

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Землянухіна Ганна Юріївна

УДК 62-83: 628.12

ДИСЕРТАЦІЯ

**Бездавачеве керування електромеханічними системами турбомеханізмів з
використанням технології нейромереж**

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Г. Ю. Землянухіна

Науковий керівник: Бур'ян Сергій Олександрович, канд. техн. наук, доцент

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Землянухіна Г.Ю. Бездавачеве керування електромеханічними системами турбомеханізмів з використанням технології нейромереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

У дисертаційній роботі вирішується задача підвищення ефективності роботи турбомеханізмів за рахунок розробки бездавачевої електромеханічної системи автоматичного керування з оцінювачами технологічних координат на основі штучних нейронних мереж в умовах зміни параметрів гідромережі.

У першому розділі проведено аналіз існуючих сучасних енергоефективних систем керування турбомеханізмами, що живляться від альтернативних джерел енергії, та систем бездавачевого керування з метою обґрунтування необхідності вирішення розглянутої у роботі науково-прикладної задачі. За результатами аналітичного огляду встановлено, що використання датчиків технологічних координат значно збільшує вартість та ускладнює процес обслуговування таких систем керування турбомеханізмами, зокрема насосами, вентиляторами та компресорами. Тому сучасні методи реалізації бездатчикових систем керування, зокрема використання штучних нейронних мереж, представляють перспективним підходом. Здатність цих мереж до навчання на основі обширних вхідних даних робить їх ефективним інструментом для оцінювання координат турбомеханізмів. Розглянуто типові автономні системи генерації електричної енергії, а саме при використанні асинхронних, синхронних двигунів та машин подвійного живлення. Серед новітніх альтернативних систем для генерації електричної енергії набувають популярності вітроустановки, які використовують асинхронні генератори.

У другому розділі проведено розробка та опис тренування оцінювачів технологічних координат на основі теорії штучних мереж із класичними структурами мереж та стандартними алгоритмами їх навчання, а також при використанні модифікованої структури нейронних мереж із зворотнім зв'язком, що дозволяє підвищити точність оцінювання при варіаціях опору гідравлічної мережі. Наведено математичний опис нейронних мереж, що, як наслідок, в подальшому дозволяє реалізувати розроблені нейронні мережі використовуючи низько-середньо рівневі контролери, такі як програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) та інші. Розглянуто покроковий алгоритм навчання нейронних мереж із класичною та модифікованою схемою перцептронів за допомогою інструментів MATLAB nntool та ntstool відповідно. Наведені результати тренування оцінювачів технологічних координат, а саме оцінювача тиску та продуктивності, показують, що точність такого оцінювача становить 10%.

У третьому розділі наведено математичний опис та опис основних елементів двох варіантів електромеханічної системи керування турбомеханізмом при живленні від вітрогенератора з використанням електронного регулятора навантаження (EPH) та статичного компенсатора (STATCOM). Проведено дослідження системи водопостачання при живленні від вітрогенератора із застосуванням статичного компенсатора в умовах стабілізації тиску гідромережі методом математичного моделювання використовуючи пакети прикладних програм MATLAB Simulink та SimPowerSystems. Результати вказують на те, що розроблена система забезпечує стабілізацію напору в гідравлічній мережі на задовільному рівні при змінах опору відповідно до технологічних вимог. Динамічна похибка в регулюванні напору системи не перевищує 1%. Використовуючи теорію штучних нейронних мереж, досліджено коефіцієнт корисної дії (ККД) насосу систем в межах типового добового циклу споживання води. Для проведення дослідження створено оцінювач ККД, тренування якого здійснювалося на основі статичних характеристик насосу, які можна отримати з каталогів обладнання відповідних виробників.

У четвертому розділі розглянуто різні типи реалізації системи стабілізації напруги асинхронних генераторів, такі як електронний регулятор навантаження (ЕРН) та статичний компенсатор (STATCOM). Як наслідок встановлено, що використання електронного ЕРН в автономній системі генерації електричної енергії дозволяє втрати енергії, що утворюються при живленні основних активних споживачів, перерозподіляти для задоволення потреб споживачів системи водопостачання. Проведено дослідження системи керування турбомеханізмом при використанні оцінювача тиску із класичними структурами мереж та стандартними алгоритмами навчання, а також при використанні модифікованого оцінювача тиску із зворотнім зв'язком. Дослідження перехідних процесів систем проводилися методом математичного моделювання в умовах стабілізації тиску. Результати дослідження показують, що динамічна похибка відпрацювання тиску системи не перевищує 1%. Порівнюючи оцінені значення тиску, які отримані від системи бездатчикового керування турбомеханізмом при живленні від вітрогенератора із використанням електронного регулятора навантаження, і фактичний тиск, що може бути виміряний за допомогою датчика тиску, встановлено, що похибка оцінки тиску знаходиться в межах від 0% до 14%. Похибка в оцінці тиску в бездатчиковій системі керування турбомеханізмом із використання статичного компенсатора знаходиться в діапазоні від 0% до 8%, що відповідає технологічним вимогам і є прийнятним для вимірювання координат мережі за допомогою контрольно-вимірювальних приладів.

У п'ятому розділі наведено опис експериментального стенду для дослідження бездавачевої системи керування вентилятором, умови проведення експерименту та результати проведення експериментальних досліджень. Дослідження вказують на те, що для приблизно 40% діапазону частот розроблений алгоритм управління є ефективним і може забезпечити точне оцінювання технологічних координат. Це відкриває можливість використання оцінювачів, реалізованих на основі теорії штучних нейронних мереж, для заміни датчиків у таких системах. Наведено опис експериментального стенду для

дослідження системи водопостачання із використанням оцінювачів коефіцієнта корисної дії (ККД) та продуктивності. Реалізовано нейронні мережі на основі їх математичного опису для оцінювання технологічних координат на базі програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). Підтверджено ефективність розробленого оцінювача ККД насосної установки, розбіжність між експериментальними та модельними даними не перевищує 15% на напорах до 7 метрів і 5% від 7 до 20 метрів, що вважається прийнятним для використаного обсягу даних і характеристик вхідних сигналів нейронної мережі. У рамках дослідження здійснено техніко-економічне обґрунтування застосування програмованих логічних інтегральних схем у порівнянні з традиційними датчиками тиску та продуктивності в системах водопостачання. Отримані результати дозволили зробити висновок щодо можливостей оптимізації ефективності систем водопостачання за допомогою використання ПЛІС. Враховуючи технічні та економічні аспекти, використання ПЛІС виявилось конкурентоспроможним та перспективним підходом порівняно із традиційними методами, такими як застосування датчиків тиску і продуктивності (витратомірів).

Результати роботи впроваджено: в ДП «Сіменс Україна» (м. Київ) та в освітній процес у Київському політехнічному інституті імені Ігоря Сікорського для вдосконалення лекційних курсів та оновлення циклів лабораторних робіт дисциплін «Електромеханічні системи типових технологічних застосувань» та «Керування та автоматизація технічних систем».

Подальше впровадження результатів дисертації рекомендується на підприємствах електротехнічного профілю України.

Ключові слова: електромеханічна система, турбомеханізм, асинхронний двигун, асинхронний генератор, вітрогенератор, система водопостачання, бездавачеве керування, стабілізація напору, штучна нейронна мережа, оцінювання технологічної координати, гідравлічний опір мережі, альтернативне джерело енергії, коефіцієнт корисної дії.

Список публікацій здобувача

1. S.O. Burian, O.I. Kiselychnyk, M.V. Pushkar, V.S. Reshetnik, H.Y. Zemlianukhina, "Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer." *Technical Electrodynamics*, №1, 2020, Kyiv pp. 71-77. DOI: [10.15407/techned2020.01.071](https://doi.org/10.15407/techned2020.01.071).
2. M.V. Pechenik, S.O. Burian, M.V. Pushkar, H.Y. Zemlianukhina, "Electromechanical system of turbomechanism when using an alternative source of electric energy." *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, №2, 2022, Dnipro, pp. 61-66. DOI: [10.33271/nvngu/2022-2/061](https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-2/061).
3. M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, M.V. Pushkar, V.I. Teriaiev, "Investigation of energy efficiency of water supply system when powered by an alternative energy source." *Tekhnichna Elektrodynamika*, №5, 2022, Kyiv, pp. 77-81. DOI: [10.15407/techned2022.05.077](https://doi.org/10.15407/techned2022.05.077).
4. С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, Г.Ю. Землянухіна, "Розробка та дослідження оцінювача ККД насоса за допомогою нейронної мережі на базі програмованої логічної інтегральної схеми." *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, 2018, Вінниця с. 68-73.
5. С.О. Бур'ян, А.С. Титаренко, Г.Ю. Землянухіна, "Оцінювач коефіцієнта корисної дії насосної установки на основі нейронної мережі: експериментальні дослідження." *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, №195, 2018, Харків, с. 132-133.
6. С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, Г.Ю. Землянухіна, А.І. Бабарова "Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації послідовно з'єднаних насосних установок в пакеті SIMHYDRAULICS." *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, №204, 2019, Харків, с. 84-86.
7. S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, "Neural Network Pressure Observer for a Turbomechanism Electromechanical System Powered by a Wind Generator." *Applied Aspects of Information Technology*, № 5(4), 2022, Odessa, pp. 303–314. DOI: [10.15276/ahait.05.2022.20](https://doi.org/10.15276/ahait.05.2022.20).

8. M.V. Pechenik, S.O. Burian, M.V. Pushkar, H.Y. Zemlianukhina, "Analysis of the Energy Efficiency of Pressure Stabilization Cascade Pump System," *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 490-493. DOI: [10.1109/MEES.2019.8896588](https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896588).
9. M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, M.V. Pushkar, "Investigation of the Hydraulic Pressure Stabilization Accuracy in the Conditions of Water Supply Cascade Pump System Operation," *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 97-100. DOI: [10.1109/ESS50319.2020.9160340](https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160340).
10. M.V. Pushkar, N.D. Krasnoshapka, M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, "Approximation of Magnetizing Inductance Curve of Self-excited Induction Generator for Investigation of Steady-state Operation Modes," *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 301-305. DOI: [10.1109/ESS50319.2020.9160143](https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160143).

ABSTRACT

Zemlianukhina H.Yu. Sensorless control of electromechanical systems of turbomechanisms using neural network technology. – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree in speciality 141 – Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.

The thesis is devoted to the problem of increasing the efficiency of turbomechanisms operation by developing a sensorless electromechanical automatic control system with technological coordinates observers based on artificial neural networks in the conditions of hydraulic network parameters changing.

The first chapter provides an analysis of existing modern energy-efficient turbomechanisms control systems powered by alternative energy sources and sensorless control systems. The aim is to justify the need to address the scientific and applied problem considered in this work. According to the results of the analytical review, it is established that the use of technological coordinate sensors significantly increases the cost and complicates the maintenance process of such control systems for turbomechanisms, including pumps, fans, and compressors. Therefore, modern methods of implementing sensorless control systems, particularly the utilization of artificial neural networks, represent a promising approach. The learning capability of these networks based on extensive input data renders them an effective tool for estimating the coordinates of turbomechanisms. Typical autonomous electric power generation systems are examined, including the use of induction motors, synchronous motors, and doubly fed machines. Among the latest alternative systems for electricity generation, wind generators using induction generators are gaining popularity.

In the second chapter, the development and training of technological coordinate observers based on artificial neural network theory with classical network structures and standard training algorithms are described. Additionally, a modified neural network structure with feedback is utilized to enhance the accuracy of estimation during variations in hydraulic network resistance. The mathematical description of the

neural networks is provided, enabling the implementation of the developed neural networks using low to mid-level controllers, such as FPGAs and others. A step-by-step training algorithm for neural networks with a classical and modified perceptron schemes using MATLAB tools, namely `nnTool` and `ntstool`, respectively, is considered. The results of training the technological parameter observers, such as a pressure and productivity observers, demonstrate that the accuracy of such an estimator is 10%.

In the third chapter, a mathematical description and an overview of the main elements of two variants of the turbomechanism electromechanical control system powered by a wind generator are provided. The systems incorporate an electronic load regulator (ELR) and a static compensator (STATCOM). The water supply system, powered by a wind turbine using a static compensator in the conditions of stabilising the hydraulic network pressure, has been investigated through mathematical modeling using MATLAB Simulink and SimPowerSystems software packages. The results indicate that the developed system ensures pressure stabilization within the hydraulic network at a satisfactory level, accommodating variations in resistance according to technological requirements. The dynamic error in the pressure regulation of the system does not exceed 1%. Utilizing artificial neural network theory, the pump efficiency of the systems is investigated within the scope of a typical daily water consumption cycle. To conduct the research, an efficiency estimator was developed, the training of which was based on the static characteristics of the pump. These characteristics can be obtained from the equipment catalogues of the respective manufacturers.

In the fourth chapter, various implementations of voltage stabilization systems for induction generators are considered, such as the electronic load regulator (ELR) and the static compensator (STATCOM). As a result, it is established that the use of the ELR in an autonomous power generation system allows redistributing the energy losses generated when supplying power to the main active consumers to meet the needs of the water supply system consumers. The turbomechanism control system is investigated using a pressure observer with classical network structures and standard training algorithms, as well as using a modified pressure estimator with feedback. Transient processes of the systems were studied by mathematical modeling under

pressure stabilization conditions. The research results show that the dynamic error in pressure response of the system does not exceed 1%. Comparing the observed pressure values obtained from the turbomechanism sensorless control system powered by a wind generator using an electronic load regulator and the actual pressure that can be measured using a pressure sensor, it is found that the pressure estimation error is within the range of 0% to 14%. The error in pressure estimation in the turbomechanism sensorless control system using a static compensator is in the range of 0% to 8%, which corresponds to technological requirements and is acceptable for measuring network parameters using control and measurement instruments.

In the fifth chapter, a description of the experimental setup for investigating the sensorless fan control system, experimental conditions, and the results of experimental studies are provided. The research indicates that for approximately 40% of the frequency range, the developed control algorithm is effective and can provide accurate estimation of technological coordinates. This opens up the possibility of using observers based on the theory of artificial neural networks to replace sensors in such systems. A description of the experimental setup for studying the water supply system using estimators of the efficiency and productivity is given. Neural networks based on their mathematical description using field-programmable gate array (FPGA). are implemented to observe technological coordinates. The efficiency of the developed estimator of the pump unit efficiency is confirmed, and the discrepancy between experimental and model data does not exceed 15% for head values up to 7 meters and 5% from 7 to 20 meters, which is considered acceptable for the used dataset and characteristics of neural network input signals. Within the scope of the research, a feasibility study for the application of FPGA compared to traditional pressure and productivity sensors in water supply systems has been conducted. The obtained results allowed conclusions to be drawn regarding the potential optimization of water supply system efficiency through the use of FPGA. Considering technical and economic aspects, the utilization of FPGA proved to be a competitive and promising approach compared to traditional methods such as the use of pressure and flow sensors.

The results of the research have been implemented at Siemens Ukraine (Kyiv) and integrated into the educational process at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute to enhance lecture courses and update laboratory work cycles for the disciplines "Electromechanical Systems of Typical Technological Applications" and "Control and Automation of Technical Systems"

Further implementation of the dissertation results is recommended for enterprises in the electrical engineering sector in Ukraine.

Keywords: electromechanical system, turbomechanism, induction motor, wind generator, water supply system, sensorless control, pressure stabilization, artificial neural network, technological coordinate observation, hydraulic network resistance, alternative energy source, efficiency.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП.....	15
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	21
1.1 Аналіз сучасних рішень бездавачевих систем керування турбомеханізмами	22
1.2 Аналіз сучасних рішень керування електромеханічними системами турбомеханізмів із живленням від альтернативного джерела електричної енергії.....	32
Висновки до розділу 1.....	40
2 ОЦІНЮВАЧІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КООРДИНАТ ТУРБОМЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	42
2.1 Оцінювачі технологічних координат турбомеханізмів: загальні відомості та області застосування.....	42
2.2 Математичний опис і алгоритми проектування оцінювачів методом штучних нейронних мереж.....	46
2.3 Результати навчання оцінювачів технологічних координат	56
Висновки до розділу 2.....	61
3 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТУРБОМЕХАНІЗМОМ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ВІТРОГЕНЕРАТОРА.....	63
3.1 Математичний опис електромеханічної системи водопостачання при живленні від вітрогенератора.....	63
3.2 Дослідження електромеханічної системи водопостачання при живленні від вітрогенератора в умовах стабілізації напору методом математичного моделювання	71
3.3 Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання при живленні від вітрогенератора методом математичного моделювання	76
Висновки до розділу 3.....	80

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ БЕЗДАВАЧЕВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТУРБОМЕХАНІЗМОМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	81
4.1 Дослідження системи керування турбомеханізмом при використанні оцінювача тиску із стандартними алгоритмами навчання.....	81
4.2 Дослідження бездавачевої системи керування турбомеханізмом при використанні модифікованого оцінювача тиску із зворотнім зв'язком.....	83
4.3 Дослідження бездавачевої системи керування турбомеханізмом з модифікованим оцінювачем тиску із зворотнім зв'язком при живленні від вітрогенератора із використанням електронного регулятора навантаження	85
Висновки до розділу 4.....	90
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	92
5.1 Основні елементи системи керування вентилятором	92
5.2 Експериментальне дослідження бездавачевої системи керування вентилятора	99
5.3 Експериментальні дослідження роботи оцінювача технологічних координат насосної установки	115
5.4 Техніко-економічні показники.....	121
Висновки до розділу 5.....	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	129
ДОДАТОК А РОБОЧА ПРОГРАМА ДЛЯ ПЛІС.....	142
ДОДАТОК Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	151
ДОДАТОК В АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

(в алфавітному порядку)

АГ – асинхронний генератор;
АД – асинхронний двигун;
ЕМС – електромеханічна система;
ЕРН – електронний регулятор навантаження;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
МПЖ – машина подвійного живлення;
НМ – нейронна мережа;
НУ – насосна установка;
ПД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;
ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;
ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема;
ПЧ – перетворювач частоти;
РН – регулятор напору;
РП – регулятор продуктивності;
РУ – регулятор напруги;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
ШНМ – штучна нейронна мережа;
 a – опір гідромережі;
 I – модуль струму статора асинхронного двигуна;
 H – напір;
 \hat{H} – оцінене значення напору;
 P – споживана потужність;
 Q – продуктивність;
 \hat{Q} – оцінене значення продуктивності;
 $\hat{\eta}$ – оцінене значення коефіцієнту корисної дії;
 ω – швидкість обертання.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Забезпечення точного та ефективного контролю координат технологічних об'єктів є життєво важливим завданням у сучасних електромеханічних системах автоматичного керування, зокрема в області турбомеханізмів. Однак, нерідко встановлення традиційних датчиків для вимірювання різноманітних параметрів може бути фінансово та технічно не вигідним завданням. Наприклад, в деяких гідравлічних системах, де потрібно виміряти тиск, витрату рідини, обертову швидкість і багато інших координат, кількість датчиків може суттєво збільшити вартість та ускладнити процес встановлення. З метою оптимізації цього процесу та зменшення витрат, широко використовуються різноманітні оцінювачі. Їх використання дозволяє визначити значення певних координат на основі інформації, яка вже виміряна і доступна системі. Одним із сучасних і досить обіцяючих методів технічної реалізації оцінювачів є використання штучних нейронних мереж. Основною їх перевагою є здатність до навчання на основі достатньої кількості вхідних даних. Для їх технічної реалізації можна використовувати низько-середньо рівневі логічні контролери або програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС).

У випадку керування турбомеханізмами, нейронні мережі можуть використовуватися для оцінювання різних координат, таких як напір, продуктивність, механічна потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД), на основі вхідних сигналів, які можуть бути виміряні без великої кількості датчиків. Це робить їх потужним інструментом для ефективного керування, контролю і оптимізації роботи турбомеханізмів у різних галузях застосування.

Саме тому застосування штучних нейронних мереж у системах керування турбомеханізмів є актуальною науково-прикладною задачею для більш точного та ефективного моніторингу та управління цими системами, зменшуючи при цьому витрати на встановлення та обслуговування традиційних датчиків.

Варто зазначити, що сучасні системи генерації електричної енергії відіграють важливу роль у житті суспільства і стали необхідним елементом сучасної інфраструктури. Вони забезпечують електропостачання для різних

галузей промисловості, побутових споживачів, а також для забезпечення роботи важливих інфраструктурних об'єктів. Системи генерації електроенергії можуть використовувати різні джерела енергії, такі як вугілля, природний газ, нафта, вітер, сонце, водні ресурси та інші. Кожен тип джерела енергії має свої переваги і недоліки, і вибір конкретного джерела залежить від численних факторів, включаючи доступні ресурси, економічну ефективність та вплив на довкілля.

Стандартні системи генерації електроенергії можуть бути різного типу, але вони мають загальні елементи, такі як джерела енергії, конвертори енергії, електрогенератори, системи керування та розподілу електроенергії. Вони можуть включати в себе турбіни, двигуни, сонячні панелі, вітрогенератори, акумулятори і багато інших компонентів.

Серед новітніх альтернативних систем для генерації електричної енергії широко застосовуються вітрогенератори, які використовують асинхронні генератори із самозбудженням (АГ). Однією з ключових проблем, яка виникає при роботі таких генераторів, є стабілізація напруги АГ для запобігання можливим відключенням генератора при великих навантаженнях. Задача стабілізації напруги має велике значення і може бути розв'язана різними методами, наприклад використання електронного регулятора навантаження (ERN). Такі технічні рішення дозволяють використовувати надлишкову енергію, що утворюється у результаті живлення активного споживача, на потреби системи водопостачання, наприклад полив, закачування води та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у межах наукової школи «Теорія та практика складних електромеханічних систем автоматичного керування». Частина досліджень виконувалася в рамках міжвузівського співробітництва з Університетом Уорика (Ковентрі, Великобританія) та Університетом прикладних наук Гессена (ТНМ) (Фрідберг, Німеччина).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи турбомеханізмів за рахунок розробки бездавачевої електромеханічної системи автоматичного керування з оцінювачами технологічних координат на основі штучних нейронних мереж в умовах зміни параметрів гідромережі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні основні задачі:

1) Аналіз існуючих сучасних енергоефективних систем керування турбомеханізмами, що живляться від альтернативних джерел енергії, та систем бездавачевого керування з метою обґрунтування необхідності вирішення розглянутої у роботі науково-прикладної задачі.

2) Розробка та опис процедури тренування оцінювачів технологічних координат на основі теорії штучних мереж зі стандартними алгоритмами навчання мереж та при використанні їх модифікованої структури із зворотнім зв'язком для підвищення точності оцінювання.

3) Теоретичне обґрунтування та розроблення системи керування турбомеханізмами, що живляться від альтернативного джерела електричної енергії, а саме вітрогенератора.

4) Розробка електромеханічної системи автоматичного керування турбомеханізмами з модифікованою структурою оцінювача технологічних координат.

5) Дослідження статичних та динамічних характеристик розробленої системи керування в умовах зміни параметрів гідромережі та варіації параметрів джерела механічної енергії.

Об'єктом дослідження є процеси бездавачевого керування електромеханічних систем турбомеханізмів, що живляться від альтернативного джерела електричної енергії.

Предметом дослідження є бездавачеві електромеханічні системи автоматичного керування турбомеханізмами в умовах зміни параметрів гідромережі.

Методи дослідження. Під час вирішення поставлених у роботі задач використовувалася теорія автоматичного керування, теорія електропривода, методи теорії штучних нейронних мереж, методи фізичного та математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1) Розроблено новий метод керування технологічними координатами турбомеханізмів з використанням технологій штучних нейронних мереж, який *вперше* дозволяє побудувати електромеханічну систему автоматичного керування напором або продуктивністю з використанням значень тільки доступних для вимірювання електричних координат.

2) *Вперше* обґрунтовано структуру модифікованого оцінювача технологічних координат турбомеханізмів, який на відміну від побудованих за класичною схемою перцептронів із стандартними алгоритмами навчання, має вбудовані зворотні зв'язки за оціненою технологічною координатою, що дозволяє підвищити точність та швидкодію процесу оцінювання.

3) Встановлено і підтверджено нові властивості електромеханічної системи автоматичного керування турбомеханізмами, які дозволяють здійснювати керування необхідними технологічними координатами без їх безпосереднього вимірювання в умовах невідомих варіацій параметрів гідромережі та при зміні структури самої гідросистеми.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розвитку теоретичної бази для розробки та проєктування замкнених за напором або продуктивністю електромеханічних систем автоматичного керування турбомеханізмами при їх живленні від альтернативних джерел енергії, а також розробці технічних засобів для їх реалізації, які разом формують складові дослідницької платформи. При виконанні дисертаційної роботи отримані наступні практичні результати:

1) Розроблена методика оцінювання технологічних координат турбомеханізмів дозволяє виключити будь-яке втручання у гідромережу, спричинене встановленням або обслуговуванням давачів напорів або

продуктивності. Такий підхід підвищує надійність та зменшує витрати на реалізацію та обслуговування системи водопостачання.

2) Впроваджена в автономну систему генерації електричної енергії електромеханічна система керування турбомеханізмом з оцінювачами технологічних координат на базі штучних нейронних мереж дозволяє перерозподілити надлишкову електричну енергію, утворену у результаті живлення основних активних споживачів, на споживачів системи водопостачання для задоволення потреб побутового характеру.

3) Отримані результати можуть бути використані під час проєктування бездавачевих систем автоматичного керування будь-якими турбомеханізмами, зокрема насосами, вентиляторами та компресорами.

4) Створено пакет моделюючих програм для дослідження бездавачевої системи керування турбомеханізмом, що живиться від вітрогенератора, в процесі стабілізації напору мережі на заданому рівні при зміні гідроопору в межах типового добового циклу споживання води; створено уніфіковані моделі розімкнених та замкнених систем керування турбомеханізмів для створення та навчання оцінювачів технологічних координат в умовах стабілізації однієї з технологічних координат.

5) Результати роботи впроваджено в ДП «Сіменс Україна» (м. Київ) та в освітній процес на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу КПІ ім. Ігоря Сікорського для вдосконалення дисциплін «Електромеханічні системи типових технологічних застосувань» та «Керування та автоматизація технічних систем».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: в роботах [1, 3, 4, 5, 8] розроблено та проведено навчання нейронних мереж для реалізації оцінювачів коефіцієнту корисної дії одноагрегатних систем водопостачання; в роботах [1, 7] розроблено та досліджено оцінювачі технологічних координат систем керування турбомеханізмом, що живиться від електромережі або від вітрогенератора; в

роботах [4, 5] проведено експериментальне тестування розроблених оцінювачів коефіцієнту корисної дії; у роботах [2, 3, 7] розроблено систему керування турбомеханізмом, що живиться від альтернативного джерела електричної енергії, а саме вітрогенератора; в роботах [6, 8, 9] проведено дослідження багатоагрегатних систем водопостачання; в роботах [2, 3, 7, 8, 9] проведено дослідження рівня стабілізації тиску гідромережі в умовах варіації гідравлічного опору в системах водопостачання; в роботах [1] - [10] проведено дослідження розроблених систем керування засобами математичного моделювання та/або експериментального тестування.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати і висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: IEEE International Conference «Modern Electrical and Energy Systems» MEES (Kremenchuk, 2019), IEEE «Energy Smart Systems» ESS (Kyiv, 2020), Workshop at the School of Engineering, University of Warwick (Coventry, UK, 2019), «Проблеми сучасної електротехніки» ПСЕ (Київ, 2020, 2022), «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ (Вінниця, 2017), «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації» ESMO (Кременчук, 2018), «Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики» СПЕА (Київ, 2017 – 2019), «Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту» (Харків, 2021), «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2021), «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 2021), конкурс студентських наукових робіт «Електротехніка та електромеханіка» ЕтЕ (Кам'янське, 2019).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі змісту, переліку умовних позначень та скорочень, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 115 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 155 сторінок, у тому числі 134 сторінок основного тексту, 66 рисунків і 15 таблиць.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Приблизно 25% загального обсягу виробленої електроенергії використовується електроприводами, спрямованими на обслуговування турбомеханізмів, які включають насоси, вентилятори, компресори, повітродувки, димососи та інші пристрої [1]. Ці електроприводи мають особливості, такі як квадратична залежність моменту двигуна від швидкості обертання та довготривалість роботи без потреби в реверсі [2]. Застосування асинхронних і синхронних двигунів ускладнене умовами пуску, і тому вивчення перехідних процесів електроприводів турбомеханізмів виявляється актуальним.

Турбомеханізми, що використовуються в масштабному виробництві, визначаються як машини широкого застосування. Технічна вдосконаленість та рентабельність електроприводів турбомеханізмів визначають ефективність споживання електроенергії в економіці. При оцінці рентабельності електроприводу, окрім його мінімальних витрат та високих параметрів потужності, важливими є його регульовальні якості. Висока рентабельність електроприводу дозволяє турбомеханізмам виконувати необхідні технологічні задачі з мінімальним споживанням енергії [3].

Насосні установки (НУ) складаються з насосного агрегату та додаткового обладнання, яке змонтовано за певною схемою для забезпечення їхньої роботи. Сучасні проблеми енергоефективності насосів та НУ стають надзвичайно важливими, оскільки з кожним днем водні ресурси та якість води зменшуються, а забруднення стає серйозною проблемою [4].

Насоси, які виконують різноманітні функції, є необхідною складовою обладнання насосних станцій та входять у склад водопостачальних систем. Водопостачання, що передбачає забезпечення різноманітних споживачів водою, вимагає комплексу інженерних споруд, що утворюють систему водопостачання або водопровід. Одним із ключових аспектів є велике споживання енергії насосними установками, які є основними та необхідними складовими цих комплексів.

1.1 Аналіз сучасних рішень бездавачевих систем керування турбомеханізмами

Процес визначення та спостереження за технологічними координатами турбомеханізмів є невід'ємною частиною проектування систем автоматичного керування ними, однак датчики, які надають інформацію системі, є дорогими або доступ для їх встановлення обмежений конструкцією гідравлічної мережі. Інші параметри, такі як продуктивність насоса, неможливо виміряти безпосередньо, можливе лише опосередковане визначення за допомогою певної кількості давачів. У роботі [5] автори пропонують систему з двома датчиками температури і тиску на вході і двома на виході насоса для розрахунку його ефективності. Для підвищення енергоефективності системи водопостачання можна використовувати метод прогнозування [6], [7]. Суть цього методу полягає у визначенні балансу продуктивності подачі та споживання води, але існує багато факторів, які впливають на точність прогнозування.

Метод прогнозування також може бути використаний для визначення оптимальної кількості насосів у системі. Багатонасосні системи є одним з основних способів підвищення енергоефективності. Багатонасосні системи можуть бути як одноприводними, так і багатоприводними [8]. Необхідна кількість робочих насосів може бути визначена на основі моніторингу розташування робочої точки [9]. З іншого боку, можна використовувати оптимальну систему керування напором багатонасосної установки на основі аналітичних характеристик та експериментальних графіків розподілу ККД, алгоритм керування якої описано в роботі [10]. У статті [11] запропоновано оптимізацію керування продуктивністю багатонасосної системи шляхом прогнозування майбутнього стану системи. Зменшення кількості насосів та їх запуск або зупинка підвищує енергоефективність.

Іншим перспективним шляхом є застосування теорії штучного інтелекту для отримання невідомих координат [12]. Такий спостерігач на основі штучних нейронних мереж, який оперує вже відомими виміряними координатами, та дозволяє спостерігати за значеннями інших координат, таких як тиск,

продуктивність насоса, механічна потужність та інші, розроблено в роботі [13]. Авторами статті [14] запропоновано теплову насосну систему прямого нагрівання з ідентифікацією в реальному часі та принципом саморегулювання, яка має високі показники спостереження за заданими величинами та здатність відхилятися від збурень. В роботі [15] розроблено багат шарову систему керування насосом зі спостерігачем ковзного режиму на основі нейронних мереж режиму руху та досліджено робастність системи.

Робота [16] присвячена розробці нечіткої системи для регулювання тиску в системі водопостачання з трьома можливими конфігураціями. Аналізувалася енергоефективність для кожної конфігурації з урахуванням профілю попиту. Для експерименту була використана система водопостачання, розташована у Лабораторії енергоефективності та гідравліки у Федеральному університеті Парайби. Штучний інтелект допомагає у розвитку нових форм керування, особливо в нелінійних системах, і нечітке керування має переваги порівняно з класичними стратегіями. Водопровідні мережі є складними системами з різними вимогами до роботи, такими як безперебійність, вирівнювання потужності та регулювання тиску. Розроблена нейромережева система регулювання тиску може бути використана для оптимізації роботи систем водопостачання з різними конфігураціями. Функціональна схема розробленого регулятора, метою якого є формування керуючих впливів для зміни значення динамічної характеристики тиску на виході системи, зображена на рис. 1.1. Керування здійснюється із застосуванням нейромережі побудованої за типом SIMO (один вхід - множинний вихід), де P – керуюча змінна (тиск); SP – поточна похибка, що є опорним значенням тиску $e = SP - P$; De – зміна похибки, задана $De = e[k] - e[k-1]$; Df – приріст або декремент сигналу керування (швидкість обертання насосного агрегату); $f[k-1]$ – останнє значення частоти, що використовується для керування; $f[k]$ – оновлене значення частоти інвертора, яке використовується як змінна керування двигуна насосу, $ДН$ – датчик напору. У цій схемі використано обмежувач, щоб запобігти роботі насосу за межами її робочого діапазону.

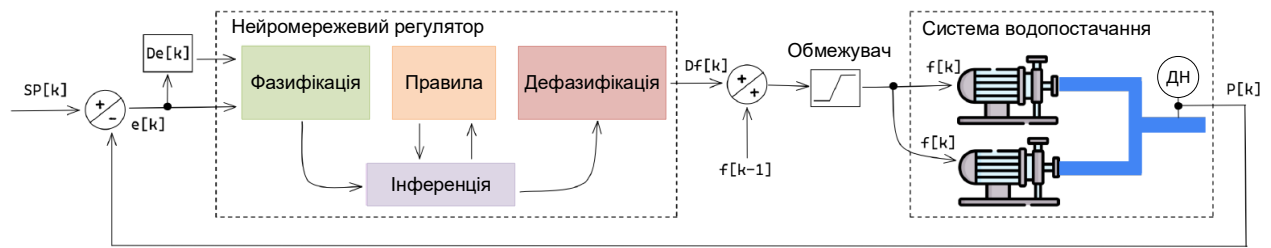


Рисунок 1.1 – Досліджена система нечіткого регулювання тиску

Обслуговування та надійність водопостачання залежать від контролю гідравлічного тиску. Проблеми з регулюванням гідравлічного тиску виникають через зміни в системі водопостачання та шуми і викиди в датчиках. Ці проблеми призводять до нестабільності керування насосними станціями. Авторами статті [17] розглядається методологія непрямого адаптивного керування за еталонною моделлю для керування системами водопостачання. Критерієм оцінювання і адаптації регулятора є максимальна коректронія. Експериментальні результати, отримані на експериментальній стендовій установці, показали, що максимальна похибка відстеження становила 15% при зміні навантаження, відсоток перерегулювання - менше 5%, а похибка в усталеному режимі - менше 2%, і система керування стала стійкою до шуму і викидів. Система керування стала стійкою до шуму і викидів. Методологія зменшує середню похибку і стандартне відхилення більш ніж на 150% у порівнянні з критерієм середньоквадратичної похибки. Запропонована методологія поліпшує надійність та ефективність системи керування насосами.

Також використовуються інтелектуальні системи з метою оптимізації енергетичних втрат у водопостачальній галузі. Ці системи дозволяють регулювати напір, враховуючи оцінку активності споживачів. Оцінку можна проводити індиректно, використовуючи вимірювання споживаної електроенергії будинками, мікрорайонами та іншими параметрами [18]. Одночасно вводиться певне запізнення, яке враховує затримку між початком споживання електроенергії та використанням води. Це поєднання систем водопостачання та електропостачання зменшує ймовірність непередбачуваності водопостачання та збільшує ризик конфліктів між водопостачальними та електропостачальними

підприємствами. У промислових системах водопостачання активність споживачів оцінюється на основі стану локальних запірних арматур, обладнаних сервоприводами [19].

Штучні нейронні мережі також широко застосовуються в системах керування, де використовується сигнал датчика витрат, зокрема в системах стабілізації продуктивності [20], [21].

Широке використання отримало інтелектуальне керування насосами у сфері оцінки. У дослідженні [22] детально аналізується динаміка гідросистеми, яка є нелінійною та складається з відцентрового насоса, акумулятора напору, навантаження та розробленого контролера лінійного зв'язку. Додатково, використовується розширений фільтр Калмана, який враховує гідравлічну динаміку в процесі оцінки та дозволяє уникнути необхідності вимірювання продуктивності та напору. Таким чином, застосована комбінована схема, з'єднана із приводом із змінною швидкістю. Функціональність цього алгоритму підтверджена експериментально.

В інтелектуальних системах [23] часто застосовується ігровий підхід. Таким чином, контролер в системі може дискретно змінювати оберти насосу (встановлювати правила гри) і оцінювати реакцію споживачів. Шляхом порівняння реального обсягу споживаної води з теоретичним, який міг би виникнути внаслідок зміни обертів, оберти пропорційно зменшуються або збільшуються. У випадку відсутності реакції споживачів на зміну обертів (продуктивності), швидкість поступово зменшується на фіксовану величину. Таким чином, відбувається автоматичне визначення мінімально-достатньої швидкості насосу для задоволення потреб споживачів.

У гібридних системах керування турбомеханізмами [24] пропонується використання контролера з адаптивним підсилювачем. Архітектура контролера включає два цикли. Внутрішній цикл виконує функції матриці керування зворотним зв'язком статичного стану, ґрунтуючись на синтезі Н-нескінченності. Основне завдання цього циклу – відключення системи та компенсація відхилень від зовнішніх збурень. Зовнішній цикл реалізовано через серію ПД-регуляторів,

що слідкують за номінальними показниками. Адаптивний підсилювач відповідає за оцінку невідомих параметрів та їх компенсацію. Моделювання підтверджує, що використання адаптивного підсилювача дозволяє досягти відносно великих витрат для систем подібного типу. Запропонована конфігурація механізму керування змішаною структурою наведена на рис. 1.2.

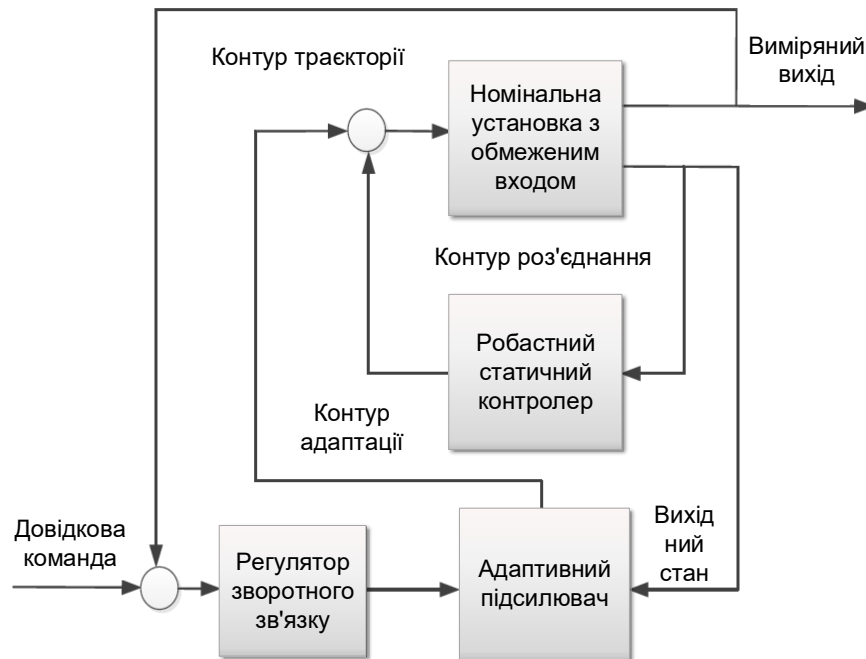


Рисунок 1.2 – Досліджена конфігурація архітектури керування

Нейронні мережі можуть бути застосовані для ідентифікації та оптимізації систем теплових насосів, як описано у дослідженні [25]. Шляхом поєднання моделі онлайн ідентифікації та принципів саморегулювання, автори визначають закон оптимального керування для теплового насоса в системі прямого нагріву. В статті представлені результати моделювання в середовищі MATLAB для підтвердження ефективності такого закону. Виявлено, що система керування тепловим насосом, розроблена на основі нейронної мережі, володіє високою точністю відтворення заданих значень та здатністю компенсувати відхилення від перешкод. У порівнянні з традиційними методами керування, запропонований алгоритм самоналаштування суттєво покращує продуктивність теплового насоса.

інсуліновий насос володіє можливістю точного дозування інсуліну за допомогою крокового двигуна. Пристрій має інтерфейс відображення, підтримує китайську та англійські мови і пропонує два режими інфузії: базальний і попередній болюс. Базальний режим забезпечує неперервну інфузію інсуліну протягом 24 годин з високою точністю 0,05 В/год, і його швидкість може бути налаштована програмним забезпеченням. Попередній болюс ґрунтується на оцінці рівня інсуліну, дозволяючи ефективно уникати гіпер- або гіпоглікемії. Використання інтелектуального інсулінового насоса дозволяє пацієнтам з діабетом безболісно, ефективно та зручно контролювати рівень глюкози в крові, підвищуючи тим самим їхню якість життя.

У зв'язку з тим, що регулювання швидкості обертання насоса є енергоефективним методом управління витратами на виході насосу, частотні перетворювачі (також відомі як частотно-регульовані приводи) стають стандартними в насосних системах. Крім управління обсягом потоку, частотні перетворювачі можуть служити як засіб моніторингу для насосних установок, оскільки вони можуть оцінювати робочий стан насосу без додаткових датчиків. Це можливо за допомогою моделей методів оцінки [28]-[31], які забезпечують оцінки витрат Q , напору H та коефіцієнта корисної дії η , використовуючи існуючі оцінки швидкості обертання валу привідного двигуна насоса та потужності на валу двигуна. У практиці такі системи можуть застосовуватися для виявлення кавітаційних процесів та моніторингу енергоспоживання системи.

Один із таких методів - це метод оцінки роботи насосу, заснований на Q - P -кривих [28]-[30]. Цей метод дозволяє оцінити кутову швидкість двигуна та потужність на його валу за допомогою частотного перетворювача. Він особливо ефективний для радіальних відцентрових насосів, де потужність на валу та швидкість потоку пропорційні (потужність на валу зростає разом із збільшенням потоку). Цей метод використовує природні та штучні Q - P та Q - H характеристики для оцінки витрат Q і напору H . Після вимірювання потужності на валу за кривими Q - P , витрати Q визначаються за допомогою інтерполяційного методу.

Потім, враховуючи витрати, визначається повний напір H за допомогою рівняння Бернуллі, оскільки тиск і витрати взаємозалежні.

Другий метод - це метод ідентифікації робочих характеристик через випробування пуску насосної установки [30]. За умови наявності статичного напорів в системі можуть існувати два робочих стани: достатній кутовий обертання (напір) для забезпечення потоку чи недостатній. У випадку радіальних насосів ці два робочі стани впливають на потужність на валу двигуна та обертовий момент насоса. Ці дані можуть бути використані для ідентифікації необхідної швидкості обертання насосу для подолання статичного напорів.

Так, метод випробування пуском (start-up test method) [32] може бути корисним під час запуску системи. У випадку, коли статичний напір визначає режим роботи насосу, такий метод використовується для визначення необхідної швидкості обертання насосу. Коли насос працює в режимі відсічки напорів, що означає, що швидкість насосу дорівнює нулю, а рідина рециркулює між насосом і випускною трубою, спожита потужність на валу насоса повинна відповідати відомому значенню споживчої потужності при нульовій швидкості. Якщо споживча потужність насосу відома при одній швидкості, то можна апроксимувати її для інших швидкостей за допомогою загального закону. Якщо швидкість обертання насосу достатня для подолання статичного напорів та забезпечення витрат, результуюча робоча точка стає початком характеристики процесу. Залежно від процесу та крутизни QR-характеристики насосу, споживча потужність насосу почне відрізнятися від випадку, коли швидкість дорівнює нулю. Це дозволяє визначити мінімальну потрібну швидкість обертання насосу для подолання статичного напорів.

У сьогоденні багато підприємств та корпорацій випускають власні рішення для систем керування насоси, які вже оснащені вбудованими частотнокерованими перетворювачами, що включають алгоритми управління та попередньо налаштовані режими роботи із використанням технологій штучного інтелекту. Розглянемо деякі з цих інновацій.

Корпорація ABB вивела на ринок інтелектуальну систему керування насосом (IPC), розроблену як програмне забезпечення для промислових приводів ABB [33]-[34]. У цьому рішенні ключовою контрольованою характеристикою є енергетична ефективність, в той час як рівень, тиск або витрати функціонують як вторинні параметри. Ця інтелектуальна система здатна ефективно зберігати енергію, скорочувати періоди неактивності насосу, попереджувати заїдання та блокування водопровідної магістралі. Реалізація системи включає в себе ключові функції, призначені для задоволення потреб споживачів, і вона ефективно працює без необхідності додаткових зовнішніх компонентів. Особливість програмного забезпечення полягає в наявності режиму контролю рівня, який забезпечує можливість оптимізувати енергетичну ефективність для паралельно працюючих насосних агрегатів. Мінімізація споживання енергії здійснюється шляхом управління насосами при їхній максимальній, але достатній швидкості, протягом такого часу, як це технічно можливо. Застосування цього методу керування дозволяє підтримувати рівень енергозбереження на високому рівні, від 10 до 50%.

Корпорація Dufoss представила нову технологію в управлінні насосами за допомогою VLT AQUA Drive [35], яка реалізує бездавачеве керування напором чи продуктивністю насосу. Це інженерне рішення ефективно вирішує завдання, оскільки воно усуває потребу у придбанні, налаштуванні та монтажі датчиків напору чи продуктивності. Система виявляється надійною, оскільки при відсутності додаткових компонентів або з'єднань може вимкнутись в разі можливих відмов у їхній роботі.

Австрійська компанія Pumpenfabrik Ernst Vogel GmbH також внесла вагомий внесок у розвиток бездатчикового управління, розробивши систему для відцентрових насосів, відому як Гідровар [36]. В цій інноваційній системі використовується високоточне вимірювання потужності, що заміщає необґрунтовані витрати на придбання та встановлення дорогих датчиків напору. Гідровар дозволяє ефективно керувати якістю продуктивності, так і рівнем напору, залежно від конкретних вимог системи чи потреб споживачів. При

нульових витратах енергії система автоматично вимикає насоси, забезпечуючи ефективне управління певною кількістю насосів без потреби в додатковому логічному контролері. Також враховано великі втрати на тертя при високому рівні продуктивності. Застосування таких передових систем при регулюванні швидкості насосів та оптимізації відповідно до власних потреб може призвести до значного збереження енергії, досягаючи показників до 75%.

Корпорація Grundfoss пропонує продукт - інтелектуальний насос IP Magna [37], розроблений спеціально для систем водопостачання та опалення. Цей насос має функції автоадаптації, яка автоматично адаптує параметри для оптимальної роботи, використовуючи частотнокерований привод для забезпечення ефективної функції енергозбереження та задоволення вимог споживачів. Важливим аспектом є те, що не потрібно заздалегідь знаходити та встановлювати параметри системи, оскільки ця система інтелектуально самодостатня.

Allen-Bradley розробила серію регуляторів PowerFlex, кожен з яких володіє унікальними особливостями і надає можливість налаштовувати необхідні параметри при управлінні [38]. Наприклад, для досягнення більш точного контролю обертів електродвигунів використовують частотний перетворювач PowerFlex 40, який включає функцію бездатчикового векторного керування. Ця характеристика відрізняє PowerFlex 40 від приводів серії PowerFlex 4. Похибка у відпрацюванні заданої швидкості не перевищує 1% в діапазоні регулювання 60:1. За рахунок вбудованих логічних операцій, таймера, лічильника і ПІД-регулятора частотний перетворювач PowerFlex 40 може виконувати різні операції та функції логічного контролера. Особливістю PowerFlex 4M є великі функціональні можливості при компактних розмірах. Вони вже включають такі функції, як автоматичне повторне включення, автопідхват, ІR-компенсація (налаштування необхідного профілю кривої "напруга-частота" для ефективної роботи з мінімальним струмом споживання) та безшумна робота приводу.

Компанія Siemens пропонує вдосконалені ультразвукові регулятори для програмного управління функціонуванням насосів у системах водопостачання [39]-[40]. Передбачається, що кожна насосна станція заздалегідь вимагає

наявності системи вимірювання рівня, програмованого логічного контролера та дистанційного пульта керування для виконання вимірів на відстані. Вдосконалений ультразвуковий регулятор усуває необхідність у таких системах, оскільки надає всі функціональні можливості для управління насосами, збору та обробці даних і забезпечення комунікації в усій гідросистемі. Регулятор також здатен зменшувати енергетичні витрати за допомогою таких стратегій управління насосом, як моніторинг тенденцій зміни витрат для ефективного управління, відстеження режимів роботи насосів для вилучення непотрібних насосів у системі та моніторинг тенденцій у водопостачанні для енергоефективного управління.

1.2 Аналіз сучасних рішень керування електромеханічними системами турбомеханізмів із живленням від альтернативного джерела електричної енергії

Існуючі способи живлення насосних установок, як керованих, так і некерованих, можна подати у вигляді наступної схеми рис. 1.4 [41]:

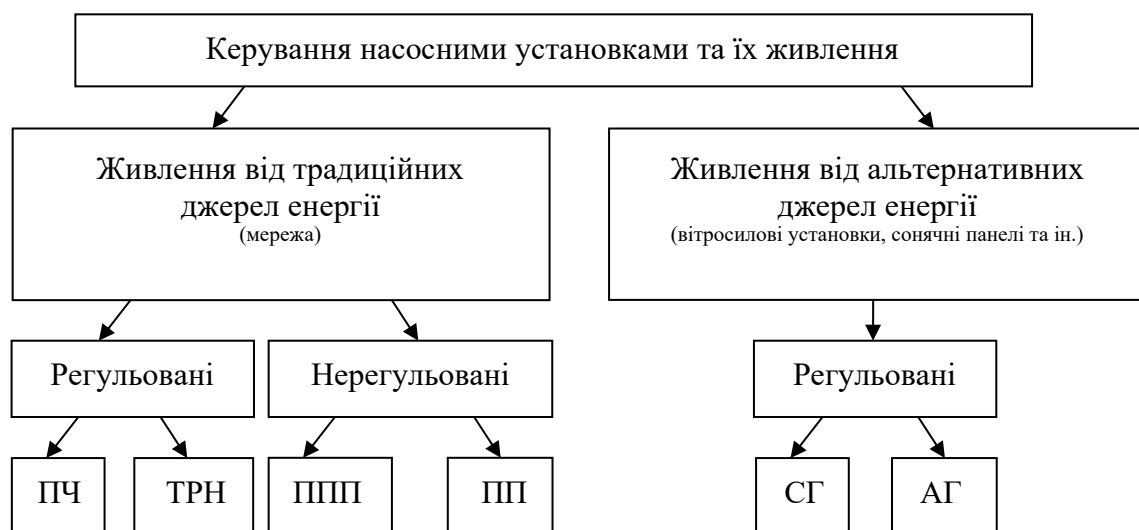


Рисунок 1.4 – Розподіл способів живлення насосних установок

На рис. 1.4 введені наступні позначення: ПЧ – перетворювач частоти; ТРН – тиристорний регулятор напруги; ППП – пристрій плавного пуску; ПП – прямий пуск; СГ – синхронний генератор; АГ – асинхронний генератор.

У системах регульованого електроприводу, які живляться від мережі, для реалізації систем стабілізації тиску або продуктивності використовується перетворювач частоти. Тиристорний регулятор напруги забезпечує регулювання одного насосного агрегату в певних межах, його пуск, а також почерговий пуск інших електроприводів, які працюють паралельно з регульованим (незалежно від того, якою технікою вони оснащені - синхронною чи асинхронною). Такі системи широко використовуються в житлових комплексах і на підприємствах, оскільки основними перевагами таких електроприводів є їх простота, надійність, легкість автоматизації в загальній технологічній схемі [42].

Нерегульовані системи електроприводу з пристроями плавного пуску використовуються для уникнення гідроударів в мережі при запуску електродвигуна. У разі несправності основного агрегату найчастіше нерегульований електропривод приєднується до системи водопостачання, яка живиться безпосередньо від мережі.

Сьогодні використання альтернативної енергетики стає все більш популярним і доцільним, оскільки дозволяє виробляти електроенергію економічно та екологічно безпечно. Дослідження вітроенергетики почали вдосконалюватися протягом останнього століття, в основному через нафтову кризу та забруднення навколишнього середовища [43]. Зростаючий інтерес до використання вітрових турбін і швидкий розвиток силової електроніки дозволяють виробникам знаходити найбільш доступні і недорогі технології для їх реалізації.

Вітрові турбіни також використовуються і для перекачування води. Механічне з'єднання вітрових турбін з системами водопостачання є найбільш поширеним методом перекачування води на сільськогосподарських орних землях і для задоволення потреб тваринництва на фермах [44]. При цьому насос з'єднується з вітровою турбіною через мотор-генераторне з'єднання. Оскільки з'єднання електричне, вітрогенератор може бути розташований в оптимальній зоні, де можна отримати максимальну енергію вітру, в той час як насос стоїть біля води або резервуара з водою [45].

Як альтернатива для управління системами водопостачання, що працюють за використанням відновлювальних джерелах енергії, таких як вітроустановки, використовуються як синхронні, так і асинхронні вітрогенератори. Синхронні генератори можуть працювати на постійній або змінній швидкості. Використання генератора зі змінною швидкістю забезпечує енергоефективність більш ефективно, ніж турбіни з постійною швидкістю [46].

Існує дві основні конфігурації систем водопостачання з використанням вітрогенераторів зі змінною швидкістю. Одна з них - це пряме з'єднання генератора зі статором двигуна (рис. 1.5). У цьому випадку швидкість обох машин підтримується постійною. Основним недоліком є те, що компоненти повинні бути підібрані з такими параметрами, щоб вони були задовільними в кожному конкретному випадку. Це пов'язано з тим, що для підвищення ефективності системи необхідно, щоб характеристичні криві навантаження, що генеруються насосом при різних швидкостях, збігалися з оптимальною кривою крутного моменту вітрогенератора. Друга конфігурація - два інвертори, які дозволяють роз'єднати насос і турбіну (рис. 1.6). У цьому випадку немає необхідності в точному узгодженні параметрів насоса і турбіни, але інвертори повинні мати достатню потужність для роботи насоса на номінальній потужності, що значно підвищує вартість системи [44].

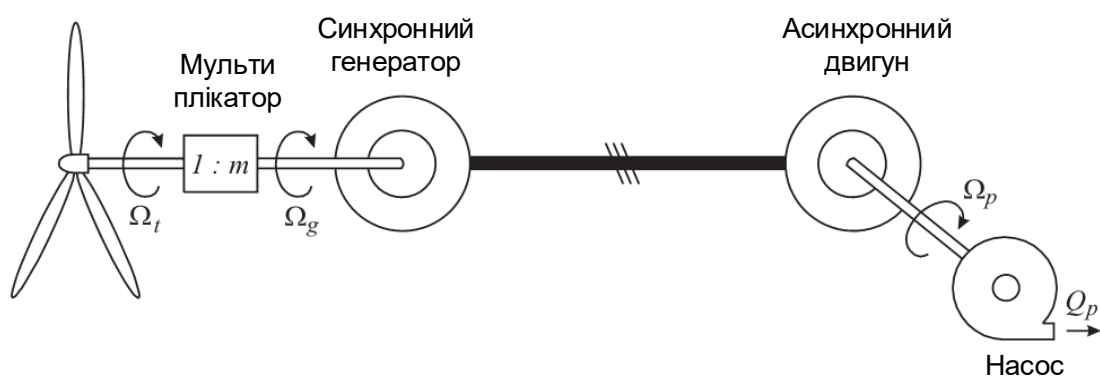


Рисунок 1.5 – Стандартна насосна системи із прямим електричним з'єднанням між статорами зі зв'язаними швидкостями

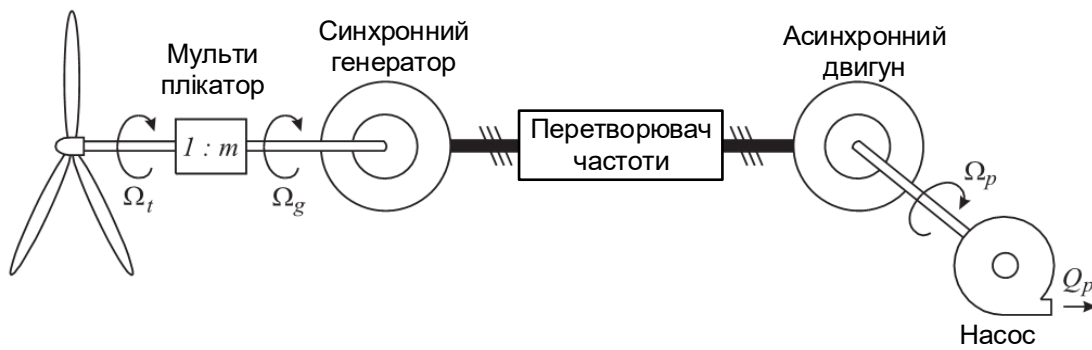


Рисунок 1.6 – Стандартна насосна система із з'єднанням через перетворювачі з роз'єднаними швидкостями

Останнім часом великий інтерес викликають системи з використанням асинхронних генераторів, особливо машини подвійного живлення (МПЖ). Машини подвійного живлення є альтернативою роторним машинам з постійними магнітами в системах перетворення енергії вітру. Завдяки можливості зменшення або навіть вилучення мультиплікатора, їх використання в системах з автономними вітрогенераторами підвищує надійність і рівень техніко-економічних показників електромеханічної системи в цілому і знижує експлуатаційні витрати, що має велике значення [47].

Крім того, певний інтерес викликає система керування насосом з використанням дво полюсного асинхронного генератора [48]. Допоміжне керування здійснюється через статор машини подвійного живлення за допомогою перетворювача частоти АС/АС. Таке рішення дозволяє відокремити вітрогенератор від насоса, що значно зменшує потік електроенергії через перетворювач. Запропонована конфігурація дозволяє зменшити необхідні номінальні параметри перетворювача, при цьому знизити вартість системи, підвищивши її продуктивність. Стратегія регулювання крутного моменту шляхом зміни частоти обертання допоміжного статора дозволяє працювати при змінних частотах обертання турбіни. Для найкращої роботи системи при номінальних значеннях обох машин використано частотний закон регулювання U/f в ланці змінного струму.

Гідроакумуючі системи загалом використовуються у відновлюваній енергетиці на високих рівнях потужності, але також є можливість їх використання для інтеграції малих джерел відновлювальної енергії, зокрема енергії вітру. У статті [49] розглянуто керування для приводу насоса гідроакумуючої системи з метою досягнення максимальної потужності для перекачування та підвищення ККД насоса. Запропоновано керування асинхронним двигуном, що базується на кубічній залежності між напругою та частотою для асинхронної машини в гідроакумуючих системах. Порівняно це керування з лінійним класичним керуванням U/f з метою виявити переваги запропонованого методу. Наведено експериментальні підтвердження запропонованого методу керування, яке підкреслює його переваги. Застосування відповідного методу керування покращує ефективність гідроакумуючої системи.

Інший варіант вирішення проблеми керування системами водопостачання з використанням вітрогенератора запропоновано авторами роботи [50]. Керування відцентровим насосом, який механічно пов'язаний з асинхронним двигуном, здійснюється за допомогою вітроустановки з асинхронним генератором подвійного живлення. Допоміжне живлення машини подвійного живлення також здійснюється через статор генератора, змінюючи частоту і напругу його збудження за допомогою двох перетворювачів частоти DC/AC і AC/DC. Наявність двох перетворювачів в системі є однією з привабливих особливостей системи, оскільки є можливість включення додаткового джерела енергії з інших видів альтернативних джерел, таких як сонячна енергія, які не потребують додаткового управління. Шина постійного струму з'єднує основний і додатковий статор через два перетворювачі, так що насос може живитися від обох джерел. Закон регулювання частоти U/f дозволяє підтримувати оптимальний крутний момент турбіни. Функціональна схема системи представлено на рис. 1.7.

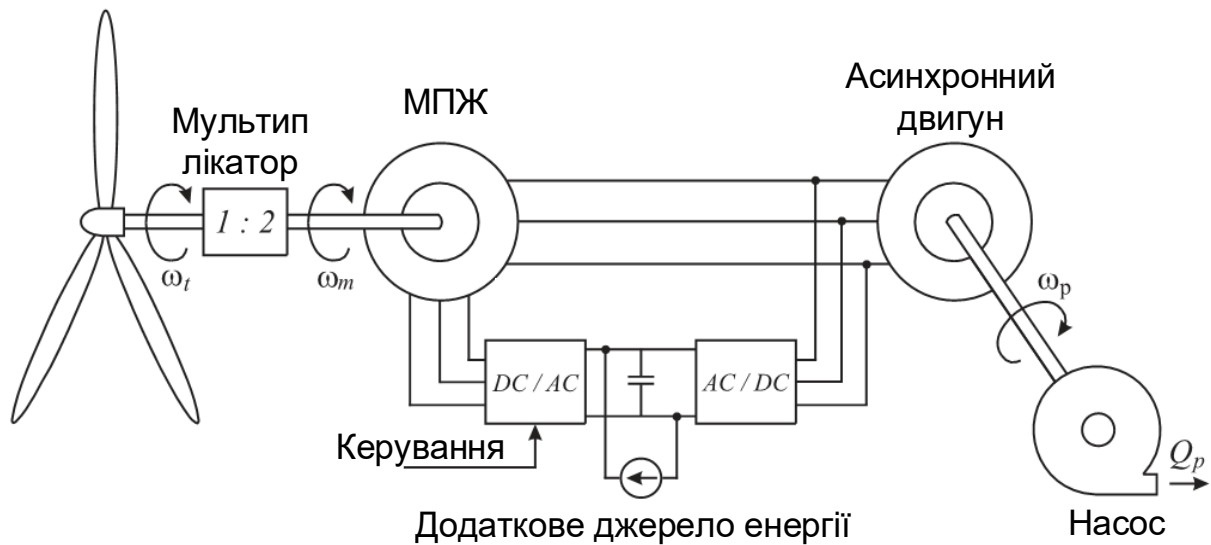


Рисунок 1.7 – Функціональна схема запропонованої системи

Інтеграція вітрової енергії в електромережу може спричинити проблеми зі стабільністю. У статті [51] розглядаються рішення для уникнення таких ситуацій, а також методи зберігання енергії, придатні для балансування енергії між вітрогенератором і мережею. У цій статті представлено автономну систему акумулювання енергії вітрової турбіни. Основна увага приділяється підвищенню ефективності цієї системи, яка є невеликою при низьких рівнях потужності. Приводна моторно-насосна група системи зберігання є ключовим моментом, наведеним в цій статті для підвищення ефективності. Представлено два методи керування, експериментально реалізовані для асинхронної машини, а порівняння ефективності системи підкреслює покращення запропонованого методу керування.

Не менш цікавим рішенням керування насосними установками є використання сонячних батарей як джерела альтернативної енергії. У роботі [52] наведена система водопостачання 6-поверхового будинку, що складається з фотоелектричних панелей, контролера або інвертора насоса, реле тиску, резервуара і насоса змінного струму. Протягом дня модуль фотоелектричних панелей виробляє постійний струм, який за допомогою інтелектуального інвертора перетворюється на змінний. Кількість води, що закачується в

резервуар, повністю залежить від кількості сонячного світла, що потрапляє на сонячні панелі, і типу насоса. Наприклад, в оптимальний період сонячного світла (з пізнього ранку до пізнього вечора в яскраві сонячні дні) насос працює на 100% потужності або на максимальному потоці води. Однак вранці і пізно ввечері в умовах низької освітленості продуктивність насоса може знижуватися на 25% і більше, що є основним недоліком системи.

Автономні фотоелектричні насосні системи постачання води є поширеними, особливо в сільських місцевостях, де відсутність доступу до електричної мережі компенсується значною інсоляцією. Такі системи використовують сонячну енергію, зібрану сонячними батареями, як джерело енергії. Однак, вони мають високий рівень конверсії, який залежить від погодних умов, таких як інсоляція і температура, а також напруги на навантаженні [53]-[56]. Під час експлуатації фотоелектричних систем ефективність їх роботи і кількість виробленої електроенергії може змінюватися внаслідок змін погодних умов. Найвищий рівень ефективності досягається в околі точки максимальної потужності. Для досягнення оптимальної роботи застосовуються різноманітні методи та алгоритми керування, іноді використовують контролери слідування. Серед основних методів можна виділити метод точки максимальної потужності (MPPT), метод штучного інтелекту (з використанням Fuzzy Logic контролерів «FLCS») та метод використання нейромереж [57]. Кожен із цих методів має свої обмеження, і їх застосування ефективно лише при певних умовах навколишнього середовища. Для впровадження фотоелектричних насосних систем часто використовується векторне керування електроприводом.

У статті [58] описується сонячна фотоелектрична система, яка використовується для насосної системи з метою отримання максимальної вигоди від сонячного джерела, а також забезпечує плавний пуск безщіткового двигуна постійного струму. Модель призначена для дослідження різноманітних параметрів альтернативного впливу на фотоелектричний масив у поєднанні з робочою температурою та рівнем сонячного випромінювання. Швидкість безщіткового двигуна постійного струму регулюється через інвертор. Інвертор

регулюється за допомогою перемикання основної частоти, що дозволяє уникнути втрат, пов'язаних з високочастотним перемиканням, і підвищити ефективність запропонованої системи.

У дослідницькій роботі [59] запропоновано використання автоматизованої системи перекачування води на основі сонячної енергії як альтернативи використанню викопного палива. Ця система включає в себе давачі вологості, які активуються лише тоді, коли рівень вологості ґрунту опускається нижче певного рівня. Серцем цієї системи є інтелектуальна плата, яка керує всіма процесами. Дослідження було проведене в селі Сірувані в Індії, де більшість сімей займається сільським господарством, але вони стикаються з високими витратами на перекачування води. Результати дослідження свідчать про те, що впровадження автоматизованої системи на основі сонячної енергії буде економічно вигідним для селян, а також допоможе зберегти воду і зменшити шкоду для навколишнього середовища.

Фермери стикаються з труднощами при поливі своїх посівів під час посушливого сезону в різних країнах світу, наприклад Індії. Вони змушені піднімати воду з колодязів, що є не ефективним та виснажливим процесом. Багато фермерів не можуть використовувати водяні насоси через віддаленість від джерела електричної енергії. Однак, сонячні та вітрові насоси можуть стати альтернативою, дозволяючи використовувати природні ресурси для подачі води на поля. Авторами [60] було проведено дослідження для порівняння ефективності використання акумуляторного джерела енергії із сонячними та вітровими насосами. При повному заряді акумулятора, об'єм води, отриманий за допомогою насоса, становить 4590 л, в той час як водяний насос з використанням акумулятора працює цілий день та ніч, а об'єм води, отриманий, становить 10710 л. Звільнені від обмежень віддаленості та доступу до електроенергії, фермери можуть використовувати сонячні та вітрові насоси для зрошення своїх угідь, що приведе до збільшення продуктивності та ефективності сільськогосподарського виробництва.

Висновки до розділу 1

Аналітичний огляд показав, що сучасні методи реалізації бездавачевих систем керування, зокрема використання штучних нейронних мереж, представляють собою перспективний підхід. Здатність цих мереж до навчання на основі обширних вхідних даних робить їх ефективним інструментом для оцінювання координат турбомеханізмів. Використання нейронних мереж для оцінювання координат, таких як напір, продуктивність, механічна потужність і ККД, на основі вхідних сигналів, може зменшити потребу в багаточисленних датчиках, встановлення яких призводить до суттєвих фінансових та технічних труднощів. Це стає ключовим фактором для ефективного керування, контролю та оптимізації турбомеханізмів у різних сферах їх використання. Електромеханічні системи турбомеханізмів стандартно живляться від мережі, проте, із розвитком альтернативних джерел, постає питання щодо використання їх у якості систем генерації електричної енергії для систем водопостачання. Стандартні системи генерації електроенергії можуть бути різного типу, але вони мають загальні елементи, такі як джерела енергії, конвертори енергії, електрогенератори, системи керування та розподілу електроенергії. Вони можуть включати в себе турбіни, двигуни, сонячні панелі, вітрогенератори, акумулятори і багато інших компонентів. Серед новітніх альтернативних систем для генерації електричної енергії стають все більш популярними вітрогенератори, які використовують асинхронні генератори (АГ).

Отже, підвищення ефективності роботи турбомеханізмів за рахунок розробки бездавачевої електромеханічної системи автоматичного керування з оцінювачами технологічних координат на основі штучних нейронних мереж в умовах зміни параметрів гідромережі є метою даної роботи. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні основні задачі:

- аналіз існуючих сучасних енергоефективних систем керування турбомеханізмами, що живляться від альтернативних джерел енергії, та систем бездавачевого керування з метою обґрунтування необхідності вирішення розглянутої у роботі науково-прикладної задачі;

- розробка та опис процедури тренування оцінювачів технологічних координат на основі теорії штучних мереж зі стандартними алгоритмами навчання мереж та при використанні їх модифікованої структури із зворотнім зв'язком для підвищення точності оцінювання;

- теоретичне обґрунтування та розроблення системи керування турбомеханізмами, що живляться від альтернативного джерел електричної енергії, а саме вітрогенератора;

- розробка електромеханічної системи автоматичного керування турбомеханізмами з модифікованою структурою оцінювача технологічних координат;

- дослідження статичних та динамічних характеристик розробленої системи керування в умовах зміни параметрів гідромережі та варіації параметрів джерела механічної енергії.

2 ОЦІНЮВАЧІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КООРДИНАТ ТУРБОМЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

2.1 Оцінювачі технологічних координат турбомеханізмів: загальні відомості та області застосування

Оцінювачі технологічних координат турбомеханізмів – це пристрої або системи, які використовуються для вимірювання та моніторингу різних технологічних координат в турбомеханізмах. Вони надають можливість контролювати та оцінювати роботу турбомеханізмів, їх ефективність та забезпечувати безперебійну роботу технологічних процесів.

Оцінювачі технологічних координат широко використовуються в різних областях, де працюють турбомеханізми. Декілька основних областей їх застосування включають [61]-[63]:

1. Енергетика. Оцінювачі технологічних координат використовуються для моніторингу роботи газових турбін, парових турбін, гідрогенераторів та інших електрогенеруючих установок. Вони допомагають контролювати тиск, температуру, обертову швидкість та інші параметри для забезпечення ефективності та безпеки енергетичних систем.
2. Промисловість. Оцінювачі технологічних координат застосовуються у виробничих підприємствах для контролю та моніторингу роботи турбомашин, компресорів, насосів та інших механізмів. Вони допомагають забезпечити оптимальну продуктивність, виявити можливі поломки або несправності та забезпечити безперебійну роботу виробничих ліній.
3. Транспорт. Оцінювачі технологічних координат використовуються в транспортних системах, таких як авіація, залізниці, морський флот та автомобільний транспорт. Вони допомагають контролювати роботу двигунів, турбокомпресорів, гальм та інших систем для забезпечення безпеки та ефективності транспортних засобів.

4. Водопостачання. Оцінювачі технологічних координат використовуються у системах водопостачання та водопровідних мережах. Вони допомагають контролювати тиск, продуктивність та інші параметри для ефективного та надійного водопостачання.
5. Вітроенергетика. Оцінювачі технологічних координат використовуються для контролю та моніторингу роботи вітрогенераторів. Вони допомагають вимірювати обертову швидкість, потужність, температуру та інші параметри для забезпечення ефективного використання вітрової енергії.

Оцінювачі є важливими компонентами для забезпечення ефективної та безперебійної роботи технологічних систем. Вони дозволяють контролювати та оптимізувати роботу турбомеханізмів у різних галузях застосування.

Для реалізації оцінювачів технологічних координат турбомеханізмів застосовуються різні методи, які базуються на сучасних технологіях та алгоритмах обробки сигналів. Методи, які використовуються для оцінювання координат турбомеханізмів наступні [64], [65]:

1. Метод аналізу вібрації. Вібраційний аналіз використовується для вимірювання та аналізу вібраційних сигналів, що генеруються турбомеханізмами. За допомогою акселерометрів або датчиків вібрації вимірюються коливання та вібрації, які можуть бути пов'язані з несправністю або станом роботи механізму. Аналіз цих сигналів дозволяє виявляти відхилення в роботі турбомеханізму та прогнозувати можливі поломки.
2. Метод аналізу теплових параметрів. Для оцінювання теплових координат турбомеханізмів застосовуються термодатчики та термопари, які вимірюють температуру різних точок механізму. Це дозволяє контролювати теплове навантаження, виявляти перегрів або недостатнє охолодження, а також визначати ефективність системи охолодження.
3. Метод аналізу потоку рідини або газу. Для оцінювання координат потоку рідини або газу використовуються датчики тиску, датчики рівня або датчики витрати. Ці давачі дозволяють контролювати тиск, рівень або

об'єм рідини або газу, що протікає через турбомеханізм. За допомогою цих даних можна визначити продуктивність, забезпечити стабільний режим роботи та виявити можливі проблеми, такі як утворення заторів або витoki.

4. Метод аналізу електричних параметрів. У випадку електромеханічних систем, які працюють з електричною енергією, використовуються датчики струму, напруги та потужності. Ці давачі дозволяють контролювати електричні параметри турбомеханізму, такі як споживана потужність, ефективність енерговиробництва, стан струмового кола тощо.
5. Метод аналізу звукових параметрів. Деякі технологічні координат турбомеханізмів можуть бути оцінені за допомогою аналізу звукових сигналів, що генеруються в процесі роботи. Звукові датчики або мікрофони вимірюють амплітуду, частоту та інші характеристики звуку, що дозволяє виявляти аномалії, шуми або несправності в турбомеханізмі.

Ці методи використовуються окремо або в поєднанні для оцінювання технологічних координат турбомеханізмів. За допомогою вимірювань та аналізу цих параметрів можна забезпечити ефективну та безперебійну роботу турбомеханізмів, попередити можливі поломки та покращити загальну продуктивність системи.

Оцінювачі технологічних координат турбомеханізмів на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) перевершують стандартні оцінювачі технологічних параметрів в кількох аспектах. Нижче наведено кілька ключових переваг, які притаманні цим оцінювачам:

1. Адаптивність. Оцінювачі на основі ШНМ проявляють здатність до адаптації та самонавчання. Вони можуть ефективно пристосовуватись до змінних умов роботи турбомеханізмів та маніпулювати своїми параметрами під час функціонування. Це робить їх ефективними навіть у випадку змін навколишнього середовища або параметрів роботи механізму.

2. Розпізнавання складних залежностей. ШНМ здатні впізнавати складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними параметрами. Вони можуть моделювати та враховувати складні взаємозв'язки, які важко виявити та описати за допомогою стандартних методів. Це надає їм більшу гнучкість та точність у оцінюванні технологічних координат.
3. Виявлення аномалій. Оцінювачі на основі ШНМ проявляють високу чутливість до аномалій та несправностей у роботі турбомеханізмів. Вони можуть виявляти відхилення від нормального стану та акцентувати увагу на проблемних областях. Це дозволяє оперативно виявляти та вирішувати потенційні проблеми, уникнувши серйозних поломок та покращивши надійність роботи механізму.
4. Гнучкість та адаптованість до різних умов. Оцінювачі на основі ШНМ можуть функціонувати в різних умовах та враховувати різноманітні фактори, що впливають на роботу турбомеханізмів. Вони можуть налаштовуватись та оптимізовуватись для різних типів механізмів та режимів роботи. Це забезпечує оптимальну продуктивність та ефективність незалежно від змінних умов.
5. Прогнозування та передбачення. Оцінювачі на основі ШНМ можуть використовуватись для прогнозування та передбачення роботи турбомеханізмів на основі вхідних даних. Вони можуть передбачати майбутні значення параметрів та виявляти потенційні проблеми. Це дозволяє оперативно реагувати та вживати відповідні заходи для попередження негативних наслідків.

Отже, оцінювачі технологічних координат на основі ШНМ мають переваги у виявленні аномалій, розпізнаванні складних залежностей, гнучкості та прогнозуванні, що сприяє більш точному та надійному контролю роботи турбомеханізмів.

2.2 Математичний опис і алгоритми проектування оцінювачів методом штучних нейронних мереж

Нейронні мережі, що використовуються як оцінювачі технологічних координат, працюють за допомогою інтегрування та обробки інформації з різних джерел. Їх функціонування базується на властивостях штучних нейронів та їх взаємозв'язках, щоб оцінювати технологічні координати об'єкта.

Для оцінки координати необхідно враховувати, що основними координатами є оцінені значення на виході нейронної мережі, які є результатом обчислення та обробки інформації нейромережею. Другорядні координати – це координати, на основі яких працює нейронна мережа, та які можна виміряти або розрахувати з використанням інших доступних у системі даних. Мережа приймає на вхід значення другорядних координат та інші доступні параметри. За допомогою внутрішніх обчислень і вагових коефіцієнтів, ці дані обробляються та розраховуються значення основних технологічних координат.

В загальному випадку при застосуванні нейронної мережі як оцінювача, мережа представляється блок-схемою, що зображено на рис. 2.1.

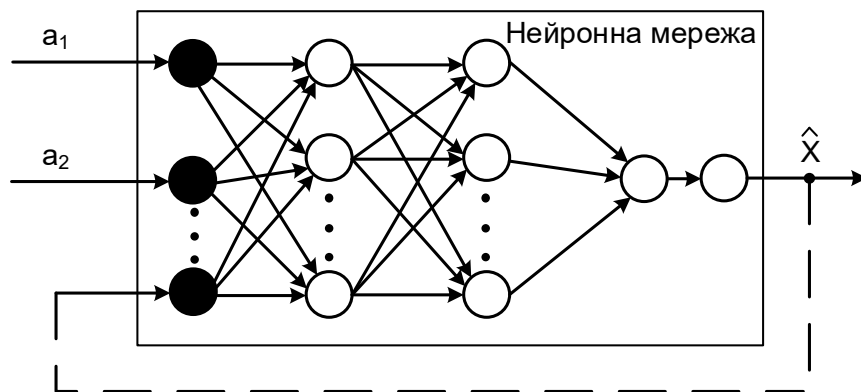


Рисунок 2.1 – Блок-схема представлення нейронної мережі у якості оцінювача технологічних координат

На рис. 2.1 вхідні координати a_1 та a_2 , які використовуються нейромережею у якості навчальних масивів даних, повинні бути легкодоступними для вимірювання. Такими параметрами у системах керування можуть бути значення струму, напруги, потужності, тощо, що доступні через використання

перетворювача частоти. Для вимірювання вихідної координати X , у випадку відсутності нейромережевого оцінювача, необхідним є впровадження у систему керування спеціального контрольно-вимірювального обладнання, тобто відповідних технологічних давачів, або фізичне втручання у систему, наприклад гідравлічну мережу, або мережу кондиціонування. У випадку ж застосування теорії ШНМ вихідною координатою мережі є оцінене значення \hat{X} . Для більш точного оцінювання та надійного функціонування системи керування можливе також використання модифікованих оцінювачів, що мають модифіковану структуру за рахунок зворотних зв'язків цільової координати.

В результаті застосування технології нейромереж отримується оцінка координати без її безпосереднього вимірювання. Цей процес дозволяє оцінювати координати системи на основі доступних даних і забезпечувати можливість точного та надійного контролю технологічних процесів.

Для роботи з нейронними мережами особливу увагу варто приділити їх математичному опису. В загальному випадку рівняння нейронів описується наступним виразом :

$$y_i = \lambda_i \left(\sum_{j=1}^m x_j w_{ij} + b_i \right), \quad (2.1)$$

де x_1, x_2, \dots, x_m – входи нейрона; $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}$ – вагові коефіцієнти синаптичних зв'язків; b_i – зміщення нейрона; $\lambda_i(\cdot)$ – активаційна функція нейрона.

В загальному випадку процедура проектування штучної нейронної мережі досить проста, використовуючи пакет прикладних програм Matlab2014b з редактором нейронної мережі (nntool) і Simulink. Цей інструментарій дає змогу створювати найбільш поширені нейронні мережі [66]-[67].

У загальному випадку, процедура проектування штучних нейронних мереж включає наступні етапи [68]:

1. Визначення кількості прихованих шарів. Перший крок – визначення того, скільки прихованих шарів буде використовуватися в нейронній мережі. Приховані шари розташовані між вхідним і вихідними шарами нейронів і відповідають за внутрішню обробку даних.

2. Визначення кількості нейронів у кожному шарі. Другий етап включає в себе визначення кількості нейронів (або вузлів) у кожному прихованому шарі. Це важливий аспект проектування, оскільки кількість нейронів впливає на обчислювальні можливості мережі.
3. Вибір функції активації нейронів. Третім кроком є вибір функцій активації для нейронів в мережі. Функції активації визначають, як нейрони реагують на вхідні дані і передають результати наступному шару.
4. Тренування мережі. Останній етап – це тренування мережі, яке включає в себе навчання мережі на основі навчальних даних. Під час тренування мережа налаштовує свої ваги та параметри для досягнення бажаних результатів.

Збільшення кількості шарів та/або нейронів у ШНМ призводить до покращення точності її функціонування, але також призводить до збільшення складності самої мережі. Це відбувається через те, що зі зростанням кількості нейронів у шарі збільшується число рівнянь, які потрібно враховувати для опису цього шару. Тому важливо визначити оптимальний баланс між кількістю нейронів та шарів у ШНМ шляхом навчання мережі з різною конфігурацією нейронів та шарів.

Однак у Matlab2018b є інструмент для роботи із нейронними мережами часових рядів (ntstool), який дає змогу створювати двошарові прямі нейронні мережі. У цьому інструменті для нелінійної фільтрації та прогнозування використовуються динамічні нейронні мережі, які включають лінії затримки з відведенням. У інструменті дозволено розв'язувати три типи задач з нелінійними часовими рядами:

- У першому типі задач з часовими рядами прогнозуються майбутні значення часового ряду $y(t)$ на основі минулих значень цього часового ряду (авторегресійні значення), та минулих значень другого часового ряду $x(t)$ (екзогенні значення). Така форма спостереження називається нелінійною авторегресією з екзогенним (зовнішнім) входом, або NARX. Її можна використовувати для ідентифікації або оцінювання координат систем,

у яких реалізовано моделі для дослідження динамічних систем, таких як систем перекачування рідин, хімічні процеси, виробничі системи, робототехніка тощо, оскільки зв'язок між входами і виходами таких нейронних мереж є нелінійним.


- У другому типі задач з часовими рядами є лише один ряд. Майбутні значення часового ряду $y(t)$ прогнозуються лише на основі минулих значень цього ряду. Ця форма прогнозування називається нелінійною авторегресією, або NAR. Недоліком такої форми є те, що прогнозування поведінки системи відбувається виключно на основі її минулих станів (авторегресивних значень).
- Третій тип задач з часовими рядами схожий на перший, але в ньому задіяні два ряди: вхідний ряд $x(t)$ та вихідний/цільовий ряд $y(t)$. Ця форма спостереження дозволяє передбачити значення $y(t)$ на основі попередніх значень $x(t)$, але без знання попередніх значень $y(t)$, та називається нелінійного входу-виходу. Модель NARX дає кращі прогнози, ніж ця модель, оскільки вона використовує додаткову інформацію, що міститься в попередніх значеннях $y(t)$. Однак, можуть існувати деякі умови, в яких попередні значення $y(t)$ будуть недоступні. Це єдині випадки, коли варто використовувати модель входу-виходу замість моделі NARX.

Нейронні мережі зі зворотним зв'язком можуть працювати з неповними або шумними даними. Вони можуть впоратися з великим обсягом даних та здійснювати розподілену обробку на багатьох вузлах, що робить їх ефективними для обробки великих наборів даних. Необхідно також зазначити, що нейронні мережі зі зворотним зв'язком дозволяють розробляти моделі, які можуть виконувати складні завдання, які раніше були важко вирішувати. Вони можуть використовуватися для прогнозування, класифікації, розпізнавання образів, генерації контенту та багатьох інших задач.

Інтерфейс вибору типу необхідної нейронної мережі (Neural network time series app) представлено на рис. 2.2.

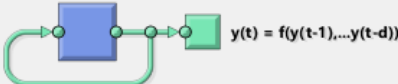
Select a Problem

☒ Nonlinear Autoregressive with External (Exogenous) Input (NARX)
 Predict series $y(t)$ given d past values of $y(t)$ and another series $x(t)$.



$y(t) = f(x(t-1), \dots, x(t-d), y(t-1), \dots, y(t-d))$


☐ Nonlinear Autoregressive (NAR)
 Predict series $y(t)$ given d past values of $y(t)$.



$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-d))$

☐ Nonlinear Input-Output
 Predict series $y(t)$ given d past values of series $x(t)$.

Important Note: NARX solutions are more accurate than this solution. Only use this solution if past values of $y(t)$ will not be available when deployed.



$y(t) = f(x(t-1), \dots, x(t-d))$

Рисунок 2.2 – Інтерфейс вибору типу нейронної мережі

Для вирішення задач оцінювання технологічних координат системи неперервного транспортування обрано тип нейронної мережі зі зворотним зв'язком NARX. Модифікована структура оцінювача координат дозволить підвищити точність оцінювання вихідного параметру при варіаціях динамічних зовнішніх збурень, таких як гідравлічний опір мережі.

Розглянемо процес проектування нейронної мережі із зворотнім зв'язком на прикладі бездавачевої системи водопостачання із стабілізацією напору (або продуктивності) при живленні від вітрогенератора. Така система є типовою і актуальною для систем із альтернативними джерелами електричної енергії [69]–[70], оскільки складається з двох перетворювачів частоти, що дозволяє розміщувати вітрогенератор та насосну установку на певній відстані один від одного на оптимальних ділянках для більш ефективного використання. В таких системах постає питання стабілізації параметру (тиску або продуктивності) в залежності від вимог необхідного технологічного процесу, таких як зрошування, накачування води у резервуари, кондиціонування, іригація тощо. Керування для систем стабілізації технологічного параметру відбувається із використанням давачів (тиску або витрат), проте у звичайних системах такі не передбачені через

високу собівартість. Функціональна схема даної системи представлена на рис. 2.3.

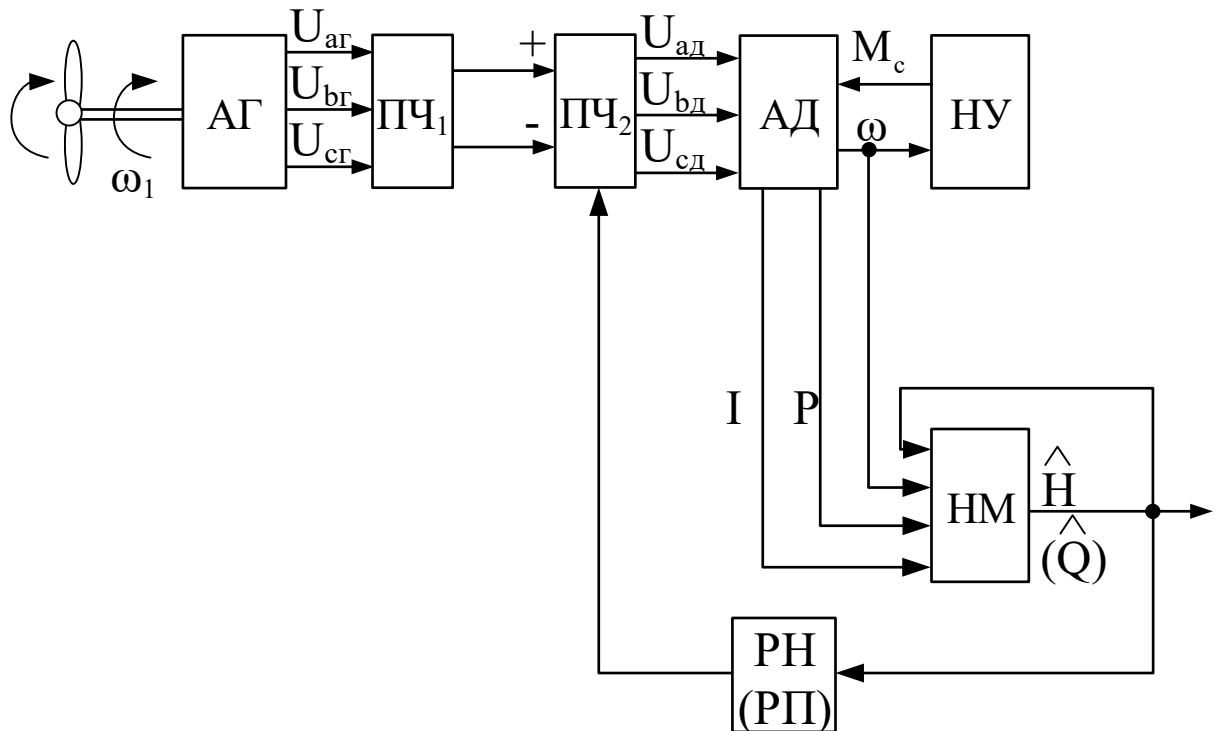


Рисунок 2.3 – Функціональна схема системи водопостачання для дослідження бездавачевого керування

На рис. 2.3 наведені наступні позначення: АГ – асинхронний генератор; ПЧ₁, ПЧ₂ – перетворювачі частоти; АД – асинхронний двигун; НУ – насосна установка; НМ – оцінювач тиску насосу на основі нейронної мережі; РН – регулятор напору, налаштований на пропорційно-інтегральний (ПІ) закон керування; РП – регулятор продуктивності, налаштований на пропорційно-інтегральний (ПІ) закон керування; ω_1 – кутова швидкість ротора АГ; ω – швидкість обертання насосу; M_c – момент навантаження на валу двигуна насосу; P – потужність приводного двигуна насосу; I – модуль струму статора приводного двигуна насосу; \hat{H} – оцінене значення напору насосу; \hat{Q} – оцінене значення продуктивності насосу; U_{ag} , U_{bg} , U_{cg} – фазна напруга статора генератора; U_{ad} , U_{bd} , U_{cd} – фазна напруга статора приводного двигуна.

Рівняння, що описують кожен нейрон у випадку двошарової нейронної мережі на 10 нейронів з трьома входами та зворотним зв'язком, що використовується у системі водопостачання, записуються наступним чином:

$$\begin{aligned} y_1 &= \text{th}((Pw_{11} + \omega w_{12} + Iw_{13} + b_1 + y_1) / a_1) \\ y_2 &= \text{th}((Pw_{21} + \omega w_{22} + Iw_{23} + b_2 + y_2) / a_2) \\ &\dots \\ y_{10} &= \text{th}((Pw_{101} + \omega w_{102} + Iw_{103} + b_{10} + y_{10}) / a_{10}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

де P, ω, I – входи нейрона; $w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{im}$ – вагові коефіцієнти синаптичних зв'язків; b_i – зміщення нейрона; a_i – коефіцієнт нахилу функції гіперболічного тангенса tansig .

Таким чином, загальне рівняння, що описує роботу нейронної мережі для оцінювання тиску насосної установки, наведену на рис. 2.3, записується наступним чином:

$$\begin{aligned} \hat{H} &= c(\text{th}((Pw_{11} + \omega w_{12} + Iw_{13} + b_1 + \hat{H}) / a_1)w_1 + \\ &+ \text{th}((Pw_{21} + \omega w_{22} + Iw_{23} + b_2 + \hat{H}) / a_2)w_2 + \\ &+ \text{th}((Pw_{31} + \omega w_{32} + Iw_{33} + b_3 + \hat{H}) / a_3)w_3 + \\ &+ \text{th}((Pw_{41} + \omega w_{42} + Iw_{43} + b_4 + \hat{H}) / a_4)w_4 + \\ &+ \text{th}((Pw_{51} + \omega w_{52} + Iw_{53} + b_5 + \hat{H}) / a_5)w_5 + \\ &+ \text{th}((Pw_{61} + \omega w_{62} + Iw_{63} + b_6 + \hat{H}) / a_6)w_6 + \\ &+ \text{th}((Pw_{71} + \omega w_{72} + Iw_{73} + b_7 + \hat{H}) / a_7)w_7 + \\ &+ \text{th}((Pw_{81} + \omega w_{82} + Iw_{83} + b_8 + \hat{H}) / a_8)w_8 + \\ &+ \text{th}((Pw_{91} + \omega w_{92} + Iw_{93} + b_9 + \hat{H}) / a_9)w_9 + \\ &+ \text{th}((Pw_{101} + \omega w_{102} + Iw_{103} + b_{10} + \hat{H}) / a_{10})w_{10} + b), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де c – коефіцієнт нахилу лінійної функції активації.

Навчання нейронної мережі відбувалося на основі координат приводного двигуна, таких як потужність, струм та швидкість обертання. Вхідні та вихідні (еталонні) дані для навчання нейронної мережі формувалися при дослідженні замкненої електромеханічної системи за тиском. Моделювання виконувалося з частотою тактування 2 кГц та з основним часом вибірки $1 \cdot 10^{-5}$ с. Збільшення параметрів моделювання системи покращить точність тренувальних масивів,

проте призведе до збільшення часу навчання і, як наслідок, подальшого можливого переповнення оперативної пам'яті обчислювальної машини. Після вибору вхідних та вихідних масивів для навчання системи, необхідно налаштувати розподілення даних для навчання, перевірки та тестування. Налаштування (Validation and test data) представленні на рис. 2.4.

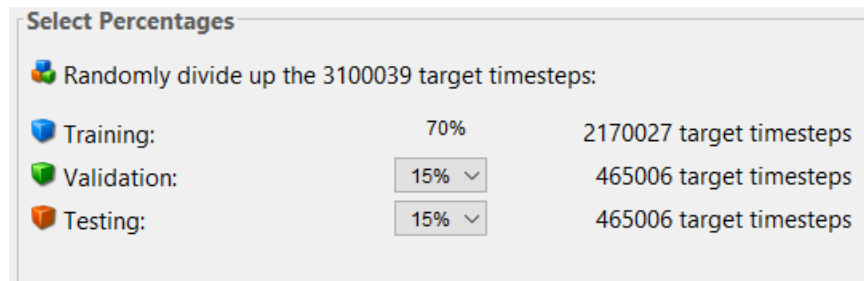


Рисунок 2.4 – Інтерфейс налаштування розподілення даних для навчання, перевірки та тестування

Кожен із наборів даних перевірки та тестування налаштовано на 15% вихідних даних. З цими налаштуваннями вхідні вектори та цільові вектори будуть випадковим чином розділені на три набори таким чином:

- 70% буде використано на навчання.
- 15% буде використано для підтвердження того, що мережа узагальнюється, і для припинення навчання перед переобладнанням.
- останні 15% будуть використані як повністю незалежний тест узагальнення мережі.

Наступним кроком формується структура нейронної мережі. Як показує практика, чим більше нейронів вибрано на шар, тим вище точність нейронної мережі. Однак система стає набагато складнішою, оскільки підвищується рівень, необхідний для опису шару. Важливим кроком є визначення оптимальної кількості нейронів і затримок для створення конкретної нейронної мережі.

Стандартна мережа NARX є двошаровою мережею прямого зв'язку з сигмоподібною функцією передачі (TANSIG) на прихованому рівні та лінійною функцією передачі (PURELIN) на вихідному рівні. Ця мережа також використовує відведені лінії затримки для зберігання попередніх значень

послідовностей $x(t)$ і $y(t)$. Однак для ефективного навчання цю петлю зворотного зв'язку можна відкрити.

Оскільки справжній вихід доступний під час навчання мережі, можна використовувати показану на рис. 2.2 архітектуру з відкритим циклом, у якій справжній вихід використовується замість зворотного зв'язку з оціненим виходом. Це має дві переваги. По-перше, вхідні дані в мережу прямого зв'язку є точнішими. По-друге, отримана мережа має архітектуру виключно прямого зв'язку, і тому для навчання можна використовувати більш ефективний алгоритм.

За замовчуванням кількість прихованих нейронів встановлено на 10. За замовчуванням кількість затримок становить 2. Ці числа можна налаштувати, якщо продуктивність навчання мережі низька.

Для визначення оптимальної кількості нейронів у нейромережі, що реалізує оцінювач тиску в бездавачевій системі водопостачання (рис. 2.3) проведено дослідження, під час якого спроектовано низку нейронних мереж та проведено їх подальше навчання (тренування). Результати представлено на рис. 2.5.

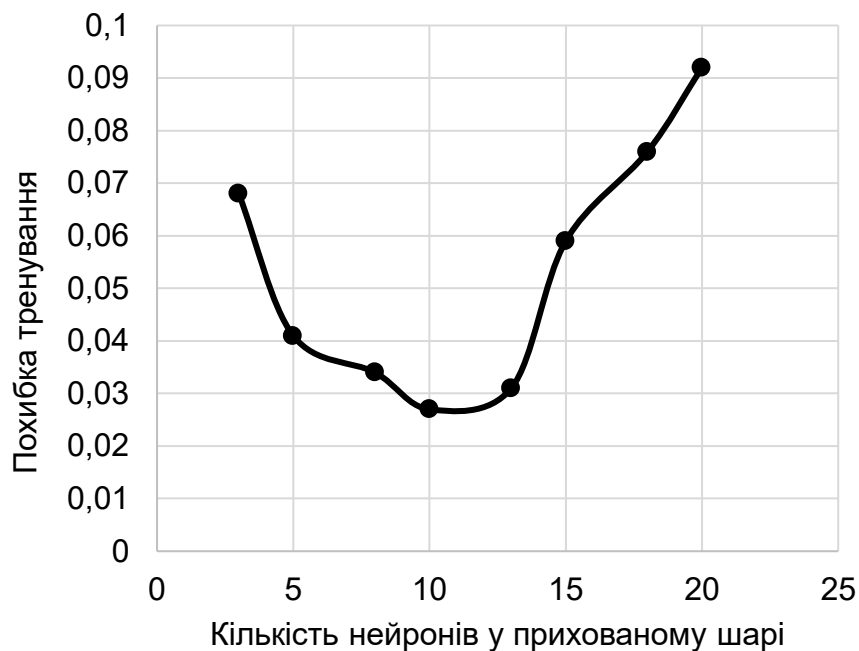


Рисунок 2.5 – Результати визначення оптимальної кількості нейронів для оцінювача тиску

З рис. 2.5 видно, що зі збільшенням кількості нейронів у прихованому (першому) шарі похибка тренування зменшується. Проте, при подальшому їх збільшенні похибка знов зростає. Цей ефект називається перенавчання. Ефект перенавчання в контексті нейронних мереж є феноменом, що виникає при вдосконаленому тренуванні моделі на великому обсязі даних, що може призвести до втрати її здатності до ефективного узагальнення на нових, раніше не бачених даних. Цей ефект визначається явищем, коли модель надто точно адаптується до шуму чи випадковостей у тренувальних даних, втрачаючи при цьому здатність узагальненого висновку на нових вхідних сигналах. Причини ефекту перенавчання включають в себе надто складну архітектуру моделі, недостатню кількість тренувальних даних для адекватного покриття всіх можливих варіантів, або неправильний вибір параметрів тренування.

Таким чином після проведення експериментальних досліджень доцільної кількості нейронів було обрано нейронну мережу із 10 нейронами. Для дослідження сформована мережа з 2-х шарів по 10 нейронів в першому і 1 в вихідному шарі. Архітектуру нейронної мережі представлено на рис. 2.5.

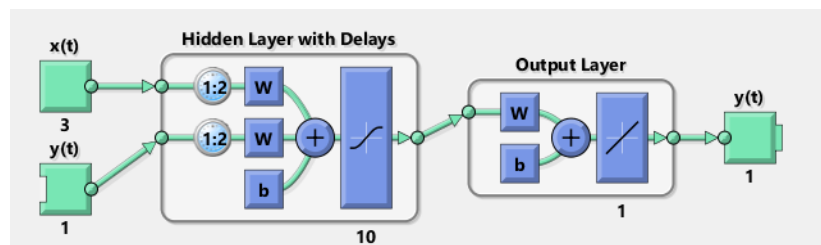


Рисунок 2.5 – Архітектура нейронної мережі оцінювача тиску

Наступним кроком необхідно обрати метод навчання нейронної мережі. Для реалізації оцінювача тиску обрано метод навчання Левенберга-Маквардта (`trainlm`) для вирішення задачі апроксимації функції [72]. Цей алгоритм зазвичай потребує більше пам'яті, але менше часу. Навчання автоматично припиняється, коли узагальнення перестає покращуватися, на що вказує збільшення середньої квадратичної похибки зразків перевірки. Прогрес навчання наведено на рис. 2.6.

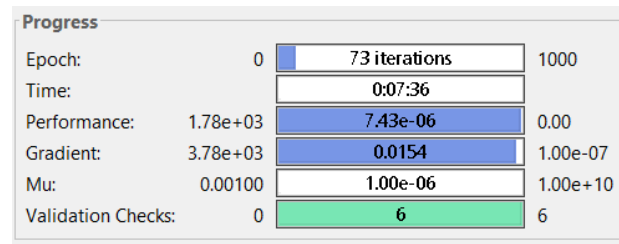


Рисунок 2.6 – Прогрес навчання оцінювача тиску

На рис. 2.6 видно, що максимальна похибка під час тренування становила $7.43 \cdot 10^{-6}$, і такий результат досягнуто після 73 епохи тренування. Такі результати свідчать про працездатність такої нейронної мережі та її високу точність.

2.3 Результати навчання оцінювачів технологічних координат

Пакет прикладних програм MATLAB, зокрема редактори nntool та ntstool, надають широкий спектр інструментів для оцінки результатів навчання.

Максимальні похибки навчання та коефіцієнти регресії, що свідчить про працездатність нейронної мережі наведеної у цьому розділі та можливості застосування її як оцінювача тиску наведено на рис. 2.7. Додаткові результати навчання, що можливо сформулювати за допомогою обраного інструментарію наведені на рис. 2.8 (Neural network training performance), рис. 2.9 (Neural network training time-series response) та рис. 2.10 (Neural network training error autocorrelation).

Results			
	Target Values	MSE	R
Training:	2170027	7.44800e-6	9.99999e-1
Validation:	465006	3.49159e-6	9.99999e-1
Testing:	465006	8.84016e-6	9.99999e-1

Рисунок 2.7 – Результати формування нейронної мережі оцінювача тиску

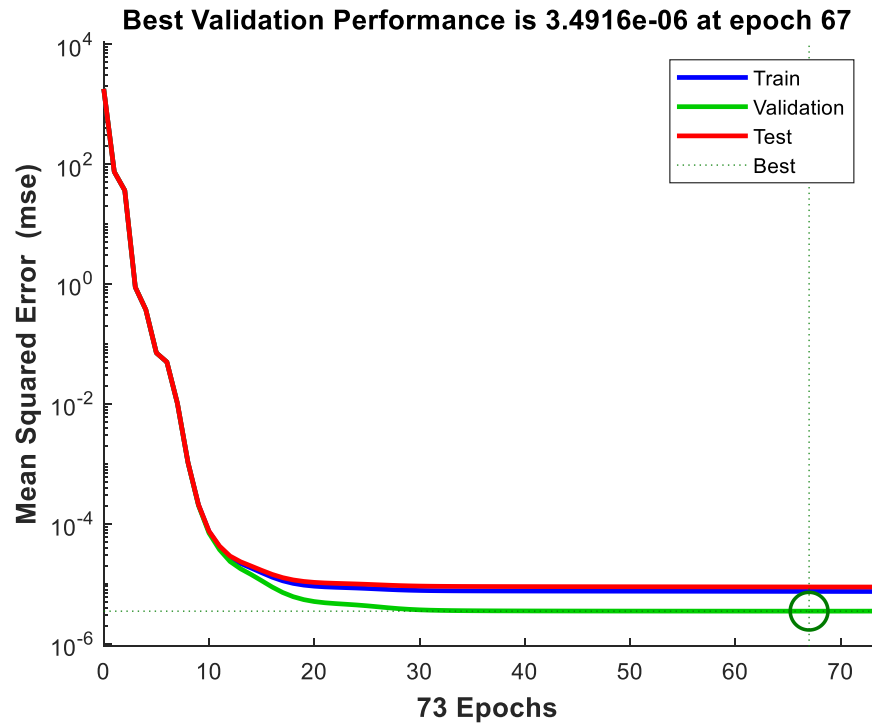


Рисунок 2.8 – Ефективність навчання нейронної мережі оцінювача тиску

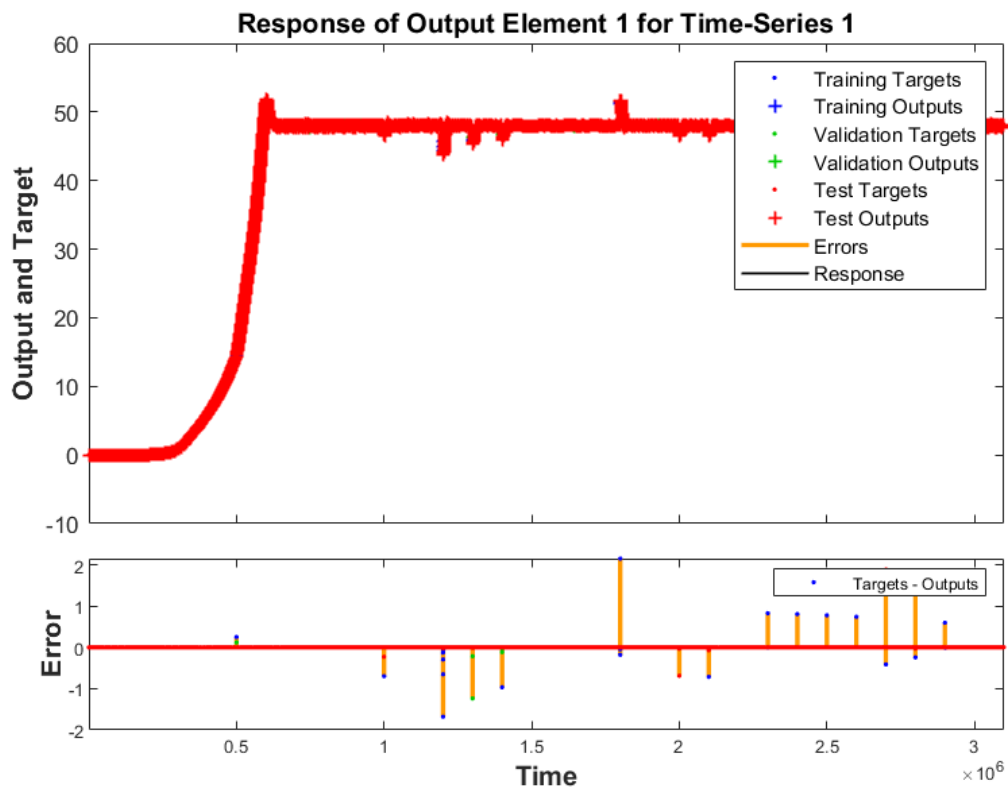


Рисунок 2.9 – Реакція нейронної мережі на часовий ряд для навчання оцінювача тиску

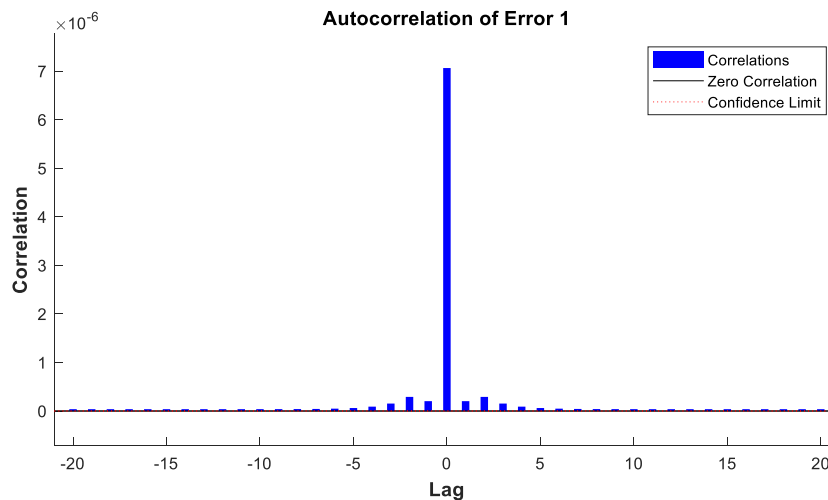


Рисунок 2.10 – Автокореляція помилок навчання нейронної мережі оцінювача тиску

Рис. 2.10 відображає функцію автокореляції похибок. Графік описує, як похибки передбачення пов'язані в часі. Для ідеальної моделі передбачення має бути тільки одне ненульове значення функції автокореляції, і воно має відбуватися з нульовим відставанням (середня квадратична похибка). Якщо існує значна кореляція в похибках передбачення, тоді має бути можливість покращити передбачення - можливо, шляхом збільшення кількості затримок у лініях затримки, що відтворюються. Якщо потрібні точніші результати, мережу можна перенавчати.

Аналогічно спроектовано нейронну мережу для реалізації оцінювача продуктивності бездавачевої системи водопостачання із стабілізацією продуктивності при живленні від вітрогенератора (рис. 2.3). Для дослідження сформована мережа, що складається з 2-х шарів, в першому шарі якої 15 нейронів і 1 у другому (вихідному) шарі. Архітектуру нейронної мережі представлено на рис. 2.11.

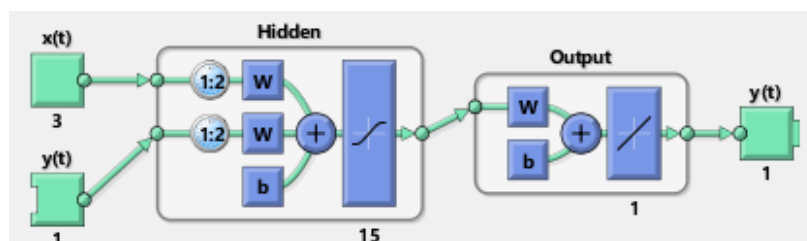


Рисунок 2.11 – Архітектура нейронної мережі оцінювача продуктивності

Загальне рівняння, що описує роботу нейронної мережі для оцінювання продуктивності насосної установки, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 \hat{Q} = & c(\text{th}((Pw_{11} + \omega w_{12} + Iw_{13} + b_1 + \hat{Q}) / a_1)w_1 + \\
 & + \text{th}((Pw_{21} + \omega w_{22} + Iw_{23} + b_2 + \hat{Q}) / a_2)w_2 + \\
 & + \text{th}((Pw_{31} + \omega w_{32} + Iw_{33} + b_3 + \hat{Q}) / a_3)w_3 + \\
 & + \text{th}((Pw_{41} + \omega w_{42} + Iw_{43} + b_4 + \hat{Q}) / a_4)w_4 + \\
 & + \text{th}((Pw_{51} + \omega w_{52} + Iw_{53} + b_5 + \hat{Q}) / a_5)w_5 + \\
 & \dots \\
 & + \text{th}((Pw_{151} + \omega w_{152} + Iw_{153} + b_{15} + \hat{Q}) / a_{15})w_{15} + b),
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Результати навчання нейромережі для оцінювача продуктивності наведено на рис. 2.12 - 2.14. Похибка тренування становила 0,057, коефіцієнт регресії – 0,999, що свідчить про працездатність нейронної мережі та можливості застосування її в якості оцінювача продуктивності обраного насосу.

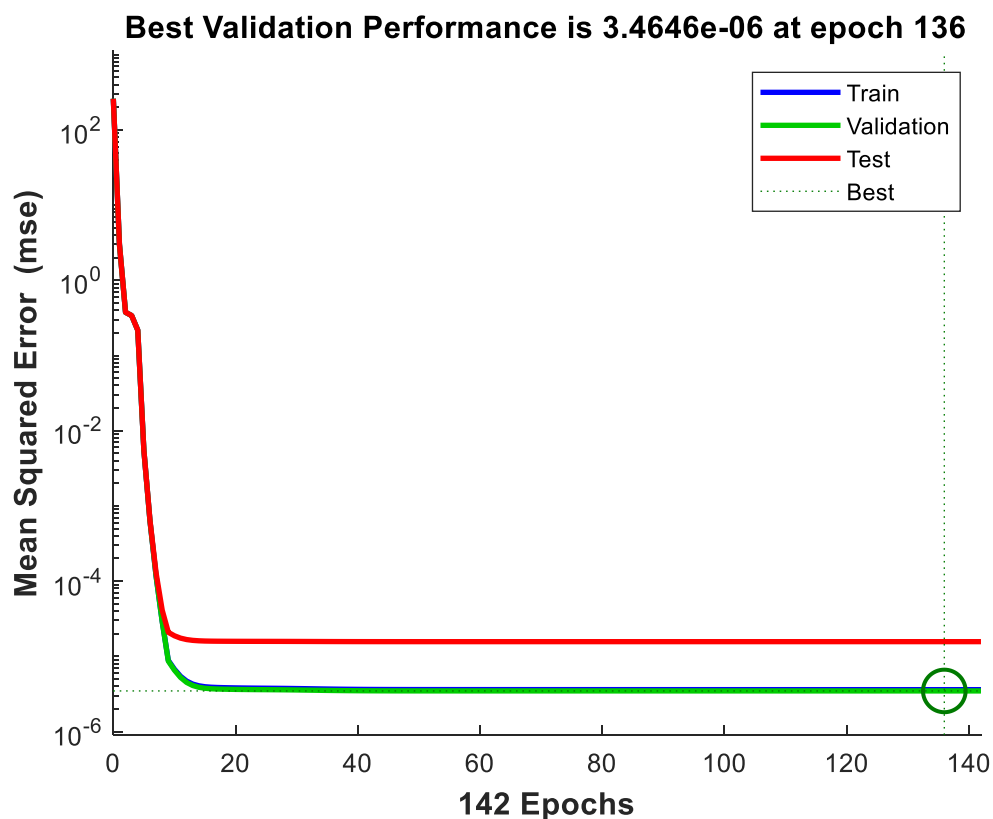


Рисунок 2.8 – Ефективність навчання нейронної мережі оцінювача продуктивності

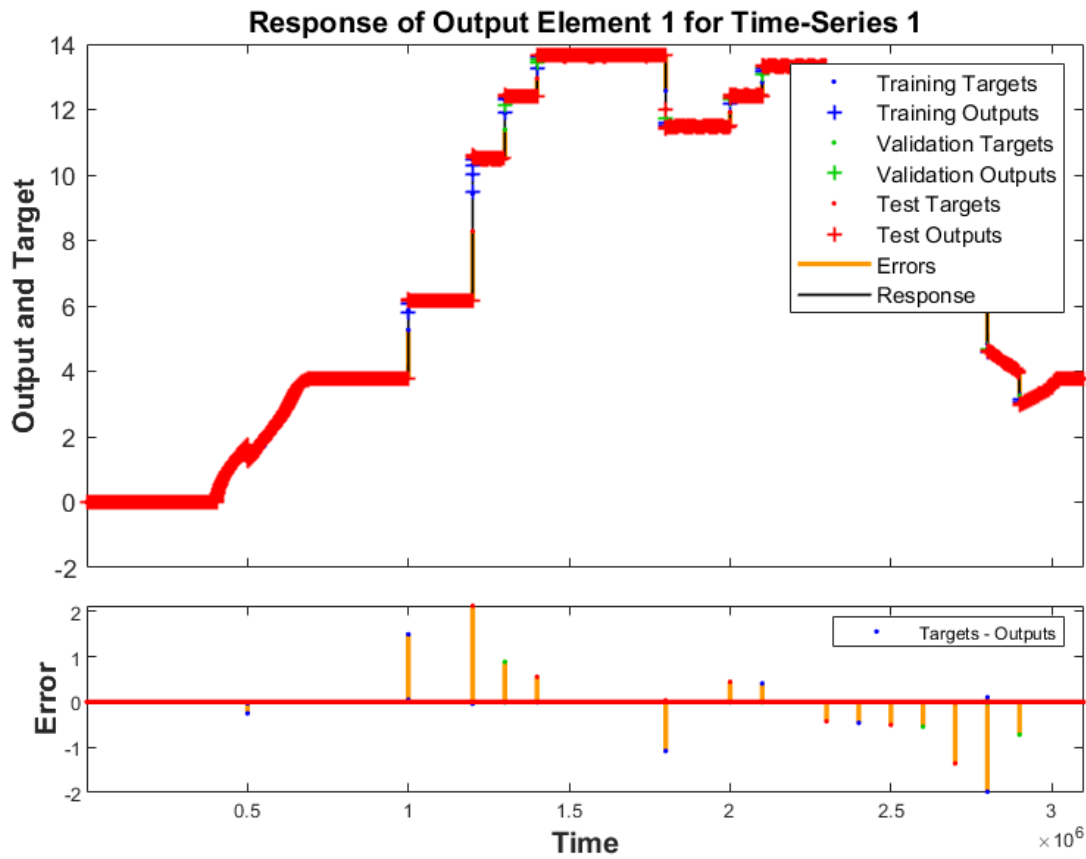


Рисунок 2.9 – Реакція нейронної мережі на часовий ряд для навчання оцінювача продуктивності

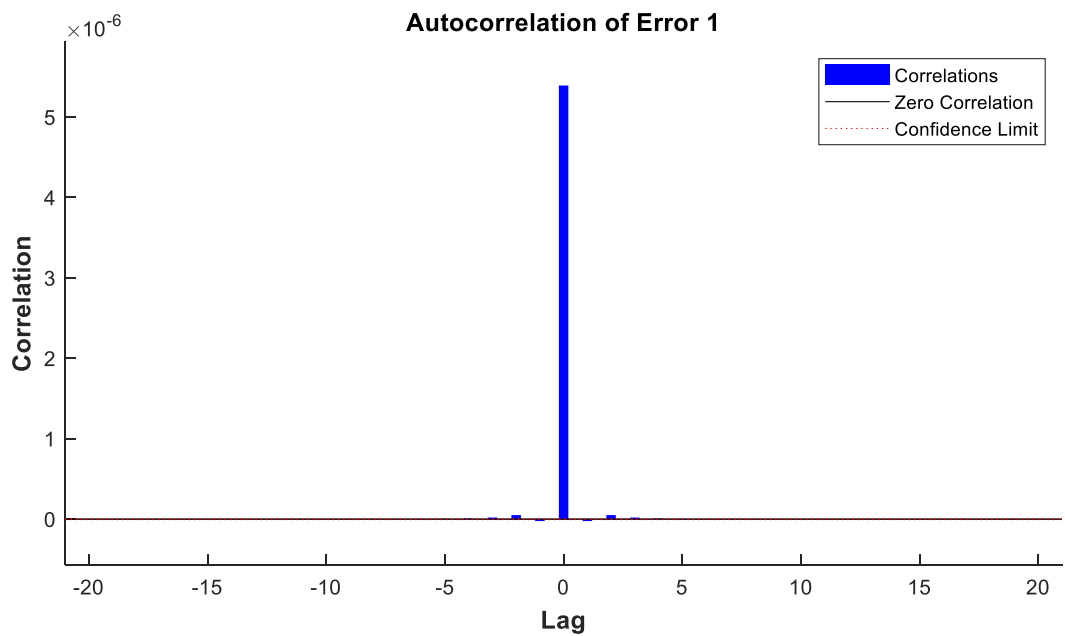


Рисунок 2.10 – Автокореляція помилок навчання нейронної мережі оцінювача продуктивності

Отже, розглянуті модифіковані оцінювачі технологічних координат мають вбудовані зворотні зв'язки за оціненою технологічною координатою, що є актуальним для подальшого їх використання у системах керування. Використання модифікованих оцінювачів є необхідним оскільки збурення у гідромережі викликані зміною гідроопору невідомі або не можуть бути точно спрогнозовані. Можливим є тільки використання орієнтованих графіків добового водоспоживання, що не враховує можливих додаткових варіацій збурень у мережі, що призводить до зменшення точності оцінки координат нейронними мережами побудованих за класичною схемою перцептронів із стандартними алгоритмами навчання. В свою чергу, висока точність модифікованих нейронних мереж дозволить реалізувати системи керування турбомеханізмами без використання реального контрольо-вимірювального обладнання.

Висновки до розділу 2

1) Розглянута загальна методика оцінювання технологічних координат турбомеханізмів, ґрунтована на використанні штучних нейронних мереж (ШНМ) побудованих за класичною схемою перцептронів із стандартними алгоритмами навчання. Завдяки властивості самонавчання ці нейронні мережі здатні оцінювати технологічні координати турбомеханізмів при невідомому законі зміни параметрів гідромережі. У порівнянні з методами апроксимації, оцінювач, заснований на нейронних мережах, вирізняється вищою точністю на всьому спектрі статичних характеристик. Цю методику можна ефективно використовувати для оцінки технологічних координат різноманітних турбомеханізмів, що сприятиме підвищенню загальної енергоефективності системи.

2) Розроблено та описано тренування у пакеті *ntstool* в середовищі *MATLAB* оцінювачів технологічних координат на основі теорії штучних мереж при використанні модифікованої структури нейронних мереж, що за рахунок вбудованих зворотних зв'язків за оціненою технологічною координатою,

дозволяють підвищити точність оцінювання вихідного параметру при варіаціях опору гідравлічної мережі.

3) Наведено математичний опис створеної нейронної мережі, який відіграє важливу роль у технічній реалізації системи штучних нейронних мереж.

4) Розроблено нейронні мережі, які, базуючись на вимірюваних швидкості обертання, струмі та активній споживаній потужності привідного асинхронного двигуна, здатні оцінювати значення тиску та продуктивності турбомеханізму, що живиться вітрогенератора.

3 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТУРБОМЕХАНІЗМОМ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ВІТРОГЕНЕРАТОРА

Сучасні тенденції в енергетичній галузі свідчать про зростання популярності вітроустановок, які використовують асинхронні генератори із самозбудженням (АГ) для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел [73]. Проте, однією з ключових проблем їх інтеграції в системи електропостачання є нестабільність напруги на виході генератора. Різні підходи вирішення цієї проблеми акцентуються на забезпеченні ефективності та надійності генерованої напруги при мінімізації витрат та спрощенні обслуговування [74].

Серед сучасних стратегій на ринку виробництва електроенергії з вітряної енергії особливого поширення здобули системи регулювання напруги АГ, які використовують електронний регулятор навантаження (ERN) [75], а також використання статичного компенсатора (STATCOM) [76]-[78]. Ці системи надають можливість плавного регулювання амплітуди та частоти генерованої напруги, забезпечуючи її сталість в широкому діапазоні змін швидкості обертання АГ та навантаження. Ефективна стабілізація напруги дозволяє уникнути колапсу напруги генератора при значному навантаженні.

Додатково, варто звернути увагу на проблеми стабільності та надійності функціонування систем водопостачання, що важливо як для промислових, так і для житлових комплексів. Забезпечення стабільності напору в гідравлічній мережі шляхом регулювання продуктивності стає загальноприйнятим рішенням даного питання.

3.1 Математичний опис електромеханічної системи водопостачання при живленні від вітрогенератора

Подальші дослідження проводилися для системи керування, що живиться від вітрогенератора при стабілізації тиску гідравлічної мережі, функціональна схема якої приведена на рис. 3.1.

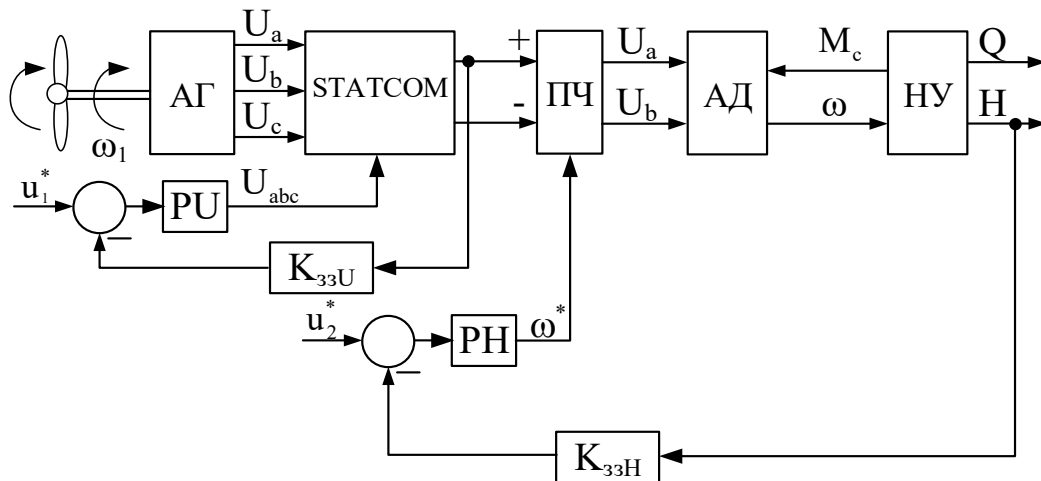


Рисунок 3.1 – Функціональна схема досліджуваної ЕМС водопостачання

На рис. 3.1 введені наступні позначення: АГ – асинхронний генератор; STATCOM – статичний компенсатор; ПЧ – перетворювач частоти; АД – асинхронний двигун; НУ – насосна установка; u_1^*, u_2^* – завдання за напругою та напором відповідно; PU – регулятор напруги, налаштований на ПІ закон керування; РН – регулятор напору, налаштований на ПІ закон керування; K_{33U} , K_{33H} – коефіцієнти зворотних зв'язків за напругою та напором відповідно; ω_1 – кутова швидкість ротора АГ; ω – швидкість обертання насосу; M_c – момент навантаження на валу двигуна насосу; Q – продуктивність насосу; H – напір насосу; ω^* – задана швидкість; U_a, U_b, U_c – фазна напруга статора; U_{abc} – задана фазна напруга статора.

Система виконана з двома перетворювачами частоти, що дозволить розташовувати вітрогенератор та насос окремо один від одного для збільшення ефективності системи при виборі оптимальних ділянок для об'єктів.

Ротор асинхронного генератора (АГ) обертається за допомогою вітрогенератора зі сталою швидкістю обертання не залежно від зміни швидкості вітру. Проте швидкість вітру має коливатися в діапазоні від номінального до критичного значень. Паралельна батарея конденсаторів, включених в трикутник, забезпечує самозбудження АГ. Конденсаторна батарея, в системах з статичним

компенсатором розраховується так, щоб процес самозбудження АГ успішно відбувся при підключеному номінальному навантаженні до генератора. Більш точному розрахунку ємності конденсаторної батареї сприяє попередній розрахунок границь самозбудження АГ в координатах «ємність-швидкість обертання – навантаження», та аналітичне отримання статичних характеристик напруги АГ [79].

Інвертор статичного компенсатора (STATCOM) керується від сигналів, які надходять від ШІМ контролера, який дає сигнал на замикання ключів інвертора в залежності від величини напруги, отриманої з регулятора напруги. Регулятора напруги забезпечує підтримку сталої напруги АГ, що в свою чергу робить сталою і величину генерованої напруги.

Добре відома математична модель асинхронного генератора в ортогональній системі координат, що обертається з довільною швидкістю описується наступною системою нелінійних диференціальних рівнянь [80].

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_1}{dt} &= U_1 - R_1 i_1 - \omega_e J \Psi_1, \\ \frac{d\Psi_2}{dt} &= -R_2 i_2 + (p_n \omega_1 - \omega_e) J \Psi_2,\end{aligned}\tag{3.1}$$

де $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $\Psi_1 = [\Psi_{1d} \quad \Psi_{1q}]^T$, $\Psi_2 = [\Psi_{2d} \quad \Psi_{2q}]^T$ – вектори потокозчеплень статора і ротора відповідно; $i_1 = [i_{1d} \quad i_{1q}]^T$, $i_2 = [i_{2d} \quad i_{2q}]^T$ – вектори струмів статора і ротора відповідно; $U_1 = [U_{1d} \quad U_{1q}]^T$ – вектор напруги статора; R_1 і R_2 – активні опори статора та ротора; p_n – кількість пар полюсів; ω_e – кутова швидкість обертання довільної системи координат d-q.

Конденсаторна батарея самозбудження ємністю C підключається паралельно до статорних обмоток АГ, до них же приєднується трифазне навантаження у вигляді трифазного електродвигуна відцентрового насосу з регульованою швидкістю обертання. Навантаження, яке створює електропривод насосу, зумовлене зміною гідравлічного опору в гідравлічній мережі, яку він

живить водою, у відповідності до добового циклу водоспоживання житлово-комунальними підприємствами.

Рівняння для напруги статора, яка є також рівною напрузі на конденсаторах батареї для самозбудження, можна отримати на основі першого закону Кірхгофа в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} -C \frac{dU_1}{dt} &= i_1 + i_L + \omega_e C J U_1; \\ Y_L L_L \frac{di_L}{dt} &= Y_L U_1 - i_L - \omega_e Y_L L_L J i_L; \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $i_L = \begin{bmatrix} i_{Ld} & i_{Lq} \end{bmatrix}^T$ – вектор струму навантаження; Y_L – провідність активної компоненти навантаження; L_L – індуктивність навантаження; C – ємність батареї самозбудження. Величини навантажень та ємностей в кожній фазі є однаковими.

Наступні рівняння визначають потокозчеплення статора та ротора:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_{\sigma 1} i_1 + L_M (i_1 + i_2); \\ \Psi_2 &= L_{\sigma 2} i_2 + L_M (i_1 + i_2), \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $L_{\sigma 1}$ та $L_{\sigma 2}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора; L_M – взаємна індуктивність статора та ротора (індуктивність намагнічування), яка, в наслідок насичення магнітної системи, нелінійно залежить від струму намагнічування

$$L_M = f(i_M), \quad i_M = \sqrt{i_{Md}^2 + i_{Mq}^2}, \quad i_{Md} = i_{1d} + i_{2d}, \quad i_{Mq} = i_{1q} + i_{2q}.$$

Аналіз роботи АГ у складі автономних систем генерування електричної енергії потребує аналітичного визначення робочих зон, в яких самозбудження є можливим – так званих зон самозбудження. В ході дослідження для розрахунку точного значення ємності конденсаторної батареї були використані аналітичні вирази, за допомогою яких границя самозбудження отримується як залежність швидкості від ємності, при незмінних інших параметрах системи.

Для випадку підключення конденсаторної батареї паралельно обмотці статора та активно-індуктивного навантаження аналітичні залежності мають вигляд [81]:

$$\begin{aligned} \omega = \omega_e^* / n_p - \left[R_2(1 + Y_L R_1) - \omega_e^{*2} C R_2 (L_1^* + Y_L R_2 L_L) / \right. \\ \left. / n_p \omega_e^* \left(Y_L (L_1^* L_2^* - L_M^{*2}) + R_1 L_2^* C - \right. \right. \\ \left. \left. - Y_L L_L \omega_e^{*2} C (L_1^* L_2^* - L_M^{*2}) + Y_L L_L L_2^* \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

На основі рівняння (3.4) варіюючи значенням ємності C , розраховуються дві криві, які з'єднуються між собою в точках, коли досягається верхній та нижній ліміт ємності, створюючи замкнену область – це і є зона самозбудження, а якій генератор є стійким і генерує напругу. Повторюючи цю процедуру для різних значень провідності та індуктивності навантаження, можна отримати сімейство кривих для зон самозбудження в координатах $C-\omega$, що дозволяє передбачати можливість самозбудження генератора при зміні робочих умов і навантаження.

Напруга навантаження регулюється за допомогою регулятора напруги (PU) за допомогою перетворень $abc-dq$ та $dq-abc$, де dq – координати двофазної моделі асинхронного електродвигуна, abc – координати трифазної моделі асинхронного електродвигуна. Вихід регулятора напруги є вектором, що містить три модулюючі сигнали, використовувані ШІМ генератором для генерації 6 імпульсів IGBT для управління інвертором при зміні навантаження на виході генератора, що обумовлено добовим циклом споживання води.

Для опису асинхронного двигуна використовується система нелінійних диференціальних рівнянь, записана в нерухомій системі координат статора ($a-b$) [82]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{1a}}{dt} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} - \beta \omega_p \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} + \beta \omega_p \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\ \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha \psi_{2a} + \omega_p \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha \psi_{2b} - \omega_p \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \end{aligned}$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}),$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c), \quad (3.5)$$

де $(i_{1a}, i_{1b})^T$, $(u_{1a}, u_{1b})^T$, $(\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – компоненти векторів струму статора, напруги статора та потокозчеплення ротора; M – електромагнітний момент; M_c – момент навантаження; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру; p_n – кількість пар полюсів. Для визначення додатних констант з виразів (3.6) використовуємо наступні вирази:

$$\alpha = R_2 / L_2,$$

$$\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2,$$

$$\beta = L_m / \sigma L_2,$$

$$\gamma = R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m, \quad (3.6)$$

де R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – активні опори та індуктивності статора та ротора, J – повний момент інерції.

Для перетворення координат з системи $(d - q)$ в систему координат $(a - b)$ використовуємо наступний вираз:

$$u_{(a-b)} = e^{j\theta_0} u_{(d-q)}, \quad (3.7)$$

$$\text{де } u_{(a-b)} = (u_{1a}, u_{1b})^T, \quad u_{(d-q)} = (u_{2d}, u_{2q})^T, \quad e^{j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

При практичній реалізації для приведення в рух турбомеханізм, застосовують $U/f^2 = \text{const}$ – квадратичний закон керування залежності напруги від частоти [83]. Такий закон керування при навантаженнях менших від номінального призводить до зменшення втрат активної потужності. Для його реалізації використана наступна модель [84]:

$$\begin{aligned}
 u_{ld} &= \alpha_1 \psi^* \\
 u_{lq} &= \omega^* p_n \psi^* \\
 \psi^* &= \psi_0^* + (\psi_n^* - \psi_0^*) \frac{\omega^* p_n}{\omega_{0n}},
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

де $\psi_n^* = \psi_{lxx}$, $0 < \psi_0^* < \psi_n^*$.

Застосовуючи алгоритм (3.5), прийнявши до уваги, що $\omega_0 = \omega^* p_n$, модуль напруги статора в залежності від заданої швидкості набуває вигляду:

$$U_{lm} = \left(\psi_0^* + (\psi_n^* - \psi_0^*) \frac{\omega^* p_n}{\omega_{0n}} \right) \sqrt{\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2}
 \tag{3.9}$$

На базі системи рівнянь (3.8) побудуємо структурну схему алгоритму частотного керування з квадратичною залежністю напруги від частоти, що показана на рис. 3.2.

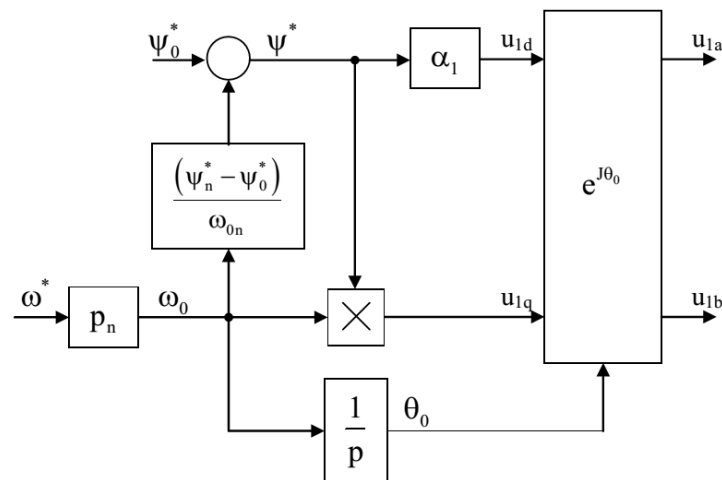


Рисунок 3.2 – Структурна схема алгоритму частотного керування $U/f^2 = \text{const}$

Перехідні процеси в одноагрегатній насосній установці з урахуванням гідравлічної мережі описуються системою рівнянь (3.10) та представлено на структурній схемі, що приведено на рис. 3.3 [85].

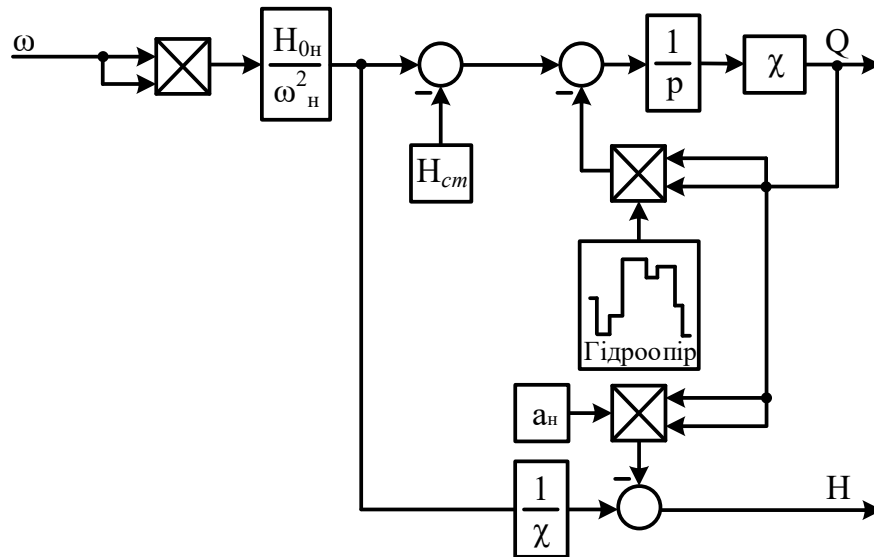


Рисунок 3.3 – Структурна схема досліджуваної насосної установки

$$\begin{aligned}\chi \frac{dQ}{dt} &= \frac{H_{0н} \omega^2}{\omega_n^2} - H_{ст} - (a_n + a) Q^2, \\ H &= \frac{H_{0н} \omega^2}{\chi \omega_n^2} - a_n Q^2, \\ M_c &= \frac{\rho g Q H}{\eta \omega},\end{aligned}\tag{3.10}$$

де $H_{0н}$ – номінальний тиск при нульовій подачі при номінальній швидкості; ω_n – номінальна швидкість насоса; χ – стала часу інтегрування насоса; $H_{ст}$ – геодезична висота рівня води; a_n – номінальний гідравлічний опір насоса; a – гідравлічний опір мережі; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; η – ККД насоса; t – час. Робота споживачів у даній моделі апроксимується заданим гідравлічним опором відповідно до графіку водоспоживання, який обирається в залежності від умов роботи та сфери застосування електромеханічної системи.

Синтез регулятора напору (РН) (рис. 3.1) виконується на основі системи рівнянь складених на основі структурної схеми (рис. 3.3) та рівняння (3.10). Спочатку використовуючи метод кінцевих приростів отримаємо вираз, записаний відносно H в лінеаризованому в околі робочої точки. Оскільки характер змін параметрів нелінійний, то запишемо рівняння в таких приростах:

$\omega = \omega + \Delta\omega$; $H_{\text{ст}} = H_{\text{ст}} + \Delta H_{\text{ст}}$; $Q = Q + \Delta Q$; $H = H + \Delta H$. Отримані рівняння, в наслідок врахування величин приростів, можливо спростити при нехтуванні малих величин другого і третього порядку та враховуючи, що $\omega = \omega_n$.

В результаті ряду математичних перетворень, введення оператора $p \rightarrow d/dt$ та налаштування контуру регулювання на модульний оптимум, отримаємо математичний опис регулятора напору, що забезпечує стабілізацію тиску в гідравлічній мережі [86]-[88].

$$W_{\text{РН}}(p) = K_{\text{Н}} + \frac{1}{(T_{\text{м}} + T_{\text{Н}})p + 1}, \quad (3.11)$$

де $W_{\text{РН}}(p)$ – передаточна функція регулятора тиску;
 $K_{\text{Н}} = \omega_n p_n (a_n + a) / 8\pi T_{\text{м}} K_{\text{зН}} H_{0\text{Н}} a$, $T_{\text{Н}} = \chi / 2(a_n + a)Q$ – введені змінні; $T_{\text{м}}$ – некомпенсована стала часу; $T_{\text{м}}$ – механічна стала часу; a – гідравлічний опір мережі водопостачання.

3.2 Дослідження електромеханічної системи водопостачання при живленні від вітрогенератора в умовах стабілізації напору методом математичного моделювання

На підставі приведених раніше математичних моделей електромеханічної системи отримані в рамках пакета прикладних програм MATLAB SimPowerSystems та Simulink моделі для показників рівня стабілізації напору в гідросистемі при живленні від вітрогенератора.

Для досліджень прийнятий один з типових графіків споживання води в межах добового циклу водопостачання житлових будинків [87]-[89], характер зміни гідравлічного опору мережі наведено на рис. 3.4.

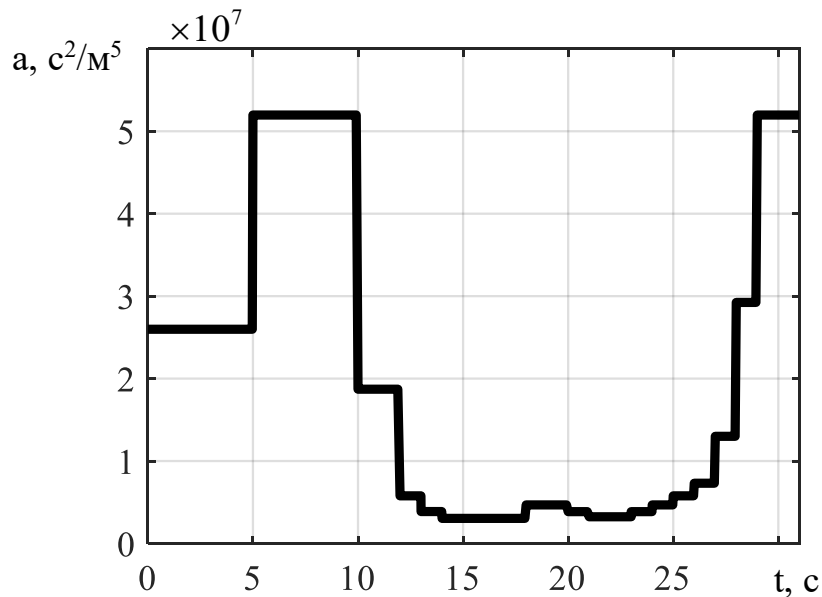


Рисунок 3.4 – Графік гідравлічного опору системи, а

Враховуючи складність та час моделювання, добовий цикл зміни гідравлічного опору (рис. 3.4) під час моделювання було зроблено в масштабі та становить (0÷30) с, що відповідає (0÷24) год. Таке масштабування є можливим оскільки процеси при добовому циклі є усталеними, тому зміна часу моделювання не вносить суттєвих похибок в результати досліджень. Добовий цикл починається з 5 с, оскільки необхідно спочатку виконати розгін генератора і двигуна.

Добовий цикл (рис. 3.4) умовно поділяється на 4 основні періоди: ранковий (6-12) год, денний (12-17) год, вечірній (17-21) год та нічний (21-6) год. Найбільш завантаженими є ранковий та вечірній періоди, тому гідравлічний опір мережі найменший.

Дослідження проводилися для асинхронного генератора потужністю 5.5 кВт, асинхронного двигуна – 4 кВт та насоса – 3.7 кВт. Рівень стабілізації напору становить 48 м, що є номінальним тиском для обраного насоса.

Моделювання проводили для такої послідовності контрольних операцій роботи асинхронного генератора з самозбудженням та приводного двигуна насосної установки:

- в момент часу 0-0.1 с АГ розганявся до швидкості 157 рад/с, при повному номінальному навантаженні 5.5 кВт, підключеному до виходів системи;

- в момент часу 0.1-5 с розганявся привідний двигун насосу до номінальної швидкості при номінальному значенні навантаження гідравлічної мережі;
- в момент часу 4.5-5 с рідина, піднімаючись до заданого рівня тиску, долає величину навантаження обумовлене статичним напором $H_{ст}$, що діє зверху вниз;
- в момент часу 5-30 с навантаження змінювалося відповідного до добового циклу водоспоживання, відповідно до графіку зміни гідравлічного опору (рис. 3.4).

Результати дослідження насосної установки та генератора приведені на рис. 3.5 - 3.8.

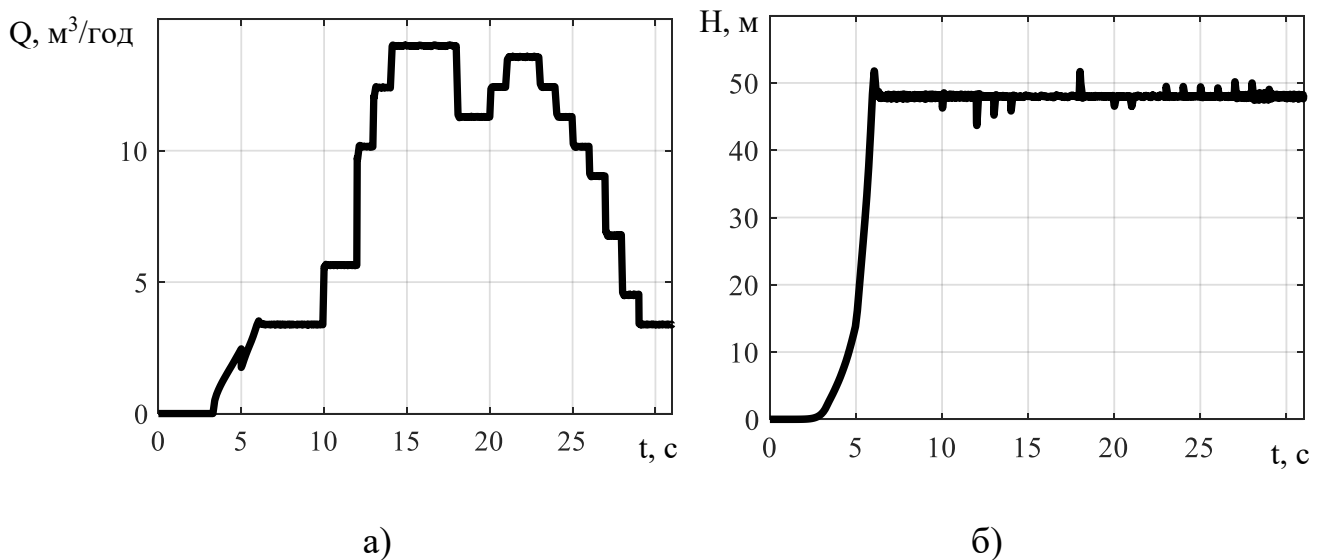


Рисунок 3.5 – Перехідні процеси в насосній системі: а) – продуктивність насосу, Q ; б) – напір насосу, H

З графіків перехідних процесів в насосній установці (рис. 3.5) видно, що під час зміни гідравлічного опору регулятор напору відпрацьовує задане значення з невеликою динамічною похибкою. Ця похибка становить не більше 1%, що є припустимим для технологічних та житлово-комунальних вимог. Максимальні значення продуктивності насоса досягаються в ранковий та вечірній періодах, при цьому насос та двигун працюють в номінальних режимах. Наявність похибка відпрацювання заданого тиску також обумовлена стибкоподібним характером зміни гідроопору.

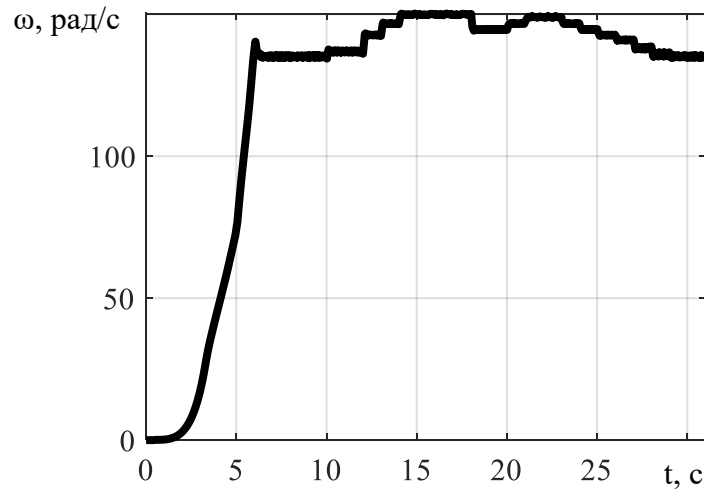
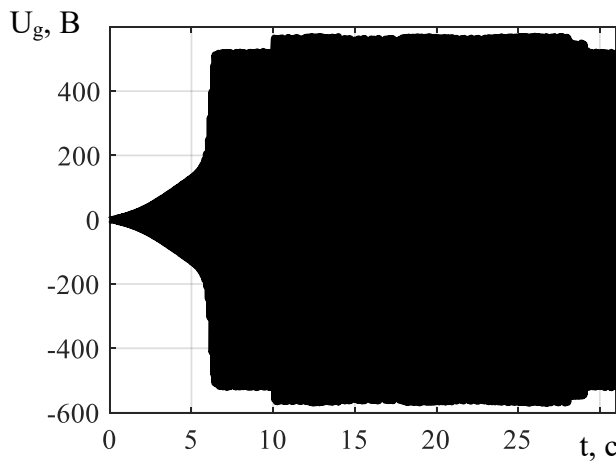
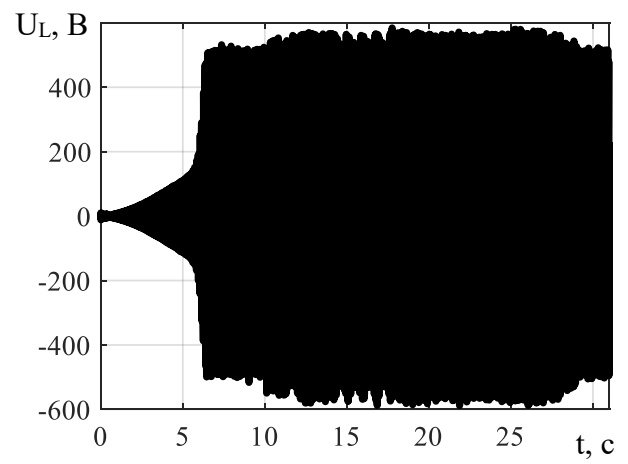


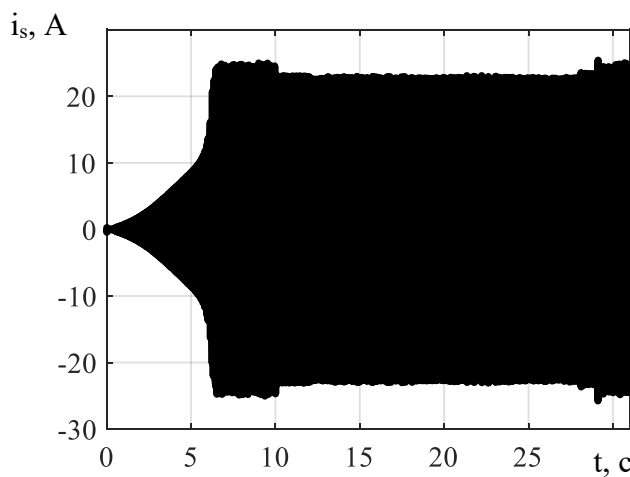
Рисунок 3.6 – Перехідні процеси в насосній системі: а) – кутова швидкість обертання двигуна, ω



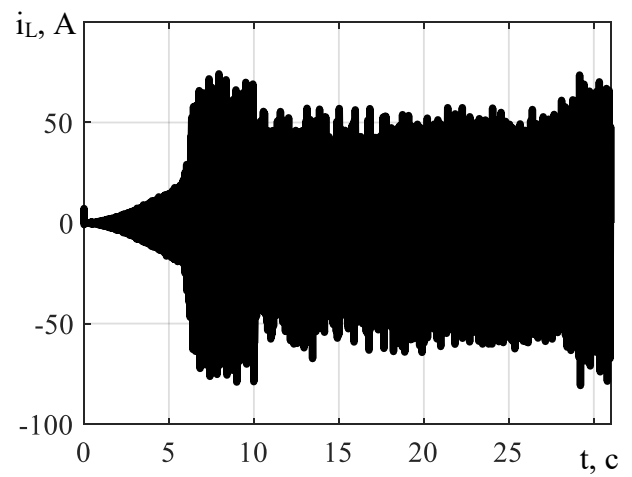
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.7 – Перехідні процеси в асинхронному генераторі: а) – лінійна напруга АГ, U_g ; б) – лінійна напруга навантаження, U_L ; в) – лінійний струм статора, i_s ; г) – лінійний струм навантаження, i_L

Після розгону генератора до кутової швидкості 157 рад / с відбувається самозбудження генератора. За час 4.5 с відбувся процес самозбудження, і генерована напруга досягла номінального значення. Генератор включається одразу з навантаженням у вигляді насосу. При цьому середнє значення електромагнітного моменту АГ становить близько 58 Нм, а напруга в ланці постійного струму становить 505 В. Величина напруги між лініями навантаження становить 450 В. При навантаженні 5.5 кВт величина струму лінії навантаження становить 35 А.

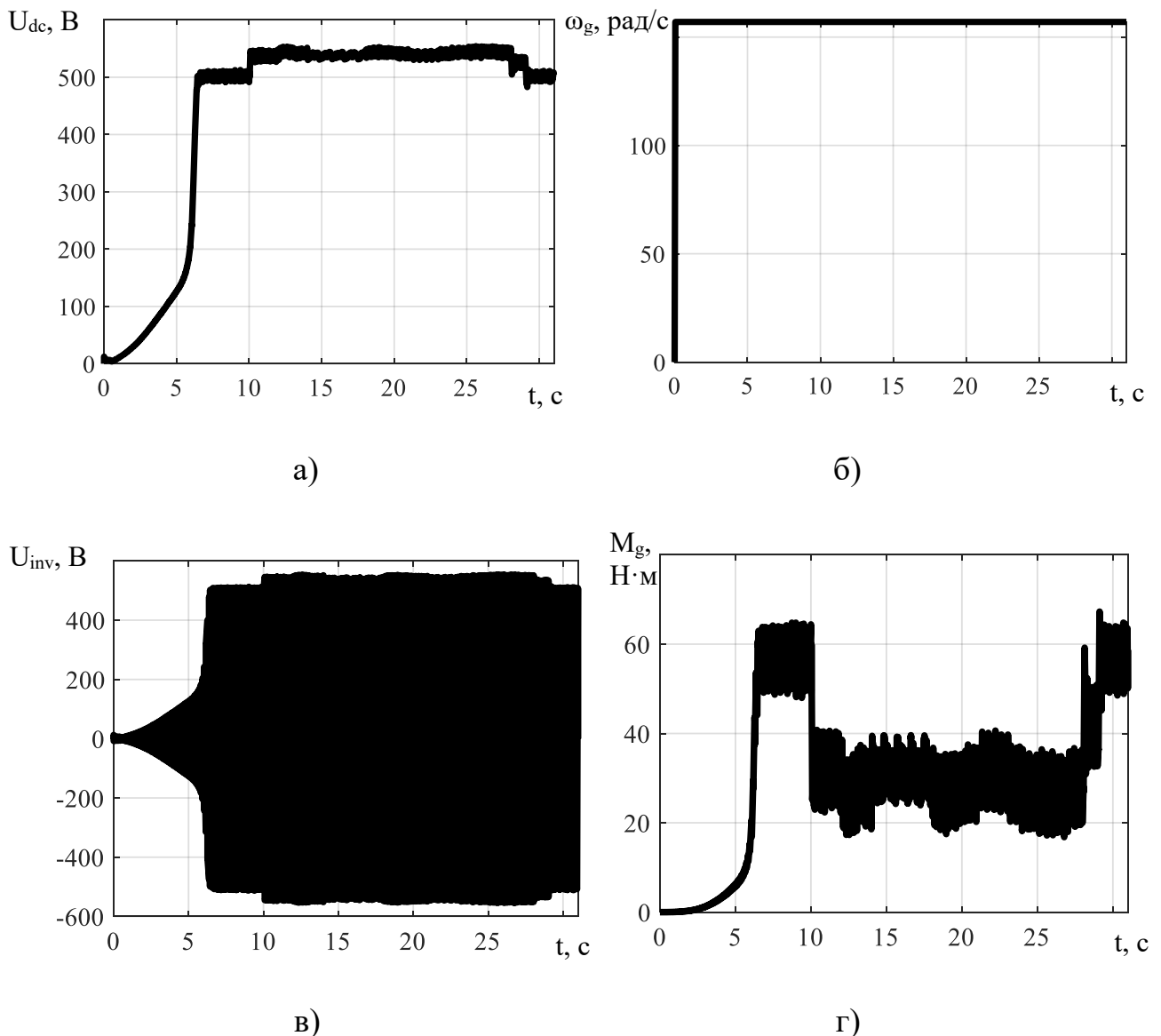


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси в асинхронному генераторі: а) напруга ланки постійного струму, U_{dc} ; б) – частота обертання ротора, ω_g ; в) – лінійна напруга інвертора, U_{inv} ; г) – момент навантаження, M_g

Після зміни навантаження відповідно до графіку розподілу навантаження гідромережі за один добовий цикл в момент часу 10 с лінійний струм навантаження має значення 20 А, а напруга АГ від лінії до лінії зростає з 505 В до 550 В. Форми струму та напруга дещо спотворюється через нелінійність навантаження. Збільшення напруги АГ призводить до зростання напруги в ланцюзі постійного струму до 540 В.

За допомогою регулятора напруги вихідна лінійна напруга навантаження стабілізується на величині 510 В. Це підтверджує той факт, що реалізація запропонованої системи дає можливість підтримувати значення вихідної напруги на постійному номінальному рівні не в залежності від гідравлічного опору мережі.

Коливання лінійного струму навантаження викликані перемиканнями IGBT ключів в інверторах перетворювачів частоти.

3.3 Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання при живленні від вітрогенератора методом математичного моделювання

Для дослідження енергоефективності системи керування турбомеханізмом, що живиться від альтернативного джерела електричної енергії, а саме вітрогенератора, у запропоновану систему (рис. 3.1) вводиться оцінювач ККД, створений на основі використання теорії штучних нейронних мереж [90]. Функціональна схема наведена на рис. 3.9.

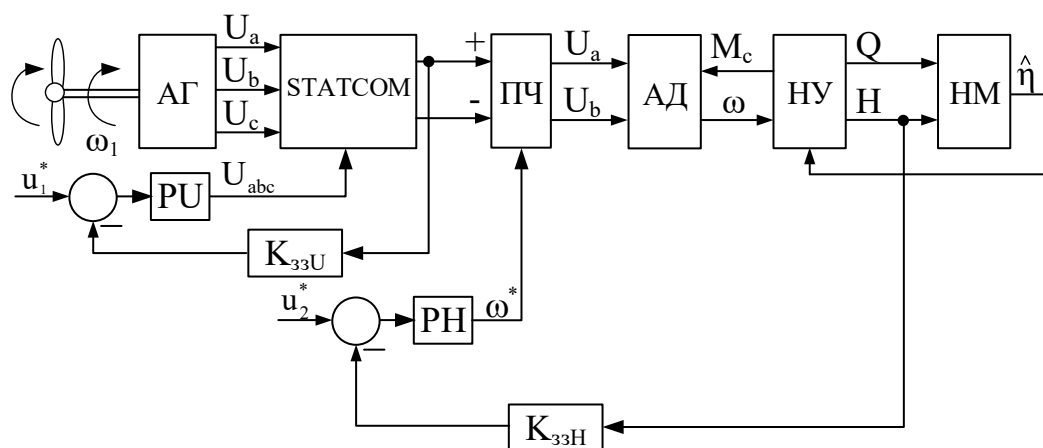


Рисунок 3.9 – Функціональна схема системи керування із оцінювачем ККД

На рис. 3.9 наведені використані наступні позначення: НМ – оцінювач ККД насосу на основі нейронної мережі; $\hat{\eta}$ – оцінене значення ККД насосу.

Для вимірювання величини ККД насоса використано оцінювач, побудований на базі нейронної мережі, налаштування якого проведено у відповідності з методикою наведеною у розділі 2. Для створення штучної нейронної мережі для оцінки ККД насосу використано пакет прикладних програм Matlab2014b з редактором нейронних мереж (Network/Data/Manager).

Для вирішення задач оцінювання ККД насосу систем водопостачання при використанні ШНМ, побудованих за класичною схемою перцептронів із стандартними алгоритмами навчання [91], [92], достатнім і необхідним є каталожні робочі характеристики насосу при різних швидкостях обертання приводного двигуна, тобто. Набори статичних характеристик продуктивність-тиск (Q-H) або продуктивність-активна потужність (Q-P) та продуктивність-ККД (Q-ККД) насосу використовується у якості масиву даних для навчання таких мереж. Точність оцінки ККД залежить від обсягу цих даних, тобто від кількості робочих точок, які включаються до ШНМ. Спрощену структуру оцінювача ККД насосу представлено на рис. 3.10.

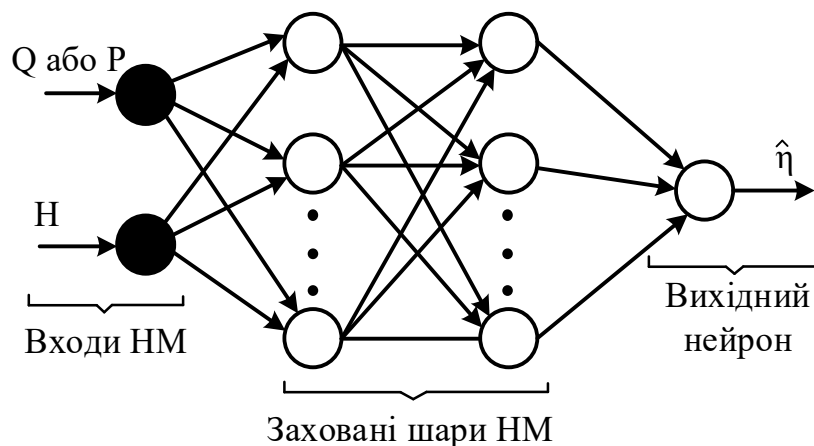


Рисунок 3.10 – Спрощена структура ШНМ для оцінювача ККД насосу

Для спрощення процесу формування масивів даних можна використовувати каталожні статичні характеристики насосів, які доступні у електронному вигляді у каталогах виробників. Наприклад, масиви можуть бути сформовані на основі 250 робочих точок, включаючи 10 статичних

характеристик і 10 значень ККД в залежності від витрат при різних швидкостях обертання насосу в діапазоні від 2950 об/хв до 1150 об/хв з інтервалом 100 об/хв.

Навчання нейронної мережі з прямим поширенням сигналів (feed-forward backpropagation) відбувалося на основі каталожних характеристик насосу [93], [94] та сформована з 2-х шарів по 10 нейронів в першому і 1 в вихідному. Структура такої нейромережі показана на рис. 3.11. Похибка тренування становила 0,031, коефіцієнт регресії – 0,998, що свідчить про працездатність нейронної мережі та можливості застосування її в якості оцінювача ККД обраного насосу. Результати тренування нейронної мережі для вхідного масиву системи водопостачання, що живиться від вітрогенератора, зображено на рис. 3.12.

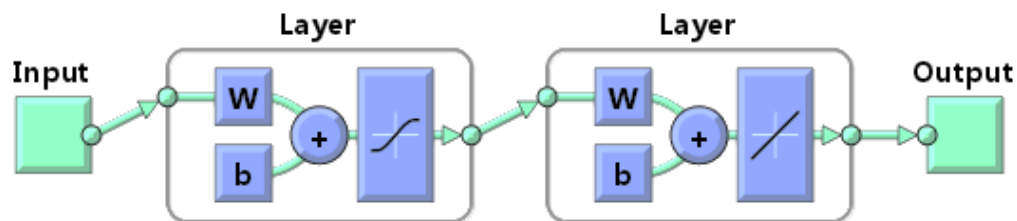


Рисунок 3.11 – Структура нейромережі для оцінювання ККД насосу

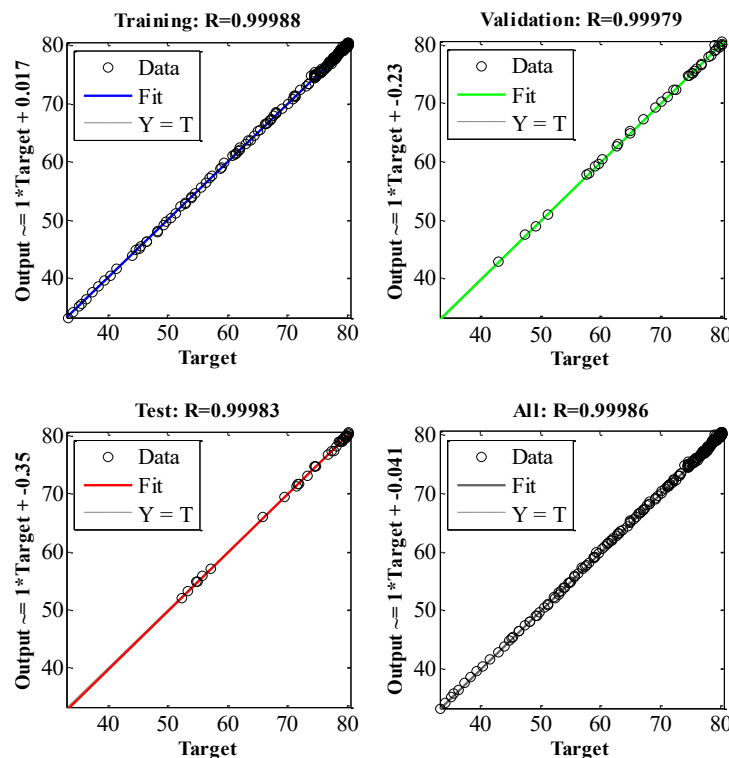


Рисунок 3.12 – Графіки лінійної регресії для нейронної для вхідного масиву (H, Q)

оцінювання ККД насосної установки, що живиться від вітрогенератора, та можливість подальшого застосування оцінювача ККД в бездатчикових системах керування турбомеханізмами.

Висновки до розділу 3

1) Наведено математичний опис основних елементів електромеханічної системи керування турбомеханізмом при живленні від вітрогенератора в умовах стабілізації тиску, таких як асинхронного генератора, перетворювача частоти, асинхронного приводного двигуна, насосної установки, регулятора тиску.

2) Проведено дослідження методом математичного моделювання системи водопостачання при живленні від вітрогенератора із застосуванням статичного компенсатора в умовах стабілізації тиску гідромережі. Результати дослідження свідчать, що створена система забезпечує стабілізацію напору в гідравлічній мережі на визначеному рівні при зміні опору відповідно до технологічних вимог. При цьому динамічна похибка в регулюванні напору системи не перевищує 1%. Розроблена модель в середовищі MATLAB дозволяє проводити аналіз системи контролю величини та частоти напруги, яку подає генератор для живлення турбомеханізму, за допомогою перетворювача частоти в різних режимах та при різних добових навантаженнях водопостачання.

3) Наведено математичний опис і процес проектування та навчання нейронної мережі для реалізації оцінювача ККД насосної установки розглянутої системи.

4) Проведені дослідження показали, що розроблена система керування дозволяє оцінювати енергоефективність насосної установки, що живиться від альтернативного джерела електричної енергії в умовах стабілізації напору, з високою точністю. ККД насоса досягає максимального значення при номінальному режимі роботи насосу та приводного двигуна. Розроблена модель у середовищі MATLAB дозволяє аналізувати енергоефективність системи керування турбомеханізмом без використання датчиків при регулюванні величини та частоти напруги вітроустановки, що живить його.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ БЕЗДАВАЧЕВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТУРБОМЕХАНІЗМОМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дослідження електромеханічної системи турбомеханізму при живленні від вітрогенератора в умовах стабілізації напору гідромережі виконувалися при використанні двох типів оцінювачів технологічних координат для реалізації бездавачевого керування. Розглянуто використання оцінювачів напору із стандартними алгоритмами навчання та з модифікованою структурою нейронних мереж із зворотнім зв'язком для підвищення точності оцінювання вихідного параметру. Також розглянуто дві системи керування турбомеханізмами, такі як: із використанням статичного компенсатора та із електронним регулятором навантаження.

4.1 Дослідження системи керування турбомеханізмом при використанні оцінювача тиску із стандартними алгоритмами навчання

Функціональна схема системи керування турбомеханізмом при живленні від вітрогенератора із оцінювачем тиску, побудованим за класичною схемою перцептронів із стандартними алгоритмами навчання, представлена на рис. 4.1.

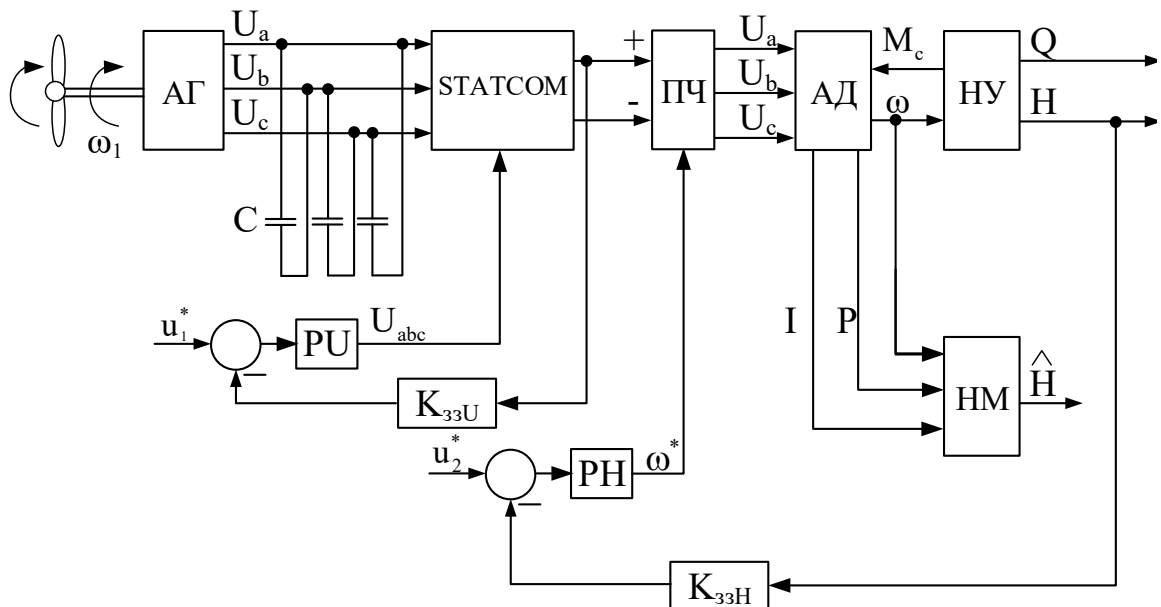


Рисунок 4.1 – Функціональна схема для дослідження системи бездавачевого керування турбомеханізмом

На підставі приведеного математичного опису основних елементів електромеханічної системи реалізовано модель в рамках пакетів прикладних програм MATLAB SimPowerSystems та Simulink для дослідження оцінювача тиску системи водопостачання в умовах стабілізації напору в гідросистемі при живленні від вітрогенератора [95], [96].

Результати роботи оцінювача напору насосної установки, побудованому на базі штучної нейронної мережі із зворотними зв'язками, представлено на рис. 4.2, де \hat{H} – величина оцінюваного тиску насосу; $e\hat{H}(\%) = H - \hat{H}$ – похибка оцінювання напору.

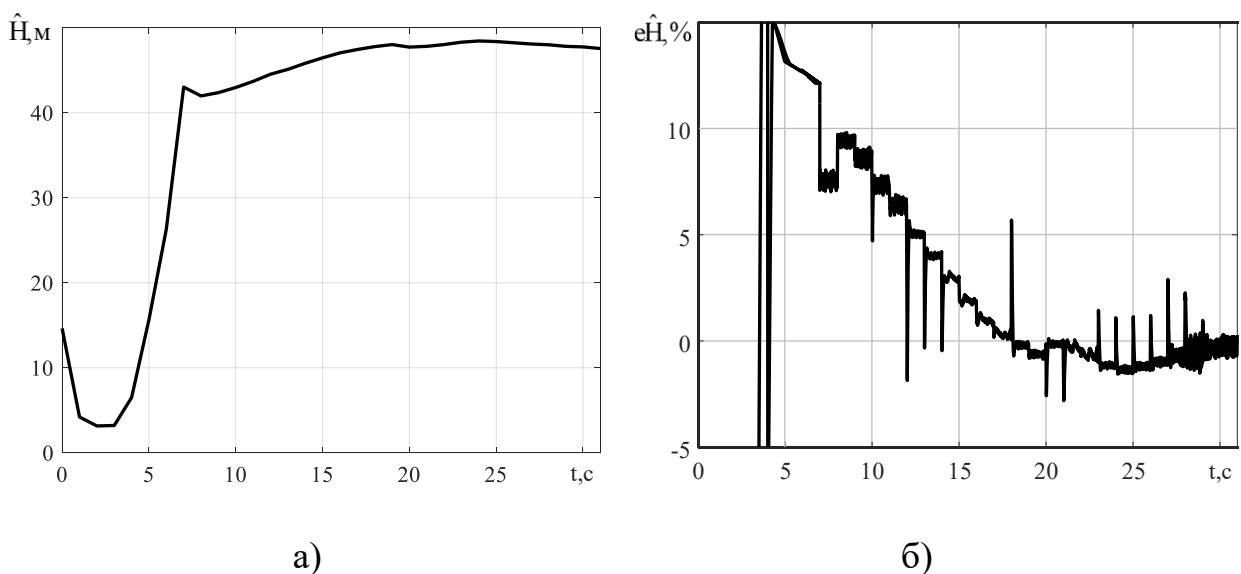


Рисунок 4.2 – Перехідні процеси оцінювача тиску: а) – величина оцінюваного тиску насосу; б) – похибка оцінювання напору

З рис. 4.2 видно, що оцінювач напору працює з досить високою точністю від 2 % до 5 %. В момент часу, коли відбувається самозбудження вітрогенератора та в періоди малого завантаження гідравлічної мережі, оцінювач працює з недостатньою точністю від 5 %. Проте в момент часу з 7 с по 30 с, коли навантаження змінюється відповідного до добового циклу споживання води, похибка оцінювання напору досягає значення до 10%, що є допустимим у таких системах. Динамічні похибки оцінювання викликані стрибкоподібною зміною навантаження. Даний оцінювач координат насосу можливо використовувати в подальшому для реалізації бездавачевих систем керування турбомеханізмами,

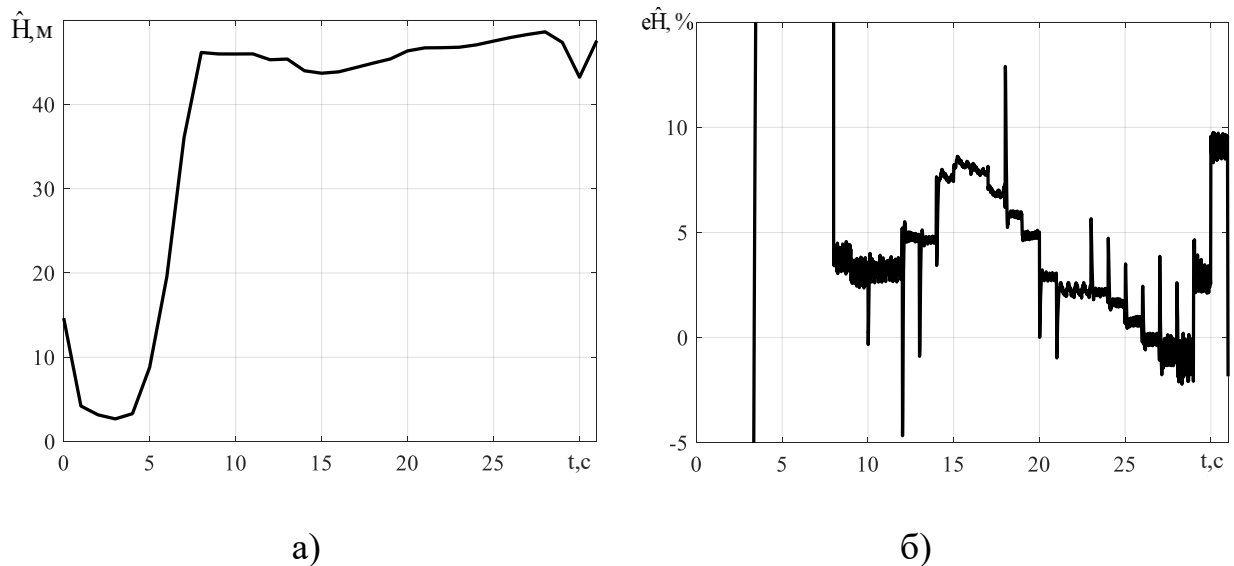


Рисунок 4.4 – Перехідні процеси в системі бездавачевого керування: а) – величина оцінюваного тиску насосу; б) – похибка оцінювання напору

З рис. 4.4 видно, що при дослідженні системи стабілізації напору із використанням сигналу оцінювача тиску у якості зворотного зв'язку похибка відпрацювання заданого напору не перевищує 5 %, що може бути прийнятним для деяких вимог технологічних процесів. Порівнюючи систему бездавачевого керування та при використанні давача тиску, похибка оцінювання тиску коливається в діапазоні від 0 % до 8 %. Динамічні похибки викликані дискретною зміною гідравлічного опору мережі. При самозбудженні генератора, оцінювач не працює, тому похибка оцінювання перевищує допустимі 10 %. Рекомендовано не використовувати ці дані. Отже, проведені дослідження показали, що розроблений оцінювач напору можливо використовувати в системах стабілізації тиску гідромережі електромеханічної системи керування турбомеханізмом, що живиться від альтернативного джерела енергії, при реалізації бездавачевих систем керування.

Для збільшення точності оцінювання технологічних координат можливо додаткове перенавчання нейронної мережі або пошук оптимальної кількості нейронів та затримок при формуванні мережі, при цьому система стабілізації напору буде працювати точніше та надійніше.

Для навчання мережі можливе використання не тільки значення швидкості обертання приводного двигуна, що доступний з датчика швидкості, а і значення частоти, у випадку відсутності останнього. Проте використання частоти у якості вхідної координати нейронної мережі зменшує точність оцінювання вихідного параметру, що призводить до збільшення динамічної похибки відпрацювання заданого рівня напору системи водопостачання.

4.3 Дослідження бездавачевої системи керування турбомеханізмом з модифікованим оцінювачем тиску із зворотнім зв'язком при живленні від вітрогенератора із використанням електронного регулятора навантаження

В загальному випадку система регулювання напруги АГ за умови використання електронного регулятора навантаження (ЕРН) містить баластний резистор $R_{\text{бал}}$ у якості баластного навантаження. Функціональна схема такої системи зображено на рис. 4.5.

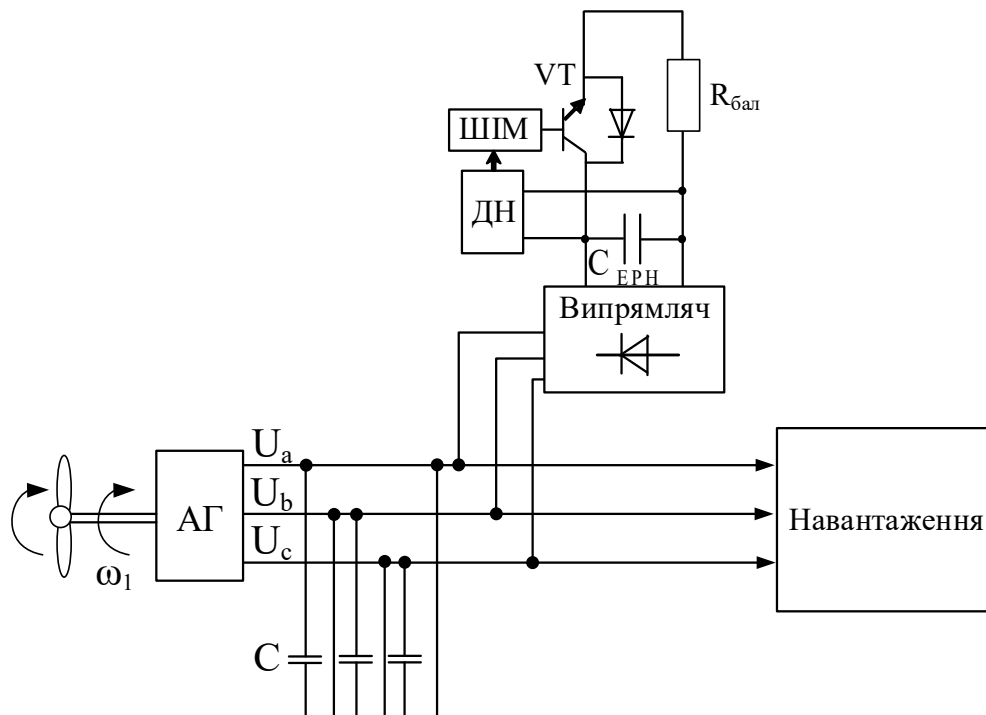


Рисунок 4.5 – Функціональна схема системи керування напругою за допомогою електронного регулятора навантаження

На рис. 4.5 асинхронний генератор приєднано до навантаження, яке може варіюватись від 0 % до 100 % від номінального значення під час роботи. Паралельно до генератора та навантаження підключено ЕРН, що складається з випрямляча, фільтруючого конденсатора $C_{ЕРН}$ та баластного навантаження у вигляді $R_{бал}$. Останнє комутується за допомогою електронного ключа VT в залежності від навантаження на асинхронний генератор.

Сигнали для управління ключем подаються від ШІМ-контролера, який, враховуючи величину напруги, отриману від датчика напруги ДН, видає сигнал на замикання ключа. Конденсаторна батарея С розраховується таким чином, щоб АГ міг самозбуджуватися від неї при приєднаному номінальному навантаженні.

Функціональна схема бездавачевої система керування турбомеханізмом із оцінювачем тиску з модифікованою структурою нейронних мереж із зворотнім зв'язком при живленні від вітрогенератора із використанням електронного регулятора навантаження наведено на рис. 4.6.

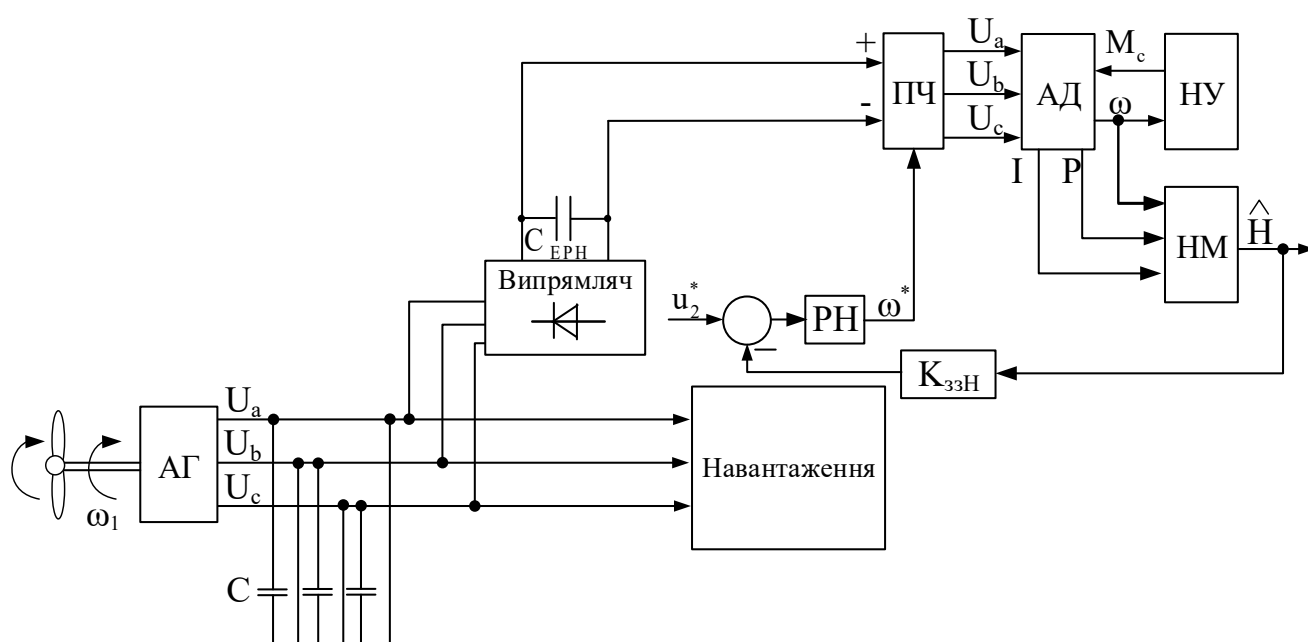


Рисунок 4.6 – Функціональна схема для дослідження системи бездавачевого керування турбомеханізмом

Однією з головних функцій електронного регулятора навантаження є забезпечення сталого навантаження АГ, що, в свою чергу, забезпечує сталу

величину генерованої напруги. У випадку зміни величини навантаження в системі, баластне навантаження (навантаження від насосу) підключається, забезпечуючи постійну загальну потужність на генераторі [97], [98].

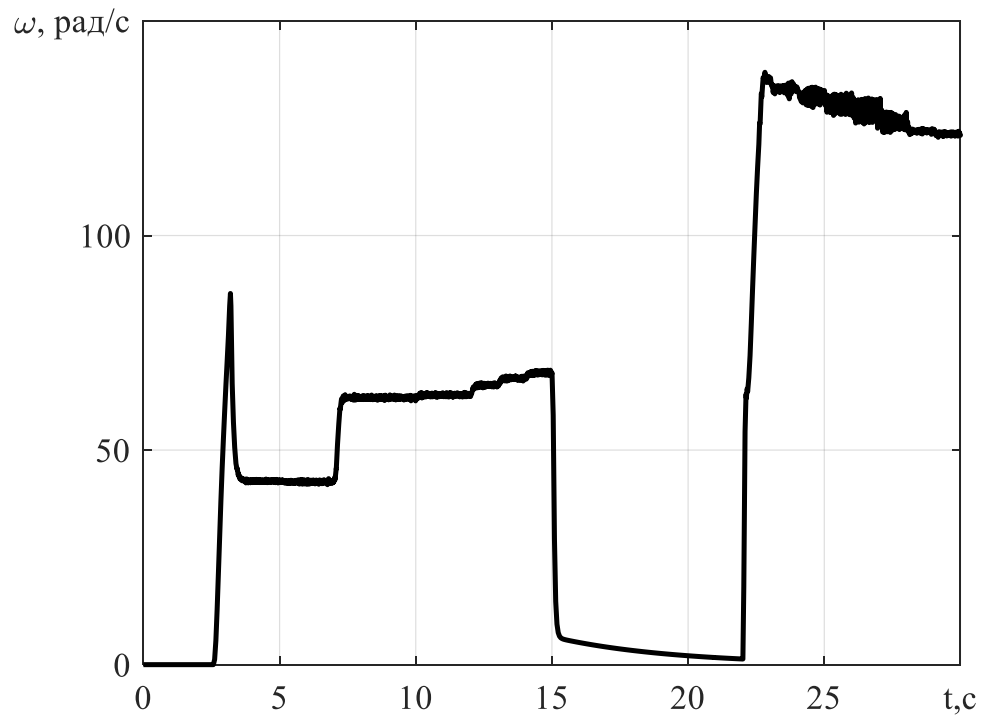
$$P_{\text{заг}} = P_L + P_{\text{бал}}, \quad (4.1)$$

де $P_{\text{заг}}$ – загальна електрична потужність на генераторі; P_L – електрична потужність яку споживає навантаження підключене до АГ; $P_{\text{бал}}$ – електрична потужність яку споживає баластне навантаження.

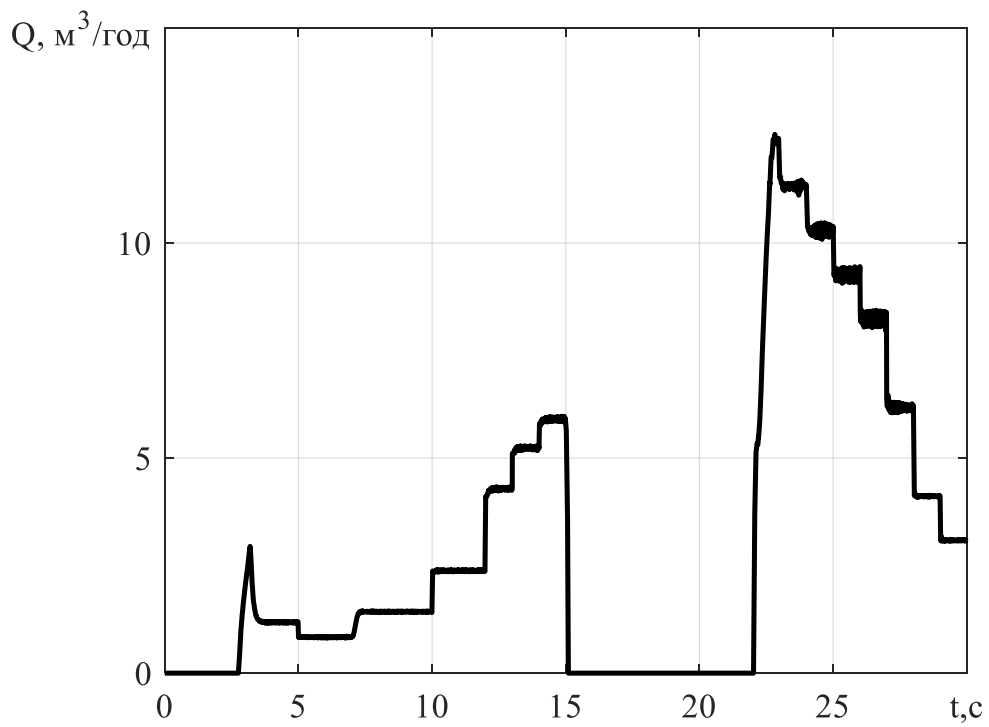
Подальші дослідження проводилися для наступних значень електричної потужності $P_{\text{бал}}$ та заданої величини стабілізації тиску гідромережі для задоволення потреб споживачів:

- з 0 с до 7 с у ранковий період часу добового циклу $P_{\text{бал}} = 1,65$ кВт, що відповідає 30% від загальної електричної потужності на генераторі $P_{\text{заг}}$; заданий рівень стабілізації тиску становить 5 м;
- з 7 с до 15 с у денний період часу добового циклу $P_{\text{бал}} = 2,75$ кВт, що відповідає 50% від загальної електричної потужності на генераторі $P_{\text{заг}}$; заданий рівень стабілізації тиску становить 10 м;
- з 15 с до 22 с у вечірній період часу добового циклу $P_{\text{бал}} = 0$ кВт, що відповідає 0% від загальної електричної потужності на генераторі $P_{\text{заг}}$;
- з 22 с до 30 с у нічний період часу добового циклу $P_{\text{бал}} = 4,95$ кВт, що відповідає 90% від загальної електричної потужності на генераторі $P_{\text{заг}}$; заданий рівень стабілізації тиску становить 40 м;

Результати дослідження наведено на рис. 4.7 – 4.8.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Перехідні процеси в системі бездавачевого керування: а) – швидкість обертання насосу; б) – продуктивність насосу

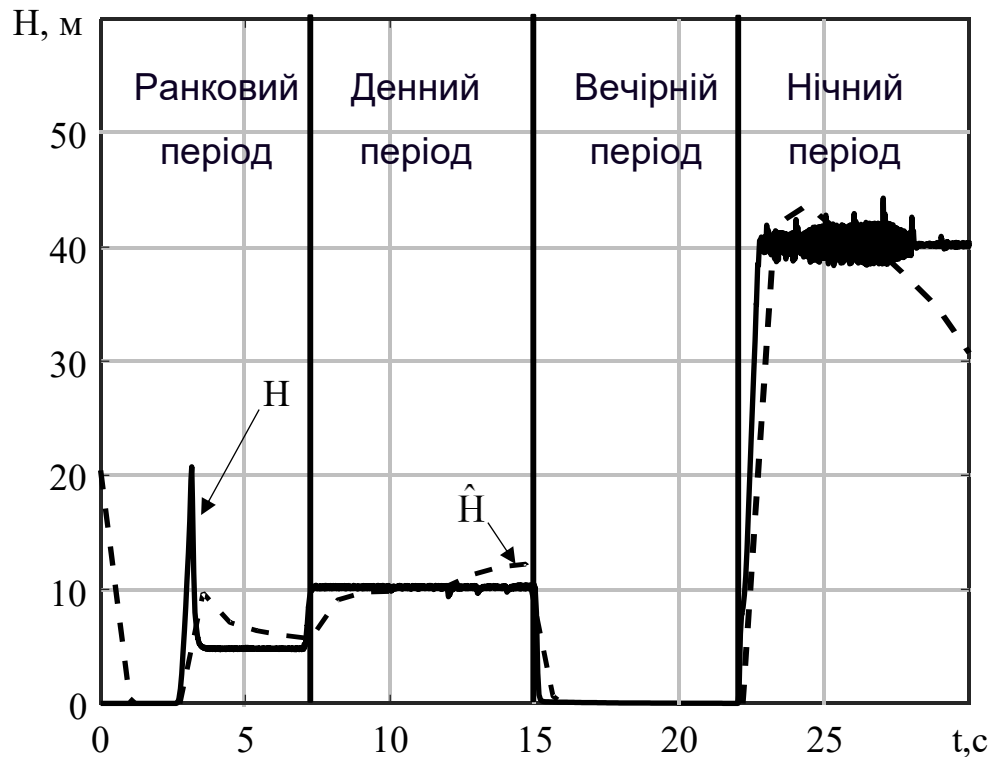


Рисунок 4.8 – Перехідні процеси в системі бездавачевого керування: величина фактичного H та оцінюваного \hat{H} тиску насосу

З графіків на рис. 4.7 та 4.8 видно, що при дослідженні бездавачевої системи керування турбомеханізмом з модифікованим оцінювачем тиску із зворотнім зв'язком при живленні від вітрогенератора із використанням електронного регулятора навантаження система стабілізує тиск гідравлічної мережі в межах добового циклу на відповідних заданих рівнях із високою точністю. Порівнюючи оцінене значення тиску систему бездавачевого керування та фактичного, що можливо отримати при використанні датчика тиску, похибка оцінювання тиску коливається в діапазоні від 0 % до 14 %. Похибки оцінювання технологічної координати викликані стрибкоподібною варіацією гідравлічного опору мережі. Спостерігаються коливальні процеси в нічний час доби, що обумовлені малим опором гідромережі. Оскільки насос є баластним навантаженням, то розроблену систему можливо використовувати для забезпечення додаткових потреб споживачів систем водопостачання, такі як полив, закачування води у резервуари, тощо. В свою чергу, проведені дослідження показали, що розроблений оцінювач напору можливо

використовувати для реалізації бездавачевих системах стабілізації тиску гідромережі, що живиться від вітрогенератора.

Висновки до розділу 4

1) Проведено дослідження методом математичного моделювання систем керування турбомеханізмом при використанні оцінювача тиску із стандартними алгоритмами навчання та при використанні модифікованого оцінювача тиску із зворотнім зв'язком. Розроблені системи дають змогу стабілізувати напір гідравлічної мережі та стабілізацію величини вхідної напруги на заданих рівнях при зміні гідроопору в межах добового циклу споживання води. При цьому динамічна похибка відпрацювання тиску системи не перевищує 1%.

2) Проведено проєктування та навчання оцінювача напору насосної установки на базі теорії штучних нейронних мереж, що дає змогу реалізовувати принципи бездавачевого керування турбомеханізмами. Використання такого оцінювача призведе до зменшення собівартості системи у результаті вилучення із системи давачів тиску. Обраний спосіб формування нейронної мережі при використанні зворотного зв'язку дає змогу досліджувати динамічні процеси з високою точністю від 2 % до 5 %. Похибка оцінювання технологічних координат не перевищує 10 %. Динамічна похибка оцінювання обумовлена стрибкоподібною зміною гідравлічного опору мережі.

3) Використання оцінювача тиску для реалізації бездавачевої системи водопостачання в умовах стабілізації напору можливе для технологічних процесів, що допускають похибку відпрацювання напору на заданому рівні до 5 %. Похибка оцінювання тиску в бездавачевій системі керування становить від 0 % до 8 %, що є допустимим як і для задоволення технологічних вимог, так і при вимірюванні параметрів мережі при використанні контрольно вимірювальних приладів.

4) Проведено дослідження бездавачевої системи керування турбомеханізмом з модифікованим оцінювачем тиску із зворотнім зв'язком при живленні від вітрогенератора із використанням електронного регулятора

навантаження. Така система дозволить використовувати насосну установку як баластного навантаження у автономній мережі, тобто як споживача надлишкової енергії, та застосовувати для забезпечення потреб споживачів, такі як зрошування, накачування води у резервуари, іригація тощо. Порівнюючи оцінені значення тиску, отримані системою бездатчикового керування, та фактичний тиск, який можна виміряти за допомогою датчика тиску, виявлено, що похибка оцінки тиску коливається в межах від 0 % до 14 %.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Основні елементи системи керування вентилятором

При дослідженні систем керування турбомеханізмами методами математичного моделювання не в повній мірі враховується фізичні властивості таких систем і обладнання в цілому. У зв'язку з цим для проведення експериментальних досліджень було обрано систему керування вентилятором, що також є турбомеханізмом. На відміну від насосних систем, де гідравлічна мережа виконується із герметично з'єднаного трубопроводу, системи вентиляціювання або кондиціювання мають значну кількість недоліків у повітропроводі, які важко помітити. Також у таких системах важко помітити втрати повітря, на відміну від втрат води, які виникають через недосконалість мережі, що призводить до появи додаткових збурень.

Експериментальний дослідницький стенд розташований в Університеті Уорика (Великобританія, Ковентрі). Дослідження проводилися в рамках академічної мобільності на базі школи Інженерії університету Уорика.

Загальний вигляд експериментальної установки представлено на рис. 5.1.

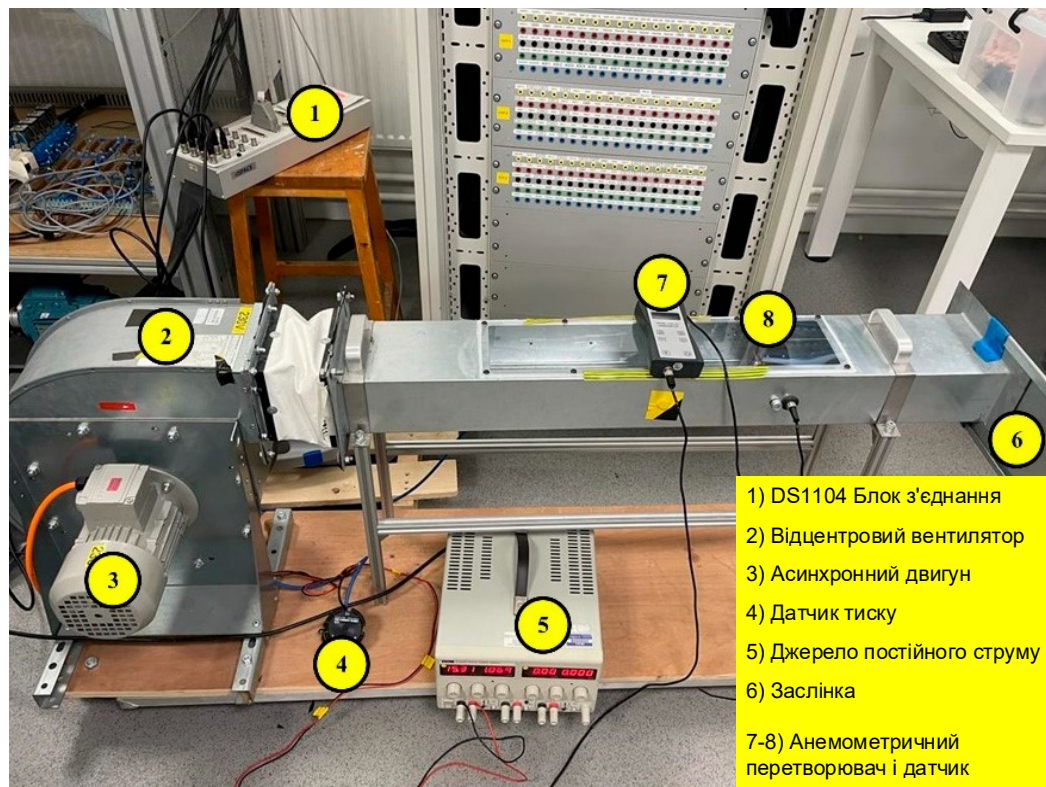


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд експериментального стенду

Функціональна схема експериментальної установки представлено на рис. 5.2.

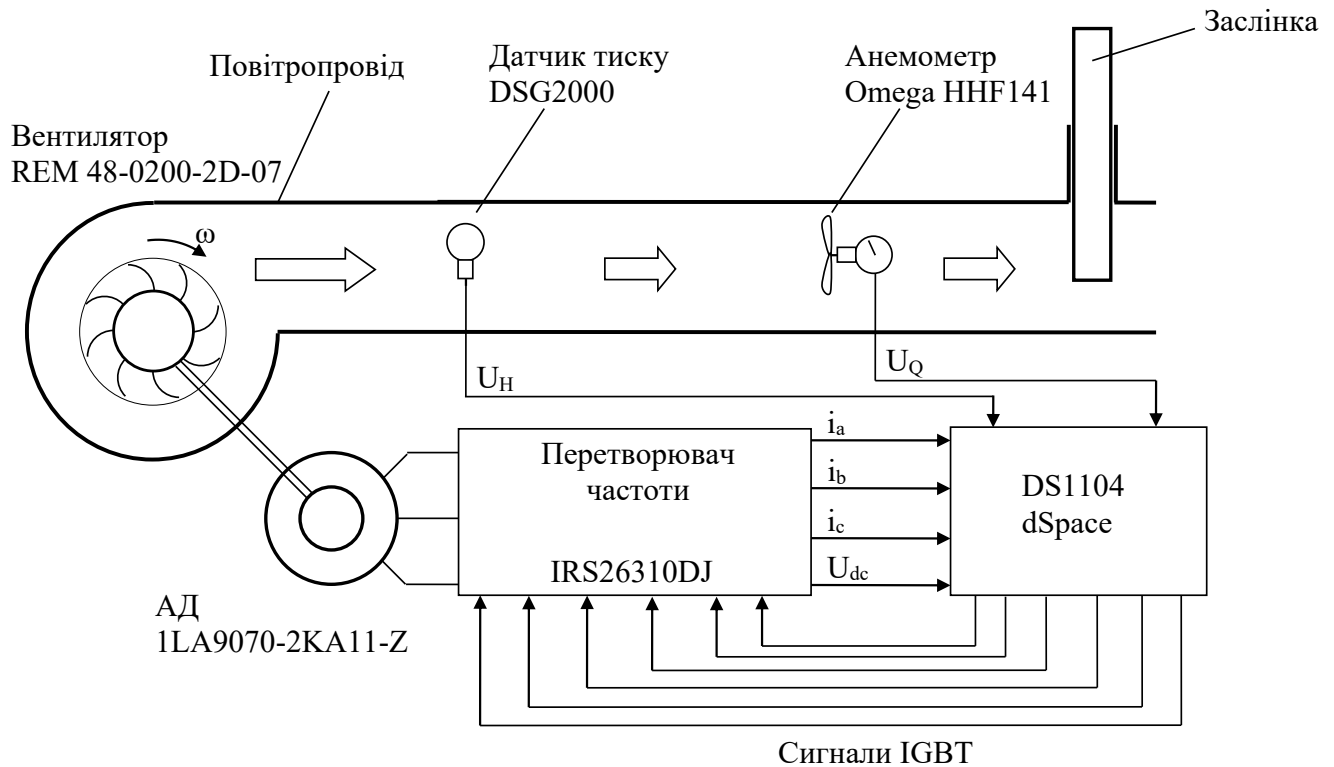


Рисунок 5.2 – Функціональна схема стенду

Стенд для проведення досліджень системи керування турбомеханізмом, а саме вентилятором, складається з наступних основних частин:

- Відцентровий вентилятор, що використовується в даному стенді - REM 48-0200-2D-07 з номінальними параметрами 2840 об/хв, 0,0714 м та 0,333 м³/с.



Рисунок 5.3 – Вигляд відцентрового вентилятора

- Двигун, що використовується в цьому стенді, – це асинхронний двигун SIEMENS, підключення «трикутник», з номінальними параметрами 0,37 кВт, 400 В, 50 Гц і 2740 об/хв.



Рисунок 5.4 – Вигляд асинхронного двигуна

- Перетворювач частоти складається з драйвера IMC IRS26310DJPBF, що керує 6 силовими IGBT ключами для реалізації симетричної ШІМ ($+V=V_{dc}/2$ і $-V=V_{dc}/2$) [99]. Номінальні параметри плати International Rectifier Inverter Evaluation - 0,4 кВт, 240 В.

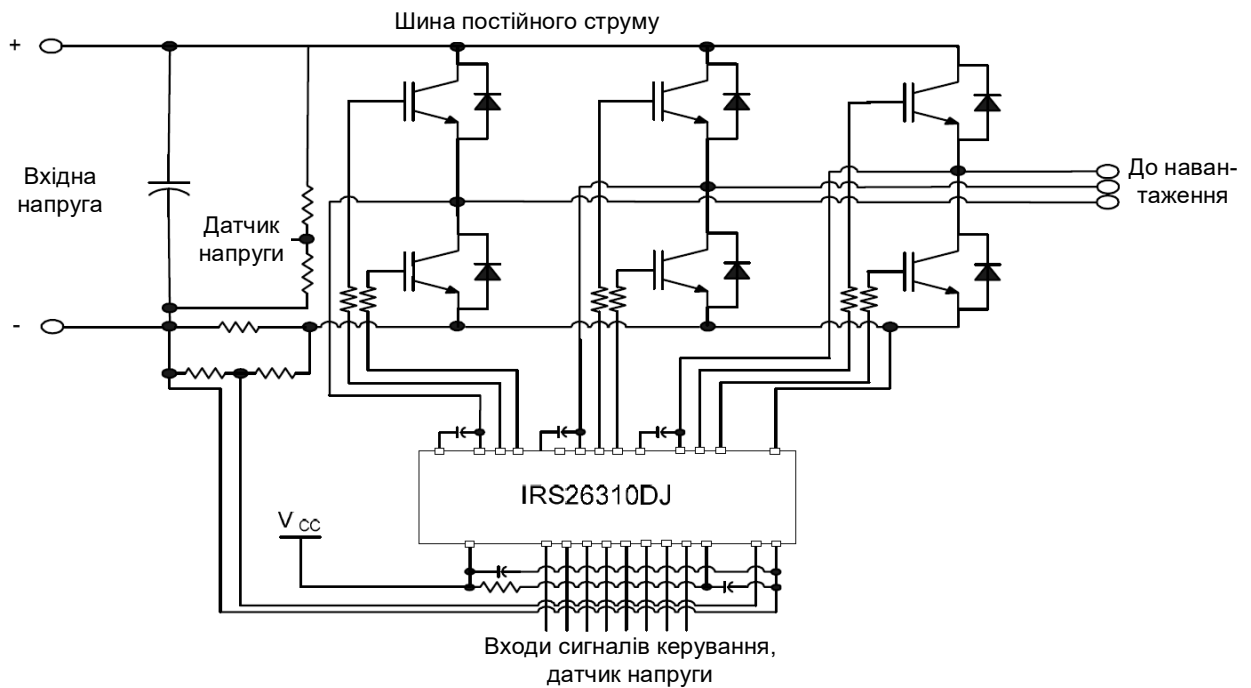


Рисунок 5.5 – Функціональна схема перетворювача частоти

- Анемометр моделі HHF141 Omega - це прилад для вимірювання швидкості повітряного потоку в каналі вентилятора. Він складається з двох елементів: датчика, встановленого всередині каналу вентилятора, і перетворювача (який перетворює виміряне значення швидкості повітря у вимірюваний сигнал напруги) зовні. Спочатку він вимірює швидкість в м/с або футах/с, а якщо необхідно розрахувати об'ємний потік, достатньо виміряти площу поперечного перерізу повітропроводу, який являє собою прямокутник довжиною 15 см і висотою 10 см, що становить $0,015 \text{ м}^2$, а потім помножити її на швидкість. Діапазон вихідної напруги анемометра становить 0 В - 5 В, що відповідає діапазону швидкості потоку від 0 до 10 000 FPM (футів за хвилину).

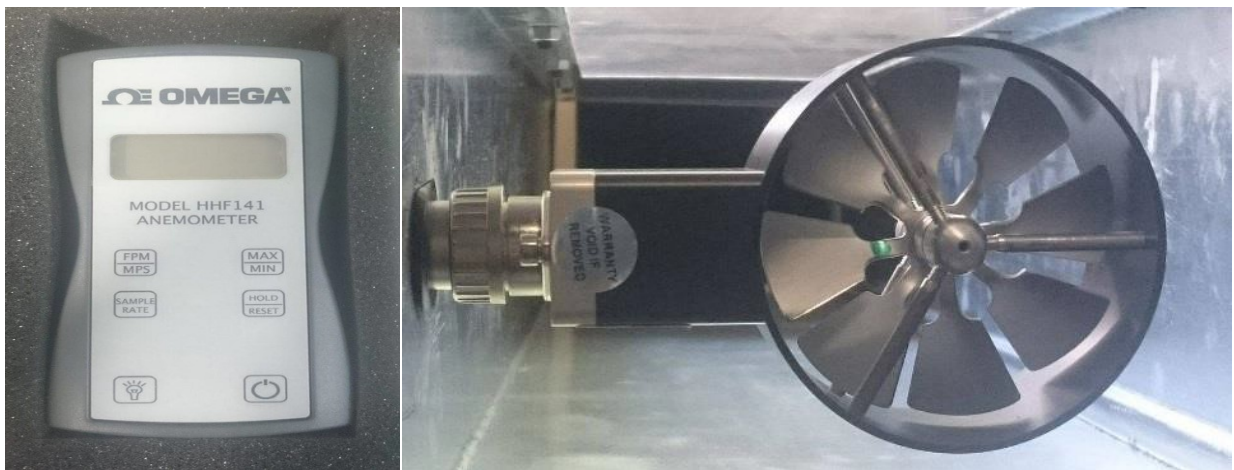


Рисунок 5.6 – Вигляд анемометру HHF141 Omega (перетворювач і датчик)

- Датчик перепаду тиску Ziehl Abegg DSG2000 - це прилад, який вимірює тиск повітря всередині повітропроводу (позитивна комірка вимірює внутрішній тиск, а негативна - атмосферний). Діапазон вихідної напруги датчика становить від 0 В до 10 В, що відповідає діапазону тиску від 0 до 2000 Па.



Рисунок 5.7 – Вигляд датчика тиску Ziehl Abegg DSG2000

- Лазерний оптичний тахозонд A2108 використовується для вимірювання швидкості обертання двигуна. Він має два діапазони, перший - від 0 до 6000 об/хв, другий - від 1000 до 60 000 об/хв. Для того, щоб він працював, всередині корпусу вентилятора і на корпусі двигуна є дві області світловідбиваючого матеріалу, які будуть відображати лазер тахометра.



Рисунок 5.8 – Вигляд лазерного оптичного тахозонду A2108

- Для вимірювання напруги ланки постійного струму, яка подається на повномостову схему, в стенді використовується перетворювач напруги. LV 25-P, який також є перетворювачем струму, але він потребує зовнішнього резистора, щоб через нього проходив струм, а потім отримувався сигнал напруги [100].
- Для вимірювання струмів статора використовуються три датчики струму моделі LTS 6-NP, вихідні сигнали яких пропорційні виміряним значенням [101].

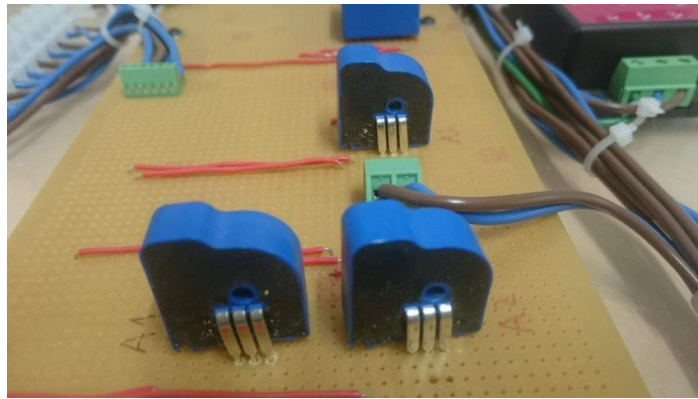


Рисунок 5.9 – Вигляд датчиків струму фаз статора

- Концепція швидке прототипного тестування (RCP) - це процес тестування та ітерації системи керування системою шляхом імпорту математичних моделей на комп'ютер з інтерфейсом вводу/виводу в реальному часі, як правило, в режимі реального часу. Ці моделі зазвичай розробляються в Matlab, Simulink, Stateflow тощо.

Перевагами RCP є швидка оцінка системи керування, скорочення часу розробки, а також раннє виявлення помилок і швидка демонстрація технології на етапах розробки. Крім того, для цих досліджень було корисно, що стратегія керування із використанням RCP була реалізована у візуальному середовищі, такому як Simulink, що призвело до менших витрат часу [102]. Реалізація концепції RCP на стенді можлива завдяки використанню обладнання dSpace.

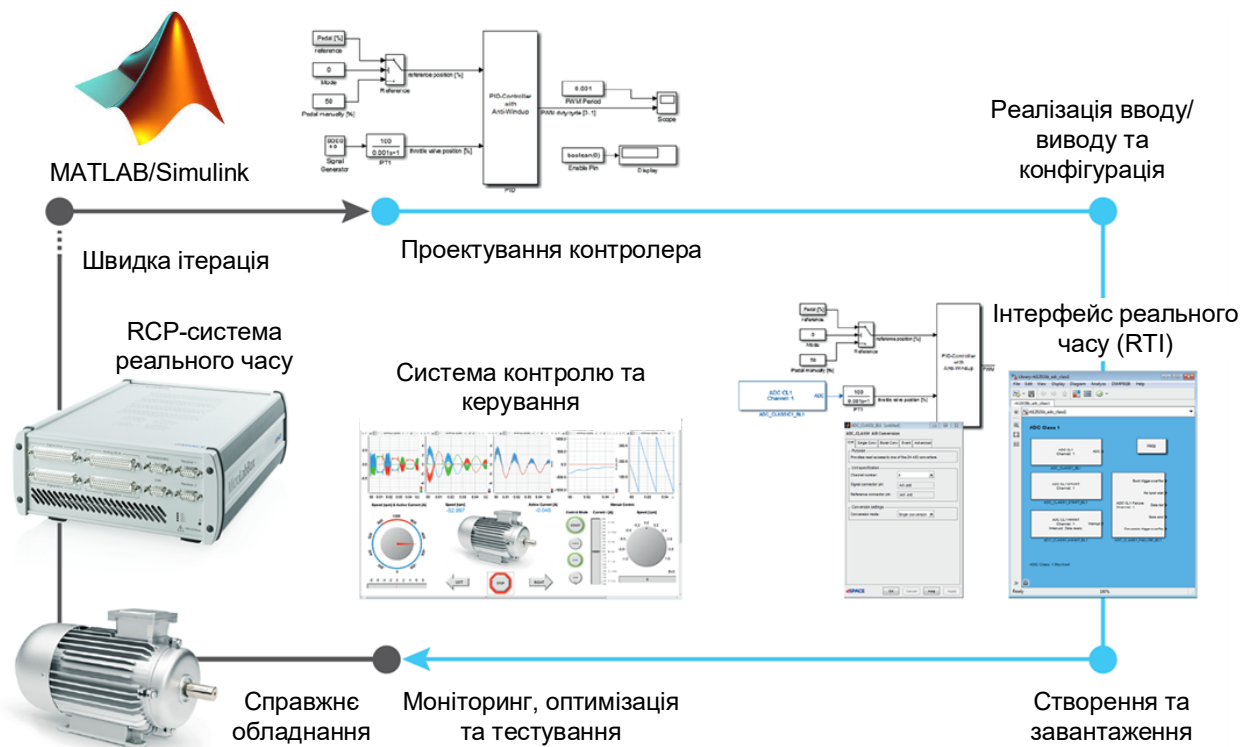


Рисунок 5.10 – Схема компонентів системи керування

- Контролерна плата DS1104 R&D покращує можливості ПК для реалізації концепції швидкого прототипного тестування.

Оскільки Simulink-модель було створено раніше, то її необхідно підготувати до реалізації в dSPACE. Для цього деякі компоненти Simulink-моделі мають бути замінені на блоки вводу/виводу, які формуються датчиками струму двигуна, ШІМ-сигналами для перетворювача частоти, тахометром, анемометром та манометром [103].



Рисунок 5.11 – Вигляд контролерної плати DS1104 R&D

5.2 Експериментальне дослідження бездавачевої системи керування вентилятора

Для того, щоб експериментально зняти характеристики, необхідно було провести тест у відкритому контурі з використанням датчиків. Тест полягав у записі даних показань датчиків для створення характеристичних кривих відцентрового вентилятора.

Фізичні експерименти передбачають вимірювання сигналів датчиків напору, витрати та швидкості обертання, а також зміну опору мережі за допомогою зміни положення однієї перешкоди (заслінка). Це положення відповідає загальній довжині 15 см, розділеній на інтервали по 1 см, і, коли положення заслінки змінюється від 0 до 15, опір мережі збільшується, даючи, в результаті, характеристичні криві вентилятора (Q-P і Q-H).

Процедура зміни положення заслінки від 0 до 14 проводилася для парних чисел частоти в діапазоні від 30 до 50 Гц, після чого фіксувалися показники датчиків. Слід зазначити, що відцентрові вентилятори зазвичай працюють у верхній половині діапазону частот, і що дані для нижчих частот необхідно збирати для реалізації нейронних мереж.

Дані, зібрані для частот 50, 46, 40, 38, 34, 30 Гц, представлені в таблицях 5.1 - 5.6 відповідно.

Таблиця 5.1 – Дані датчиків для частоти 50 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

50 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	280	275	270	260	264.5	262	252	240	226	210	194	174	151	123	99
ω , рад/с	287.5	289.8	289.5	290.4	290.5	290.7	291.9	293.1	294	296	297.3	298.8	300.5	302.3	302.5
Q, м ³ /с	0.437	0.419	0.402	0.379	0.356	0.329	0.305	0.274	0.225	0.201	0.173	0.146	0.115	0.087	0.059
H, Па	176	252	317	391	475	561	628	706	780	850	914	976	1023	1050	1080

Таблиця 5.2 – Дані датчиків для частоти 46 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

46 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	214	214	213.5	209.5	208	201.5	197	190	178.5	164	149	130.5	115.5	90	74.5
ω , рад/с	266.6	267.1	267	267.2	267.3	268.2	269.3	270.1	270.9	272.5	273.3	275.5	277.6	279.2	279.8
Q, м ³ /с	0.398	0.381	0.371	0.353	0.334	0.331	0.292	0.262	0.223	0.191	0.162	0.136	0.108	0.079	0.054
H, Па	148	244	281.1	351.5	418.7	490.7	555.2	628.6	690.2	741	795.1	847.6	890.6	912.8	929.2

Таблиця 5.3 – Дані датчиків для частоти 40 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

40 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	150.5	149.5	148	147	145	142	136.5	131.5	126	114	105	90.8	78.5	64	51
ω , рад/с	237.7	237.8	237.9	238.1	237.9	238.3	239.1	239.5	240.4	240.6	241.2	242.4	242.9	244.4	245.4
Q, м ³ /с	0.35	0.342	0.326	0.31	0.293	0.277	0.254	0.226	0.19	0.166	0.141	0.117	0.094	0.067	0.046
H, Па	115.5	168.6	226.2	276.9	336.6	387.3	440.6	483.5	544.3	581.9	627.1	660.6	685.8	700.1	716.8

Таблиця 5.4 – Дані датчиків для частоти 38 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

38 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	132	131.5	129.5	129	128	123.5	120.8	115.6	108.5	100	91.5	81	69.5	54.5	45
ω , рад/с	226.7	226.3	226.7	227	226.8	226.9	227.4	227.7	228.2	228.4	229.5	230.7	231.6	232.4	233
Q, м³/с	0.336	0.323	0.311	0.296	0.28	0.257	0.241	0.214	0.181	0.161	0.134	0.109	0.089	0.066	0.044
H, Па	113.3	161.6	203.3	252.4	303.7	361.2	401.3	454.9	489.6	525.0	568.4	600.6	623.2	634.5	649.5

Таблиця 5.6 – Дані датчиків для частоти 34 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

34 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	100.8	100	98.9	97.5	95	93.5	91.5	87.5	82.5	76	70	60.8	53	44.1	36
ω , рад/с	203.7	204.4	204.4	204.2	204.7	204.9	205.1	204.8	205.8	208.9	206.6	207.2	207.7	208.3	209.3
Q, м³/с	0.296	0.289	0.28	0.265	0.252	0.233	0.215	0.194	0.161	0.143	0.121	0.099	0.081	0.058	0.038
H, Па	109.6	139.1	166.7	211.0	250.3	295.6	332.3	367.5	403.0	427.4	459.3	487.7	503.8	510.3	521.6

Таблиця 5.6 – Дані датчиків для частоти 30 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

30 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	74	74	73.5	73	72	70	69	66	62.5	57	53	47	43	35	29.9
ω , рад/с	180.8	181.2	181.4	181.4	181	181.4	181.4	182.1	181.9	182.1	182.8	183.5	183.6	184	184.9
Q, м³/с	0.262	0.256	0.248	0.236	0.222	0.209	0.193	0.17	0.143	0.127	0.107	0.089	0.073	0.053	0.036
H, Па	84.8	102.5	129.4	153.8	197.1	228.2	264.5	293.5	314.6	339.8	363.3	383.1	397.7	402.8	411.7

На основі отриманих даних побудовано статичні характеристичні криві (витрата - напір та витрата - потужність) досліджуваного вентилятора для діапазону частот від 30 Гц до 50 Гц з кроком 2 Гц (рис. 5.12-5.13 відповідно).

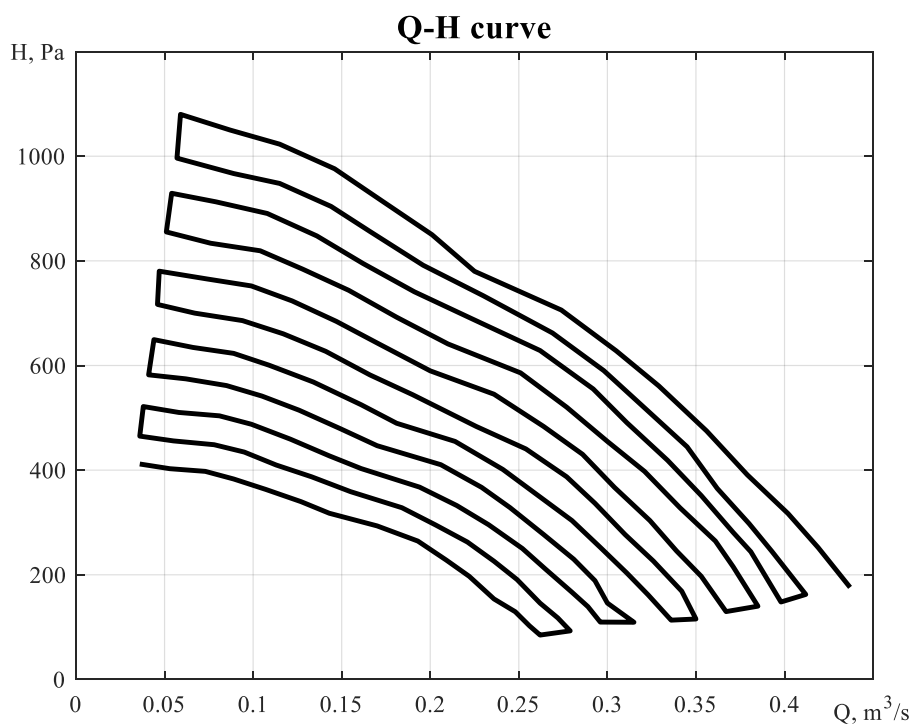


Рисунок 5.12 – Q-H криві в діапазоні частот від 30 Гц до 50 Гц

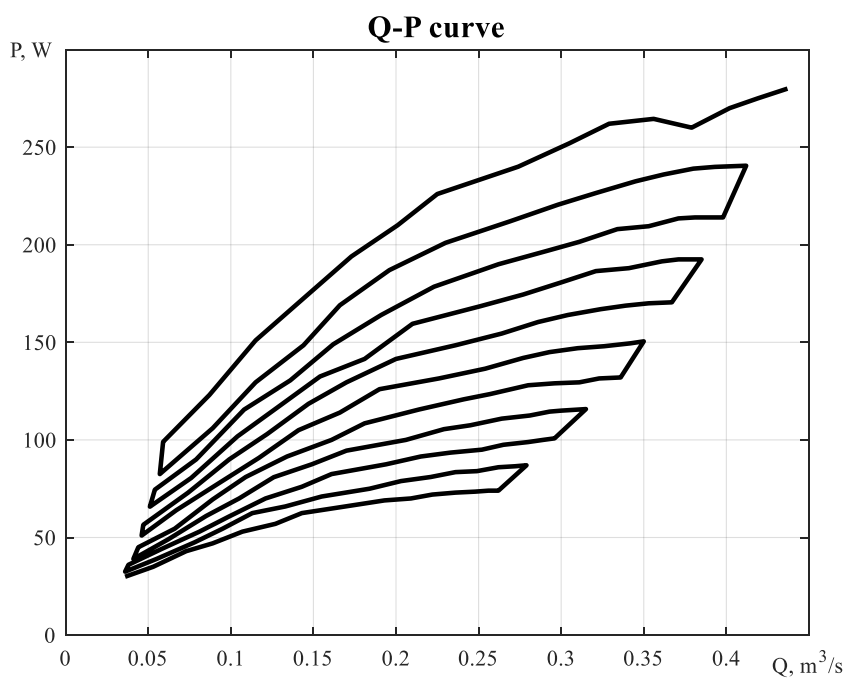


Рисунок 5.13 – Q-P криві в діапазоні частот від 30 Гц до 50 Гц

Наступні дослідження проводилися для розімкненої системи, проте для визначення параметрів мережі використовувалися нейронні мережі. Метою цього тесту є визначення того, чи є оцінки достатньо надійними і чи можуть вони успішно замінити датчики в розімкнутому контурі керування.

Реалізація нейронних мереж в dSpace вимагає створення ШНМ в Simulink, а потім побудови нового С-коду (для оцінки напору і продуктивності) і завантаження програми на плату контролера.

На рисунку 5.14 показано остаточну схему розімкнутої системи з нейромережевими оцінювачами напору та продуктивності розроблену в середовищі MATLAB/Simulink для подальшого використання її у RCP-системі. Схема все ще включає в собі сигнали датчиків напору, швидкості обертання і витрати для перевірки точності оцінювання.

У цій Simulink-моделі є два нейромережеві блоки (синього кольору) та Simulink-блок "Vector concatenate", який створює вектор зі значеннями потужності та швидкості обертання, що слугують вхідними даними для нейромережевих блоків. Наступними кроками є повторна збірка системи на мові С та завантаження програми на плату контролера DS1104 R&D.

Контрольна панель для проведення досліджень зображено на рис. 5.15.

Дані, зібрані для частот 50, 46, 40, 38, 34, 30 Гц, представлені в таблицях 5.7 - 5.12

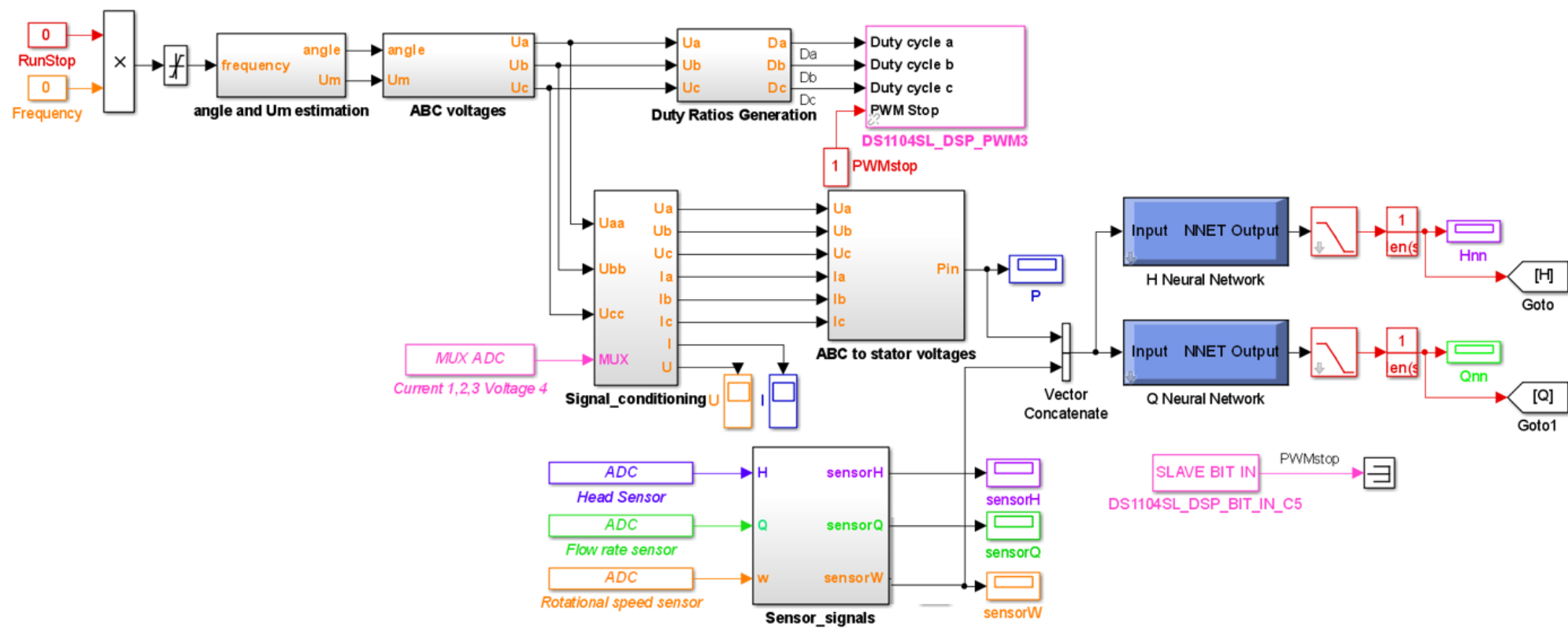


Рисунок 5.14 – Бездатчикове керування відцентровим вентилятором за допомогою неймереж у Simulink

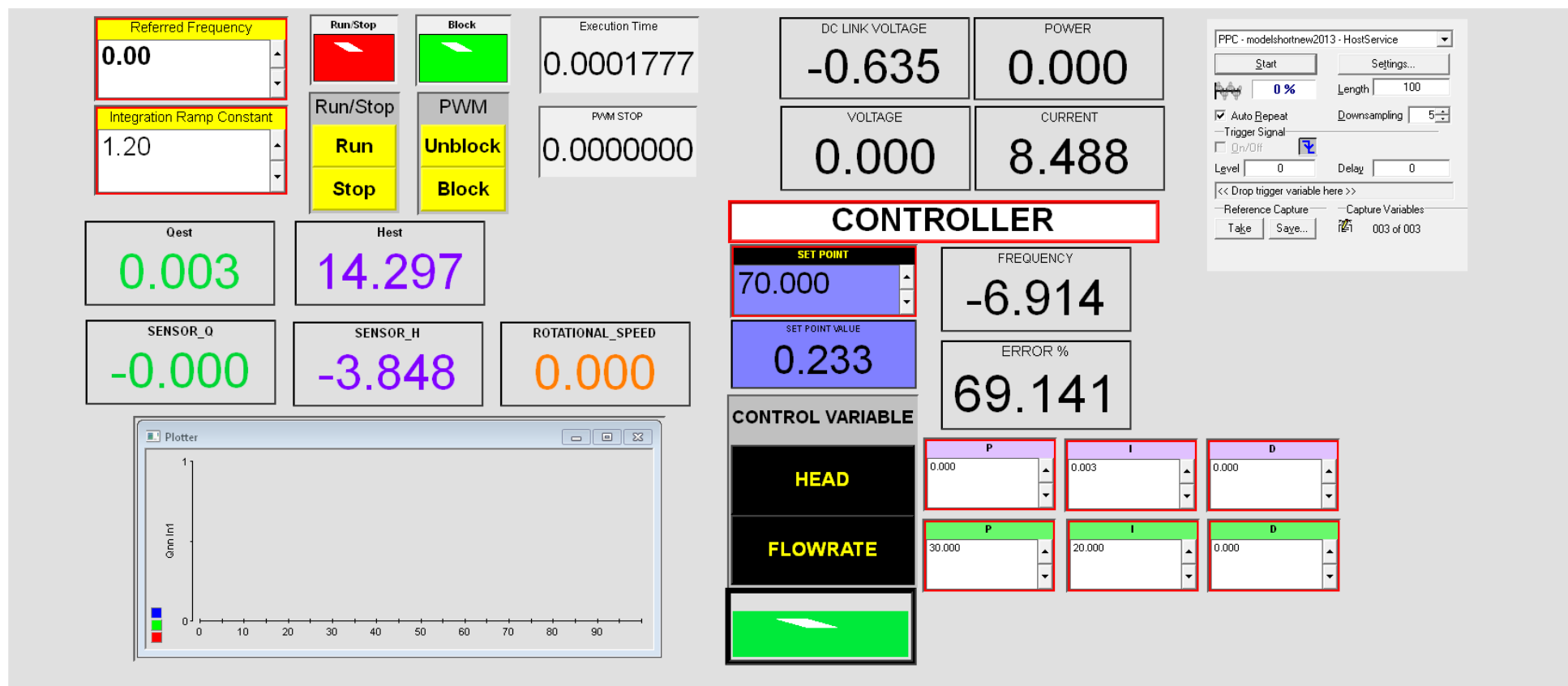


Рисунок 5.15 – Макет пульта керування, який використовується для контролю та відображення змінних системи

Таблиця 5.7 – Дані датчиків та оцінені значення для частоти 50 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

50 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	280	275	270	260	264.5	262	252	240	226	210	194	174	151	123	99
ω , рад/с	287.5	289.8	289.5	290.4	290.5	290.7	291.9	293.1	294	296	297.3	298.8	300.5	302.3	302.5
Q, м³/с	0.437	0.419	0.402	0.379	0.356	0.329	0.305	0.274	0.225	0.201	0.173	0.146	0.115	0.087	0.059
H, Па	176	252	317	391	475	561	628	706	780	850	914	976	1023	1050	1080
\hat{Q} , м³/с	0.37	0.364	0.418	0.366	0.336	0.314	0.297	0.28	0.228	0.199	0.176	0.144	0.111	0.08	0.063
\hat{H} , Па	480	500	480	500	595	615	677	703	812	880	922	960	988	1010	1026

Таблиця 5.8 – Дані датчиків та оцінені значення для частоти 46 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

46 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	214	214	213.5	209.5	208	201.5	197	190	178.5	164	149	130.5	115.5	90	74.5
ω , рад/с	266.6	267.1	267	267.2	267.3	268.2	269.3	270.1	270.9	272.5	273.3	275.5	277.6	279.2	279.8
Q, м³/с	0.398	0.381	0.371	0.353	0.334	0.331	0.292	0.262	0.223	0.191	0.162	0.136	0.108	0.079	0.054
H, Па	148	244	281.1	351.5	418.7	490.7	555.2	628.6	690.2	741	795.1	847.6	890.6	912.8	929.2
\hat{Q} , м³/с	0.352	0.348	0.347	0.332	0.317	0.296	0.273	0.244	0.212	0.182	0.158	0.133	0.108	0.075	0.058
\hat{H} , Па	380	385	400	458	506	555	622	690	748	794	827	855	882	915	937

Таблиця 5.9 – Дані датчиків та оцінені значення для частоти 40 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

40 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	150.5	149.5	148	147	145	142	136.5	131.5	126	114	105	90.8	78.5	64	51
ω , рад/с	237.7	237.8	237.9	238.1	237.9	238.3	239.1	239.5	240.4	240.6	241.2	242.4	242.9	244.4	245.4
Q, м³/с	0.35	0.342	0.326	0.31	0.293	0.277	0.254	0.226	0.19	0.166	0.141	0.117	0.094	0.067	0.046
H, Па	115.5	168.6	226.2	276.9	336.6	387.3	440.6	483.5	544.3	581.9	627.1	660.6	685.8	700.1	716.8
\hat{Q} , м³/с	0.344	0.33	0.326	0.311	0.296	0.278	0.255	0.23	0.2	0.168	0.145	0.119	0.097	0.68	0.05
\hat{H} , Па	200	215	220	261	290	345	408	482	530	590	622	653	673	699	718

Таблиця 5.10 – Дані датчиків та оцінені значення для частоти 38 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

38 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	132	131.5	129.5	129	128	123.5	120.8	115.6	108.5	100	91.5	81	69.5	54.5	45
ω , рад/с	226.7	226.3	226.7	227	226.8	226.9	227.4	227.7	228.2	228.4	229.5	230.7	231.6	232.4	233
Q, м³/с	0.336	0.323	0.311	0.296	0.28	0.257	0.241	0.214	0.181	0.161	0.134	0.109	0.089	0.066	0.044
H, Па	113.3	161.6	203.3	252.4	303.7	361.2	401.3	454.9	489.6	525.0	568.4	600.6	623.2	634.5	649.5
\hat{Q} , м³/с	0.325	0.317	0.305	0.297	0.28	0.262	0.239	0.217	0.188	0.158	0.138	0.112	0.09	0.062	0.047
\hat{H} , Па	190	205	205	255	272	325	380	415	478	531	564	592	611	632	644

Таблиця 5.11 – Дані датчиків та оцінені значення для частоти 34 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

34 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	100.8	100	98.9	97.5	95	93.5	91.5	87.5	82.5	76	70	60.8	53	44.1	36
ω , рад/с	203.7	204.4	204.4	204.2	204.7	204.9	205.1	204.8	205.8	208.9	206.6	207.2	207.7	208.3	209.3
Q, м³/с	0.296	0.289	0.28	0.265	0.252	0.233	0.215	0.194	0.161	0.143	0.121	0.099	0.081	0.058	0.038
H, Па	109.6	139.1	166.7	211.0	250.3	295.6	332.3	367.5	403.0	427.4	459.3	487.7	503.8	510.3	521.6
\hat{Q} , м³/с	0.281	0.276	0.272	0.262	0.25	0.234	0.211	0.19	0.166	0.136	0.115	0.094	0.075	0.058	0.044
\hat{H} , Па	186	190	200	218	240	266	304	345	388	440	468	493	508	517	521

Таблиця 5.12 – Дані датчиків та оцінені значення для частоти 30 Гц при тестуванні розімкнутого контуру

30 Гц	Опір мережі a_n														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Вт	74	74	73.5	73	72	70	69	66	62.5	57	53	47	43	35	29.9
ω , рад/с	180.8	181.2	181.4	181.4	181	181.4	181.4	182.1	181.9	182.1	182.8	183.5	183.6	184	184.9
Q, м³/с	0.262	0.256	0.248	0.236	0.222	0.209	0.193	0.17	0.143	0.127	0.107	0.089	0.073	0.053	0.036
H, Па	84.8	102.5	129.4	153.8	197.1	228.2	264.5	293.5	314.6	339.8	363.3	383.1	397.7	402.8	411.7
\hat{Q} , м³/с	0.226	0.233	0.22	0.21	0.202	0.19	0.174	0.158	0.138	0.111	0.092	0.075	0.062	0.49	0.041
\hat{H} , Па	170	173	190	202	213	238	256	285	323	369	395	418	424	421	408

На основі отриманих даних побудовано статичні характеристичні криві (витрата - напір та витрата - потужність) досліджуваного вентилятора при використанні датчиків (суцільна лінія) та нейронних мереж (пунктирна лінія) для діапазону частот від 30 Гц до 50 Гц з кроком 2 Гц (рис. 5.16-5.17 відповідно).

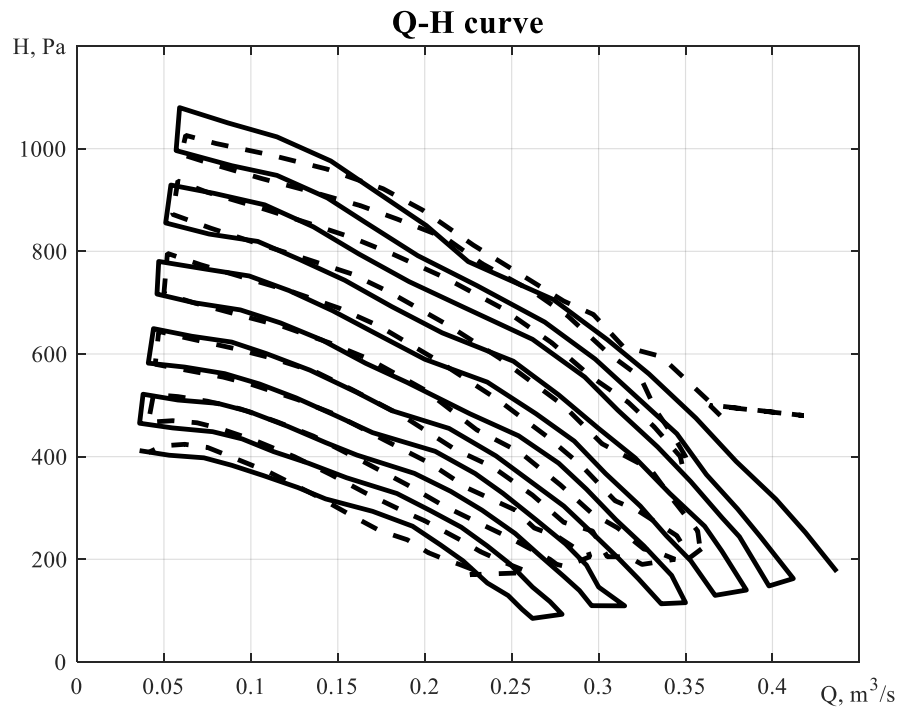


Рисунок 5.16 – Q-H криві в діапазоні частот від 30 Гц до 50 Гц

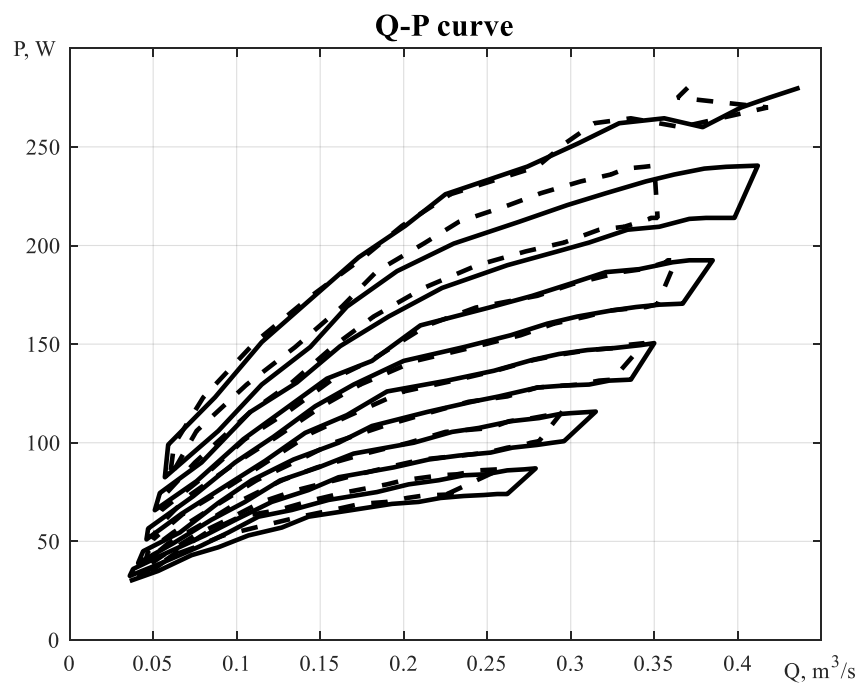


Рисунок 5.17 – Q-P криві в діапазоні частот від 30 Гц до 50 Гц

Отримані Q-H криві (рис. 5.16), загалом, хорошої якості, але не для всього діапазону частот. Слід також пам'ятати, що відцентрові вентилятори не обов'язково працювати в повному діапазоні частот від 0 до 50 Гц і що для конкретних застосувань потрібні специфічні робочі області. Вище 44 Гц криві не збігаються так добре, як криві в діапазоні частот між 44 Гц і 34 Гц. Також можливим поясненням невідповідності кривих Q-H датчиків і оцінок в деяких областях є той факт, що для створення кривої Q-H потрібні оцінки витрати і напору, а вони розраховуються за допомогою нейронних мереж на основі складних алгоритмів, які не завжди збігаються один з одним (напір збігається зі швидкістю потоку).

Отримані криві Q-P (рис. 5.17) оцінок нейронної мережі здебільшого збігалися з кривими датчиків. На частоті 50 Гц спостерігається невелике відхилення, коли опір мережі відповідає нульовому положенню заслінки, що, можливо, пов'язано з варіаціями у показаннях потужності. Для частот між 48 Гц і 32 Гц результати можна вважати задовільними, що також означає, що нейронні мережі були навчені із високою точністю. Для частот нижче 30 Гц і зі зменшенням частоти криві Q-P мають тенденцію бути плоскими для широкого діапазону швидкості потоку, що призводить до великих помилок в оцінках.

Стандарт для промислових вентиляторів ISO 13348 AN3 точності визначає, що межі похибки кривих Q-P і Q-H становлять:

- $\pm 5\%$ витрата повітря
- $\pm 5\%$ тиску вентилятора
- $+8\%$ потужності (без обмеження на від'ємне відхилення потужності) [21].

Цей стандарт ISO слугує критерієм для прийняття рішення про те, чи є результати дослідження достатньо точними. Похибки, отримані при оцінюванні напору та швидкості потоку (продуктивності), показані на рис. 5.18-5.20 та 5.21-5.23 відповідно. Похибки розраховувалися як різниця між показниками датчика та оціненими значеннями, поділені на номінальне значення відповідних змінних і помножена на 100.

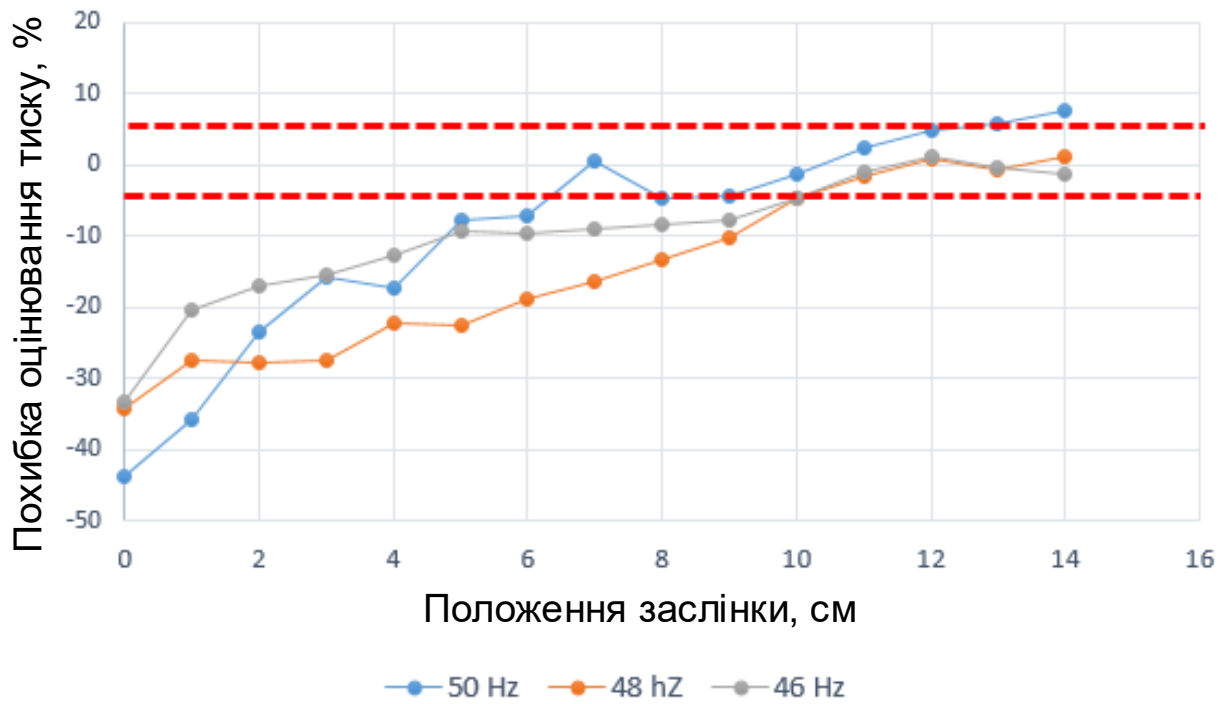


Рисунок 5.18 – Відсоток похибки відпрацювання в залежності від положення заслінки при 50, 48 і 46 Гц при оцінюванні тиску

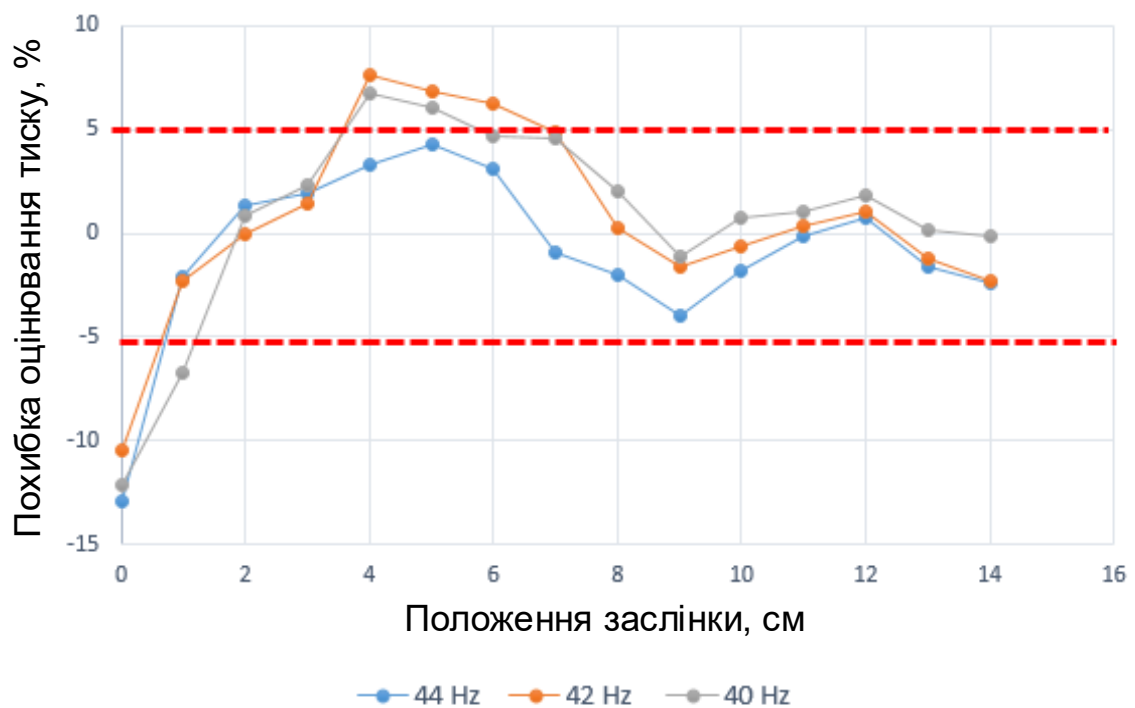


Рисунок 5.19 – Відсоток похибки відпрацювання в залежності від положення заслінки при 44, 42 і 40 Гц при оцінюванні тиску

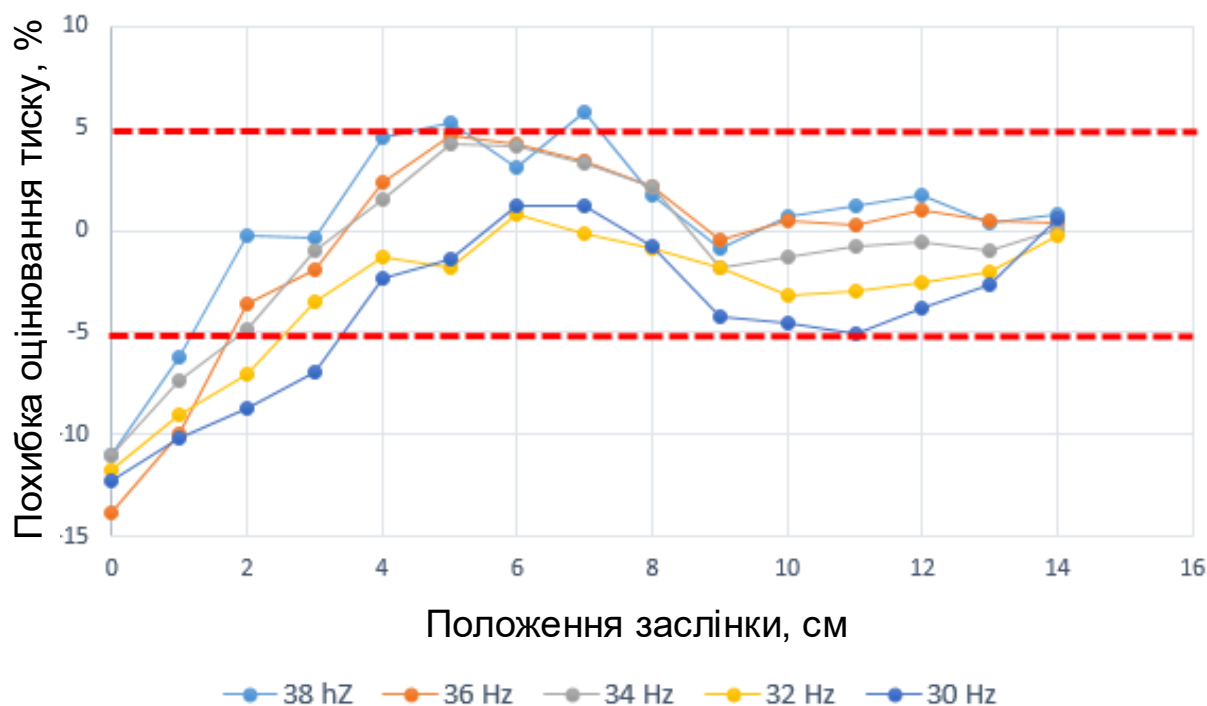


Рисунок 5.20 – Відсоток похибки відпрацювання в залежності від положення заслінки при 38, 36, 32 і 30 Гц при оцінюванні тиску

На рис. 5.18, який показує похибку оцінювання напору для 50, 48 і 46 Гц, виділені червоним лінії обмежують допустиму область $\pm 5\%$, яка передбачена стандартом ISO 13348 AN3. Похибка є неприйнятною для більшості положень заслінки (опір мережі). Відсоток похибки знаходиться в допустимих межах, коли положення заслінки перевищує 50% (7,5 см). На рис. 5.19, який показує похибку оцінювання напору для 44, 42 і 40 Гц, похибка здебільшого знаходиться в межах допустимого відхилення. Найгірші показники оцінювання спостерігаються при низьких значеннях опору мережі, як і на рис. 5.16. На рис. 5.20, який показує похибку оцінювання напору для 38, 36, 34, 32 і 30 Гц, похибка оцінювання тиску здебільшого знаходиться в прийнятних межах точності, відповідно до згаданого стандарту ISO.

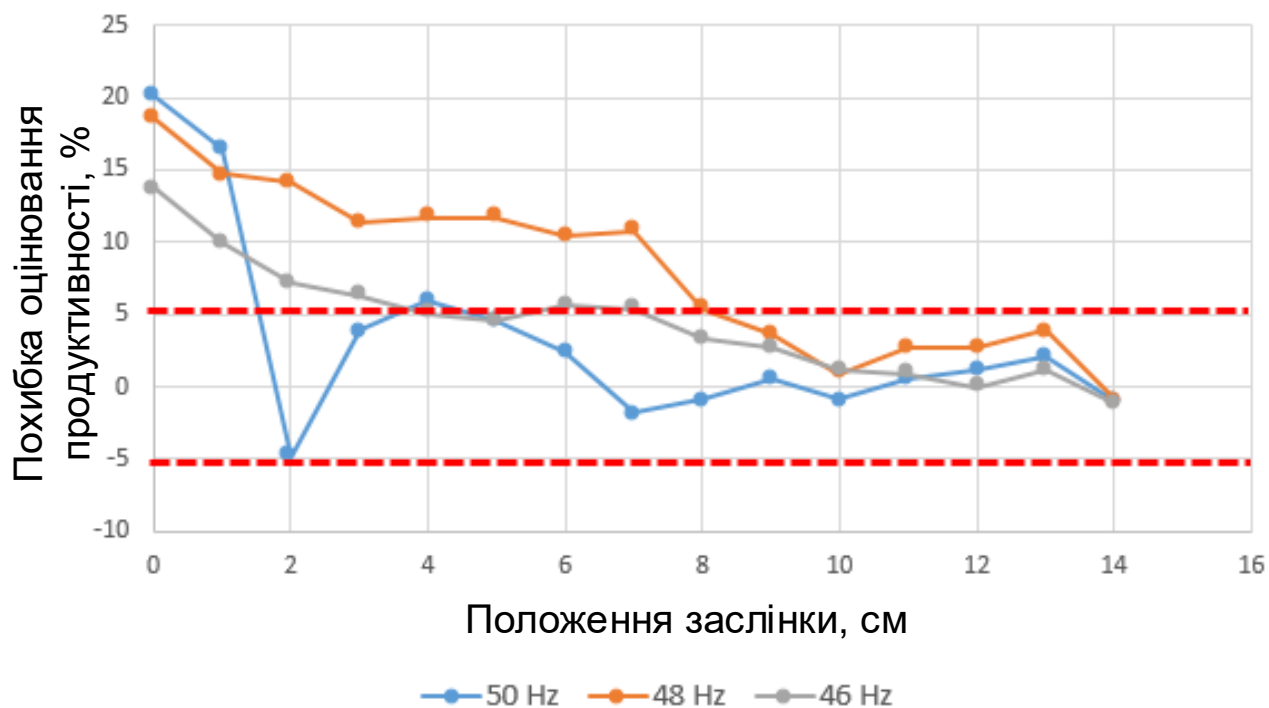


Рисунок 5.21 – Відсоток похибки відпрацювання в залежності від положення заслінки при 50, 48 і 46 Гц при оцінюванні продуктивності

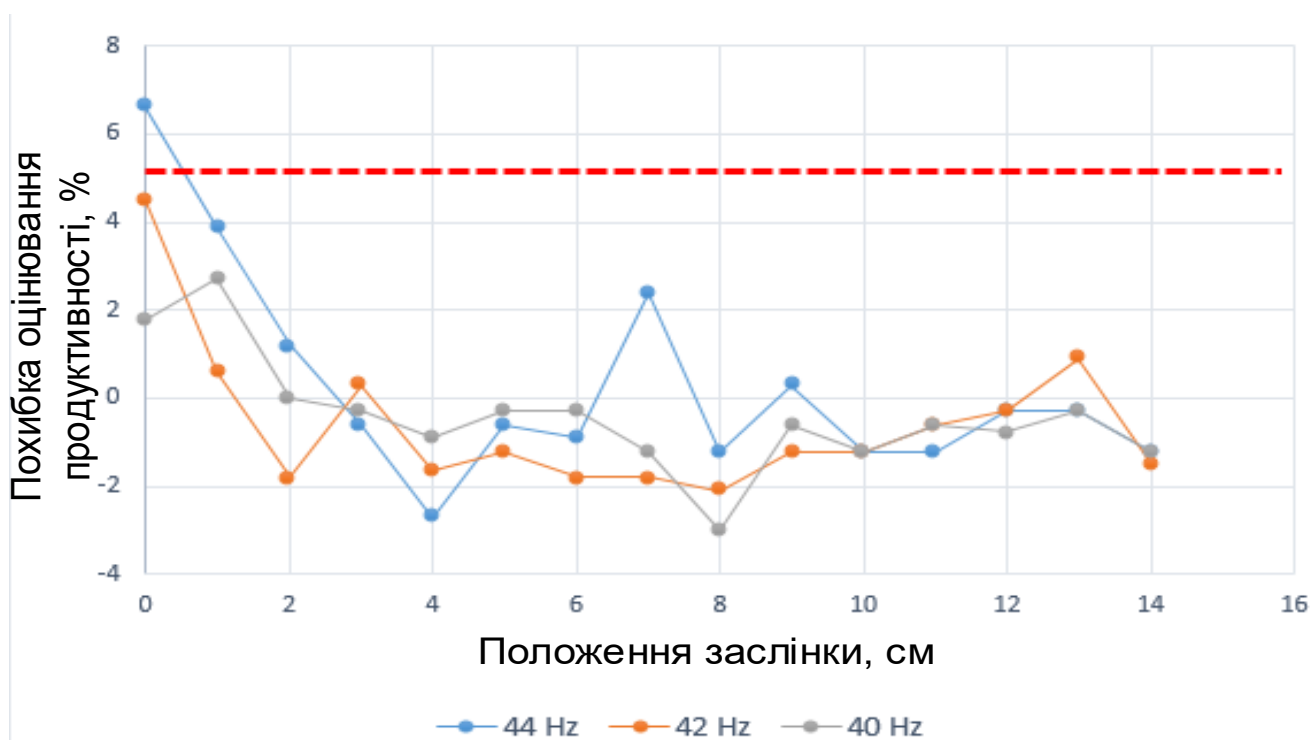


Рисунок 5.22 – Відсоток похибки відпрацювання в залежності від положення заслінки при 44, 42 і 40 Гц при оцінюванні продуктивності

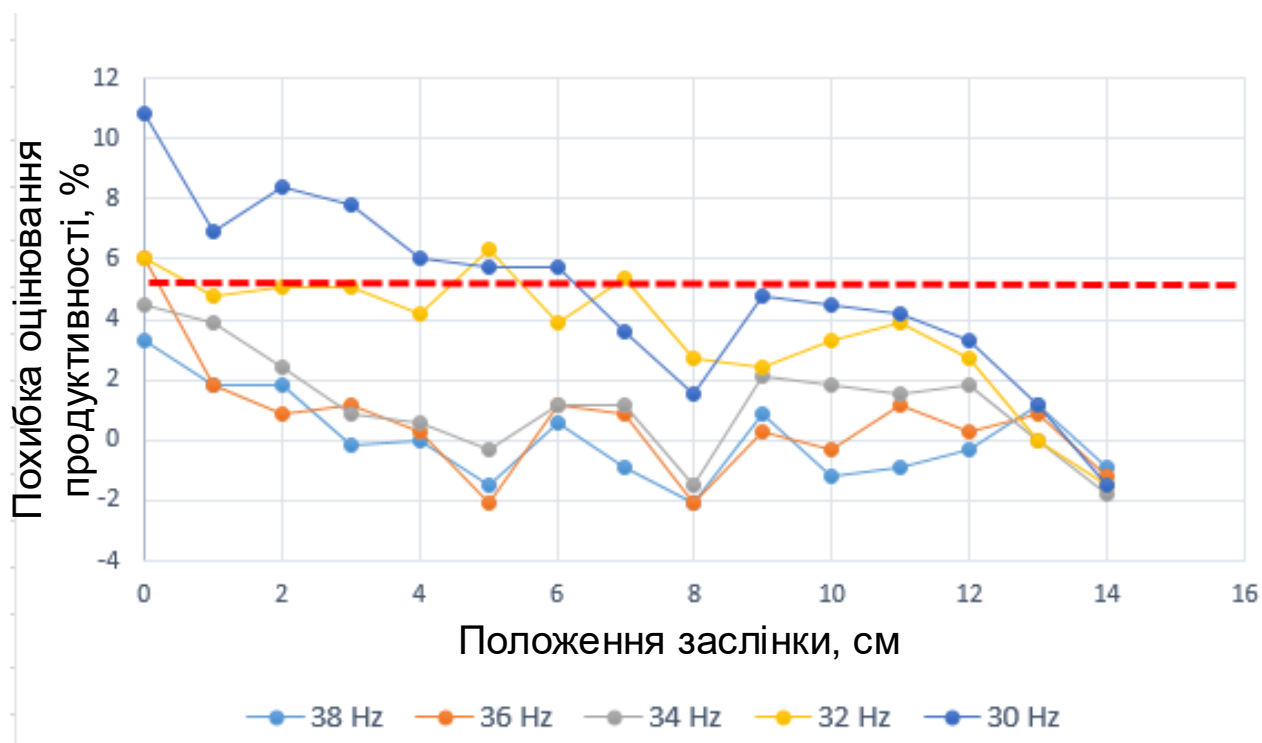


Рисунок 5.23 – Відсоток похибки відпрацювання в залежності від положення заслінки при 38, 36, 32 і 30 Гц при оцінюванні продуктивності

На рис. 5.21, при більш високій частоті роботи двигуна, 50, 48 і 46 Гц, видно відповідні похибки оцінювання продуктивності. Як і у випадку з оцінюванням напору на високих частотах і низькому опорі мережі, значення похибки оцінювання витрат значно перевищує допустимі межі $\pm 5\%$, запропоновані стандартом ISO. При малому опорі мережі, похибка оцінювання витрат досягає максимального рівня і перевищує номінальну величину продуктивності, а тиск утримується на мінімальному значенні. Після того, як приблизно 50% положення заслінки вже пройдено, похибка стає прийнятною. На рис. 5.22 і 5.23 оцінювач продуктивності працює з високою точністю, похибки знаходяться в допустимих межах, що є результатом якості апроксимації нейронної мережі.

5.3 Експериментальні дослідження роботи оцінювача технологічних координат насосної установки

Для проведення експериментальних досліджень роботи оцінювача технологічних координат насосу використано спеціальну дослідницьку установку [104], [105]. В рамках цієї установки використано насос відомого виробника Calpeda MXH 202E [106], оснащений асинхронним двигуном М потужністю 0,33 кВт, який під'єднано до перетворювача частоти Lenze 8200 Vector потужністю 0,75 кВт [107]. На вході насоса встановлено фітінг, до якого в свою чергу, для візуальної фіксації тиску у трубопроводі, приєднано манометр, витратомір ДQ з імпульсним виходом та датчик напору ДН зі струмовим виходом. Для уникнення зворотного ходу води у гідромережі, на виході фітінгу встановлено спеціальний зворотний клапан.

Разом із стендом, використовується плата Altera DE1-SoC [108], що забезпечує практичну реалізацію нейронних мереж для оцінювача ККД та продуктивності насосу. У цій схемі вказані наступні об'єкти: ДQ – датчик продуктивності, Н – насос, ДН – датчик напору, ЗК – зворотний клапан, В1-В3 – вентилі.

Практична реалізація ШНМ проведена на платі DE1-SoC виробництва Altera з використанням ПЛІС типу FPGA (field-programmable gate array) сімейства Cyclone V [109]. Дана плата обладнана наступними компонентами: генератором тактової частоти та 12-розрядним аналого-цифровим перетворювачем, який володіє 8 аналоговими входами, а також семисегментними індикаторами; програматором USB-Blaster з інтерфейсом програмування JTAG. У процесі використання ПЛІС задіяно процесор Nios II та синхронний послідовний порт, який забезпечує можливість зчитувати дані з аналого-цифрового перетворювача.

Функціональну схему установки представлено на рис. 5.24.

програмного забезпечення MatLab та редактора нейронних мереж (Network Data Manager), детальний опис якого наведено у розділі 2. Основні етапи методики оцінювання технологічних координат насосної установки для подальшого використання нейронної мережі зображено на рис. 5.25. Максимальна похибка під час тренування становила $7.232 \cdot 10^{-5}$, і такий результат досягнуто після 31 епохи тренування. Коефіцієнт регресії складає 0.996. Отримані результати навчання вважаються задовільними для використаного набору даних.

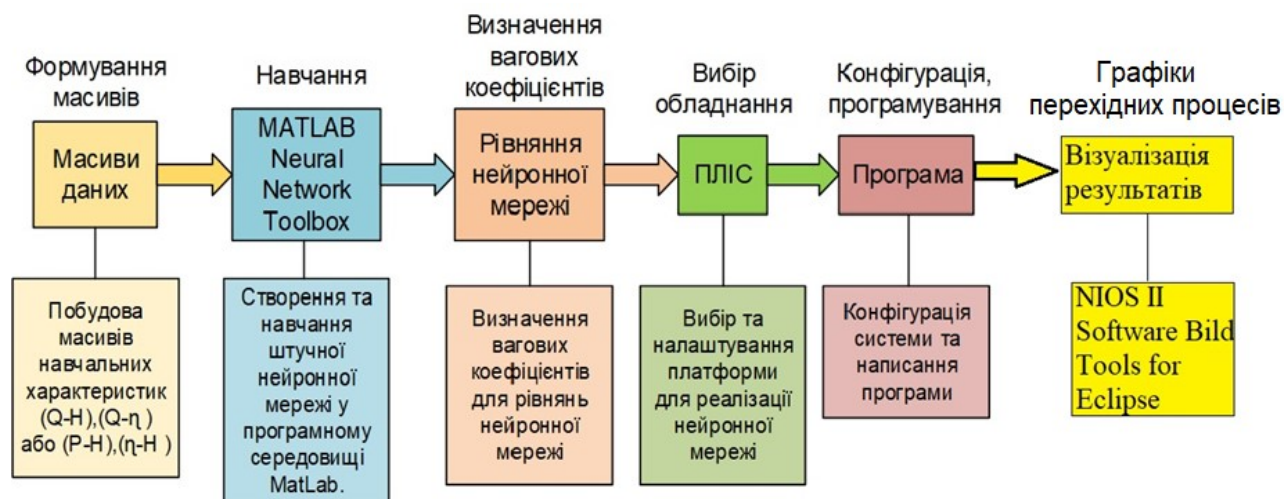


Рисунок 5.25 – Основні етапи методики оцінювання технологічних координат досліджуваної насосної установки

Після збору даних сформовано тренувальні набори даних для ККД (ККД-Н) та активної споживаної потужності (P-Н). Процес тренування оцінювача ККД насосу із стандартною архітектурою мережі виконувався з використанням програмного забезпечення MatLab та редактора нейронних мереж (Network Data Manager), детальний опис якого наведено у розділі 2. Основні етапи методики оцінювання технологічних координат насосної установки для подальшого використання нейронної мережі зображено на рис. 5.25. Максимальна похибка під час тренування становила $7.232 \cdot 10^{-5}$, і такий результат досягнуто після 31 епохи тренування. Коефіцієнт регресії складає 0.996. Отримані результати навчання вважаються задовільними для використаного набору даних.

В додатку А наведена робоча програма, за якою перевірялась працездатність оцінювача технологічних координат турбомеханізмів.

Проведення експериментальних досліджень відбулося за наступною процедурою: спочатку привідний двигун насосної установки був запущений на номінальну швидкість, яка відповідає частоті 50 Гц, при мінімальному гідравлічному опорі (з повністю відкритими вентилями). Далі гідравлічний опір поступово збільшувався до 80% від максимального, а потім знову зменшувався до мінімального рівня. Зміни гідравлічного опору відбувалися стрибкоподібно. Графіки перехідних процесів оціненого ККД насоса $\hat{\eta}_p$ та напору насоса H_p , які були отримані в результаті експерименту, порівнювалися з ККД $\hat{\eta}_m$ та напором H_m , що були отримані в ході математичного моделювання, на базі системи рівнянь (3.10). Деталі цього дослідження представлені на рис. 5.26 - 5.27.

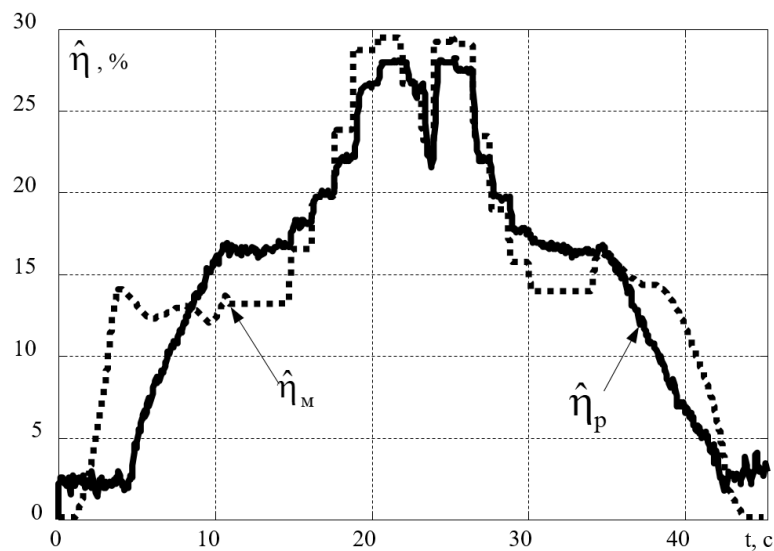


Рисунок 5.26 – Графік зміни ККД насосу

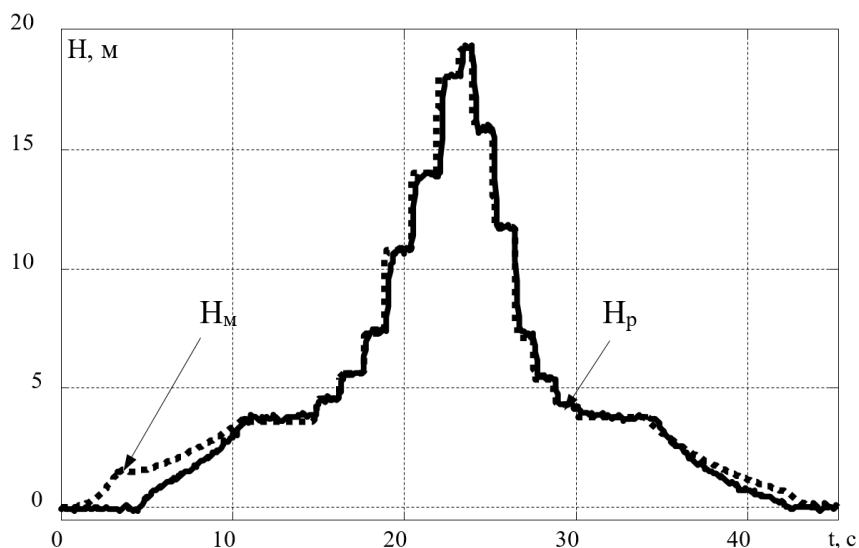


Рисунок 5.27 – Графік зміни напору насосу

З рис. 5.26 та 5.27 видно, що відхилення між визначеними значеннями оціненого ККД $\hat{\eta}_p$ та ККД $\hat{\eta}_m$, отриманому в результаті математичного моделювання, не перевищують 15% при невеликих гідравлічних опорах та напорах до 7 метрів, і 5% при середніх і великих значеннях опору при напорах до 20 метрів. Такі різниці в основному обумовлені точністю вимірювання активної потужності P за допомогою перетворювача частоти, оскільки ці дані використовувалися для створення тренувальних даних для нейронної мережі, а також обмеженою кількістю доступних даних для навчання моделі. У той же час, під час математичного моделювання активна потужність обчислювалася з використанням двофазної моделі асинхронного двигуна, що забезпечило більшу точність порівняно з аналоговим виходом перетворювача. Збільшення обсягу тренувальних даних і застосування більш точних датчиків можуть значно підвищити точність оцінки. Здобуті результати мають практичне значення при проектуванні електромеханічних систем, які працюють неперервно, і для яких складно або неможливо здійснити прямі вимірювання технологічних координат і параметрів гідромережі.

Для впровадження технічного рішення для оцінки продуктивності необхідно використовувати два вхідні набори даних: сигнал активної потужності і сигнал тиску. У дослідженні оцінювача продуктивності насосної установки

проводився експеримент при частоті 50 Гц. Результати дослідження наведено на рис. 5.28.

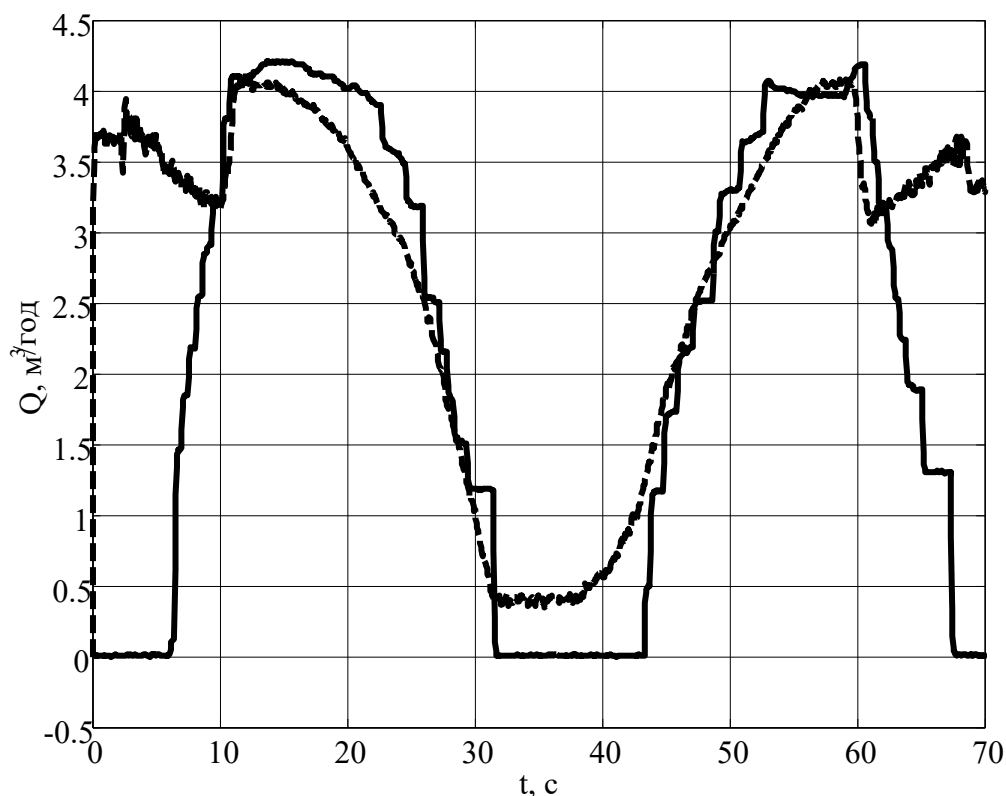


Рисунок 5.28 – Експериментальне дослідження роботи оцінювача продуктивності

На рис. 5.28 представлені два сигнали, які були зафіксовані. Один із них відображає реальні показники датчика продуктивності насоса (суцільна лінія), а інший – оцінені значення продуктивності насосної установки (пунктирна лінія). Видно, що сигнал від датчика характеризується дискретними змінами з певним квантуванням, що є результатом конструкції самого датчика, який є крильчастого типу.

Результати дослідження при 50 Гц свідчать про вищу якість оціненого сигналу та малу похибку у статичному режимі. Проте, при дослідженні оцінювача на інших частотах, похибка оцінювання зростала при зменшенні частоти. Це може пояснюватися обмеженою кількістю інформації та точністю вхідних сигналів, оскільки нейронна мережа була побудована на основі експериментальних статичних характеристик.

5.4 Техніко-економічні показники

Для реалізації бездавачевої електромеханічної системи керування турбомеханізмами необхідним та достатнім є створення очінювачів технологічних координат на базі теорії штучних нейронних мереж. Для їх технічної реалізації можна використовувати низько-середньо рівневі логічні контролери або програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС).

ПЛІС на ринку представлені у широкому спектрі. Ціна варіюється в залежності від технічних характеристик обладнання, таких як кількості логічних елементів, оперативної пам'яті, тощо. Спираючись на складність та точність необхідної нейронної мережі, можна обирати обладнання, відповідно до технологічного завдання, різної складності та вартості.

Порівнюючі бездавачеві системи із використанням ПЛІС та системи керування із використанням фізичних давачів технологічних координат слід враховувати деякі переваги ПЛІС [110]-[112]:

1. Гнучкість і програмовані можливості ПЛІС:

- ПЛІС надають можливість програмування і гнучкість. Вони можуть бути налаштовані для виконання різних завдань, залежно від потреб гідромережі.
- Зміни в функціональності можуть вноситися шляхом перепрограмування ПЛІС без заміни обладнання, що полегшує обслуговування і апгрейди.

2. Інтеграція функцій:

- ПЛІС можуть об'єднувати декілька функцій в одному чіпі, що спрощує систему і робить її меншою та ефективнішою.
- Інтеграція може включати обробку сигналів, збір даних та інші функції, що раніше потребували б окремого обладнання.

3. Ефективність ресурсів:

- ПЛІС можуть бути оптимізовані для конкретних завдань, що дозволяє ефективніше використовувати обчислювальні ресурси порівняно з загальнопризначеними датчиками.

4. Низька вартість у великих обсягах:

- При великих обсягах виробництва вартість ПЛІС може бути конкурентоспроможною порівняно з вартістю окремих датчиків та контролерів.

5. Енергоефективність:

- ПЛІС можуть бути оптимізовані для мінімізації споживання енергії, що особливо важливо для бездавачевих систем у гідромережі.

6. Масштабованість:

- ПЛІС можуть легко масштабуватися для відповіді на зростаючі потреби мережі без значних змін в архітектурі.

7. Можливості аналітики та обробки даних:

- Завдяки вбудованим обчислювальним можливостям, ПЛІС можуть виконувати аналітику та обробку даних без необхідності передачі даних на центральний сервер.

8. Інтеграція з іншими системами:

- ПЛІС можуть легко інтегруватися з іншими елементами системи, такими як сенсори, мікроконтролери, або інші ПЛІС.

Однак важливо враховувати конкретні вимоги гідромережі, обмеження щодо енергоспоживання, точності оцінювання координат мережі, масштабованості, безпеки та надійності перед прийняттям рішення щодо використання ПЛІС замість датчиків.

У табл. 5.13 для порівняння наведено вартість деяких ПЛІС, що використовуються для реалізації нейронних мереж різної складності архітектури [113].

Таблиця 5.13 – Ринкова вартість ПЛІС

Найменування ПЛІС, короткий опис	Вартість, грн.
10CL006YE144I7G, Intel / Altera, кількість логічних елементів: 6272, RAM пам'ять: 276480 біт	816,00
10CL010YU256A7G, Intel / Altera, кількість логічних елементів: 10320, RAM пам'ять: 423936 біт	1 297,00
10CL040YF484I7G, Intel / Altera, кількість логічних елементів: 39600, RAM пам'ять: 1161216 біт	3 837,00
5CEBA2F17I7N, Intel / Altera, кількість логічних елементів: 25000, RAM пам'ять: 2002944 біт	4 511,00
10CL120YF484I7G, Intel / Altera, кількість логічних елементів: 119088, RAM пам'ять: 3981312 біт	12 464,00
EP4CE6E22 (макетна плата SK-EP4CE6 – комплексне рішення) Intel / Altera, кількість логічних елементів: 6272, RAM пам'ять: 270000 біт	3 040,00
EP4CE22F17C6N (макетна плата DE0-Nano – комплексне рішення) Intel / Altera, кількість логічних елементів: 22320, RAM пам'ять: 594000 біт	11 351,00

Використання логічних контролерів у бездатчикових системах водопостачання може бути ефективним з економічної точки зору за рядом причин [114]:

1. Низькі витрати на обладнання:

- Контролери зазвичай коштують менше, ніж високоточні датчики.
- Зменшення вартості обладнання може значно вплинути на загальні витрати проекту.

2. Ефективне використання ресурсів:

- Прості контролери можуть виконувати базові функції без зайвих можливостей, що забезпечує ефективне використання обчислювальних ресурсів.

3. Мінімізація експлуатаційних витрат:

- Контролери зазвичай потребують менше технічного обслуговування порівняно з високоточними датчиками, що може призвести до зменшення експлуатаційних витрат.

4. Легше обслуговування і ремонт:

- Простота конструкції контролерів може забезпечити легшу обслуговуваність та можливість проведення ремонтних робіт без необхідності спеціалізованого обладнання та втручання у гідромережу.

5. Простота інтеграції:

- Контролери можуть бути легше інтегровані з існуючою інфраструктурою водопостачання без значних змін у системі.

6. Низькі енерговитрати:

- Контролери можуть вимагати менше енергії для своєї роботи порівняно з датчиками, що може бути важливим у випадках обмеженого джерела живлення.

7. Скасування потреби у високоточних даних:

- У деяких випадках, коли точність вимірювань не критична, можна відмовитися від дорогих вимірювальних пристроїв і використовувати більш прості контролери.

8. Легша масштабованість:

- Контролери можуть бути легше масштабовані для відповіді на зростаючі потреби мережі.

Однак слід врахувати, що в залежності від конкретних вимог і характеристик системи, використання датчиків може бути обґрунтованим для вимірювань високої точності або для вирішення конкретних завдань, які вимагають великої чутливості та спеціалізованих функцій.

Для порівняння у табл. 5.14 та 5.15 наведено ринкову вартість промислових датчиків тиску та продуктивності (витратомірів) [115]. Варто зазначити, що вартість датчиків варіюється в залежності від умов експлуатації та діаметри трубопроводу гідравлічної мережі.

Таблиця 5.14 – Ринкова вартість промислових датчиків тиску

Найменування датчику, короткий опис	Вартість, грн.
Датчик тиску MBS 5150 1411-A6DB04-4 (060N1083) Danfoss, діапазон вимірювання: 0-2,5 бар	20 130,00
Датчик тиску XMLP010BD21F, Schneider Electric, діапазон вимірювання: 0-10 бар	3 998,00
Датчик тиску SITRANS P500, Siemens, діапазон вимірювання: 0-32 бар	58 979,00

Таблиця 5.15 – Ринкова вартість промислових датчиків продуктивності

Найменування датчику, короткий опис	Вартість, грн.
Витратомір 8800DW015, Rosemount, діапазон вимірювання: 0-12000 кг/год	80 000,00
Витратомір 80F25, Endress+Hauser Promass, діапазон вимірювання: 0-18000 кг/год	117 600,00
Витратомір SITRANS FM MAG 31000, Siemens, діапазон витрат: 0-10000 кг/год	88 000,00

Порівнюючи дані з табл. 5.13 та 5.14, 5.15 видно, що використання у системах керування турбомезанізмами технології нейронних мереж, реалізовані на базі ПЛІС, є більш економічно обґрунтованим.

Висновки до розділу 5

1) Описано експериментальні стенди, що використовувалися для проведення відповідних досліджень систем бездавачевого керування вентилятором та дослідження точності роботи оцінювачів ККД та продуктивності в системах водопостачання. Наведено опис основних складових установок та процесу проведення досліджень.

2) Проведено дослідження роботи бездавачевої системи керування вентилятором в статичних і динамічних режимах. Дослідження показали, що приблизно для 40% діапазону частот розроблений алгоритм керування є придатним і може забезпечити достатньо точне оцінювання технологічних координат, що дає змогу замінити у таких системах датчики на оцінювачі, що реалізовані із застосуванням теорії штучних нейронних мереж.

3) Розроблено нейронні мережі, які, ґрунтуючись на вимірюванні тиску та активного споживання потужності привідного асинхронного двигуна, проводять оцінювання коефіцієнта корисної дії (ККД) та продуктивності турбомеханізму в системі водопостачання.

4) Під час виконання досліджень було підтверджено функціональність розробленого оцінювача ККД насосної установки, базованим на штучній нейронній мережі та випробуваного на спеціалізованому експериментальному стенді. Різниця між експериментальними даними та тими, які було отримано внаслідок моделювання, не перевищує 15% на напорах до 7 метрів і 5% від 7 до 20 метрів, що вважається прийнятним для даного обсягу даних і характеристик вхідних сигналів нейронної мережі. Розширення обсягу навчальних даних та використання точніших датчиків призведе до підвищення точності оцінювання. Отримані результати можливо ефективно використовувати при розробці електромеханічних систем безперервної дії, для яких здійснення вимірювань технологічних параметрів та координат ускладнено або неможливо.

5) Проведено експериментальне дослідження функціонування оцінювача продуктивності при частоті 50 Гц, результати якого свідчать про те, що обмежена кількість вхідних даних та низька якість вхідних сигналів не забезпечують достатньої точності в оцінці продуктивності насоса.

6) Проведено порівняльний аналіз техніко-економічних показників використання ПЛІС та датчиків тиску і продуктивності у системах водопостачання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі була вирішена актуальна науково-технічна задача застосування штучних нейронних мереж у бездавачевих системах керування турбомеханізмів для підвищення ефективності роботи турбомеханізмів за рахунок використання оцінювачів технологічних координат, що реалізуються на основі теорії штучних нейронних мереж, в умовах зміни параметрів гідромережі. При цьому отримано наступні основні результати:

1) Розроблено новий метод керування технологічними координатами турбомеханізмів з використанням технологій штучних нейронних мереж, який вперше дозволяє побудувати електромеханічну систему автоматичного керування напором або продуктивністю з використанням значень тільки доступних для вимірювання електричних координат, за рахунок використання модифікованого оцінювача технологічних координат для турбомеханізмів, який, на відміну від побудованих за класичною схемою перцептронів із стандартними алгоритмами навчання, має вбудовані зворотні зв'язки за оціненою технологічною координатою, що дає змогу знизити похибку оцінювання при варіаціях опору гідравлічної мережі. Розроблена методика оцінювання технологічних координат турбомеханізмів дозволяє виключити будь-яке втручання у гідромережу, спричинене встановленням або обслуговуванням давачів напору або продуктивності, що підвищує надійність та зменшує витрати на реалізацію та обслуговування системи водопостачання.

2) Встановлено і підтверджено нові властивості електромеханічної системи автоматичного керування турбомеханізмами, які дозволяють здійснювати керування необхідними технологічними координатами без їх безпосереднього вимірювання в умовах невідомих варіацій параметрів гідромережі та при зміні структури самої гідросистеми. Впроваджена в автономну систему генерації електричної енергії електромеханічна система керування турбомеханізмом з оцінювачами технологічних координат на базі штучних нейронних мереж дозволяє перерозподілити надлишкову електричну енергію, утворену у результаті живлення основних активних споживачів, на

споживачів системи водопостачання для задоволення потреб побутового характеру.

3) Створено пакет моделюючих програм для дослідження бездавачевої системи керування турбомеханізмом, що живиться від вітрогенератора, в процесі стабілізації напору мережі на заданому рівні при зміні гідроопору в межах типового добового циклу споживання води.

4) Створено уніфіковані моделі розімкнених та замкнених систем керування турбомеханізмів для створення та навчання оцінювачів технологічних координат в умовах стабілізації одного з технологічних параметрів. Описано процес проектування та реалізації оцінювачів технологічних координат на базі систем швидкого прототипного тестування та на базі простих контролерів, таких, як програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС).

5) Отримані результати можуть бути використані під час проектування бездавачевих систем автоматичного керування будь-якими турбомеханізмами, зокрема насосами, вентиляторами та компресорами.

6) Результати роботи впроваджено: в ДП «Сіменс Україна» (м. Київ) та в освітній процес у Київському політехнічному інституті імені Ігоря Сікорського з метою вдосконалення лекційних курсів та оновлення циклів лабораторних робіт дисциплін «Електромеханічні системи типових технологічних застосувань» та «Керування та автоматизація технічних систем». Подальше впровадження результатів дисертації рекомендується на підприємствах електротехнічного профілю України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Видиш, А. А., & Ярошенко, Л. В. (2020). Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. навч. посіб.-Вінниця: ВНАУ, 2020.-387 с.
- [2] Шевчук, С.П., Попович, О.М., & Світлицький, В.М. (2010). Насосні, вентиляторні та пневматичні установки: підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком підготовки «Електромеханіка». К.: НТТУ «КПІ.
- [3] Tyuteva, P. V., & Muravleva, O. O. (2008, March). The peculiarities of mechanical characteristics of pump units as electric drive loading machines. In 2008 International Conference-Modern Technique and Technologies (pp. 63-66). IEEE.
- [4] Попович, М.Г., & Кіселичник, О.І. (2008). Задачі автоматизації установок водопостачання на основі електромеханічних систем керування. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського, 3(50), Ч.2, 8-12.
- [5] Cattaert, A. E. (2007, July). High pressure pump efficiency determination from temperature and pressure measurements. In 2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa-PowerAfrica (pp. 1-8). IEEE.
- [6] Kallesoe, C. S., Cocquempot, V., & Izadi-Zamanabadi, R. (2006). Model based fault detection in a centrifugal pump application. IEEE transactions on control systems technology, 14(2), 204-215.
- [7] Vodovozov, V., Bakman, I., Raud, Z., & Lehtla, T. (2016). High-efficiency predictive control of pumping. In 2016 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC) (pp. 203-206). Tallinn, Estonia.
- [8] Bakman, I., & Gevorgov, L. (2015, October). Speed control strategy selection for multi-pump systems. In 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON) (pp. 1-4). IEEE.
- [9] Bakman, I., Gevorgov, L., & Vodovozov, V. (2015). Efficiency control for adjustment of the number of working pumps in a multi-pump system. Proc. 9th

International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), 396-402.

[10] Vodovozov, V., et al. (2016). Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations. *Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, 233-238.

[11] Bakman, I., Gevorkov, L., & Vodovozov, V. (2014). Optimization of the method of adjustment of productivity of a multi-pump system containing directly connected motors. *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 209-214.

[12] Lu, Y., Yang, Y., & Gu, H. (2016). Identification and self-tuning control of heat pump system based on neural network. *IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 6687-6691.

[13] Pechenik, N., Kiselychnyk, O., Buryan, S., & Petukhova, D. (2011). Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation. *Electrotechnic and Computer Systems*, 3, 462-466.

[14] Zhu, Q., Li, G., & Zhou, R. (2015). Integrated model of water pump and electric motor based on BP neural network. *Proc. 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 1449-1452.

[15] Rhif, A. (2015). A sliding mode observer for a sensorless pumping system. *Proc. 7th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 1-6.

[16] Flores, T.K.S., Villanueva, J.M.M., & Gomes, H.P. (2023). Fuzzy Pressure Control: A Novel Approach to Optimizing Energy Efficiency in Series-Parallel Pumping Systems. *Automation*, 4(1), 11-28.

[17] Flores, T.K.S., Villanueva, J.M.M., Gomes, H.P., & Catunda, S.Y.C. (2021). Adaptive Pressure Control System Based on the Maximum Correntropy Criterion. *Sensors*, 21(15), 5156.

[18] Ольшевський, О.М., Сергєєв, С.О., & Колотило, В.Д. (2004). Система управління насосною станцією міської системи водопостачання. Патент №68448, Україна. Дата публікації – 15.03.2004.

[19] Cimorelli, L., Covelli, C., Molino, B., & Pianese, D. (2020). Optimal

regulation of pumping station in water distribution networks using constant and variable speed pumps: A technical and economical comparison. *Energies*, 13(10), 2530.

[20] Кіселичник, О.І. (2003). Дослідження екстремальної енергозберігаючої нейронної системи автоматичного керування насосом водопостачання. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ, 2(19), Т.1, 78-82.

[21] Tamminen, J., Ahonen, T., Ahola, J., & Kestilä, J. (2011). Sensorless flow rate estimation in frequency-converter-driven fans. In Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications (pp. 1-10). Birmingham, UK.

[22] Caba, S., Lepper, M., & Liu, S. (2016). Nonlinear controller and observer design for centrifugal pumps. IEEE Conference on Control Applications (CCA), Argentina, 19-22 Sept. 2016.

[23] Попович, М.Г., Печеник, М.В., Кіселичник, О.І., & Соколовський, О.Ф. (2006). Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками. Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: проблеми автоматизованого електропривода, Випуск 66, 311-314.

[24] Fan, W., Xiang, C., Xu, B., & Peng, Y. (2017). Mixed-structure Control System for an Unconventional Coaxial-Ducted Fan Aircraft with Input Saturation. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), USA.

[25] Xu, X., He, M., & Zheng, H. (2007, May). Neuron Based Control of Main Engine Cooling Water Temperature. In 2007 IEEE International Conference on Control and Automation (pp. 2293-2296). IEEE.

[26] Li, X., Xie, D., & Che, Z. (2009). Intelligent Learning Control of Electrohydraulic Proportional Variable Displacement Pump Based on Fuzzy Neural Network. In ISA 2009. International Workshop on Intelligent Systems and Applications, China, 23-24 May 2009.

[27] Hu, R., & Li, C. (2015). The Design of an Intelligent Insulin Pump. In 4th

International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), China, 19-20 Dec 2015.

[28] Kiselychnyk, O.I., Buryan, S., Bodson, M., & Werner, H. (2009). Improved interactive energy-saving control algorithms of water supply pump based on head measurement. In Problems of Automated Electric Drive. Electroinform, Lviv, 349-354.

[29] Turkeri, C., & Kiselychnyk, O. (2023). Dynamical Modelling of a Centrifugal Fan Driven by an Induction Motor and Experimental Validation. *Energies*, 16(18), 6658.

[30] Vodovozov, V., & Bakman, I. (2012). Sensorless pressure calculation for parallel redundancy in pumping systems. Tallin University of Technology. Tallin, Estonia.

[31] Bakman, I., & Vodovozov, V. (2013). Sensorless pressure control of centrifugal pump. Tallin University of Technology. IEEE, 304–309.

[32] Ahonen, T., Tamminen, J., Ahola, J., & Niinimäki, L. (2012). Sensorless estimation of the pumping process characteristics by a frequency converter. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, Finland.

[33] ABB. (Невідома дата). Каталог обладнання фірми ABB. Режим доступу: www.abb.com/motors&drives – Заголовок з екрана.

[34] ABB. (Невідома дата). Інтелектуальні насоси фірми ABB. Режим доступу:

[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/0724f3a9de9100bac125722000427525/\\$File/Fact_Intelligent_pump_control_software_RevB_EN.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/0724f3a9de9100bac125722000427525/$File/Fact_Intelligent_pump_control_software_RevB_EN.pdf) –

Заголовок з екрана.

[35] Danfoss. (Невідома дата). Каталог обладнання фірми Danfoss. Режим доступу:

http://www.danfoss.com/South_Africa/NewsAndEvents/Archive/Motion+Controls/2007.htm? – Заголовок з екрана.

[36] Skworcow, P., AbdelMeguid, H., Ulanicki, B., & Bounds, P. (2010). Optimal pump scheduling with pressure control aspects: Case studies. У Integrating

Water Systems Boxall & Maksimovi'c., London, 113-119.

[37] Grundfos. (2009). Каталог обладнання фірми Grundfos. Програма підбору насосного обладнання WinCaps версія 7.90.22.

[38] Allen-Bradley. (Невідома дата). Каталог обладнання фірми Allen-Bradley. Режим доступу: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/public/documents/webassets/bro_wse_category.hcst – Заголовок з екрана.

[39] Siemens. (Невідома дата). Каталог продукції фірми Siemens. Режим доступу: www.siemens.com/processautomation – Заголовок з екрана.

[40] Siemens. (Невідома дата). Режим доступу: <https://pia.khe.siemens.com/efiles/feldg/file/fachaufsaetze/pumpcontrol.pdf> – Заголовок з екрана.

[41] Печеник, М. В., Бур'ян, С. О., & Землянхуїна, Г. Ю. (2018). Постановка задач по дослідженню електромеханічних систем транспорту рідин при використанні альтернативних джерел енергії. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики", 440-443.

[42] Palgrave, R. (2009). Troubleshooting centrifugal pumps and their systems. Tilgjengelig fra Høgskolen i Telemark – Norway.

[43] Emna, M. E., Adel, K., & Mimouni, M. F. (2013). The wind energy conversion system using PMSG controlled by vector control and SMC strategies. International Journal of Renewable Energy Research, 3(1), 41-50.

[44] Camocardi, P., Battaiotto, P., & Mantz, R. (2010). Autonomous water pumping system based on wind generation. Control by rotor frequency. Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, 903-908.

[45] Amelio, M., & Bova, S. (2000). Exploitation of moderate wind resources by autonomous wind electric pumping systems. Renewable energy, 21(2), 255-269.

[46] Vidal, Y., Acho, L., Luo, N., Zapateiro, M., & Pozo, F. (2012). Power control design for variable-speed wind turbines. *Energies*, 5(8), 3033-3050.

[47] Troncoso, P. E., Mantz, R. J., & Battaiotto, P. E. (2017). Active and

reactive power regulation in wind turbines based on BDFIG machines. URUCON, 2017 IEEE, 1-4.

[48] Camocardi, P., Battaiotto, P., & Mantz, R. (2008). Brushless Doubly Fed Induction machine in wind generation for water pumping. *Electrical Machines*, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on, 1-6.

[49] Forcoş, A., & Marinescu, C. (2011). Motor pump group efficiency in a wind energy pumped storage system. In *2011 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-6). Bucharest, Romania.

[50] Camocardi, P., Battaiotto, P., & Mantz, R. (2008). Wind generator with double stator induction machine. Control strategy for a water pumping application. *Universities Power Engineering Conference*, 2008. UPEC 2008. 43rd International, 1-5.

[51] Forcos, A., Marinescu, C., Teodorescu, R., & Clotea, L. (2011). Efficiency improvement for wind energy pumped storage systems. In *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 579-584). Gdansk, Poland.

[52] Uddin, M. R., Hossen, M. R., & Salim, K. M. (2015). Design, implementation and cost analysis of a solar-powered water pump for multistoried building. *Green Energy and Technology (ICGET)*, 2015 3rd International Conference on, 1-5.

[53] Marouani, R., & Sellami, M.A. (2014). Cascade sliding mode control applied to a photovoltaic water pumping system with maximum power point tracker. *Y 1st International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing – ATSIP*, 328-333.

[54] Vongmanee, V. (2012). The photovoltaic water pumping system using optimum slip control to maximum power and efficiency. *Y The University of the Thai Chamber of Commerce*. Bangkok, Thailand.

[55] Jiang, D., Mo, Y., Jiang, W., Huang, H., Zhang, L., Xu, P., & Hu, X. (2011). Design of photovoltaic water-pump control system based on TMS320F2812. *Y School of Energy and Power Engineering YangZhou University*. YangZhou,

JiangSu, 147-150.

[56] Hmidet, A., Hasnaoui, O., & Dhifaoui, R. (2013). Digital control of MPPT structures for water pumping systems. Y University of Tunis El Manar. INSAT, Tunisia, 1-7.

[57] Ferreira, A., & Boston, J.R. (2009). A control system for rotary blood pumps based on suction detection. Y Transactions on Biomedical Engineering, №3, 656-666.

[58] Kukde, H., & Lilhare, A. S. (2017). Solar powered brushless DC motor drive for water pumping system. In 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC) (pp. 405-409). Chennai, India.

[59] Megalingam, R. K., & Gedela, V. V. (2017). Solar powered automated water pumping system for eco-friendly irrigation. In 2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI) (pp. 623-626). Coimbatore, India.

[60] Saputra, M., Syuhada, A., & Sary, R. (2018). Study of Solar and Wind Energy Using as Water Pump Drive-Land for Agricultural Irrigation. In 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST) (pp. 1-4). Yogyakarta, Indonesia.

[61] Doshi, S., Katoch, A., Suresh, A., Razak, F. A., Datta, S., Madhavan, S. & Gundabattini, E. (2021). A review on vibrations in various turbomachines such as fans, compressors, turbines and pumps. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 9(7), 1557-1575.

[62] How, D. N., Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Sahari, K. S., Ker, P. J., & Muttaqi, K. M. (2020). State-of-charge estimation of li-ion battery in electric vehicles: A deep neural network approach. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(5), 5565-5574.

[63] Modi, S., Bhattacharya, J., & Basak, P. (2020). Estimation of energy consumption of electric vehicles using deep convolutional neural network to reduce driver's range anxiety. ISA transactions, 98, 454-470.

[64] Abidov, K. G., Zaripov, O. O., Khamudkhanova, N. B., Gafurova, M. O., & Zaripova, S. O. (2023, January). Characteristics and parameters of pumping stations

determining energy-saving modes. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2552, No. 1). AIP Publishing.

[65] Wang, J., Zhai, Y., Yao, P., Ma, M., & Wang, H. (2020). Established prediction models of thermal conductivity of hybrid nanofluids based on artificial neural network (ANN) models in waste heat system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110, 104444.

[66] Florin, T. M., & Florin, I. (2020, November). Air Source Heat Pump Performance Evaluation Based on Experimental measurements and Neural Network. In 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) (pp. 1-4). IEEE.

[67] Turkeri, C., & Kiselychnyk, O. (2022, December). Dynamical Flow Rate and Pressure Artificial Neural Network Estimators for a Centrifugal Fan Driven by an Induction Motor Drive. In 2022 IEEE 1st Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON) (pp. 1-6). IEEE.

[68] Saggiaro, N.J., Cagnon, J.A., & da Silva, I.N. (2002). A Neural Approach for Determination of Global Energetic Efficiency Indicator in Groundwater Wells. State University of Sao Paulo – UNESP, Brazil.

[69] Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes*, 8(2), 248.

[70] Pechenik, M.V., Buryan, S.O., Pushkar, M.V., & Zemlianukhina, H.Y. (2022). Electromechanical system of turbomechanism when using an alternative source of electric energy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, №2, 61-66.

[71] Alkaisi, A., Mossad, R., & Sharifian-Barforoush, A. (2017). A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 110, 268-274.

[72] Yuzer, E. O., & Bozkurt, A. (2023). Instant solar irradiation forecasting for solar power plants using different ANN algorithms and network models. *Electrical Engineering*, 1-19.

[73] Beshta, A., Aziukovskyi, O., Balakhontsev, A., & Shestakov, A. (2017,

November). Combined power electronic converter for simultaneous operation of several renewable energy sources. In 2017 International Conference On Modern Electrical And Energy Systems (MEES) (pp. 236-239). IEEE.

[74] Chilipi, R. R., Singh, B., Murthy, S. S., Madishetti, S., & Bhuvaneswari, G. (2014). Design and implementation of dynamic electronic load controller for three-phase self-excited induction generator in remote small-hydro power generation. *IET Renewable Power Generation*, 8(3), 269-280.

[75] Kiselychnyk, O., Bodson, M., & Wang, J. (2013, June). Model of a self-excited induction generator for the design of capacitor-controlled voltage regulators. In 21st Mediterranean Conference on Control and Automation (pp. 149-154). IEEE.

[76] Youssef, K. H., Wahba, M. A., Yousef, H. A., & Sebakhy, O. A. (2010). A new method for voltage and frequency control of stand-alone self-excited induction generator using pulse width modulation converter with variable DC-link voltage. *Electric Power Components and Systems*, 38(5), 491-513.

[77] Nazarova, O., Osadchyy, V., & Brylysty, V. (2020, September). Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics. In 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP) (pp. 1-4). IEEE.

[78] Ganesh, A., Dahiya, R., & Singh, G. K. (2016, December). Development of simple technique for STATCOM for voltage regulation and power quality improvement. In 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) (pp. 1-6). IEEE.

[79] Печеник, М. В., Бовкунович, В. С., & Пушкар, М. В. (2015). Регулювання напруги асинхронного генератора із самозбудженням за допомогою електронного регулятора навантаження. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, (3), 82-88.

[80] Bodson M., Kiselychnyk O.(2012), “Analysis of triggered self-excitation in induction generators and experimental validation”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol.27, No.2, 238–249.

[81] Pushkar, M.V., Krasnoshapka, N.D., Pechenik, M.V., Buryan, S.O.,

Zemlianukhina, H.Y. (2020). Approximation of Magnetizing Inductance Curve of Self-excited Induction Generator for Investigation of Steady-state Operation Modes. У IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 301-305.

[82] Marino, R., Peresada, S., & Tomei, P. (1995). Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 42(5), 508-515.

[83] Valtchev, S., Kryukov, O.V., Meshcheryakov, V.N., & Belousov, A.S. (2020, November). Comparative analysis of electric drives control systems applied to two-phase induction motors. In 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) (pp. 918-922). IEEE.

[84] Leonhard, W. (1996). Control of Electrical Drives. Springer-Verlag, Berlin, 420.

[85] S.O. Burian, O.I. Kiselychnyk, M.V. Pushkar, V.S. Reshetnik, H.Y. Zemlianukhina, "Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer." Technical Electrodynamics, №1, 2020, Kyiv, 71-77.

[86] Osadchyy, V., & Nazarova, O. (2020, September). Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems. In 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP) (pp. 1-4). IEEE.

[87] Pechenik, M., Burian, S., Pushkar, M., & Zemlianukhina, H. (2019, September). Analysis of the Energy Efficiency of Pressure Stabilization Cascade Pump System. In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (pp. 490-493). IEEE.

[88] Pechenik, M.V., Buryan, S.O., Zemlianukhina, H.Y., & Pushkar, M.V. (2020). Investigation of the Hydraulic Pressure Stabilization Accuracy in the Conditions of Water Supply Cascade Pump System Operation. У IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 97-100.

[89] Петухова, О. А., Чернуха, А. М., & Горносталь, С. А. (2013). Спеціальне водопостачання. Електронний ресурс].-Режим доступу до ресурсу:

<http://univer.nuczu.edu.ua/e-books/voda2/2958.html>.

[90] Pechenik, M.V., Buryan, S.O., Zemlianukhina, H.Y., Pushkar, M.V., & Teriaiev, V.I. (2022). Investigation of energy efficiency of water supply system when powered by an alternative energy source. *Tekhnichna Elektrodynamika*, №5, Kyiv, 77-81.

[91] Saggiaro, N.J., Cagnon, J.A., & da Silva, I.N. (2002). A Neural Approach for Determination of Global Energetic Efficiency Indicator in Groundwater Wells. State University of Sao Paulo – UNESP, Brazil.

[92] Ahonen, T., Tamminen, J., Ahola, J., & Kestila, J. (2009). Sensorless pump operation estimation. In 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 1-10.

[93] Caba, S., Lepper, M., & Liu, S. (2018). Nonlinear Controller and Estimator Design for Multi-Pump Systems. У 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, Denmark, 515-520.

[94] Calpeda. (Невідома дата). Режим доступу: https://gidromash.ua/files/katalog_calpeda_mxl_mxl.pdf – Заголовок з екрана.

[95] Burian, S.O., Zemlianukhina, H.Y. (2022). Neural Network Pressure Observer for a Turbomechanism Electromechanical System Powered by a Wind Generator. *Applied Aspects of Information Technology*, № 5(4), Odessa, 303–314.

[96] Бур'ян, С.О., Печеник, М.В., Землянукхіна, Г.Ю., Бабарова, А.І. (2019). Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації послідовно з'єднаних насосних установок в пакеті SIMHYDRAULICS. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, №204, Харків, с. 84-86.

[97] Karmakar, Shukla. (2021). Artificial Neural Network-Built Electronic Load Controller for Three-Phase Self-Excited Induction Generator Feeding Single-Phase Load. pp. 185-190.

[98] Ion, C. P. (2020). A Comprehensive Overview of Single-Phase Self-Excited Induction Generators. *IEEE Access*, 8, 197420-197430.

[99] International Rectifier. (2007). IRS26310DJPbF HIGH VOLTAGE 3

PHASE GATE DRIVER IC WITH DC BUS OVER –VOLTAGE PROTECTION, 1st ed., 1-44.

[100] LEM. (2020). Voltage transducer 25-P LV. Режим доступу: http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf – Заголовок з екрана.

[101] Farnell.com. (2020). Current transducer LTS 6-NP. Режим доступу: http://www.farnell.com/datasheets/1639891.pdf?_ga=1.252218057.1507103487.1470218427 – Заголовок з екрана.

[102] Opal-rt.com. (2016). What is Rapid Control Prototyping? Режим доступу: <http://www.opal-rt.com/rapid-control-prototyping-general-overview>. – Заголовок з екрана.

[103] www.dspace.com. (2016). DS1104 R&D Controller Board. Cost-effective system for controller development. Режим доступу: https://www.dspace.com/shared/data/pdf/2016/dSPACE_DS1104_Catalog2016_E.pdf. – Заголовок з екрана.

[104] Бур'ян, С.О., Печеник, М.В., Землянхуїна, Г.Ю. (2018). Розробка та дослідження оцінювача ККД насоса за допомогою нейронної мережі на базі програмованої логічної інтегральної схеми. Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2, Вінниця, 68-73.

[105] Бур'ян, С.О., Титаренко, А.С., Землянхуїна, Г.Ю. (2018). Оцінювач коефіцієнта корисної дії насосної установки на основі нейронної мережі: експериментальні дослідження. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, №195, Харків, 132-133.

[106] Calpeda S.p.A. (Невідома дата). Calpeda MXH, MXHM. Monobloc horizontal multistage pumps. Електронні дані. Режим доступу: <http://www.calpeda.com.ua/mxh.html> – Заголовок з екрана.

[107] Каталог Lenze 8200. (Невідома дата). Перетворювачі частоти Lenze 8200 Vector. Електронні дані. Режим доступу: http://www.lenze.org.ua/?inc=inverters/01_inv/01e_8200_Vector – Заголовок з

екрана.

[108] Terasic Inc. (2013). Overview of DE1-SoC Development Board /Solution for Altera FPGAs. Електронні дані. Terasic Inc. Режим доступу: <http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=836> –

Заголовок з екрана.

[109] Terasic Inc. (2013). Complex FPGA Design Service. Електронні дані. Terasic Inc. Режим доступу: <http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=836> –

Заголовок з екрана.

[110] Wu, R., Guo, X., Du, J., & Li, J. (2021). Accelerating neural network inference on FPGA-based platforms—A survey. *Electronics*, 10(9), 1025.

[111] Vineetha, K. V., Reddy, M. M. S., Ramesh, C., & Kurup, D. G. (2023). An efficient design methodology to speed up the FPGA implementation of artificial neural networks. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 47, 101542.

[112] Ling, K. V., Yue, S. P., & Maciejowski, J. M. (2006, June). A FPGA implementation of model predictive control. In 2006 American Control Conference (pp. 6-pp). IEEE.

[113] Каталог Intel. (Невідома дата). FPGA - Field Programmable Gate Array . Електронні дані. Режим доступу: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/catalog/mfr=intel> – Заголовок з екрана.

[114] Ali, Y. M., Zargelin, O. A., Lashhab, F., & Alaribi, A. (2021, April). Water Level Control System using Programmable Logic Controller (PLC): Rujban Water Supply System. In 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS) (pp. 1-9). IEEE.

[115] Каталог Промислова Автоматика. (Невідома дата). Датчики тиску. Електронні дані. Режим доступу: <https://ianv.com.ua/uk/category/category-danfoss/promyshlennaya-avtomatika/datchiki-davlenija> – Заголовок з екрана.

ДОДАТОК А

РОБОЧА ПРОГРАМА ДЛЯ ПЛІС

```
// main_prog
#include <stdio.h>
#include <io.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include "SEG7.h"
#include "system.h"

void main(void)
{
    // FILE *fp;
    int i, ch = 0, ch1=1, ch2=2;
    const int nReadNum = 100; // max 1024
    int Value, Value1, Value2=0, Value3=0, num, nIndex=0, Value4=0, Value5=0
;

    double y11, y12, y13, y14, y15, y16, y17, y18, y19, y10, Q, H, Q1;
    double j11, j12, j13, j14, j15, j16, j17, j18, j19, j10;
    double    U, U1, InQ, InH, InZ, Out, Out1;
    double    w111=-2.6061,
              w112= 9.2105,
              w113= 4.1799,
              w114= 2.5864,
              w115= 4.7173,
              w116= 3.8062,
              w117=-2.4992,
              w118=-0.065031,
              w119=-4.2674,
              w110=-0.38066;
```

```
double v111=-4.1943,  
      v112=-3.2408,  
      v113=0.019318,  
      v114=0.39098,  
      v115=-2.568,  
      v116=-1.0239,  
      v117=-0.78653,  
      v118=1.8977,  
      v119=-0.56577,  
      v110=-1.8323;
```

```
double w121= 2.2434,  
      w122=-5.0738,  
      w123= 3.4592,  
      w124= 3.6393,  
      w125=-3.8113,  
      w126=-1.4234,  
      w127= 4.5564,  
      w128=-4.4918,  
      w129= 0.95331,  
      w120= 4.8808;
```

```
double v121=0.67286,  
      v122=3.1098,  
      v123=2.1677,  
      v124=-0.18018,  
      v125=-5.8341,  
      v126=-7.1484,  
      v127=-2.5819,  
      v128=3.5274,  
      v129=-1.149,
```

v120=4.5573;

double w11= 1.1254,
 w12= 1.2913,
 w13=-0.25575,
 w14= 0.25044,
 w15= 0.44512,
 w16=-1.8897,
 w17= 0.15953,
 w18=-0.19761,
 w19=-2.8887,
 w10= 0.78157;

double v11=0.25416,
 v12=-0.047812,
 v13=3.2551,
 v14=-2.1764,
 v15=-0.083367,
 v16=-0.027767,
 v17=-0.39899,
 v18=0.16759,
 v19=1.2963,
 v10=-1.3045;

double b11=-5.5171,
 b12= 6.1314,
 b13=-2.1914,
 b14=-1.2355,
 b15= 1.8249,
 b16= 2.89392,
 b17= 2.3549,


```

        b18=-2.2437,
        b19=-4.2061,
        b10= 4.6737,
        b1= -1.8824;
double  z11=5.0773,
        z12=3.2587,
        z13=2.8775,
        z14= 0.16009,
        z15=0.52591,
        z16= 2.0438,
        z17=-1.1519,
        z18=3.5868,
        z19=-1.4139,
        z10= 4.8149,
        z1=-1.2986;
double  XminQ=0,
        XmaxQ=361.3,
        Ymin=-1,
        Ymax=1,
        XminH=0,
        XmaxH=21.3,
        XminN=0,
        XmaxN=0.3,
        XminZ=0,
        XmaxZ=4.29;

int t=0;
while(1){
    //num= IORD(SW_BASE, 0x00);

    //printf("=%d, ch=%d, ch1=%d\t", nIndex++, ch, ch1);

```

```

// set measure number for ADC convert
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x01, nReadNum);
// start measure
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch << 1) | 0x00);
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch << 1) | 0x01);
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch << 1) | 0x00);
usleep(1);
// wait measure done1
while ((IORD(ADC_LTC2308_BASE,0x00) & 0x01) == 0x00);
// read adc value
for(i=0;i<nReadNum;i++){
Value = IORD(ADC_LTC2308_BASE, 0x01);
//printf("Value=%.3f\n", (double)Value);
    Value2=Value2+Value;}
Value=Value2/nReadNum;
Value2=0;
// start measure2
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch1 << 1) | 0x00);
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch1 << 1) | 0x01);
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch1 << 1) | 0x00);
usleep(1);

while ((IORD(ADC_LTC2308_BASE,0x00) & 0x01) == 0x00);
for(i=0;i<nReadNum;i++){
Value1 = IORD(ADC_LTC2308_BASE, 0x01);
// printf("Value=%.3f\n", (double)Value);
    Value3=Value3+Value1;}
        Value1=Value3/nReadNum;
        Value3=0;

// start measure3

```

```

IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch2 << 1) | 0x00);
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch2 << 1) | 0x01);
IOWR(ADC_LTC2308_BASE, 0x00, (ch2 << 1) | 0x00);
usleep(1);
while ((IORD(ADC_LTC2308_BASE,0x00) & 0x01) == 0x00);
for(i=0;i<nReadNum;i++){
Value4 = IORD(ADC_LTC2308_BASE, 0x01);
//printf("Value=%.3f\n", (double)Value);
        Value5=Value5+Value4;}
        Value4=Value5/nReadNum;
        Value5=0;
Q=((double)(Value/1000.0))*(XmaxQ/1.485);
H=((double)(Value1/1000.0)-0.897)*(XmaxH/1.26);
Q1=((double)(Value4/1000.0)-0.68)*(1/0.685);
InQ=(Q-XminQ)/(XmaxQ-XminQ)*(Ymax-Ymin)+Ymin;
InH=(H-XminH)/(XmaxH-XminH)*(Ymax-Ymin)+Ymin; //
//////////
y11=tanh(InQ*w111+InH*w121+b11);
y12=tanh(InQ*w112+InH*w122+b12);
y13=tanh(InQ*w113+InH*w123+b13);
y14=tanh(InQ*w114+InH*w124+b14);
y15=tanh(InQ*w115+InH*w125+b15);
y16=tanh(InQ*w116+InH*w126+b16);
y17=tanh(InQ*w117+InH*w127+b17);
y18=tanh(InQ*w118+InH*w128+b18);
y19=tanh(InQ*w119+InH*w129+b19);
y10=tanh(InQ*w110+InH*w120+b10);
//////////
j11=tanh(InH*v111+InQ*v121+z11);
j12=tanh(InH*v112+InQ*v122+z12);

```

```

j13=tanh(InH*v113+InQ*v123+z13);
j14=tanh(InH*v114+InQ*v124+z14);
j15=tanh(InH*v115+InQ*v125+z15);
j16=tanh(InH*v116+InQ*v126+z16);
j17=tanh(InH*v117+InQ*v127+z17);
j18=tanh(InH*v118+InQ*v128+z18);
j19=tanh(InH*v119+InQ*v129+z19);
j10=tanh(InH*v110+InQ*v120+z10);

```

```

U=y11*w11+y12*w12+y13*w13+y14*w14+y15*w15+y16*w16+y17*w17+y
18*w18+y19*w19+y10*w10+b1;

```

```

Out=(U-Ymin)/(Ymax-Ymin)*(XmaxN-XminN)+XminN;

```

```

U1=j11*v11+j12*v12+j13*v13+j14*v14+j15*v15+j16*v16+j17*v17+j18*v1
8+j19*v19+j10*v10+z1;

```

```

Out1=(U1-Ymin)/(Ymax-Ymin)*(XmaxZ-XminZ)+XminZ;

```

```

//printf("%.3f  \t\n", Q);
printf("%.3f  \n ", H);
printf("%.3f  \n", Out*100); //KKD
//printf("%.3f  \n", Q1);
printf("%.2f  \n", Out1); //Q s NM
printf("%.2f\n", Q1);
printf("%.1f  \n", (double)(t));
//printf("Value=%.3f\n", (double)Value);
//printf("Value1=%.3f\n", (double)(Value1));
//printf("Value3=%.3f\n", (double)(Value3));
// printf("InQ=%.3f \n", InQ);
// printf("InH=%.3f \n", InH);
//printf("U=%.3f  \t", U);
//printf("kkd=%.4f          \n", Out*100);

```

```

        //printf("%.3f\n",(double)Value);
        //printf("##### \n");
//    SEG7_Decimal(Out*10000, 0x00);
//}
    usleep(500*100);
    t++;
} // while }

```

```

//sorting
while(!source.eof()){
source>>aPress[i]; //read first word from kkd.txt
press << aPress[i] << endl;
source>> aKKD[i]; //read first word from kkd.txt
kkd << aKKD[i] << endl;
source >> aQqq[i];
qqq << aQqq[i]<< endl;
source >> aQ2 [i];
q2 << aQ2[i]<< endl;
source>>aTime[i]; //read first word from kkd.txt
time << aTime[i] << endl;
i++;}
time << "];"<<endl;
kkd << "];"<<endl;
press << "];"<<endl;
qqq << "];" <<endl;
q2 << "];" << endl;
cout << "The length of Arrays =" ;
cout << i << endl;
press.close();

```

```
time.close(); //  
kkd.close();  
qqq.close();  
q2.close();  
source.close(); //  
system("pause");  
return 0;}
```

ДОДАТОК Б
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. S.O. Burian, O.I. Kiselychnyk, M.V. Pushkar, V.S. Reshetnik, H.Y. Zemlianukhina, "Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer." *Technical Electrodynamics*, №1, 2020, Kyiv pp. 71-77. DOI: [10.15407/techned2020.01.071](https://doi.org/10.15407/techned2020.01.071).
2. M.V. Pechenik, S.O. Burian, M.V. Pushkar, H.Y. Zemlianukhina, "Electromechanical system of turbomechanism when using an alternative source of electric energy." *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, №2, 2022, Dnipro, pp. 61-66. DOI: [10.33271/nvngu/2022-2/061](https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-2/061).
3. M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, M.V. Pushkar, V.I. Teriaiev, "Investigation of energy efficiency of water supply system when powered by an alternative energy source." *Tekhnichna Elektrodynamika*, №5, 2022, Kyiv, pp. 77-81. DOI: [10.15407/techned2022.05.077](https://doi.org/10.15407/techned2022.05.077).
4. С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, Г.Ю. Землянухіна, "Розробка та дослідження оцінювача ККД насоса за допомогою нейронної мережі на базі програмованої логічної інтегральної схеми." *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, 2018, Вінниця с. 68-73.
5. С.О. Бур'ян, А.С. Титаренко, Г.Ю. Землянухіна, "Оцінювач коефіцієнта корисної дії насосної установки на основі нейронної мережі: експериментальні дослідження." *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, №195, 2018, Харків, с. 132-133.
6. С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, Г.Ю. Землянухіна, А.І. Бабарова "Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації послідовно з'єднаних насосних установок в пакеті SIMHYDRAULICS." *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, №204, 2019, Харків, с. 84-86.

7. S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, "Neural Network Pressure Observer for a Turbomechanism Electromechanical System Powered by a Wind Generator." *Applied Aspects of Information Technology*, № 5(4), 2022, Odessa, pp. 303–314. DOI: [10.15276/ahait.05.2022.20](https://doi.org/10.15276/ahait.05.2022.20).

8. M.V. Pechenik, S.O. Burian, M.V. Pushkar, H.Y. Zemlianukhina, "Analysis of the Energy Efficiency of Pressure Stabilization Cascade Pump System," *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 490-493. DOI: [10.1109/MEES.2019.8896588](https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896588).

9. M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, M.V. Pushkar, "Investigation of the Hydraulic Pressure Stabilization Accuracy in the Conditions of Water Supply Cascade Pump System Operation," *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 97-100. DOI: [10.1109/ESS50319.2020.9160340](https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160340).

10. M.V. Pushkar, N.D. Krasnoshapka, M.V. Pechenik, S.O. Burian, H.Y. Zemlianukhina, "Approximation of Magnetizing Inductance Curve of Self-excited Induction Generator for Investigation of Steady-state Operation Modes," *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 301-305. DOI: [10.1109/ESS50319.2020.9160143](https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160143).

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати і висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: IEEE International Conference «Modern Electrical and Energy Systems» MEES (Kremenchuk, 2019), IEEE «Energy Smart Systems» ESS (Kyiv, 2020), Workshop at the School of Engineering, University of Warwick (Coventry, UK, 2019), «Проблеми сучасної електротехніки» ПСЕ (Київ, 2020, 2022), «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ (Вінниця, 2017), «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації» ESMO (Кременчук, 2018), «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики» СПЕА (Київ, 2017 – 2019), «Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту» (Харків, 2021), «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2021),

«Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 2021), конкурс студентських наукових робіт «Електротехніка та електромеханіка» ЕТЕ (Кам'янське, 2019).

ДОДАТОК В
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор департаменту

«Цифрова промисловість»

ДП «Сіменс Україна»

Сергій ДВОРНИК

«06» листопада 2023 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
асистента кафедри автоматизації електромеханічних систем та
електроприводу КПП ім. Ігоря Сікорського
Землянухіної Ганни Юріївни

Даним актом підтверджується, що метод керування технологічними координатами турбомеханізмів з використанням технологій штучних нейронних мереж, який розроблено асистентом кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Землянухіною Ганною Юріївною в рамках виконання її дисертації на здобуття ступеня доктора філософії, використано для побудови електромеханічної системи автоматичного керування напором або продуктивністю при використанні ПЛК Simatic S7-1500 та технологічного модуля TM NPU (модуль штучного інтелекту).

Розроблений автором метод керування турбомеханізмом, а саме насосом, дає змогу реалізувати бездавачеву систему керування з використанням доступних для вимірювання електричних координат, що дозволило провести тестування обладнання TM Simatic S7-1500 NPU у поєднанні з системами водопостачання в умовах варіації гідроопору мережі.

Начальник відділу
сервісу обладнання

Олександр НОСАЧ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету електроенерготехніки та
автоматики Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»



доктор технічних наук, професор

Олександр ЯНДУЛЬСЬКИЙ

“___” листопада 2023 р.

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи асистента
кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу КПП ім. Ігоря
Сікорського Землянухіної Ганни Юріївни за темою «Бездавачеве керування
електромеханічними системами турбомеханізмів з використанням технології
нейромереж»

Комісія у складі кафедри АЕМС-ЕП, д.т.н. доц. Ковбаса С.М., к.т.н. проф.
Печеник М.В., к.т.н. доц. Вололянський Р.С., к.т.н. доц. Красношাপка Н.Д., склала цей
акт про використання результатів дисертаційної роботи Землянухіної Г.Ю. у
навчальному процесі кафедри автоматизації електромеханічних систем та
електроприводу КПП ім. Ігоря Сікорського.

Розроблений автором метод керування турбомеханізмом, а саме насосом,
моделюючі програми та програмне забезпечення для дослідження бездавачевої
системи керування турбомеханізмом із застосуванням нейронних мереж в умовах
стабілізації напору або продуктивності, експериментальна насосна установка із
реалізацією оцінювачів технологічних координат на базі ПЛІС використовуються при
проведенні лекційних та лабораторних занять з дисциплін «Електромеханічні системи
типових технологічних застосувань» та «Керування та автоматизація технічних
систем» (магістерський рівень), а також у дипломному проектуванні за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Голова комісії

Члени комісії

д.т.н. доц. Сергій КОВБАСА

к.т.н. проф. Микола ПЕЧЕНИК

к.т.н. доц. Роман ВОЛЯНСЬКИЙ

к.т.н. доц. Наталія КРАСНОШАПКА