

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

КОВАЛЬЧУК ВІКТОРІЯ ГРИГОРІВНА



УДК 621.675.003.13-83: 644.6

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО КОМПЛЕКСУ
З ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОСИСТЕМИ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кременчук – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі систем автоматичного управління і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Коренькова Тетяна Валеріївна, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри систем автоматичного управління і електроприводу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Розен Віктор Петрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами

кандидат технічних наук, доцент
Мошноріз Микола Миколайович,
Вінницький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри
електромеханічних систем автоматизації в промисловості
і на транспорті

Захист відбудеться «24» вересня 2021 р. об 11 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: ауд. 1122, корпус № 1, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600) і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 за електронною адресою: http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/avtoref_recall.php?id_r=3.

Автореферат розісланий «20» серпня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к. т. н, доц.



А. В. Некрасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електрогідравлічні комплекси (ЕГК) найрізноманітнішого призначення є досить важливими об'єктами життєзабезпечення людей, їх господарської та промислової діяльності. До типової структури ЕГК входять: регульований або нерегульований електропривод (ЕП) насосу з послідовним або паралельним включенням насосних агрегатів (НА) на загальну трубопровідну мережу з запірно-регулюючою та захисною арматурою, безпосередньо розгалужена гідромережа та споживач. У більшості випадків, ЕГК в Україні характеризуються незадовільним технічним станом та значною зношеністю основних фондів. Так, в аварійному стані перебуває близько 35 % водопровідних мереж та 38 % мереж водовідведення, майже 30 % НА потребують заміни.

Тривала експлуатація як насосного, так і трубопровідного обладнання ЕГК призводить до зношення механічної та гідравлічної частин, супроводжується відхиленням фактичних напірних до 11–23 % та енергетичних до 10–33 % характеристик НА від номінальних, збільшенням макрошоркості до 50–83 % та гідравлічного опору до 50–61 % трубопровідних мереж.

Під час регулювання технологічних параметрів ЕГК, ввімкнення/вимкнення НА чи окремих ділянок трубопровідної мережі, спрацювання запірно-регулюючої арматури, зміни термодинамічних властивостей транспортованої рідини виникають режими, що призводять до розвитку нестационарних гідродинамічних процесів: пульсацій напору, гідравлічних ударів, кавітаційних явищ, помпажу та ін. Робота ЕГК в нестационарних режимах супроводжується розвитком хвильових явищ, і, як наслідок, зміною напору, витрати та гідравлічної потужності в часі, відхиленням параметрів насосного та трубопровідного обладнання від номінальних значень, зміщенням точки робочого режиму та зниженням ККД НА.

Для забезпечення енергоефективних режимів роботи електромеханічної системи (ЕМС) ЕГК необхідно здійснювати ідентифікацію поточних параметрів (активних, індуктивних та емнісних гідравлічних опорів, втрат потужності, ККД) насосного та трубопровідного обладнання як в стаціонарних, так і нестационарних режимах роботи.

Питання визначення параметрів гідросистеми, як окреме гідравлічне завдання, розглядалось в роботах Петросова В. А., Попкова В. В. (Україна), Fenton J. D. (Австрія), Kopiláková V., Turza J., Nujo E., Kosiba J. (Словаччина), Кантора Л. І., Левинских Б. Е., Сулейманова Р. Н., Яременка О. В., Кричке В. О. (Росія). Методи, що використовуються для розрахунку напорів, витрат та гідравлічних опорів, базуються, в більшості випадків, на емпіричних виразах, характеризуються значною вартістю вимірювального обладнання, обмеженою кількістю вимірювальних величин, можливістю застосування лише в сталих режимах роботи. Однак, такі підходи розглядають гідродинамічну мережу лише з позиції гідродинаміки, а не як елемент силового каналу ЕМС ЕГК, зміна параметрів якого впливає не енергетичні процеси в усій гідротранспортній системі. Тому є доцільним використання енергетичного методу на базі рівнянь балансу потужності при визначенні параметрів гідросистеми.

Сучасні ЕГК, що працюють на трубопровідну мережу складної конфігурації зі споживачем в кінцевій точці потребують стабілізації технологічного параметра: напору чи витрати у споживача, рівня рідини в резервуарі. Сказане забезпечується впровадженням систем автоматичного керування на базі частотно-регульованого ЕП ЕГК, що знайшло відображення в роботах Онищенко Г. Б., Лезнова Б. С. (Росія), Клепікова В. Б., Розена В. П., Грабка В. В., Мошноріза М. М. (Україна), Оттерпола Г.,

Хюбнера Р. (Німеччина), Kim Y., Norford L. K., Kirtley J. L. (США) та ін. Таке регулювання параметрів ЕГК є енергоефективним заходом, що дозволяє зекономити до 30 % споживаної електроенергії і до 10 % робочого продукту. Проте для максимальної енергоефективної роботи ЕГК необхідно урахувати зміну поточних параметрів насосного та трубопровідного обладнання, яка призводить до відхилення робочого режиму ЕГК від області з максимально можливим ККД.

Тому *актуальним* науковим завданням є підвищення енергоефективності електрогідравлічного комплексу з регульованим електроприводом на базі гармонічного аналізу потужності у силовому каналі та визначення поточних параметрів гідросистеми в стаціонарних та нестаціонарних режимах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведених автором протягом 2008–2021 років.

Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п. 6 статті 7 «Новітні технології і ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі» та спрямованості тематики науково-дослідних робіт (НДР) кафедри «Системи автоматичного управління і електропривода» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Матеріали роботи використано під час виконання бюджетних НДР Міністерства освіти і науки України: «Створення систем підвищення керованості технологічними комплексами, обладнаними насосами, вентиляторами й компресорами в задачах енергоресурсозбереження» (№ ДР 0103U002867, 2008); «Створення наукових основ енергоресурсозбереження в електромеханічних комплексах, розробка на їх базі методів і систем керування якістю перетворення енергії, оцінка керованості та працездатності комплексів» (№ ДР 0109U003097, 2012); «Розвиток теоретичних основ підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів, розробка методів діагностики та систем корекції енергоспоживання та енергоперетворення у процесі експлуатації та в аварійних режимах» (№ ДР 0115U002529, 2018), у яких автор була співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні енергоефективності насосного комплексу шляхом розвитку енергетичного методу ідентифікації поточних параметрів електрогідравлічного обладнання та розробки системи автоматичного керування регульованим електроприводом насосної установки з урахуванням зміни параметрів гідросистеми та двохпараметричного регулювання у разі стабілізації тиску в трубопровідній мережі.

Для досягнення мети були поставлені та розв'язані такі завдання:

- аналіз стаціонарних та нестаціонарних режимів роботи електрогідравлічних комплексів, їх впливу на параметри насосного та трубопровідного обладнання;
- аналіз існуючих методів визначення параметрів електрогідравлічних комплексів;
- обґрунтування використання енергетичного методу в завданнях ідентифікації параметрів електромеханічних систем;
- дослідження енергетичних процесів в електрогідравлічному комплексі з частотно-регульованим електроприводом на базі математичної моделі та визначення діапазону зміни гідравлічних параметрів електрогідравлічного обладнання з нелінійними процесами в трубопровідній мережі;
- розвиток енергетичного методу для ідентифікації поточних параметрів електрогідравлічного обладнання на базі еквівалентних електричних схем заміщення, що ураховують різну конфігурацію гідросистеми, схему включення НА та розвиток нестаціонарних процесів в трубопроводі;

- дослідження впливу зміни параметрів гідросистеми на енергоефективність електрогідравлічного комплексу з частотно-регульованим електроприводом при стабілізації тиску у споживача;

- обґрунтування використання двохпараметричного регулювання продуктивності для забезпечення енергоефективної роботи електрогідравлічного комплексу;

- розробка системи автоматичного керування електроприводом насоса з енергоефективним (двохпараметричним) регулюванням при зміні поточних параметрів гідромережі і стабілізації тиску у споживача;

- експериментальні дослідження та техніко-економічне обґрунтування системи керування регульованим електроприводом електрогідравлічного комплексу з ідентифікацією параметрів гідросистеми.

Об'єкт дослідження – енергетичні процеси в електрогідравлічному комплексі в динамічних режимах роботи.

Предмет дослідження – технологічні і енергетичні параметри та характеристики електрогідравлічного обладнання насосного комплексу.

Методи досліджень. Під час розв'язання завдань дослідження використовувалися фундаментальні положення фізики, гідродинаміки, теорії автоматичного керування, теорії електропривода для створення математичних моделей перетворювача частоти, асинхронного електродвигуна, відцентрового насоса, трубопровідної мережі та запірно-регульовальної арматури; методи подібності та методи теорії електротехніки для побудови еквівалентних електричних схем заміщення насосних установок; методи апроксимації для отримання аналітичного опису характеристик насосів; теорія миттєвої потужності та метод рядів Фур'є під час визначення гармонічного складу сигналів миттєвої потужності елементів енергетичного каналу електрогідравлічного комплексу; експериментальні дослідження для перевірки теоретичних положень і наукових результатів. Достовірність отриманих результатів та висновків підтверджується обґрунтованістю прийнятих припущень, використанням апробованих теоретичних методів, відповідністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично доведено та експериментально підтверджено, що при розвитку нестационарних гідравлічних процесів в трубопровідній мережі електрогідравлічного комплексу енергетичні процеси в силовому каналі мають характер періодичних сталих коливань потужності на аналізованому інтервалі часу з появою змінних складових, аналіз яких дозволяє визначити порогові значення поточних параметрів насосного та трубопровідного обладнання, при досягненні яких електромеханічна система насосної станції переходить у зону нестійкої роботи та супроводжується виникненням аварійних режимів;

- отримав подальший розвиток енергетичний метод ідентифікації параметрів електрогідравлічного комплексу на основі рівнянь енергобалансу між джерелом живлення та елементами силового каналу, що відрізняється від існуючих формувань ідентифікаційних рівнянь на базі гармонічного аналізу гідравлічної потужності з використанням еквівалентних електричних схем заміщення, урахуванням конфігурації трубопроводу та нестационарних процесів в гідросистемі, що дозволяє визначити терміни експлуатації насосного і трубопровідного обладнання для прийняття своєчасного рішення для їх ремонту чи заміни;

- вперше запропоновано енергоефективну систему автоматичного керування частотно-регульованим електроприводом насосного комплексу при стабілізації тиску у споживача, яка базується на апроксимаційній залежності ККД насосного агрегату від гід-

равлічних опорів електрогідравлічного обладнання та дозволяє скорегувати сигнали завдання на перетворювач частоти електроприводу насоса та регульованого електропривода засувки для забезпечення режиму максимальної енергоефективності.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю прийнятих у математичних моделях припущень і підтверджується збігом результатів аналітичних розрахунків з результатами математичного та фізичного моделювання.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено математичну модель електрогідравлічного комплексу, яка дозволяє аналізувати енергетичні процеси в силовому каналі та розрахувати порогові значення поточних параметрів насосного та трубопровідного обладнання у разі виникнення нестационарних процесів у трубопровідній мережі;

- розроблено спосіб ідентифікації параметрів електрогідравлічного обладнання у формі рівнянь балансу гармонічних складових гідравлічної потужності між джерелом живлення та елементами гідросистеми при періодичній зміні технологічних параметрів, що дозволяє визначити поточні параметри гідросистеми в стаціонарних та нестационарних режимах роботи;

- запропоновано апроксимаційну залежність, яка ураховує залежність ККД насосного агрегату від зміни гідравлічних опорів насосного та трубопровідного обладнання;

- розроблено структуру та алгоритм роботи системи автоматичного керування електрогідравлічним комплексом з двохпараметричним регулюванням та урахуванням змінених в процесі експлуатації параметрів насосного та трубопровідного обладнання, що дозволяє забезпечити стабілізацію напору в гідромережі з максимально можливим ККД насосного агрегату.

Результати роботи пройшли експериментальну перевірку в умовах дослідницьких лабораторій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, а також окремі положення були впроваджені на КП «Глобинське» та ТОВ «Науково-виробниче підприємство «Енерго-плюс»», що підтверджено відповідними актами про впровадження.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського під час підготовки бакалаврських робіт зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також під час проведення лекційних, лабораторних і практичних занять з дисциплін «Автоматизований електропривод типових промислових механізмів», «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв».

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював мету й завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, виконав теоретичну частину роботи, брав безпосередню участь у розробці математичного забезпечення для формування тестового вхідного впливу на перетворювач частоти на експериментальній насосній установці та проведенні експериментальних досліджень. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – дослідження енергетичних процесів на базі математичної моделі ЕГК з періодичною зміною технологічних параметрів у разі розвитку кавітаційних коливань, розробка процедури ідентифікації параметрів електрогідравлічного обладнання; [2, 13, 19] – складання ідентифікаційних рівнянь для визначення параметрів ЕГК за схемою заміщення при тестовому вхідному впливі; [3, 17] – розробка еквівалентних електричних схем заміщення ЕГК, що ураховують конструктивні особливості насоса, трубопроводу та виникнення нестационарних процесів у гідромережі; [4, 16] – дослідження процесів енергоперетворення в фі-

зичній моделі ЕГК при розвитку нестационарних процесів; [5, 22] – розробка функціональної схеми та алгоритму роботи САК ЧРЕП ЕГК з урахуванням зміни параметрів насосного та трубопровідного обладнання; [6, 23] – розробка математичної моделі ЧРЕП ЕГК зі стабілізацією тиску у споживача та дослідження енергоефективності ЕГК при двохпараметричному регулюванні; [7, 8, 21] – частотний аналіз енергетичних процесів на математичній та фізичній моделі ЕГК, складання ідентифікаційних рівнянь енергобалансу при розвитку кавітаційних коливань в гідромережі; [9] – аналіз впливу зміни порогових значень параметрів насосного та трубопровідного обладнання на енергоефективність ЕГК; [10] – визначення термінів експлуатації трубопровідного та насосного обладнання у разі ідентифікації поточних параметрів ЕГК; [11, 12] – дослідження енергетичних процесів в ЕГК при розвитку кавітаційних коливань та формуванні вхідного тестового впливу; [14] – аналіз існуючих методів визначення параметрів ЕГК, складання еквівалентних електричних схем заміщення ЕГК з розділенням на активні та реактивні опори, що залежать від продуктивності та ураховують інерційні втрати напору в трубопроводі; [15, 20] – аналіз енергетичних процесів на фізичному лабораторному стенді ЕГК при розвитку нестационарних явищ в трубопровідній мережі; [18] – обґрунтування можливості використання енергетичного методу в задачах ідентифікації параметрів ЕГК; [24] – розроблено структурну схему САК ЧРЕП ЕГК при двохпараметричному регулюванні та зміні поточних параметрів електрогідравлічного обладнання; [25] – експериментальне дослідження з ідентифікації параметрів насосного та трубопровідного обладнання при формуванні тестового впливу з використанням енергетичного методу; [26, 27] – патентний пошук, розробка способу ідентифікації параметрів ЕГК з використанням енергетичного методу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2008–2010); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2011–2020); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електромеханічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук 2011, 2014–2020); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» (Харків, 2017, Одеса, 2019); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (ПСЕ) (Київ, 2016); *Symposium Srodowiskowe «Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce»* (PTZE) (Mikolajki, Poland, 2013; Hucisko, Poland, 2014; Wieliczka, Poland, 2015; Wroclaw, Poland, 2016; Mierzecin, Poland, 2017; Raclawice, Poland, 2018; Janow Podlaski, Poland, 2019; Warszawa, Poland, 2020); 1st and 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (Kiev, Ukraine, 2014, 2016); XVIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'15 & Symposium on Electromagnetic Evaluation of Materials SEEM'15 (Kołobrzeg, Poland, 2015); 18th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE) (Tatranska Lomnica, Slovakia, 2015); 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Kiev, Ukraine, 2017); Faculty of Electrical Engineering of Bialystok University of Technology, within the Polish National Agency for Academic Exchange (NAWA) programme, PROM – International scholarship exchange for PhD candidates and academic Staff (Білосток, Польща, 2019 p.); IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (Kremenchuk, Ukraine, 2019);

25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP) (Kremenchuk, Ukraine, 2020); науково-технічних семінарах Інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Результати роботи обговорювалися на засіданнях науково-технічного семінару «Електромеханіка, проблеми енергоперетворення та енергоресурсозбереження» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при Науковій раді НАН України з комплексної проблеми «Наукові проблеми електроенергетики» (2015–2021).

Публікації. Основний зміст роботи представлено у 27 науково-технічних роботах, в тому числі: 1 монографія; 8 друкованих праць у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 1 праця у міжнародних науково-технічних конференціях, занесених до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 8 статей у фахових наукових виданнях, 7 публікацій у збірниках конференцій, 2 патенти України на винаходи.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації складає 236 сторінок друкованого тексту й містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і шість додатків. Основна частина роботи викладена на 147 сторінках. Список використаних джерел складається зі 191 найменування на 19 сторінках. Дисертація містить 96 рисунків і 13 таблиць, із них 19 рисунків повністю займають 9 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність і показано зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими програмами та планами НДР, сформульовано мету й завдання дослідження, визначено наукову новизну, практичну цінність, наведено рівень апробації отриманих результатів, кількість публікацій за темою та особистий внесок автора.

У першому розділі виконано аналіз існуючих методів та систем визначення параметрів електрогідравлічних комплексів як в стаціонарних, так і нестационарних режимах роботи та обґрунтовано використання енергетичного методу в завданнях ідентифікації параметрів насосного та трубопровідного обладнання.

ЕГК є складними енергоємними об'єктами, що характеризуються незадовільним станом електромеханічного та гідравлічного обладнання: близько 30 % загальної довжини трубопровідних мереж знаходяться в аварійному стані, 25 % – фактично відпрацювали свій амортизаційний термін; закінчився допустимий термін експлуатації практично кожної п'ятої насосної станції.

Аналіз фактичних характеристик НА показав, що зношеність механічної частини насоса супроводжується погіршенням потужнісної та енергетичної характеристик до 16 % при відносно стабільній напірно-витратній характеристиці. Вплив кавітаційних та корозійних процесів на гідравлічну частину НА призводить до відхилення напірно-витратної характеристики до 11–19 % та енергетичної до 10–27 % від паспортних. Зношеність як в механічній, так і в гідравлічній частинах НА призводить до найбільш негативного впливу на характеристики насоса: зниження напірно-витратної характеристики до 23 %, потужнісної – до 10 %, енергетичної – до 33 %, що супроводжується звуженням діапазону регулювання витрати на 15 %.

Нестационарні режими роботи ЕГК, зумовлені розвитком турбулентних та кавітаційних явищ, супроводжуються нестійкою течією рідини зі зміною основних параметрів НА та трубопровідної мережі, при досягненні порогових значень яких, в гідросистемі можливий розвиток аварійних ситуацій: закупорювання або порив трубопровідної мережі, кавітаційний зрив НА, гідроудар та ін.

Питання визначення параметрів (напору, витрати, ККД, активної потужності, гідравлічних опорів насоса і трубопроводу) ЕГК знайшло відображення в роботах Кантора Л. І., Сулейманова Р. Н., Патронова К. С., Рахліна А. В., Кричке В. О. (Росія), Петросова В. А., Попкова В. В. (Україна), John D. Fenton (Австрія), Kopiláková V., Turza J., Nujo L., Kosiba J. (Словаччина). Проте існуючі методи, що базуються на безпосередньому вимірюванні електричних та технологічних параметрів або використанні непрямих методів, мають суттєві недоліки: високу вартість використовуваних вимірювальних приладів, обмежену кількість вимірюваних параметрів ЕГК, використання емпіричних залежностей, відсутність можливості визначення втрат на кожному елементі силового каналу ЕГК, необхідність зупинки НА для проведення процедури ідентифікації, можливість застосування лише в сталих режимах.

В роботах Демірчяна К. С., Неймана Л. Р. (Росія) показана можливість використання методу гармонічного балансу несинусоїдальних сигналів, представлених сумою основної та вищих гармонік, для знаходження невідомих величин електричного кола з лінійними та нелінійними елементами.

У такому випадку є доцільним представлення ЕГК еквівалентними електричними схемами заміщення на базі методу електрогідравлічної аналогії (МЕГА), при якому основні електричні рівняння переводяться у відповідні гідравлічні співвідношення. Основні принципи МЕГА окремо для НА викладені в роботах Костішина В. С., Сотника М. І., Бойка В. С. (Україна); трубопровідної мережі – в працях Tanaka Y., Gofuku A., Nakamura K. (Японія), Глікмана Б. Ф. (Росія), Nicolet C., Kaelbel T. (Швейцарія). Однак ЕГК – це система взаємопов'язаного електромеханічного та гідравлічного обладнання, тому є обгрунтованим його представлення на основі МЕГА єдиною системою взаємодіючого устаткування.

Узагальнення матеріалів першого розділу стало підставою для постановки відповідних завдань дослідження, розв'язання яких необхідне для досягнення мети.

Другий розділ присвячений аналізу енергетичних процесів в ЕГК з частотно-регульованим електроприводом (ЧРЕП) в нестационарних режимах роботи та визначенню порогових значень параметрів насосного та трубопровідного обладнання, при досягненні яких робота електромеханічної системи є нестійкою та супроводжується розвитком аварійних режимів.

Для дослідження процесів енергоперетворення в силовому каналі ЕГК в нестационарних режимах роботи розроблено математичну модель ЧРЕП НА, що працює на трубопровідну мережу зі споживачем в кінці. Перетворювач частоти (ПЧ) формує квадратичний закон керування та описаний аперіодичною ланкою першого порядку. Робота асинхронного двигуна (АД) описується рівняннями моделі в $u, v, 0$ -координатах, де диференціальні рівняння представлені у формі потокозчеплень для синхронної системи координат. Насос, представлений аперіодичною ланкою, створює квадратичний момент опору на валу двигуна. Трубопровідна мережа з j -ою кількістю ділянок описується рівняннями розповсюдження хвиль тиску в трубопроводі, вирішення яких методом кінцевих елементів, дозволяє представити гідромережу окремими ділянками з рівними параметрами. Блоки формування кавітації та турбулентності представлені окремими контурами, які можуть бути підключеними до будь-якої

ділянки трубопровідної мережі. Умовою для виникнення кавітаційних коливань в гідромережі є зміна роботи споживача, що супроводжується падінням тиску нижче тиску насичених парів. Турбулентні коливання виникають внаслідок зростання швидкості переміщення рідини, зміни її температури та в'язкості. Модель включає блок гармонічного аналізу сигналів потужності (електричної, гідравлічної) на елементах силового каналу ЕГК.

Як об'єкт дослідження розглядається насосна установка системи водопостачання з номінальними параметрами двигуна: $P_n = 7,5$ кВт, $\omega_n = 301,6$ с⁻¹, $I_n = 15$ А, $M_n = 24,868$ Нм; насоса: $Q_n = 0,013$ м³/с, $H_0 = 32$ м, $H_n = 28$ м; трубопровідної мережі: $d = 0,1$ м, $l = 1000$ м.

Отримані криві зміни електромеханічних, технологічних та енергетичних характеристик ЕГК показали, що зростання ступеня n_{kav} кавітаційних процесів в трубопровідній мережі призводить до збільшення амплітуди коливань основних параметрів: напору на виході насоса $H_p(t)$ та у споживача $H_{con}(t)$, гідравлічної потужності на виході насоса $p_p(t)$ та у споживача $p_{con}(t)$ (рис. 1). Так, при $n_{kav} = 31,3$ амплітуда коливань в сигналах напору $H(t)$ та витрати $Q(t)$ складає 10–15 % від номінального значення, в сигналах гідравлічної потужності – 15–20 %. Кавітаційні коливання здійснюють вплив й на електромеханічні параметри ЕМС ЕГК: амплітудні значення коливань в сигналі кутової швидкості привідного двигуна та електромагнітного моменту складають близько 3–5 % від номінального значення.

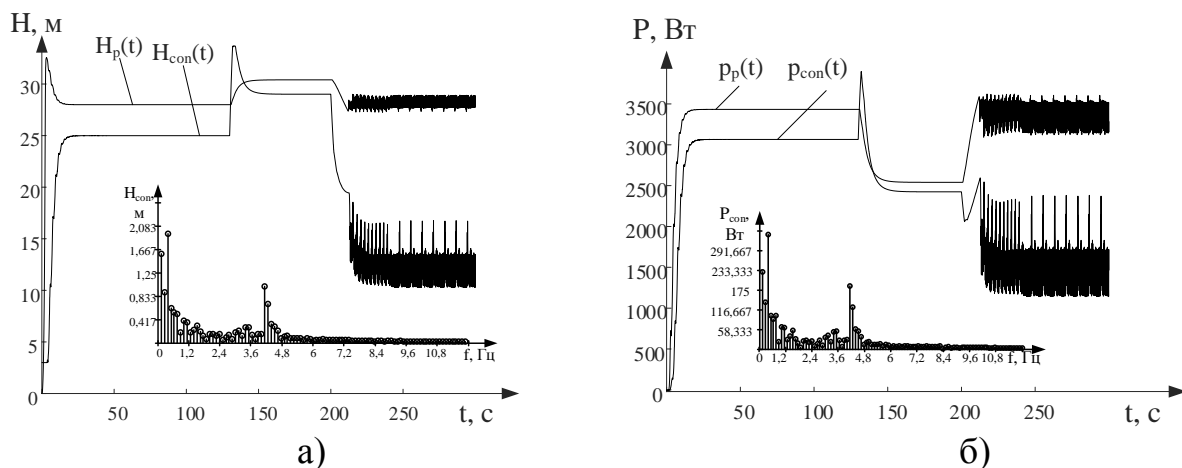


Рисунок 1 – Криві зміни напору (а) та гідравлічної потужності (б) на виході НА, у споживача та амплітудні спектри напору і потужності

Показано, що при розвитку нестационарних процесів у трубопровідній мережі енергетичні процеси в силовому каналі ЕМС ЕГК мають характер періодичних сталих коливань потужності на аналізованому інтервалі часу, що характеризуються появою змінних складових (рис. 1).

Частотний аналіз отриманих сигналів (амплітудні спектри рис. 1) показав, що розвиток кавітаційних процесів супроводжується появою гармонічних складових в амплітудному спектрі порядку 1–10 Гц, частка яких складає близько 40 % від постійної складової.

Сказане підтверджує можливість представлення технологічних $H(t)$, $Q(t)$ та енергетичних $p(t) = \rho g H(t) Q(t)$ сигналів ЕГК тригонометричним рядом Фур'є у вигляді суми постійної та знакозмінних (косинусної та синусної) складових, де ρ – густина перекачуваної рідини; g – прискорення вільного падіння.

Формування різного ступеня n_{kav} кавітаційних коливань в трубопровідній мережі дозволило визначити порогові значення зміни поточних параметрів електрогідравлічного обладнання (рис. 2). Так, при $n_{kav1} = 3$ – початковій стадії кавітації – коливання в сигналах гідравлічного опору $R_p(t)$, $R_{net}(t)$ складають близько 3 % від сталого значення, робота ЕГК відбувається в стійкій зоні; у разі $n_{kav2} = 7$ та $n_{kav3} = 17$ – стадії розвиненої кавітації – коливання параметрів складають близько 10–15 %; при $n_{kav4} = 30,3$ – значення параметрів гідросистеми є пороговими, при досягненні яких ЕГК знаходиться в зоні нестійкої роботи в умовах розривної кавітації.

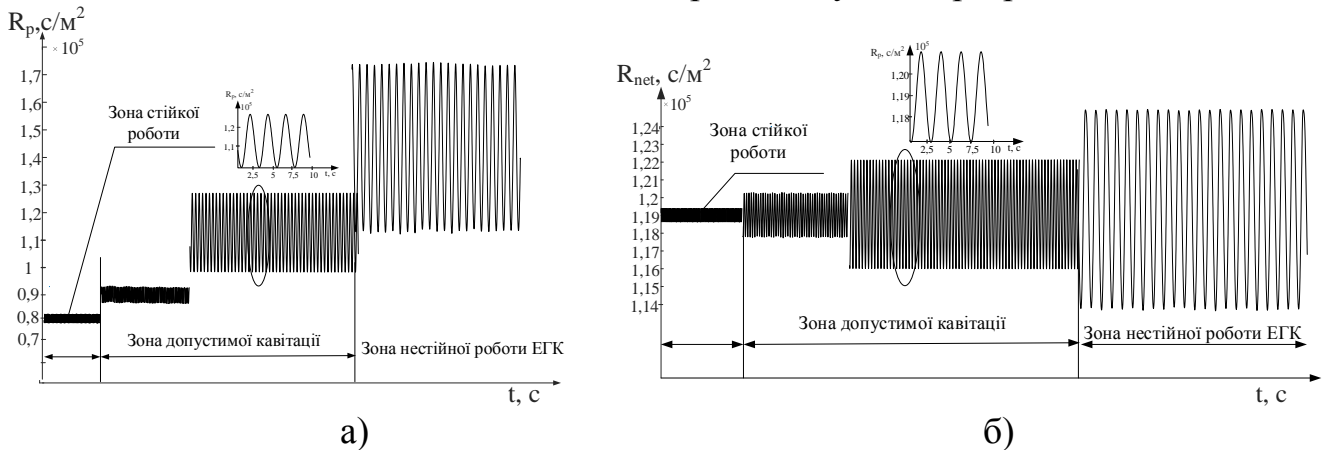


Рисунок 2 – Залежність активного гідравлічного опору насоса (а) та трубопровідної мережі (б) від ступеня n_{kav} розвитку кавітації

Аналогічні дослідження виконані для визначення порогових значень параметрів ЕГК у разі нестійкої роботи внаслідок виникнення турбулентних процесів в гідросистемі.

У третьому розділі отримав розвиток енергетичний метод ідентифікації параметрів ЕГК на базі рівнянь енергобалансу з урахуванням еквівалентних електричних схем заміщення, які ураховують складну конфігурацію трубопровідної мережі, нестационарні процеси в гідросистемі, що дозволяє визначити терміни експлуатації трубопровідного та насосного обладнання.

На базі МЕГА ЕГК представлений еквівалентними електричними схемами заміщення, що ураховують різну конфігурацію трубопровідної мережі, схему включення НА (последовну чи паралельну), розвиток нестационарних процесів в трубопровідній мережі. На рис. 3, а) показана схема заміщення найпростішого ЕГК, який складається: з регульованого НА, представленого джерелом $H_0 v^2(t)$ гідравлічної енергії та активним гідравлічним опором R_p ; трубопровідної мережі з активно-індуктивним $R_{net} - L_{net}$ навантаженням; джерела H_{st} статичного протитиску та активного R_{con} опору споживача, де: H_0 – напір, що створюється насосом при нульовій витраті; $v(t)$ – відносна частота обертання. На рис. 3, б) наведена еквівалентна електрична схема заміщення ЕГК, що працює на гідромережу, представлену двома ділянками трубопроводу з рівними параметрами, де прийняті наступні позначення: $Q_p(t)$, $Q_{net j}(t)$, $Q_{con}(t)$ – витрати на виході насоса, на j -тій ділянці трубопроводу та у споживача, відповідно; $Q'_j(t)$ – витрати витрати на j -тій ділянці трубопроводу; $R_{net j}$, $L_{net j}$, $C_{net j}$ – активний, індуктивний та ємнісний гідравлічні опори на j -тій ділянці трубопроводу, відповідно.

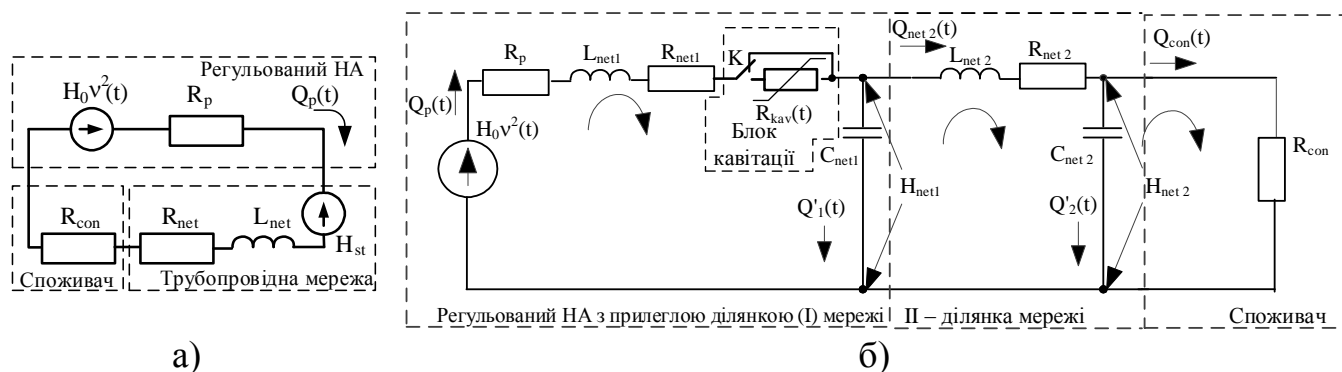


Рисунок 3 – Еквівалентні електричні схеми заміщення найпростішого ЕГК (а) та працюючого на довгій трубопровідній мережі (б)

В загальному випадку рівняння енергобалансу має вигляд:

$$p_s(t) = \Delta p_{R_p}(t) + \Delta p_{R_{net j}}(t) + \Delta p_{L_{net j}}(t) + \Delta p_{C_{net j}}(t) + \Delta p_{st}(t) + p_{con}(t), \quad (1)$$

де $p_s(t) = H_0 v^2(t) Q_p(t)$, $p_{con}(t) = R_{con} Q_{con}^3(t)$ – потужність джерела гідравлічного живлення та споживача, відповідно; $\Delta p_{R_p}(t) = R_p Q_p^3(t)$ – втрати потужності на активному опорі насоса;

$\Delta p_{R_{net j}}(t) = R_{net j} Q_j^3(t)$, $\Delta p_{L_{net j}}(t) = L_{net j} Q_j(t) \frac{d}{dt} (Q_j(t))$,

$\Delta p_{C_{net j}}(t) = \frac{\rho g Q_j(t) T}{C_{net j}} \int_0^T Q_j(t) dt$ – втрати потужності на активному, індуктивному та ємнісному опорі j -тої ділянки трубопровідної мережі, відповідно; $\Delta p_{st}(t) = H_{st} Q(t)$ – втрати потужності на подолання статичного напору.

Для вирішення задачі ідентифікації параметрів ЕГК на вхід системи керування перетворювачем частоти електроприводу насоса задається тестовий гармонічний сигнал напруги, що включає постійну та змінну складові:

$$u(t) = u_0 + u_m \cos(\Omega t - \psi). \quad (2)$$

Тоді сигнал відносної частоти обертання електродвигуна насоса має вигляд:

$$v(t) = v_0 + v_m \cos(\Omega t - \varphi) = v_0 + v_a \cos(\Omega t) + v_b \sin(\Omega t). \quad (3)$$

Як наслідок, сигнал витрати на виході НА теж має постійну та змінну компоненти:

$$Q_p(t) = Q_{pn} v(t) = Q_0 + Q_a \cos(\Omega t) + Q_b \sin(\Omega t), \quad (4)$$

де у виразах (2)–(4): $\Omega = 2\pi f$ – кутова частота; f – частота зміни вхідного сигналу; $u_0, v_0, Q_0, v_a, Q_a, v_b, Q_b$ – амплітудні значення постійної, косинусної та синусної складових сигналу напруги, відносної частоти обертання та витрати, відповідно; u_m, v_m – амплітуда змінної складової сигналу напруги та відносної частоти обертання, відповідно; ψ, φ – кут зсуву сигналу напруги та відносної частоти обертання, відповідно; Q_{pn} – номінальне значення витрати НА.

Частотний аналіз сигналів гідравлічної потужності на базі рядів Фур'є дозволив представити сигнали на елементах силового каналу ЕГК сумою постійної та змінних (косинусної та синусної) складових.

Так, потужність на виході джерела гідравлічного живлення (насоса):

$$p_s(t) = H_0 v^2(t) Q(t) = \left[H_0 (v_0 + v_a \cos(\Omega t) + v_b \sin(\Omega t)) \right]^2 \times \\ \times [Q_0 + Q_a \cos(\Omega t) + Q_b \sin(\Omega t)] = P_{s0} + P_{s1a} \cos(\Omega t) + P_{s1b} \sin(\Omega t) + \\ + P_{s2a} \cos(2\Omega t) + P_{s2b} \sin(2\Omega t) + P_{s3a} \cos(3\Omega t) + P_{s3b} \sin(3\Omega t), \quad (5)$$

де P_{s0} – постійна складова сигналу гідравлічної потужності; P_{s1a} , P_{s1b} , P_{s2a} , P_{s2b} , P_{s3a} , P_{s3b} – косинусна і синусна складові першої, другої та третьої гармонік потужності на виході насоса, відповідно.

Слід зазначити, що кількість складових вищого порядку в рівнянні (5) зумовлена виглядом тестового гармонічного впливу, що формується на вхід системи керування ПЧ ЕП насоса. Аналогічним чином представлені сигнали гідравлічної потужності на елементах ЕГК, що входять до загального рівняння енергобалансу (1). Це дозволило отримати систему ідентифікаційних рівнянь у вигляді рівнянь енергобалансу для окремих компонент гідравлічної потужності між джерелом гідравлічного живлення та елементами ЕГК:

$$\left. \begin{aligned} P_{s0} &= P_{st0} + P_{Rp0} + P_{Rnetj0} + P_{Lnetj0} + P_{Cnetj0} + P_{Rcon0}; \\ P_{s1a} &= P_{st1a} + P_{Rp1a} + P_{Rnetj1a} + P_{Lnetj1a} + P_{Cnetj1a} + P_{Rcon1a}; \\ P_{s1b} &= P_{st1b} + P_{Rp1b} + P_{Rnetj1b} + P_{Lnetj1b} + P_{Cnetj1b} + P_{Rcon1b}; \\ &\dots\dots\dots \\ P_{ska} &= P_{stka} + P_{Rpka} + P_{Rnetjka} + P_{Lnetjka} + P_{Cnetjka} + P_{Rconka}; \\ P_{skb} &= P_{stkb} + P_{Rpkb} + P_{Rnetjkb} + P_{Lnetjkb} + P_{Cnetjkb} + P_{Rconkb}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де індексу «0» відповідають постійні складові потужності; індексам «a», «b» – косинусні та синусні компоненти, відповідно; P_{Rp} , P_{Rnetj} , P_{Lnetj} , P_{Cnetj} – амплітудні значення втрат гідравлічної потужності на гідравлічному опорі насоса, на активному, індуктивному та ємнісному опорах j -тої ділянки гідромережі, відповідно; P_{con} – амплітудне значення гідравлічної потужності у споживача; k – номер гармоніки сигналу потужності.

Так, для найпростішого ЕГК (рис. 3, а) невідомими параметрами є: активні гідравлічні опори насоса R_p , трубопроводу R_{net} і споживача R_{con} , індуктивний опір трубопроводу L_{net} та статичний напір H_{st} в гідромережі. У даному випадку стисненістю рідини нехтуємо, приймаючи зміни її об'єму у часі незначними. Активний гідравлічний опір НА з урахуванням його конструктивних особливостей має вигляд: $R_p = \alpha Q(t)$, де α – коефіцієнт апроксимації, що ураховує сили в'язкого тертя між шарами рідини та стінками каналу насоса. Втрати потужності в трубопроводі ураховуються активно-індуктивним навантаженням: $Z_n(j\omega) = R_{net} + jL_{net} = \delta/Q(t) + j\gamma v(t)$, де: $\delta = 0,0034l^4 \mu / d^8 g^4$; $\gamma = \rho l \beta$ – коефіцієнти, що ураховують властивості рідини та геометричні параметри трубопроводу; l , d – довжина та діаметр ділянки проточної частини трубопроводу, відповідно; μ – кінематична в'язкість; ρ – густина середовища; $\beta = 1,33$ – поправочний коефіцієнт; g – прискорення вільного падіння.

Тоді, система (6) для вхідного тестового сигналу вигляду (3) буде складатися з дев'яти ідентифікаційних рівнянь, з яких для знаходження п'яти невідомих парамет-

рів ($R_p, R_{net}, L_{net}, R_{con}, H_{st}$) використані лише перші п'ять рівнянь, які відображають процеси енергоперетворення між найбільш вагомими складовими миттєвої потужності. Розв'язання системи (6) дозволило отримати аналітичні вирази для визначення параметрів схеми заміщення ЕГК.

Так, при відносній частоті обертання робочого колеса насоса вигляду $v(t) = 0,95 + 0,4 \cos(\Omega t - 15^\circ) = 0,95 + 0,386 \cos(\Omega t) + 0,104 \sin(\Omega t)$, де $\Omega = 2\pi f_t = 3,14 \text{ с}^{-1}$; $f_t = 0,5 \text{ Гц}$, що відповідає частоті хвильових процесів у трубопроводі. Для лабораторного стенду НУ з параметрами: $P_n = 830 \text{ Вт}$; $\omega_n = 303,7 \text{ с}^{-1}$; $I_n = 1,7 \text{ А}$; $Q_{pn} = 0,00138 \text{ м}^3/\text{с}$; $H_0 = 20,8 \text{ м}$; $H_{pn} = 18 \text{ м}$; $d = 0,04 \text{ м}$; $l = 6 \text{ м}$ результати розрахунку за енергетичним методом наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати ідентифікації параметрів ЕГК для схеми заміщення рис. 3, а)

Розрахункові параметри гідромережі								
$H_{st},$ м	$\alpha \cdot 10^8$	$\delta_\Sigma \cdot 10^3$	γ_Σ	$C_{net\Sigma} \cdot 10^{-5},$ м ⁻¹	$R_{con} \cdot 10^7,$ кг/м ⁴ с	$R_p \cdot 10^5,$ кг/м ⁴ с	$L_{net\Sigma} \cdot 10^3,$ кг/м ⁴	$R_{net\Sigma} \cdot 10^6,$ кг/м ⁴ с
8,33	1,707	1,477	5,602	8,273	1,032	2,355	1,679	1,07

Для визначення термінів T експлуатації ділянок трубопроводу ЕГК у вираз для визначення активного гідравлічного опору введена залежність шорсткості $\bar{\Delta}$ від часу знаходження гідромережі в експлуатації: $\bar{\Delta} = f(T) = aT/(T + b)$, де a, b – коефіцієнти регресії (за результатами досліджень Петросова В.А.) Для трубопроводу з розглянутими вище геометричними параметрами: $a = 0,0126$; $b = 50,78$.

Результати ідентифікації параметрів ЕГК, представленого регульованим НА та двома ділянками трубопроводу з однаковою геометричною конфігурацією (рис. 3, б) наведені в табл. 2. Зростання макрошоркості трубопроводу імітувалося зниженням пропускної здатності гідромережі та відповідної величини витрати Q_p при незмінній відносній частоті обертання насосного агрегату.

Таблиця 2 – Результати ідентифікації параметрів ЕГК для схеми заміщення рис. 3, б)

$Q_p \cdot 10^{-3},$ м ³ /с	Розрахункові параметри гідромережі								
	$\alpha \cdot 10^8$	$\delta_\Sigma \cdot 10^3$	γ_Σ	$C_{net\Sigma} \cdot 10^{-5},$ м ⁻¹	$R_{con} \cdot 10^7,$ кг/м ⁴ с	$R_p \cdot 10^5,$ кг/м ⁴ с	$L_{net\Sigma} \cdot 10^3,$ кг/м ⁴	$R_{net\Sigma} \cdot 10^6,$ кг/м ⁴ с	$\eta,$ %
1,383	2,072	4,304	8,607	8,155	1,102	2,86	2,079	3,119	60
1,312	2,318	4,815	8,607	7,709	1,233	3,199	2,079	3,489	58,8
1,25	2,553	5,305	8,607	7,346	1,358	3,523	2,079	3,844	56,4

Для ділянок гідромережі з однаковим діаметром, довжиною та матеріалом виготовлення $R_{net\Sigma} = R_{net1} + R_{net2}$, $\delta_1 = \delta_2$ отримано, що зниження витрати на 3 % супроводжується зростанням гідравлічних опорів R_{net} в 1,1 рази, що відповідає терміну експлуатації $T = 16$ місяців; при зниженні Q_p на 8 % – до збільшення гідравлічних опорів R_{net} в 1,23 рази з терміном експлуатації $T = 60$ місяців, що дозволяє прийняти рішення про техніко-економічну доцільність подальшої експлуатації трубопроводної мережі.

Визначення активного гідравлічного опору R_p насосу, який при зниженні витрати Q_p зростає в 1,12 та 1,23 рази, відповідно, дозволило розрахувати реальний ККД турбомеханізму (за результатами роботи Лезнова Б.С.): $\eta_p = R_p / (R_p + R_p Q_p^2)$, де $R_p = \rho g H_p Q_p$ – потужність на виході НА. Так, при зниженні Q_p на 3 % та 8 % ККД насоса зменшився на 2 % та 6 %, відповідно. При подальшому зниженні ККД більше ніж на 15 % від номінального використовувати насос є економічно не доцільно.

У разі ускладнення конфігурації трубопроводу і наявності ділянок з різним діаметром гідравлічний опір визначається за виразом: $R_{netj} = R_{net\Sigma} / 2(d_1/d_2)^{0,15}$. Так, для схеми заміщення рис. 3, б) з різними геометричними параметрами ділянки трубопроводу $d_1 = 0,03$ м і $d_2 = 0,05$ м активні гідравлічні опори складають, відповідно, $R_{net1} = 4,71 \cdot 10^7$ кг/м⁴с та $R_{net2} = 4,063 \cdot 10^7$ кг/м⁴с.

Під час ідентифікації параметрів ЕГК з урахуванням нелінійних процесів в трубопроводній мережі до еквівалентної електричної схеми заміщення (рис. 3, б) введений блок кавітації, який складається з нелінійного гідравлічного опору $R_{kav}(t)$, що описує періодичні кавітаційні коливання в трубопроводній мережі та представляється тригонометричним рядом вигляду: $R_{kav}(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \sin(n\Omega_{kav}t)$, де a_0, a_n – коефіцієнти тригонометричного ряду; $\Omega_{kav} = 2\pi f_{kav}$ – кутова частота кавітаційних коливань; $f_{kav} = 1/T_{kav}$, T_{kav} – частота та період кавітаційних коливань, відповідно; n, N – номер та кількість гармонік сигналу гідравлічного опору каналу кавітації, відповідно.

Тоді сигнал витрати на виході НА:

$$Q_p(t) = d(V_{kav}(t))/dt = Q_{p0} + \sum_{n=1}^N Q_{pn} \cos(n\Omega_{kav}t), \quad (7)$$

де $V_{kav}(t) = k_{kav} R_{kav}(t)$ – об'єм кавітаційної камери; k_{kav} – коефіцієнт пропорційності; Q_{p0}, Q_{pn} – амплітудні значення постійної та косинусної n -тої гармоніки сигналу витрати, відповідно.

Якщо сигнал $R_{kav}(t)$, а, відповідно, і сигнал $Q_p(t)$, містить постійну та три гармонічні складові, то система (6) буде складатися з 19 рівнянь, з яких для знаходження невідомих сумарних гідравлічних опорів R_Σ насоса, трубопроводу й споживача, індуктивних L_Σ і ємнісних C_Σ опорів ділянок гідромережі, використовують перші три. Результати розрахунку зведені до таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати ідентифікації параметрів ЕГК для схеми заміщення рис. 3, б)

Параметр	Система без кавітації	Система з кавітацією				
		$n_{kav1} = 3,7$	$n_{kav2} = 7$	$n_{kav3} = 19,7$	$n_{kav4} = 26$	$n_{kav5} = 31,3$
R_Σ , кг/м ⁴ с	$1,86 \cdot 10^7$	$1,87 \cdot 10^7$	$1,918 \cdot 10^7$	$2,38 \cdot 10^7$	$3,817 \cdot 10^7$	$4,898 \cdot 10^8$
L_{net} , кг/м ⁴	$1,041 \cdot 10^3$	$1,12 \cdot 10^3$	$1,172 \cdot 10^3$	$1,341 \cdot 10^3$	$1,361 \cdot 10^3$	$1,392 \cdot 10^3$
C_{net} , м ⁻¹	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$

Отримано, що при виникненні кавітаційних коливань з різним ступенем $n_{kav} = V_{cur}/V_0$ в трубопровідній мережі відбувається зростання сумарного гідравлічного опору R_{Σ} , що викликано ростом об'єму кавітаційних каверн в потоці рідини: при $n_{kav2} = 7$ опір R_{Σ} зростає в 1,03 рази; при $n_{kav4} = 26$ та $n_{kav5} = 31,3$ – відповідно, в 2,05 та 2,63 рази, де: $V_0 = 0,0008 \text{ м}^3$, $V_{cur} = \frac{1}{T_{kav}} \int_0^{T_{kav}} (Q_j(t) - Q_{j+1}(t)) dt$ – початкове та поточне значення об'єму кавітаційної каверни, відповідно; T_{kav} – постійна часу кавітаційної каверни.

Запропоновано узагальнену процедуру методу ідентифікації параметрів ЕГК, що складається з формування відповідного гармонічного тестового впливу, вигляд якого залежить від кількості невідомих параметрів, частотного аналізу сигналів потужності, складання та розв'язку системи ідентифікаційних рівнянь та прийняття рішення щодо доцільності подальшого функціонування насосного та трубопровідного обладнання.

У четвертому розділі запропонована та досліджена система автоматичного керування (САК) електроприводом насосної установки з енергоефективним (двохпараметричним) регулюванням з урахуванням зміни поточних параметрів гідросистеми при стабілізації тиску у споживача.

Дослідження впливу зміни активного опору R_p насоса та трубопровідної мережі R_{net} на енергоефективність ЕГК виконано на базі математичної моделі ЧРЕП зі зворотнім зв'язком за тиском споживача, доповненої ПІ-регулятором та блоком керування положенням засувки. Параметри НУ наведено у другому розділі. Так, отримано, що при відпрацюванні змінного у часі водоспоживання, представленого кривою відносного активного гідравлічного опору $r_{con}(t)$ споживача (рис. 4, а), та збільшенні R_p в 1,4 та 2,45 разів, САК ЧРЕП забезпечує стабілізацію тиску в гідромережі на заданому рівні $h_{con}(t)$, але супроводжується зниженням ККД $\eta_p(t)$ турбомеханізму на 17 % та 35 %, відповідно (рис. 4, б), де $h_{con} = H_{con cur}/H_{con ref}$; $H_{con cur}$, $H_{con ref}$ – поточне та задане значення тиску у споживача, відповідно.

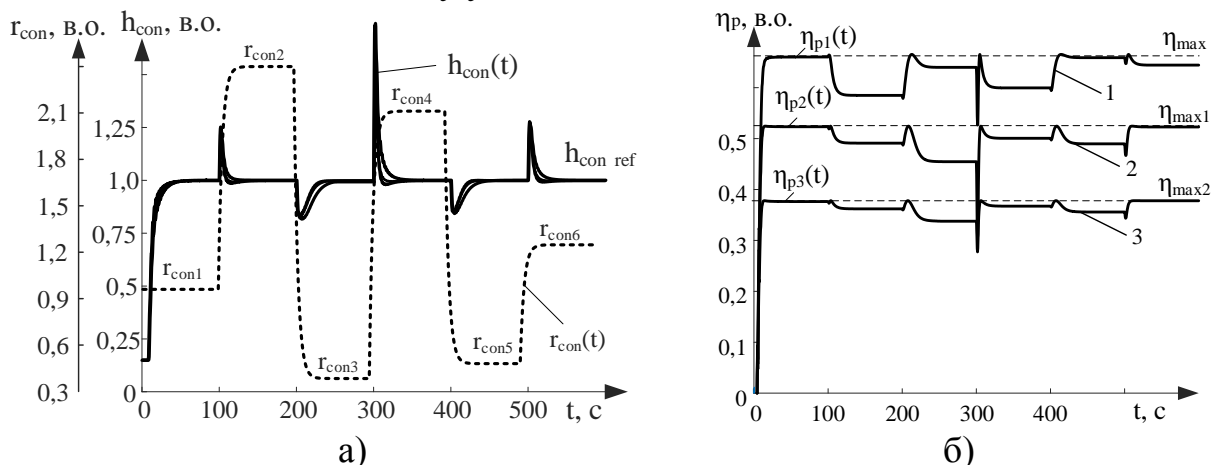


Рисунок 4 – Криві зміни напору у споживача (а) та ККД НА (б) при зміні R_p :

крива 1 – $R_p = 2,86 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^4\text{с}$; крива 2 – $1,4 R_p$; крива 3 – $2,45 R_p$

При зростанні гідравлічного опору R_{net} в 3,5 рази САК ЧРЕП забезпечує підтримку необхідного значення тиску в допустимих межах 7–10 % від заданого значення $h_{con ref}$ шляхом збільшення частоти обертання привідного двигуна. Встановлено,

що збільшення R_{net} в 10–12 разів, обумовлене статистичними даними щодо зношеності ділянок трубопроводу, призводить до відсутності можливості підтримки заданого значення тиску у споживача на ділянках з опором R_{con3} та R_{con5} (рис. 5, а) внаслідок досягнення граничного значення частоти обертання привідного двигуна, що складає $\omega_{lim} = 1,15\omega_n$ та практично не впливає на енергоефективність НА – ККД зменшується на долі відсотка (рис. 5, б).

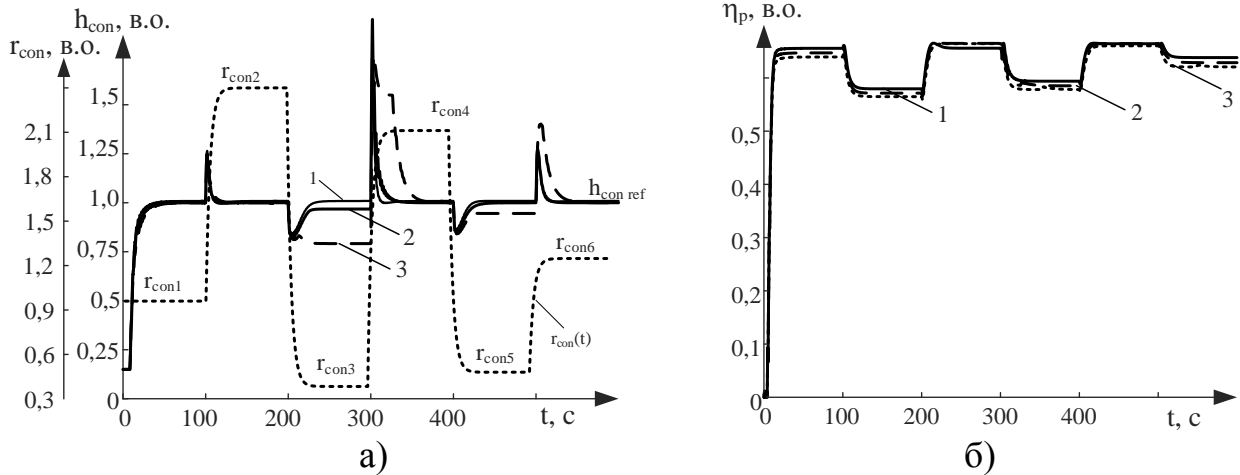


Рисунок 5 – Криві зміни напору у споживача (а) та ККД НА (б) при зміні R_{net} : крива 1 – $R_{net} = 1,55 \cdot 10^6$ кг/м⁴с; крива 2 – $3,5 R_{net}$; крива 3 – $12 R_{net}$

Для урахування спільного впливу зміни параметрів гідросистеми на енергоефективність роботи ЕГК запропонована апроксимаційна залежність ККД НА від активного гідравлічного опору R_p насоса та R_{net} ділянки трубопроводу:

$$\eta = a + bR_{net} + cR_p + dR_{net}^2 + eR_p^2 + fR_{net}R_p + gR_{net}^3 + hR_p^3 + iR_{net}R_p^2 + kR_{net}^2R_p, \quad (8)$$

де $a, b, c, d, e, f, g, h, i, k$ – коефіцієнти апроксимації (для даної НУ: $a = 165,6$; $b = -2,79 \cdot 10^{-6}$; $c = -6,39 \cdot 10^{-6}$; $d = -6,8 \cdot 10^{-4}$; $e = 1,17 \cdot 10^{-7}$; $f = 1,27 \cdot 10^{-10}$; $g = 4,6 \cdot 10^{-21}$; $h = -7,6 \cdot 10^{-13}$; $i = -1,27 \cdot 10^{-15}$; $j = 9,69 \cdot 10^{-21}$). Коефіцієнт детермінації отриманої залежності склав $R^2 = 0,99$.

Для забезпечення режиму максимальної енергоефективності ЕГК обґрунтовано використання двохпараметричного регулювання в САК ЕГК, де необхідний технологічний режим забезпечується зміною частоти обертання АД, а енергоефективне керування – корекцією гідравлічної характеристики трубопроводної мережі шляхом зміни опору засувки на виході НА (рис. 6). Отримано, що при збільшенні водоспоживання та зміщенні точки робочого режиму кривої $\eta_p = f(Q)$ в область значних витрат ($Q > Q_{pn}$), використання двохпараметричного регулювання дозволяє підвищити ККД на 5,4 % на інтервалі часу ($t_2 - t_3$) та на 3,5 % – на інтервалі ($t_4 - t_5$) порівняно з однопараметричним регулюванням (рис. 6, б). При цьому, точність підтримки тиску у споживача лежить у межах допустимої похибки для такого типу технологічних завдань – $\Delta_H = 10$ % (рис. 6, а).

Запропонована структура САК ЕП з енергоефективним регулюванням, до складу якої входять: блок ідентифікації параметрів (БІП), фаззі-регулятор (ФР) та ПІ-регулятор; датчики витрати (ДВ), тиску (ДТ), швидкості (ДШ); засувка (З) з регульованим ЕП (рис. 7).

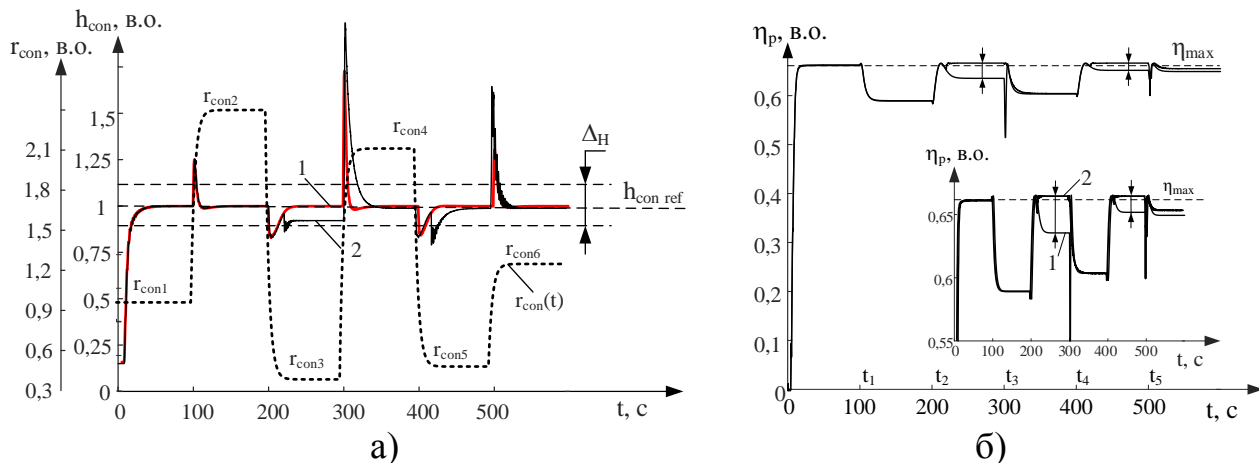


Рисунок 6 – Криві зміни напору у споживача (а) та ККД НА (б) при однопараметричному (1) та двохранетричному регулюванні (2) технологічних параметрів

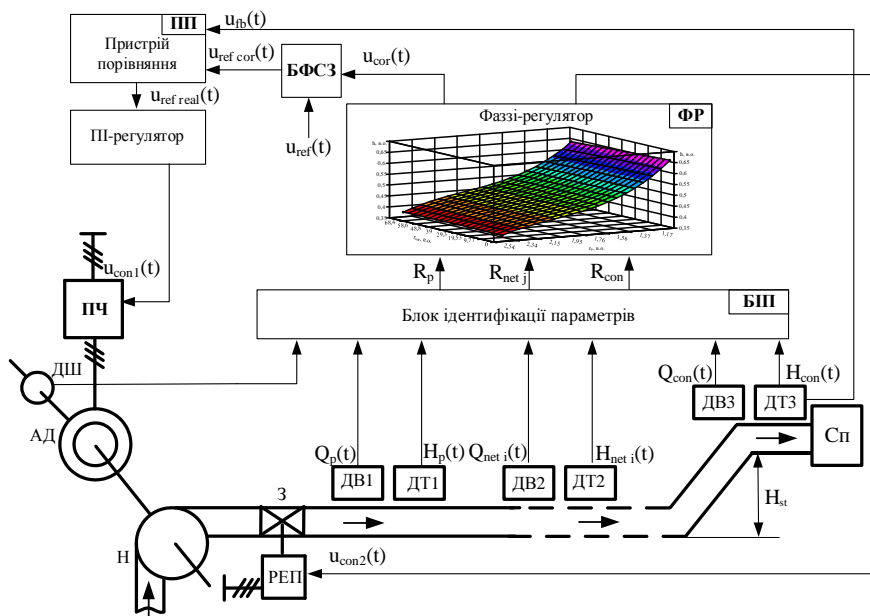


Рисунок 7 – Структурна схема САК ЧРЕП ЕГК з енергоефективним керуванням

при зміні поточних параметрів гідросистеми:

Н – насос; АД – асинхронний двигун; Сп – споживач;

ПП – пристрій порівняння; РЕП – регульований електропривод засувки

$R_p(t)$, $R_{net j}(t)$ гідросистеми в межах Δ_{cor} , що імітується формуванням тестового сигналу напруги $u_t(t)$ (рис. 8), САК ЧРЕП забезпечує підтримку необхідного значення тиску $h_{con ref}$ з допустимою для такого роду технологічних завдань похибкою Δ_H . При відхиленні параметрів гідросистеми, більше Δ_{cor} на інтервалах часу $(t_1 - t_2)$ та $(t_5 - t_6)$, САК не відпрацьовує сигнал завдання і виходить за межі допустимої зміни тиску, що призводить до необхідності корекції сигналу завдання $u_{ref real}(t)$, що формується на вхід ПІ-регулятора перетворювача частоти (рис. 7) та формування сигналу $u_{con2}(t)$ для керування РЕП засувки (рис. 7). Таке двохранетричне регулювання дозволяє підвищити ККД НА при незначному зниженні (в межах Δ_H) точності підтримки тиску у споживача на 2,9 % та 1,8 %, відповідно.

При наявності відхилення параметрів насосного ΔR_p і трубопровідного $\Delta R_{net j}$ обладнання від номінальних значень фаззи-регулятором на базі апроксимаційної залежності (8) формується коригуючий сигнал $u_{cor}(t)$ на вхід блоку формування сигналу завдання (БФСЗ) для забезпечення стабілізації тиску в гідромережі з урахуванням зміни параметрів гідросистеми. Підвищення енергоефективності НА здійснюється шляхом формування сигналу керування $u_{con2}(t)$ на РЕП засувки на виході насоса.

Отримано, що при відхиленні параметрів

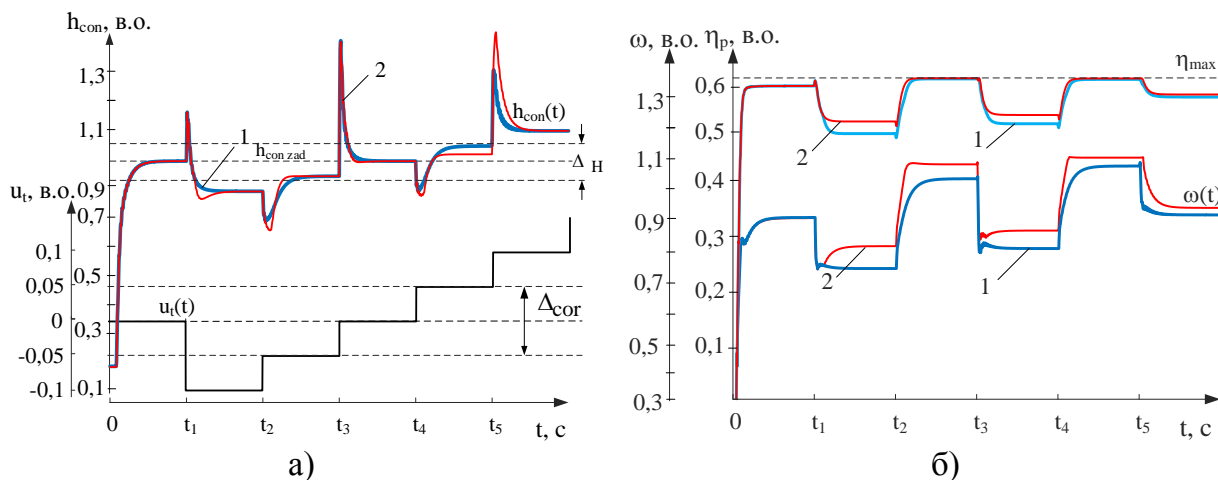


Рисунок 8 – Криві зміни тестового сигналу напруги $u_t(t)$, напору $H_{con}(t)$ у споживача (а), частоти $\omega(t)$ обертання двигуна та ККД $\eta_p(t)$ НА (б) в часі при однопараметричному (1) та двохпараметричному (2) регулюванні технологічних параметрів

Розроблено алгоритм роботи САК ЧРЕП ЕГК, що включає процедуру ідентифікації параметрів електрообладнання, формування ФР керуючих сигналів на перетворювач частоти електроприводу насоса та РЕП засувки.

У п'ятому розділі виконано експериментальні дослідження, метою яких було підтвердження адекватності запропонованих теоретичних положень, отриманих на базі математичних моделей, техніко-економічне обґрунтування ефективності системи керування регульованим електроприводом електрогідравлічного комплексу з ідентифікацією параметрів гідросистеми.

Експериментальна насосна установка складається з ЧРЕП, насоса, трубопроводної мережі, запірно-регулюючої арматури та контрольно-вимірювальних пристроїв та може працювати на систему з протитиском та без нього. Параметри НУ наведені в третьому розділі. В найпростішому випадку у разі ідентифікації параметрів гідросистеми нехтуємо стисканням рідини та інерційністю потоку, тобто враховуємо лише втрати напору по довжині трубопроводу. З урахуванням сказаного, ЕГК представлений еквівалентною електричною схемою заміщення (рис. 9, а), яка складається з двох контурів: джерела живлення (насоса) з прилеглою ділянкою (I) трубопроводу та другої (II) ділянки трубопроводу зі споживачем в кінці.

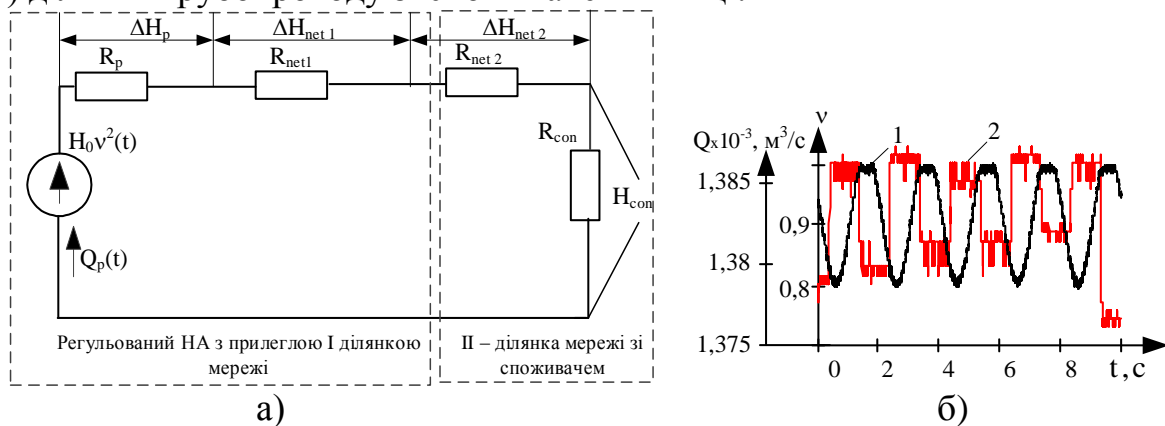


Рисунок 9 – Еквівалентна електрична схема заміщення ЕГК (а) та сигнали відносної частоти обертання привідного двигуна (1) та витрати (2) при тестовому сигналі (б)

Криві зміни відносної частоти обертання $v(t)$ привідного двигуна та витрати $Q(t)$ при формуванні гармонічного тестового впливу на вхід системи керування ПЧ ви-

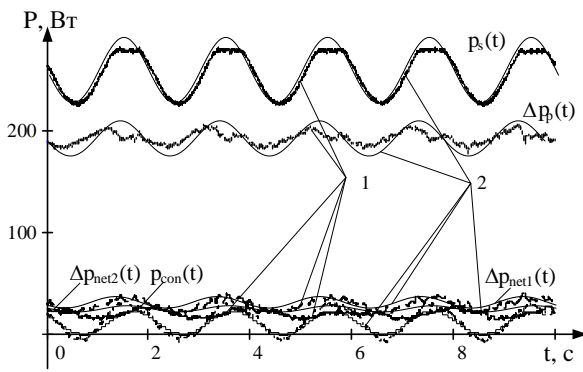


Рисунок 10 – Криві зміни гідравлічної потужності на елементах силового каналу ЕГК:
1 – експериментальні; 2 – модельні

ставленої сумою постійної та змінних складових до п'ятої гармоніки включно, складається з 11 рівнянь, з яких для визначення чотирьох невідомих ($R_p, R_{net1}, R_{net2}, R_{con}$) за схемою заміщення (рис. 9, а), використовуються перші чотири. Після перетворень система ідентифікаційних рівнянь в матричному вигляді має вигляд: $AX = B$, де

$$A = \begin{vmatrix} 1,396 \cdot 10^5 & 2,139 \cdot 10^4 & 9,348 \cdot 10^3 & 1,473 \cdot 10^4 \\ 1,081 \cdot 10^5 & -2,24 \cdot 10^5 & 8,46 \cdot 10^5 & -5,318 \cdot 10^5 \\ 1,606 \cdot 10^5 & 1,258 \cdot 10^6 & -1,885 \cdot 10^5 & -1,032 \cdot 10^6 \\ 5,551 \cdot 10^5 & -1,668 \cdot 10^5 & -5,832 \cdot 10^5 & 3,158 \cdot 10^5 \end{vmatrix}; B = \begin{vmatrix} 1,338 \cdot 10^8 \\ -5,473 \cdot 10^{11} \\ 9,779 \cdot 10^{11} \\ -2,404 \cdot 10^{11} \end{vmatrix}; X = \begin{vmatrix} R_p \\ R_{net1} \\ R_{net2} \\ R_{con} \end{vmatrix}.$$

Отримані результати ідентифікації параметрів лабораторної насосної установки (табл. 4) підтверджують адекватність розвинутого в роботі енергетичного методу ідентифікації: порівняльний аналіз ідентифікації експериментальних (I) та модельних (II) результатів дає похибку не більше 6 %. Похибка між експериментальними дослідженнями та значеннями, розрахованими за емпіричними виразами на базі відомих рівнянь гідродинаміки, – не більше 7 %.

Таблиця 4 – Результати ідентифікації параметрів експериментального ЕГК

Метод	Розраховані параметри схеми заміщення експериментального ЕГК											
	$R_p \cdot 10^5, \text{ кг/м}^4\text{с}$			$R_{net1} \cdot 10^6, \text{ кг/м}^4\text{с}$			$R_{net2} \cdot 10^6, \text{ кг/м}^4\text{с}$			$R_{con} \cdot 10^7, \text{ кг/м}^4\text{с}$		
	I	II	$\varepsilon, \%$	I	II	$\varepsilon, \%$	I	II	$\varepsilon, \%$	I	II	$\varepsilon, \%$
енергетичний	2,676	2,534	5,3	1,238	1,312	6	1,037	0,977	5,8	1,244	1,307	5,1
за емпіричними виразами	2,863		7	1,317		6,4	1,108		6,9	1,171		5,8

Аналіз техніко-економічних показників САК ЧРЕП ЕГК для НУ з потужністю 7,5 кВт показав, що при капітальних затратах близько 62 тис. грн річний економічний ефект складає 142 тис. грн за рахунок зниження енергоспоживання та аварійності шляхом своєчасної заміни електрогідравлічного обладнання за результатами ідентифікації поточних параметрів гідросистеми. Термін окупності такої системи становить шість місяців.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих теоретичних результатів та їх систематизації розв'язано актуальне наукове завдання підвищення енергоефективності

гляду $u(t) = 4,5 + 0,5 \cos(\Omega t)$ наведені на рис. 9, б).

Порівняльний аналіз енергетичних процесів в ЕГК, отриманих експериментально (криві 1, рис. 10) та на базі математичної моделі (криві 2, рис. 10), показав достатньо високу збіжність результатів: коефіцієнт детермінації R^2 лежить в межах 0,87–0,98.

Система ідентифікаційних рівнянь для наведеної схеми заміщення (рис. 9, а) та сигналу витрати, пред-

ставленої сумою постійної та змінних складових до п'ятої гармоніки включно, складається з 11 рівнянь, з яких для визначення чотирьох невідомих ($R_p, R_{net1}, R_{net2}, R_{con}$) за схемою заміщення (рис. 9, а), використовуються перші чотири. Після перетворень система ідентифікаційних рівнянь в матричному вигляді має вигляд: $AX = B$, де

$$A = \begin{vmatrix} 1,396 \cdot 10^5 & 2,139 \cdot 10^4 & 9,348 \cdot 10^3 & 1,473 \cdot 10^4 \\ 1,081 \cdot 10^5 & -2,24 \cdot 10^5 & 8,46 \cdot 10^5 & -5,318 \cdot 10^5 \\ 1,606 \cdot 10^5 & 1,258 \cdot 10^6 & -1,885 \cdot 10^5 & -1,032 \cdot 10^6 \\ 5,551 \cdot 10^5 & -1,668 \cdot 10^5 & -5,832 \cdot 10^5 & 3,158 \cdot 10^5 \end{vmatrix}; B = \begin{vmatrix} 1,338 \cdot 10^8 \\ -5,473 \cdot 10^{11} \\ 9,779 \cdot 10^{11} \\ -2,404 \cdot 10^{11} \end{vmatrix}; X = \begin{vmatrix} R_p \\ R_{net1} \\ R_{net2} \\ R_{con} \end{vmatrix}.$$

Отримані результати ідентифікації параметрів лабораторної насосної установки (табл. 4) підтверджують адекватність розвинутого в роботі енергетичного методу ідентифікації: порівняльний аналіз ідентифікації експериментальних (I) та модельних (II) результатів дає похибку не більше 6 %. Похибка між експериментальними дослідженнями та значеннями, розрахованими за емпіричними виразами на базі відомих рівнянь гідродинаміки, – не більше 7 %.

Таблиця 4 – Результати ідентифікації параметрів експериментального ЕГК

Метод	Розраховані параметри схеми заміщення експериментального ЕГК											
	$R_p \cdot 10^5, \text{ кг/м}^4\text{с}$			$R_{net1} \cdot 10^6, \text{ кг/м}^4\text{с}$			$R_{net2} \cdot 10^6, \text{ кг/м}^4\text{с}$			$R_{con} \cdot 10^7, \text{ кг/м}^4\text{с}$		
	I	II	$\varepsilon, \%$	I	II	$\varepsilon, \%$	I	II	$\varepsilon, \%$	I	II	$\varepsilon, \%$
енергетичний	2,676	2,534	5,3	1,238	1,312	6	1,037	0,977	5,8	1,244	1,307	5,1
за емпіричними виразами	2,863		7	1,317		6,4	1,108		6,9	1,171		5,8

Аналіз техніко-економічних показників САК ЧРЕП ЕГК для НУ з потужністю 7,5 кВт показав, що при капітальних затратах близько 62 тис. грн річний економічний ефект складає 142 тис. грн за рахунок зниження енергоспоживання та аварійності шляхом своєчасної заміни електрогідравлічного обладнання за результатами ідентифікації поточних параметрів гідросистеми. Термін окупності такої системи становить шість місяців.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих теоретичних результатів та їх систематизації розв'язано актуальне наукове завдання підвищення енергоефективності

електрогідравлічного комплексу з регульованим електроприводом на базі гармонічного аналізу потужності у силовому каналі та визначення поточних параметрів гідросистеми в стаціонарних та нестаціонарних режимах.

Результати досліджень, проведених за темою дисертаційної роботи, дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Показано, що функціонування електрогідравлічних комплексів супроводжується розвитком нестаціонарних процесів, що призводять до зміни технологічних параметрів насосного і трубопровідного обладнання у часі. Встановлено, що тривала експлуатація електрогідравлічного обладнання супроводжується відхиленням фактичних напірних до 23 % та енергетичних до 33 % характеристик НА від номінальних, збільшенням макрошоркості до 83 % та гідравлічного опору до 61 % трубопровідних мереж.

2. Розроблено та досліджено математичну модель частотно-регульованого електроприводу електрогідравлічного комплексу з урахуванням розвитку нестаціонарних процесів в трубопровідній мережі, на базі якої встановлено, що енергопроцеси, які відбуваються в гідросистемі, носять характер періодичних сталих коливань потужності на аналізованому інтервалі часу. Аналіз динамічних режимів в електрогідравлічному комплексі з нелінійними процесами у трубопровідній мережі дозволив визначити порогові значення активних гідравлічних опорів насоса та трубопроводу, при досягненні яких електромеханічна система переходить у зону нестійкої роботи та призводить до виникнення аварійних режимів. Отримано, що розвиток різного роду нестаціонарних (кавітаційних, турбулентних) процесів в трубопровідній мережі електрогідравлічного комплексу супроводжується появою змінних складових в сигналах гідравлічної потужності з частотою 1–10 Гц, амплітудне значення яких складає до 40 % від номінального значення.

3. Доведено, що для вирішення задачі ідентифікації параметрів електрогідравлічного комплексу доцільно формувати тестовий гармонічний вплив на вхід системи керування перетворювачем частоти електроприводу насоса, який містить постійну та змінну складові, та використовувати рівняння енергобалансу гармонічних складових гідравлічної потужності між джерелом живлення і елементами силового каналу при періодичній зміні технологічних параметрів, які складені на основі еквівалентних електричних схем заміщення, що базуються на методі електрогідравлічної аналогії та ураховують схему включення насосних агрегатів, конфігурацію трубопроводу, розвиток нестаціонарних гідродинамічних процесів в гідросистемі. Це дозволило розрахувати терміни експлуатації насосного та трубопровідного обладнання, які визначають доцільність їх подальшої експлуатації.

4. Отримано, що на енергоефективність електрогідравлічного комплексу впливає збільшення гідравлічного опору насоса, а на відпрацювання технологічного завдання (стабілізацію тиску у споживача) – збільшення гідравлічного опору трубопроводу під час експлуатації. При зростанні гідравлічного опору насоса в 1,4 та 2,45 разів ККД турбомеханізму знижується на 17 % та 35 %, відповідно. Встановлено, що збільшення гідравлічного опору трубопроводу в 10–12 разів призводить до неможливості стабілізації тиску у споживача при практично незмінному ККД насоса. Запропоновано апроксимаційну залежність коефіцієнта корисної дії від активних гідравлічних опорів насосного та трубопровідного обладнання, яка дозволяє визначити зони можливого підвищення енергоефективності електрогідравлічного комплексу.

5. Розроблено структуру системи автоматичного керування електроприводом електрогідравлічного комплексу з енергоефективним регулюванням та урахуванням

зміни поточних параметрів гідросистеми при стабілізації напору в гідромережі та запропоновано алгоритм її роботи. Доведено ефективність використання двохпараметричного регулювання (одночасною зміною частоти обертання привідного двигуна та положення засувки на виході насоса) в системі частотно-регульованого електропривода при стабілізації тиску у споживача та зміні параметрів гідросистеми під час тривалої експлуатації для забезпечення режиму максимальної енергоефективності: відпрацювання змінного графіку споживача при значному водоспоживанні дозволяє підвищити ККД насосного агрегату на 5,4 %.

6. Доведено ефективність застосування енергетичного методу при ідентифікації параметрів на базі фізичної моделі електрогідравлічного комплексу. Порівняльний аналіз експериментальних та модельних сигналів потужності та втрат потужності на елементах силового каналу електрогідравлічного комплексу, показав достатню збіжність результатів. Отримано, що похибка вимірювання параметрів за енергетичним методом між експериментальними та модельними результатами досліджень склала менше 6 %; з розрахованими за емпіричними виразами – менше 7 %.

8. Отримано, що економічна ефективність системи автоматичного керування регульованим електроприводом насосного комплексу з двохпараметричним регулюванням та урахуванням поточних параметрів гідромережі за рахунок зниження енергоспоживання та аварійності шляхом своєчасної заміни електрогідравлічного обладнання за результатами ідентифікації поточних параметрів гідросистеми, дозволяє отримати річний економічний ефект 435,34 тис. грн, термін окупності такої системи становитиме 6 міс.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Zagirnyak M., Korenkova T., Serdiuk O., Kravets O. and Kovalchuk V. The Control of the Pumping Complex Electric Drive in Non-Steady Operation States: monograph. New York, Nova Publisher, 2019. – 278 p. ISBN: 978-1-53615-017-9 (*Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*)

Статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science™ Core Collection та/або Scopus:

2. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Identification of electrohydraulic complex parameters using instantaneous power components. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. № 89 (12 B). PP. 286–289. (*Scopus*)

3. Загирняк М. В., Ковальчук В. Г., Коренькова Т. В. Энергетический метод в задачах определения параметров электрогидравлического комплекса. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 76–78. (*Фахове видання категорії «А», Scopus*)

4. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. The automation of the procedure of the electrohydraulic complex power harmonic analysis. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018. № 94 (1 B). PP. 1–4. (*Scopus, Web of Science*)

5. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. The principles of the creation of the control system for the pumping complex variable-frequency electric drive, taking into account the alteration of the current parameters of the hydrosystem. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018. № 94 (12B). PP. 38–41. (*Scopus, Web of Science*)

6. Kovalchuk, V., Korenkova, T. The operation modes of a power-efficient system of control of a pumping plant variable-frequency electric drive. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019. 95(12), с. 148–151. (*Scopus, Web of Science*)

Праці конференцій, занесених до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science™ Core Collection та/або Scopus:

7. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Power model of an electrohydraulic complex with periodic nonlinear processes in the pipeline network. *Proceedings of 2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*. Tatranska Lomnica, 2015, pp. 345–352, doi: 10.1109/EDPE.2015.7325318. (*Scopus, Web of Science*)

8. Zagirnyak M., Korenkova T., Kovalchuk V. Harmonic analysis of power in an electrohydraulic complex with nonlinear processes in the pipeline system. *Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kiev, 2016*, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEPS.2016.7521850. (*Scopus, Web of Science*)

9. Kovalchuk V., Korenkova T. The Assessment of the Efficiency of a Pumping Plant with a Variable-Frequency Electric Drive at the Change of the Hydraulic System Parameters. *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019. P. 134–137, doi: 10.1109/MEES.2019.8896618. (*Scopus*)

10. Kovalchuk V., Korenkova T. and Almashakbeh A. S. Electrohydraulic Complex Parameters Determination Based on the Energy Balance Equations *Proceedings of the 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240819. (*Scopus*)

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

11. Ковальчук В. Г., Сердюк А. А., Коренькова Т. В. Оценка динамических параметров гидротранспортных систем с использованием энергетического критерия. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. Вип. 2/2012 (18). С. 17–21. (*Фахове видання категорії «Б», Ulrich's Periodicals Directory*)

12. Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г. Процессы преобразования энергии в насосном комплексе с кавитационными автоколебаниями. *Наукові праці ДонНТУ «Електротехніка і енергетика»*. 2012. № 1(12)–2(13). С. 128–133. (*Фахове видання категорії «Б»*)

13. Ковальчук В. Г., Коренькова Т. В. Идентификация параметров насосного комплекса с использованием энергетического критерия. *Електронний щоквартальний науково-практичний журнал "Інженерні та освітні технології" (EETECs)*. 2013. Вип. 1/2013 (1). С. 14–20. Режим доступу: www.eetecs.kdu.edu.ua (*Фахове видання категорії «Б»*)

14. Ковальчук В. Г., Коренькова Т. В. Идентификация параметров насосного комплекса при тестовом гармоническом воздействии. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 2/2013 (22). Ч. 2. С. 135–141. (*Фахове видання категорії «Б», Ulrich's Periodicals Directory*)

15. Коренькова Т. В., Сердюк А. А., Ковальчук В. Г. Оценка энергоэффективности электрогидравлического комплекса при развитии кавитационных процессов в трубопроводной сети. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. Вип. 4/2014 (28). С. 94–104. (*Фахове видання категорії «Б», Ulrich's Periodicals Directory*)

16. Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г., Родькин Д. И. Анализатор процессов энергопреобразования в электрогидравлическом комплексе. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2016. Вип. 1/2016 (33). С. 104–113. (*Фахове видання*)

категорії «Б», *Ulrich's Periodicals Directory*)

17. Ковальчук В. Г., Коренькова Т. В. Разработка эквивалентных электрических схем замещения в задачах идентификации параметров насосного комплекса. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 165–169. (Фахове видання категорії «Б»)

18. Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г., Родькин Д. И. К теории идентификации электромеханических систем энергетическим методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. 2019. № 16 (1341). С. 32–42 ISSN 2079-8024. (Фахове видання категорії «Б»)

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

19. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Identification of hydrotransport complex parameters using instantaneous power components. *Materialy XXIII Sympozjum Srodowiskowe PTZE'2013 "Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce"*. Mikolajki, 2013. P. 229–231.

20. Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г., Сердюк А. А. Оценка энергоэффективности электрогидравлического комплекса при развитии нелинейных процессов в трубопроводной сети. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук 10–11 квітня 2014)*. Кременчук: КрНУ, 2014. С. 186–187.

21. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Identification of Parameters of Electrohydraulic Complex with Periodic Nonlinear Processes in the Pipeline Network. *XVIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'15 & Symposium on Electromagnetic Evaluation of Materials SEEM'15*. Kołobrzeg, Poland June 7th–10th, 2015, P. 94. ISBN 978 - 83 - 7663 - 196 - 7

22. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. A system of a pumping complex electric drive control taking into account the current parameters of the hydrosystem. *Materialy XXVIII Sympozjum Srodowiskowe PTZE "Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Technologiach"*. Raclawice, Poland, 2018. P. 357-358. ISBN 83-88131-99-0

23. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Power-efficient control of the technological parameters of a pumping plant with a variable-frequency electrical drive. *Materialy XXIX Sympozjum Srodowiskowe PTZE "Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Technologiach"*. Janow Podlaski, Poland, 2019. P. 364–365. ISBN 978-83-88131-01-1

24. Ковальчук В. Г., Кравец А. М., Коренькова Т. В. Двухпараметрическое регулирование в системе частотно-регулируемого электропривода насосной установки. *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук 11-12 квітня 2019 р.)*. Кременчук: КрНУ, 2019. С. 134–137.

25. Ковальчук В. Г., Коренькова Т. В. Визначення параметрів експериментальної гідротранспортної установки на базі енергетичного методу. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика: збірник наукових праць XIX Міжнародної науково-технічної конференції (Кременчук, 4–6 листопада 2020 р.). Кременчук: КрНУ, 2020. Вип. 6/2020. С. 10–13.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

26. Родькін Д.Й., Коренькова Т.В., Ковальчук В.Г., Зінченко М.Г. Спосіб ідентифікації параметрів електрогідравлічного комплексу. Патент. 87460. Україна, МПК F04D 13/00, G01R 11/50; № u2013 09686; Заявл. 05.08.2013; Опубл. 10.02.2014. Бюл. № 3. 10 с.

27. Родькін Д. Й., Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г., Ромашко Д. А. Спосіб визначення показників процесів енергоперетворення в електромеханічному комплексі. Патент 118077. Україна. МПК G01R 21/06, G01R 21/08; № u2016 13668; Заявл. 30.12.2016; Опубл. 25.07.2017; Бюл. №14. 12 с.

АНОТАЦІЯ

Ковальчук В. Г. Енергоефективне керування регульованим електроприводом електрогідравлічного комплексу з ідентифікацією параметрів гідросистеми. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, Кременчук, 2021.

У практиці експлуатації електрогідравлічних комплексів (ЕГК) досить часто виникають нестационарні процеси, пов'язані з розвитком складних гідродинамічних явищ: гідравлічних ударів, кавітаційних коливань, турбулентних режимів та ін. Вони супроводжуються несталою течією рідини в гідросистемі зі зміною сигналів напору і витрати в часі, що призводить до відхилення параметрів (активних, індуктивних і ємнісних опорів) насосного агрегату (НА) і гідромережі від їх номінальних значень і, як наслідок, до неефективної роботи електротехнологічного обладнання.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання підвищення енергоефективності електрогідравлічного комплексу з регульованим електроприводом на базі гармонічного аналізу потужності у силовому каналі та визначення поточних параметрів гідросистеми в стаціонарних та нестационарних режимах.

У дисертаційній роботі теоретично доведено та експериментально підтверджено, що при розвитку нестационарних гідравлічних процесів в трубопровідній мережі електрогідравлічного комплексу енергетичні процеси в силовому каналі мають характер періодичних сталих коливань потужності на аналізованому інтервалі часу. Сказане супроводжується появою змінних складових в сигналах технологічних та енергетичних параметрів, на основі аналізу яких можливе визначення порогових значень поточних параметрів електрогідравлічного обладнання, при досягненні яких електромеханічна система насосної станції переходить у зону нестійкої роботи та супроводжується виникненням аварійних режимів.

У дисертації отримав подальшого розвитку метод ідентифікації параметрів електрогідравлічного комплексу на основі рівнянь енергобалансу між джерелом живлення та елементами силового каналу, що дозволяє визначити поточні параметри гідросистеми в стаціонарних та нестационарних режимах роботи, розрахувати терміни експлуатації насосного і трубопровідного обладнання для прийняття своєчасного рішення щодо їх ремонту чи заміни.

Запропоновано систему автоматичного керування частотно-регульованим електроприводом насосного комплексу при стабілізації тиску у споживача, яка забезпечує

підвищення енергоефективності електрогідравлічного комплексу шляхом періодичного визначення поточних параметрів гідросистеми та застосування двохпараметричного регулювання параметрів, що базується на одночасній зміні частоти обертання двигуна та положення засувки на виході насоса.

Доведено ефективність використання енергетичного методу при ідентифікації параметрів на базі фізичної моделі електрогідравлічного комплексу.

Ключові слова: електрогідравлічний комплекс, регульований електропривод, гармонічний аналіз потужності, рівняння енергобалансу, ідентифікація параметрів, нестационарні процеси, двохпараметричне регулювання.

ABSTRACT

Kovalchuk V. – Energy efficiency control of the adjustable electric drive of the electrohydraulic complex with identification the parameters of the hydrosystem. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the scientific degree of Cand. Sc. (PhD) for the specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems (141 – Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – Kremenchug Mykhailo Ostrogradsky National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kremenchuk, 2021.

In the practice of operation of electrohydraulic complexes (EHC) quite often there are non-stationary processes associated with the development of complex hydrodynamic phenomena. They are accompanied by an unstable flow of fluid in the hydraulic system, which are characterized by changes in pressure signals and flow over time and leads to deviation of parameters of the pump unit (PU) and hydraulic network from their nominal values.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific problem of increase of efficiency of electrohydraulic complexes functioning with the frequency-regulated electric drive based on the harmonic power analysis at the power channel and definition the hydrosystem current parameters in stationary and non-stationary modes.

In the dissertation theoretically proved and experimentally confirmed that during the development of non-stationary hydraulic processes in the pipeline network the energy processes in the electrohydraulic complex have the character of periodic constant power fluctuations on the analyzed time interval with increasing variable component.

In the dissertation the method of identification of an electrohydraulic complex parameters received further development. It based on equations of energy balance between a power supply and elements of the power channel that allows to define current parameters of hydraulic systems in stationary and nonstationary modes of operation, to calculate service life of pump and pipeline equipment regarding their repair or replacement.

The system of automatic control of the frequency-regulated electric drive of the pump complex at stabilization of pressure at the consumer which provides, unlike existing, increase of energy efficiency of an electrohydraulic complex by periodic definition of current parameters of hydraulic system and application of two-parameter regulation of parameters based on simultaneous valves at the pump outlet.

The efficiency of using the energy method in identification the parameters of the electrohydraulic complex physical model is proved.

Key words: electrohydraulic complex, adjustable electric drive, harmonic power analysis, energy balance equation, identification of parameters, non-stationary processes, two-parameter regulation.

Ковальчук Вікторія Григорівна

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО КОМПЛЕКСУ
З ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОСИСТЕМИ**

(Автореферат)

Підписано до друку 16.08.2021. Формат 30x42/4.
Папір Polspeed. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обліково-видавн. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 20510.

Редакційно-видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4837 від 22.01.2015