

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Яшин Роман Вікторович**

УДК 628.12-83:[621.67+621.313.33](043.3)

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

Розгалужена електромеханічна система напірного переміщення рідини з  
інтегрованими насосними агрегатами

спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

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

Р.В. Яшин

Наукові керівники: д.т.н., доцент Попович Олександр Миколайович,  
к.т.н., доцент Лістовщик Леонід Костянтинович

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

Яшин Р.В. Розгалужена електромеханічна система напірного переміщення рідини з інтегрованими насосними агрегатами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 – Електрична інженерія). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Загальносвітова тенденція на зростаючі потреби в електроенергії та воді вимагає розробки та впровадження енерго- та ресурсоефективних технологій в тому числі і в сфері будівництва багатоповерхових будинків різного призначення (житлові, комерційні, промислові тощо). Оскільки прогнозується, що кількість житлових багатоповерхових будинків, а також їх висотність буде зростати найближчі два десятиліття, для дослідження було обрано системи водопостачання багатоповерхових житлових будинків підвищеної енергетичної ефективності, а саме – електромеханічні системи (ЕМС) паралельного зонного водопостачання.

В першому розділі розглянуто загальносвітові тенденції зміни потреб у воді та електроенергії у наступні 25 років. У сфері багатоповерхового будівництва тенденції розвитку пов'язані із збільшенням потреб у воді і енергії внаслідок зростання кількості населення планети та збільшення частки міського населення. За прогнозами до 2050 року очікується приріст населення на рівні 20%, при цьому доля міського населення збільшиться з 56% (дані на 2023 р.) до 70% у 2050. Зростання потреб людства у воді найближчі 25 років оцінюється в 1% кожен рік. Збільшення попиту на електроенергію торкнеться багатьох сфер: промисловість, дата-центри, транспорт тощо. Окрім цього очікується, що до 2050 р. потреба домогосподарств в електричній енергії зросте на 75%. Оскільки населення міст буде зростати, очікується і зростання висоти будинків. Отже зросте потреба у воді, а оскільки системи водопостачання є потужними споживачами електроенергії, зросте потреба і в електроенергії.

Розглянуто різні системи водопостачання багатоповерхових будинків та підходи до зменшення енергоспоживання. Найбільш розповсюдженою системою водопостачання в Україні є система, за якою вода подається до споживачів по одному стояку. Перевагою такої системи є простота. Але у випадках коли кількість поверхів у будинках обчислюється десятками, системи з одним стояком стикаються з такими труднощами: потребують дорогих потужних високонапірних насосних агрегатів; відповідно потребують обладнання, що повинно витримувати і працювати в умовах великих тисків в системі; великі тиски призводять до зростання витоків; зростає ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Іншими типами систем водопостачання багатоповерхових будинків є: системи з проміжними баками на поверхах (каскадні системи водопостачання); системи водопостачання з баком на даху будівлі; системи паралельного зонного водопостачання.

Ключовим елементом наведених вище електромеханічних систем водопостачання є – насосні агрегати (НА). Встановлено, що для систем водопостачання багатоповерхових будинків, в переважній більшості випадків, використовуються НА до складу яких входять відцентрові насоси та асинхронні двигуни. Поширене використання відцентрових насосів обумовлено їх високим ККД, простотою з'єднання з електродвигуном, плавною подачею води, відносною простотою конструкції. В свою чергу асинхронні двигуни (з короткозамкненим ротором) мають також певні переваги: високий ККД, відносна простота конструкція, висока надійність, відносно невелика вартість.

В другому розділі представлено розроблені математичні моделі. Побудовано математичну модель для виконання розрахунків електромеханічних систем паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків. Розроблені моделі також дають можливість здійснювати порівняльні дослідження системи паралельного зонного водопостачання із системами водопостачання з одним стояком. Для порівняння обох систем використано коефіцієнт енергетичної ефективності.

Оскільки було встановлено, що надлишковий тиск в системі водопостачання впливає на витрати, було проведено уточнення математичної моделі: отримано рівняння що дозволяють врахувати вплив надлишкових тисків.

На базі припущення, що завдяки зменшенню надлишкових тисків у системі водопостачання при застосуванні системи паралельного зонного водопостачання замість ЕМС з одним стояком, зменшиться і витрата в такій системі, було отримано рівняння коефіцієнта ефективності: запропонований коефіцієнт ефективності дає змогу оцінювати як енергетичну ефективність системи водопостачання так і ресурсну (іншими словами – економію електроенергії та води). При порівнянні двох систем водопостачання, запропонований коефіцієнт ефективності дає змогу надати оцінку ефективності як у відносних одиницях, так і гривневому еквіваленті (розрахунок на базі вартості води та електроенергії).

На основі проведеного уточнення щодо впливу надлишкового тиску на витрати, покращено математичну модель, розроблену для виконання розрахунків електромеханічних систем паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків. Даний підхід дозволив більш точно розраховувати параметри ЕМС паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків що складаються з двох та трьох паралельних стояків.

В третьому розділі проведено дослідження на основі розроблених математичних моделей. Порівняно енергоефективність ЕМС з одним стояком із системою паралельного зонного водопостачання: встановлено що електромеханічна система водопостачання багатоповерхового будинку із двома паралельними стояками споживає на 30 % менше енергії, за систему з одним стояком, що є наслідком зменшення надлишкового напору та втрат у двигуні.

Проведено дослідження впливу надлишкового тиску в системі водопостачання на витрат. Дослідження виконано для семиповерхового будинку. Розрахунки показали, що надлишкові тиски, є причиною того, що за однакової потреби у воді, різниця споживання між першим та сьомим поверхом може становити 9%. Результат дослідження змусив переглянути підхід до розрахунків

ЕМС водопостачання що базуються на припущенні рівності споживання за поверхами; крім того, дане дослідження спонукало до перегляду розрахунку коефіцієнту ефективності. Отже було розроблено новий підхід до оцінки ефективності ЕМС водопостачання. Було проведено порівняння ефективності ЕМС з одним стояком із системами паралельного зонного водопостачання, що склалися з двох та трьох стояків. Встановлено, що по відношенню до ЕМС з одним стояком, ЕМС паралельного зонного водопостачання з двох стояків забезпечує економію 4% води і 25% електроенергії з їх співвідношенням у грошовому виразі – 6:1; а ЕМС паралельного зонного водопостачання з трьох стояків забезпечує економію 32.97% електроенергії та 5.11% води і співвідношення економії води та електричної енергії в грошовому еквіваленті становить 6,4/1 (відповідно до вартості води та електроенергії станом на перший квартал 2024 року для споживачів Києва).

За первинними капітальними витратами системи паралельного зонного водопостачання є дорожчими за систему з одним стояком (за рахунок додаткового насосного агрегату, труб, супутнього обладнання та інш.), і щоб рекомендувати їх для впровадження замість систем водопостачання з одним стояком, у четвертому розділі було проведено розрахунки терміну окупності систем паралельного зонного водопостачання.

Аналіз тарифної політики, врахування збільшення капітальних витрат за рахунок застосування додаткового обладнання та розрахована економічна ефективність від впровадження систем паралельного зонного водопостачання показали, що за умов впровадження системи паралельного зонного водопостачання замість системи з одним стояком терміни повернення коштів, витрачених на додаткове обладнання становлять: 14 місяців для системи паралельного зонного водопостачання, що складається з двох стояків; 15 місяців для системи паралельного зонного водопостачання, що складається з трьох стояків. Прогнозована розрахункова ефективність від впровадження системи з двома паралельними стояками порівняно із системою з одним стояком за десять років роботи склала 5,06 млн. грн., при розрахунковій вартості системи з двома

паралельними стояками 1,05 млн. грн.; розрахункова ефективність від впровадження системи з трьома паралельними стояками порівняно із системою з одним стояком за десять років роботи склала 7,3 млн. грн., при розрахунковій вартості системи з трьома паралельними стояками 1,25 млн. грн. Розрахунки наведені для умов дванадцятиповерхового будинку, який було використано для дослідження у третьому розділі.

Результати проведеного дослідження вказують на те, що застосування систем паралельного зонного водопостачання у багатоповерхових будинках є ефективним і актуальним рішенням в умовах зростаючого попиту на електроенергію та зростаючу потребу у воді.

У п'ятому розділі проведено ряд досліджень спрямованих на: розробку насосного агрегату спеціалізованої конструкції з метою підвищити ефективність систем паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків.

Проаналізовано різні конструкції відцентрових насосів. Запропоновано конструкцію насосного агрегату двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором. Основними перевагами запропонованого насосного агрегату є: надійність конструкції та простота складання; знижений рівень шуму; герметичність конструкції; ефективне охолодження (що збільшує довговічність роботи пристрою); та високий ККД обумовлений зменшення об'ємних втрат (за рахунок зменшення перетоків і мінімізації можливості виникнення витоків через герметичність конструкції) та зменшенням втрат електричної енергії.

### **Наукова новизна дослідження полягає у наступному:**

1. Розроблено математичну модель комплексного дослідження економії електроенергії та води в електромеханічних системах водопостачання багатоповерхових будинків завдяки зниженню надлишкових напорів за застосування паралельного зонного водопостачання, яка враховує зміни водоспоживання поверхів в залежності від величини надлишкових тисків і включає рівняння втрат напору у розгалуженій гідравлічній системі трубопроводу водопостачання багатоповерхового будинку.

2. Запропоновано, обґрунтовано і застосовано концепцію розрахунку параметрів робочих режимів електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків на основі визначення «потреби у воді» окремих користувачів (груп користувачів) і її врахування за зміни структури системи, що дає можливість більш точно виконати порівняльну оцінку енергетичної і ресурсної ефективності варіантів систем водопостачання.

3. Запропоновано використання коефіцієнту комплексної ефективності системи, який на відміну від відомих, дозволяє врахувати енергетичну і ресурсну ефективності за ціновим еквівалентом, що дало можливість визначити закономірності зміни ефективності електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків за застосування паралельного зонування: зменшення споживання електроенергії до 33 %, а споживання води до 5 % за перевищення економічного ефекту від зменшення споживання води над економією електроенергії до 6 разів.

4. Обґрунтовано застосування спеціалізованого насосного агрегату системи паралельного водопостачання, який на відміну від відомих, одночасно забезпечує всі паралельні стояки, що збільшує ККД асинхронного двигуна внаслідок збільшення його габаритної потужності, забезпечує зниження втрат в обмотках двигуна за інтенсифікації охолодження, компенсацію осьових зусиль робочих коліс насосу із зниженням втрат у підшипниках і внаслідок перетоків рідини.

**Практичне значення** полягає у наступному. Розроблена математична модель дає змогу: порівняти ефективність різних систем водопостачання багатоповерхових будинків за показниками енерго- та ресурсоефективності; оцінити величину економії, виражену в гривнях відповідно до діючої вартості води та електроенергії; розрахувати терміни окупності як застосованого додаткового обладнання, необхідного для побудови систем паралельного зонного водопостачання, так і системи водопостачання в цілому.

Отримані результати вказують на те, що впровадження системи паралельного зонного водопостачання замість системи водопостачання з одним

стояком дозволяє зекономити як електроенергію так і воду; також отримана економія дозволить компенсувати додаткові витрати, пов'язані із збільшенням вартості системи з паралельними стояками по відношенню до системи з одним стояком (труби, насосний агрегат тощо) і повністю повернути кошти, витрачені на створення системи водопостачання.

Запропоновано конструкцію насосного агрегату спеціальної конструкції, застосування якого підвищить ефективність систем паралельного зонного водопостачання. Основними перевагами розробленого насосного агрегату є: надійність конструкції та простота зборки; понижений рівень шуму; герметичність конструкції; ефективне охолодження (що збільшує довговічність роботи пристрою); високий ККД обумовлений як зменшенням втрат електричної енергії так і зменшення об'ємних втрат. Завдяки своїм характеристикам даний насосний агрегат може бути задіяний і в інших сферах побуту, промисловості, агросекторі.

За застосування паралельного зонного водопостачання зменшуються надлишкові тиски у системі, що зменшує вірогідність виникнення аварійних ситуацій та наслідків, до яких вони призводять (втрата води, псування майна, припинення водопостачання споживачам тощо).

Практичне значення полягає в отриманій можливості кількісного обґрунтування рекомендацій з економії водних ресурсів та електроенергії за умови впровадження систем паралельного зонного водопостачання.

**Ключові слова:** електромеханічні системи, енергоефективність, системи водопостачання, зонне водопостачання, асинхронний двигун, паралельне зонування, ефективність споживання енергії і води.



## **ABSTRACT**

Yashyn R.V. Branched electromechanical water supply system of pressure movement of fluid with integrated pumping units. - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 141 'Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics' (14 - Electrical engineering) - National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Kyiv, 2025.

The global trend of growing demand for electricity and water requires the development and implementation of energy and resource efficient technologies, including in the construction of multi-storey buildings for various purposes (residential, commercial, industrial, etc.). Since it is predicted that the number of residential multi-storey buildings and their height will increase over the next two decades, the study selected water supply systems for multi-storey residential buildings with increased energy efficiency, namely, electromechanical parallel zone water supply systems.

The first section discusses global trends in water and electricity demand over the next 25 years. In the field of multi-storey construction, development trends are associated with an increase in water and energy demand due to the growth of the world's population and the growing share of urban population. According to forecasts, the population is expected to grow by 20% by 2050, with the share of urban population increasing from 56% (as of 2023) to 70% in 2050. The growth of humanity's water needs over the next 25 years is estimated at 1% per year. The increase in demand for electricity will affect many areas: industry, data centres, transport, etc. In addition, household electricity demand is expected to increase by 75% by 2050. As urban populations continue to grow, the height of buildings is expected to increase. This will increase the need for water, and as water systems are large consumers of electricity, the need for electricity will also increase.

Different water supply systems for multi-storey buildings and approaches to reducing energy consumption are considered. The most widespread water supply system in Ukraine is the system where water is supplied to consumers via a single riser. The

advantage of this system is its simplicity. However, in cases where the number of floors in buildings is in the tens, single riser systems face the following difficulties: they require expensive powerful high-pressure pumping units; they require equipment that must withstand and operate under high system pressures; high pressures lead to increased leakage; and the likelihood of emergencies increases. Other types of water supply systems for multi-storey buildings are: systems with intermediate tanks on the floors (cascade water supply systems); water supply systems with a tank on the roof of the building; parallel zone water supply systems.

The key element of the above electromechanical water supply systems is pumping units (PU). It has been established that for water supply systems of multi-storey buildings, in the vast majority of cases, pumping units consisting of centrifugal pumps and asynchronous motors are used. The widespread use of centrifugal pumps is due to their high efficiency, ease of connection to an electric motor, smooth water supply, and relative simplicity of design. In turn, asynchronous motors (with a squirrel-cage rotor) also have certain advantages: high efficiency, relative simplicity of design, high reliability, and relatively low cost.

The second section presents the developed mathematical models. A mathematical model has been built to perform calculations of electromechanical systems of parallel zone water supply of multi-storey buildings. The developed models also make it possible to carry out comparative studies of the parallel zone water supply system with water supply systems with a single riser. The energy efficiency coefficient was used to compare both systems.

Since it was found that overpressure in the water supply system affects flow rates, the mathematical model was refined: equations were obtained to take into account the impact of overpressure.

Based on the assumption that due to the reduction of excessive pressures in the water supply system when using a parallel zone water supply system instead of an EMS with a single riser, the consumption in such a system will also decrease, the equation of the efficiency coefficient was obtained: the proposed efficiency coefficient allows assessing both the energy efficiency of the water supply system and the resource

efficiency (in other words, electricity and water savings). When comparing two water supply systems, the proposed efficiency coefficient allows to assess the efficiency both in relative units and in hryvnia equivalent (calculation based on the cost of water and electricity).

Based on the refinement of the influence of overpressure on flow rates, the mathematical model developed for calculating electromechanical systems of parallel zone water supply of multi-storey buildings was improved. This approach made it possible to more accurately calculate the EMC parameters of the parallel zone water supply of multi-storey buildings consisting of two and three parallel risers.

In the third section, a study based on the developed mathematical models is carried out. The energy efficiency of a single-riser EMS with a parallel zone water supply system was compared: it was found that the electromechanical water supply system of a multi-storey building with two parallel risers consumes 30 % less energy than a system with a single riser, which is a consequence of reducing the excessive pressure and losses in the motor.

A study of the effect of excessive pressure in the water supply system on the flow rate was carried out. The study was carried out for a seven-storey building. The calculations showed that excessive pressures are the reason why, with the same water demand, the difference in consumption between the first and seventh floors can be 9%. The results of the study led to a revision of the approach to water supply EMC calculations based on the assumption of equal consumption by floor; in addition, this study prompted a revision of the calculation of the efficiency factor. As a result, a new approach to assessing the EMC efficiency of water supply was developed. The efficiency of a single riser EMS was compared with parallel zone water supply systems consisting of two and three risers. It was found that, compared to the single-standpipe EMS, the two-standpipe parallel zone water supply system saves 4% of water and 25% of electricity with a ratio of 6:1 in monetary terms; and the three-standpipe parallel zone water supply system saves 32.97% of electricity and 5.11% of water, and the ratio of water and electricity savings in monetary terms is 6.4/1 (according to the cost of water and electricity as of the first quarter of 2024 for Kyiv consumers).

In terms of initial capital costs, parallel zone water supply systems are more expensive than a single riser system (due to additional pumping units, pipes, associated equipment, etc.), and in order to recommend them for implementation instead of single riser water supply systems, the payback period of parallel zone water supply systems was calculated in Chapter 4.

The analysis of the tariff policy, taking into account the increase in capital expenditures due to the use of additional equipment and the calculated economic efficiency of the introduction of parallel zone water supply systems showed that, if a parallel zone water supply system is introduced instead of a single riser system, the payback period for the funds spent on additional equipment is 14 months for a parallel zone water supply system consisting of two risers; 15 months for a parallel zone water supply system consisting of three risers. The projected estimated efficiency from the implementation of a system with two parallel risers compared to a system with one riser for ten years of operation is UAH 5.06 million, while the estimated cost of a system with two parallel risers is UAH 1.05 million; the estimated efficiency from the implementation of a system with three parallel risers compared to a system with one riser for ten years of operation is UAH 7.3 million, while the estimated cost of a system with three parallel risers is UAH 1.25 million. The calculations are based on the conditions of a twelve-storey building, which was used for the study in Chapter 3.

The results of the study indicate that the use of parallel zone water supply systems in multi-storey buildings is an effective and relevant solution in the context of growing demand for electricity and the growing need for water.

In the fifth section, a number of studies were conducted aimed at: developing a pumping unit of a specialised design in order to increase the efficiency of parallel zone water supply systems for multi-storey buildings.

Various designs of centrifugal pumps are analysed. The design of a two-way inlet pump unit with an integrated toroidal stator motor is proposed. The main advantages of the proposed pumping unit are: reliability of construction and ease of assembly; reduced noise level; tightness of construction; efficient cooling (which increases the durability of the device); and high efficiency due to reduced volumetric

losses (by reducing flows and minimising the possibility of leakage due to the tightness of the construction) and reduced electrical energy losses.

**The scientific novelty of the study is as follows:**

1. A mathematical model has been developed for a comprehensive study of electricity and water savings in electromechanical water supply systems of multi-storey buildings due to the reduction of excess pressures using parallel zone water supply, which takes into account changes in water consumption of floors depending on the magnitude of excess pressures and includes the equation of pressure losses in the branched hydraulic system of the water supply pipeline of a multi-storey building.

2. The concept of calculating the parameters of the operating modes of electromechanical water supply systems of multi-storey buildings based on determining the "water demand" of individual users (groups of users) and taking it into account when changing the structure of the system has been proposed, substantiated and applied, which makes it possible to more accurately perform a comparative assessment of the energy and resource efficiency of water supply system options.

3. It is proposed to use the coefficient of complex efficiency of the system, which, unlike the known ones, allows taking into account energy and resource efficiency by price equivalent, which made it possible to determine the patterns of changes in the efficiency of electromechanical water supply systems of multi-storey buildings when using parallel zoning: reducing electricity consumption by up to 33%, and water consumption by up to 5%, with the economic effect of reducing water consumption exceeding electricity savings by up to 6 times.

4. The use of a specialized pumping unit of a parallel water supply system is justified, which, unlike the known ones, simultaneously provides all parallel risers, which increases the efficiency of the asynchronous motor due to an increase in its overall power, provides a reduction in losses in the motor windings due to intensification of cooling, compensation of axial forces of the pump impellers with a reduction in losses in bearings and due to fluid overflows.

**The practical significance is as follows.** The developed mathematical model makes it possible to: compare the efficiency of different water supply systems for multi-

storey buildings in terms of energy and resource efficiency; estimate the amount of savings expressed in UAH in accordance with the current cost of water and electricity; calculate the payback period of both the additional equipment used to build parallel zone water supply systems and the water supply system as a whole.

The results obtained indicate that the introduction of a parallel zone water supply system instead of a single riser water supply system allows saving both electricity and water; the savings will also compensate for the additional costs associated with the increase in the cost of a system with parallel risers compared to a single riser system (pipes, insulation, pumping unit, etc.) and fully recover the funds spent on the creation of the water supply system.

A specially designed pumping unit is proposed, the use of which will increase the efficiency of parallel zone water supply systems. The main advantages of the developed pumping unit are: reliability of construction and ease of assembly; reduced noise level; tightness of construction; efficient cooling (which increases the durability of the device); high efficiency due to both reduction of electrical energy losses and reduction of volumetric losses. Due to its characteristics, this pumping unit can be used in other areas of everyday life, industry, and the agricultural sector.

The use of parallel zone water supply reduces excessive pressures in the system, which reduces the likelihood of emergencies and the consequences they lead to (loss of water, damage to property, interruption of water supply to consumers, etc.)

The practical significance lies in the possibility of quantitative substantiation of recommendations for saving water resources and electricity in the case of implementation of parallel zone water supply systems.

**Keywords:** water supply systems, energy efficiency, zone water supply, electromechanical systems, efficiency of energy and water consumption, asynchronous motor, parallel zoning

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Список публікацій в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Попович О.М., Яшин Р. В. Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку із дворівневими стояками, Технічна електродинаміка, 2023 №1. – С. 42 – 50, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.042>

2. Попович О.М., Головань І.В., Сліденко В.М., Листовщик Л.К., Поліщук В.О., Яшин Р.В. Математична модель електромеханічної системи нафтовидобування для комплексного проектування, Енергетика: економіка, технології, екологія, 2021. - № 3. – С. 78 – 87, DOI 10.20535/1813-5420.3.2021.251209

3. Яшин Р. В. Визначення параметрів математичної моделі системи водопостачання багатоповерхового будинку за зміни вхідного тиску, Енергетика: економіка, технології, екологія, 2024. - № 3 . – С. 40 – 46, DOI 10.20535/1813-5420.3.2024.314532

4. Попович О.М., Яшин Р. В. Дослідження економії енергетичних і водних ресурсів в системі водопостачання багатоповерхового будинку за дворівневих стояків, Технічна електродинаміка, 2025. - №1. – С.57 – 64, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.057>

### **Список публікацій які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

1. Попович О.М., Яшин Р.В., Комплексний підхід до ощадного використання електричної енергії та води у системах водопостачання Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-технічної конференції у місті Києві 22-24 листопада 2023 р. – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С.97.

2. Попович О.М., Яшин Р. В, Підвищення енергетичної ефективності систем водопостачання за паралельного зонування, Проблеми сучасної

енергетики і автоматики в системі природокористування, Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції м. Київ, 19 жовтня 2023 р. с.110-111.

3. Яшин Р. В. Зоноване водопостачання як реалізація заходів для енергозбереження та енергоефективності в системах водопостачання багатоповерхових будинків. Збірник наукових праць XXIV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 18–19 травня 2023 року – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С.149-150.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ ТА ВОДА: ЗРОСТАННЯ ПОТРЕБ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ. СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДИНКІВ: ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ .....	29
1.1 Аналіз ситуації із потребами у воді та електроенергії.....	29
1.2 Системи водопостачання багатоповерхових будинків. Способи підвищення ефективності систем водопостачання.....	33
1.2.1 Робота насосних агрегатів відповідно до графіку сталого споживання..	34
1.2.2 Каскадне водопостачання.....	35
1.2.3 Паралельне зонне водопостачання.....	37
1.2.4 Використання регульованого приводу насосних агрегатів .....	39
1.3 Дослідження впливу тиску на споживання води та електроенергії в системах водопостачання .....	40
1.4 Складові систем водопостачання багатоповерхових будинків .....	42
1.4.1 Труби.....	43
1.4.2 Насосні агрегати .....	44
1.5 Гідравлічний розрахунок систем водопостачання багатоповерхових будинків (за ДБН) .....	47
1.6 Математичні моделі електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків .....	48
Висновки до Розділу 1 .....	54
Формулювання мети і наукових задач дослідження.....	56
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ .....	58
2.1 Вихідні положення, система припущень .....	58
2.2 Математичні моделі складових системи .....	62

2.2.1 Визначення рівняння руху рідини і витратної характеристики гідравлічної мережі .....	62
2.2.2 Визначення напірної характеристики насосу.....	65
2.2.3 Асинхронний двигуни в математичній моделі. Визначення характеристик асинхронного двигуна.....	66
2.2.4 Визначення комплексного критерію ефективності .....	67
2.3 Визначення параметрів математичної моделі систем водопостачання багатоповерхових будинків за умов впливу надлишкових тисків на витрати....	67
2.4 Врахування зміни тиску зовнішньої мережі для оцінки ефективності ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку .....	71
2.5 Корекція характеристик насосного агрегату: трансформація відповідно до зміни кількості поверхів та зміни типу системи водопостачання .....	74
2.6 Розробка комплексного критерію для оцінки енергоефективності та ресурсоефективності та програмна реалізація математичної моделі.....	75
2.7 Засоби дослідження ефективності системи паралельного зонного водопостачання з трьома різнорівневими стояками .....	80
Висновки до Розділу 2.....	83
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ, РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА РЕСУРСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ .....</b>	<b>84</b>
3.1 Порівняння ЕМС паралельного зонного водопостачання із системою з одним стояком за критерієм енергетичної ефективності .....	84
3.2 Оцінка величини впливу надлишкових тисків на витрати у багатоповерховому будинку .....	88
3.3 Порівняльний аналіз ЕМС паралельного зонного водопостачання із системою з одним стояком за критерієм енергетичної та ресурсної ефективності (з урахуванням впливу надлишкового тиску на витрати) .....	92
3.4 Дослідження впливу зміни величини коефіцієнту F на витрати в системі водопостачання .....	95

3.5 Дослідження впливу розподілу споживачів (поверхів) по стоякам на ефективність системи паралельного зонного водопостачання з двох стояків ....	98
Висновки до Розділу 3 .....	101
<b>РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНЕ ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ З ВДОСКОНАЛЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ ПАРЕЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ .....</b>	
4.1 Економічний ефект від впровадження системи водопостачання з двома паралельними стояками замість системи водопостачання з одним стояком ....	104
4.1.1 Вибір обладнання та оцінка його вартості .....	105
4.1.2 Аналіз та прогнозування тарифів .....	108
4.1.3 Порівняльний аналіз витрат на систему паралельного зонного водопостачання, терміну її окупності та економії від впровадження даної системи .....	111
4.2 Економічний ефект від впровадження системи водопостачання з трьома паралельними стояками замість системи водопостачання з одним стояком ....	113
Висновок до розділу 4 .....	115
<b>РОЗДІЛ 5. СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ НАСОСНИЙ АГРЕГАТ ДЛЯ СИСТЕМИ ПАРЕЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ. КОНСТРУКЦІЯ, ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	
5.1 Спеціалізований насосний агрегат з інтегрованим електродвигуном. Опис конструкції.....	116
5.2 Принцип роботи насосного агрегату двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором.....	120
5.3 Умови ефективного використання спеціалізованого насосного агрегату у системах паралельного зонного водопостачання.....	123
5.4 Дослідження кореляції між потужністю насосного агрегату та його ККД.	125
Висновки до Розділу 5 .....	127
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	133

Додаток 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації .....	141
Додаток 2. Модуль паралельно підключених насосних агрегатів на базі ветрикальних відцентрових насосів.....	143
Додаток 3. Вертикальні багатоступінчасті насосні агрегати .....	144
Додаток 4. Аналіз конструкції відомих технічних рішень (НА та АД) .....	146
Додаток 5. Дослідження взаємозв'язку потужності НА з їх ККД.....	149

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ**

АД	Асинхронний двигун (з короткозамкненим ротором)
ВН	Відцентровий насос
ДБН	Державні будівельні норми
ЕМС	Електромеханічна система
ККД	Коефіцієнт корисної дії
НА	Насосний агрегат
СНА	Спеціалізований насосний агрегат

## ВСТУП

Тематика дослідження «Розгалужена електромеханічна система напірного переміщення рідини з інтегрованими насосними агрегатами» є актуальною для України і відповідає загальносвітовим трендам на створення енерго- та ресурсоефективних систем водопостачання багатоповерхових будинків. Дане дисертаційне дослідження відповідає постанові Кабінету міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні», зокрема у розділах «Енергетика та енергоефективність» та «Рациональне природокористування». Актуальність питань економії електроенергії та води для України особливо зросла в останні роки в результаті бойових дій на території країни через знищення об'єктів енергетичної галузі, інших об'єктів критичної інфраструктури, знищення частини водних запасів прісної води тощо.

Проблеми зростання дефіциту води та електроенергії є зараз актуальними і у світі – проблеми мають глобальний характер. Відповідно до оцінок фахівців ООН, «Світового банку», ЮНЕСКО ці проблеми будуть викликами для світу наступні кілька десятиліть. Річна потреба в електроенергії буде збільшуватись у промисловості, у сфері транспорту, забезпеченні дата-центрів, у побуті тощо. Зокрема, прогнозується що до 2050 року тільки потреби домогосподарств у в електроенергії зростуть на 75%. Прогнозоване зростання потреби у воді буде збільшуватись на 1% кожного року.

Через те що системи водопостачання багатоповерхових будинків є споживачами електричної енергії, дослідження по підвищенню енергоефективності систем ведеться з моменту їх впровадження. В результаті досліджень запропоновано ряд рішень що допомагають підвищити ефективність систем водопостачання: різні підходи до регулювання подачі (регулювання відповідно до певних графіків чи регулювання відповідно до поточних потреб споживачів); застосування сучасних насосних агрегатів з високими значеннями ККД; застосування різних схем подачі води до споживачів (системи з

накопичувальними ємностями, використання бустерних насосних агрегатів на проміжних поверхах, застосування зонного водопостачання тощо).

Застосування систем паралельного зонного водопостачання для забезпечення водою споживачів багатоповерхових будинків – одне з можливих вирішень проблеми енерго- та ресурсозбереження у сфері багатоповерхового будівництва.

Дослідження спрямоване на підвищення ефективності систем водопостачання багатоповерхових будинків, що виражається у зменшенні споживання електроенергії та зменшенні витрат води.

Спираючись на зазначене вище, тему розгалужених електромеханічних систем водопостачання з інтегрованими насосними агрегатами, зокрема представлену системами паралельного зонного водопостачання, можна вважати актуальною та затребуваною на сьогодні і такою, що збереже актуальність наступні десятиліття.

**Метою** дисертаційного дослідження є розробка та обґрунтування засобів підвищення рівня ефективності системи водопостачання багатоповерхового будинку шляхом визначення закономірностей співвідношення конструктивних і режимних параметрів ефективних електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків із паралельним зонуванням, розробка засобів комплексного математичного моделювання, отримання практичних рекомендацій з підвищення ефективності даних систем.

Досягнення поставленої мети потребує розв'язання наступних задач:

1. Визначити та дослідити існуючі тенденції щодо області застосування, складу та структур розгалужених електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків.

2. Розробити математичні моделі і їх програмну реалізацію для комплексного дослідження розгалужених електромеханічних систем водопостачання, які б, враховували вплив зміни надлишкових тисків у мережі водопостачання на витрати; розробити рівняння втрат напору у розгалуженій

гідравлічній системі водопостачання багатоповерхового будинку яке враховувало б вплив надлишкових тисків на витрати.

3. Розробити комплексний критерій ефективності розгалужених електромеханічних систем водопостачання, який би врахував їх енергетичну та ресурсну ефективність; дав би змогу оцінити економічну ефективність від впровадження системи водопостачання.

4. Визначити співвідношення конструктивних і режимних параметрів розгалужених електромеханічних систем водопостачання, яке забезпечує підвищення їх ефективності, а саме:

- дослідити співвідношення розподілу споживачів за стояками з метою знаходження найкращого співвідношення з погляду на енергетичну та ресурсну ефективність;

- дослідити вплив зміни коефіцієнту впливу надлишкового тиску на збільшення водоспоживання на ефективність роботи системи водопостачання.

5. Надати економічне обґрунтування доцільності впровадження систем паралельного зонного водопостачання замість систем водопостачання з одним стояком.

6. Розробити практичні рекомендації з підвищення рівня ефективності розгалужених систем водопостачання.

**Об'єкт дослідження:** процеси перетворення енергії у електромеханічних системах водопостачання багатоповерхових будинків із паралельним зонуванням.

**Предмет дослідження:** закономірності зміни енергетичної і ресурсної ефективності, від величини конструктивних параметрів за комплексним критерієм ефективності.

### **Наукова новизна дослідження полягає у наступному:**

1. Розроблено математичну модель комплексного дослідження економії електроенергії та води в електромеханічних системах водопостачання багатоповерхових будинків завдяки зниженню надлишкових напорів за застосування паралельного зонного водопостачання, яка враховує зміни



водоспоживання поверхів в залежності від величини надлишкових тисків і включає рівняння втрат напору у розгалуженій гідравлічній системі трубопроводу водопостачання багатоповерхового будинку.

2. Запропоновано, обґрунтовано і застосовано концепцію розрахунку параметрів робочих режимів електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків на основі визначення «потреби у воді» окремих користувачів (груп користувачів) і її врахування за зміни структури системи, що дає можливість більш точно виконати порівняльну оцінку енергетичної і ресурсної ефективності варіантів систем водопостачання.

3. Запропоновано використання коефіцієнту комплексної ефективності системи, який на відміну від відомих, дозволяє врахувати енергетичну і ресурсну ефективності за ціновим еквівалентом, що дало можливість визначити закономірності зміни ефективності електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків за застосування паралельного зонування: зменшення споживання електроенергії до 33 %, а споживання води до 5 % за перевищення економічного ефекту від зменшення споживання води над економією електроенергії до 6 разів.

4. Обґрунтовано застосування спеціалізованого насосного агрегату системи паралельного водопостачання, який на відміну від відомих, одночасно забезпечує всі паралельні стоякі, що збільшує ККД асинхронного двигуна внаслідок збільшення його габаритної потужності, забезпечує зниження втрат в обмотках двигуна за інтенсифікації охолодження, компенсацію осьових зусиль робочих коліс насосу із зниженням втрат у підшипниках і внаслідок перетоків рідини.

**Особистий внесок здобувача.** У наукових роботах, що були опубліковані у співавторстві, здобувачем виконано: [56] – врахування в математичній моделі динамічних властивостей рідини; [54] – дослідження різних структур електромеханічних систем водопостачання, розробка математичної моделі системи паралельного зонного водопостачання; [55] – пошук та аналіз досліджень

у сфері залежності витрат від надлишкових тисків, розробка математичної моделі врахування впливу надлишкового тиску на витрати; коефіцієнта ресурсної та енергетичної ефективності.

**Апробація.** Тема застосування систем паралельного зонного водопостачання пройшла апробацію на наукових конференціях:

1. Проблеми сучасної електротехніки – 2022, XVII Міжнародна науково-технічна конференція, 27 – 28 вересня, 2022, Київ, Україна (Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку із дворівневими стояками).

2. Міжнародна науково-технічна конференція ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: стан та перспективи розвитку – REMS'2023, Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 22-24 листопада, 2023 (Комплексний підхід до ощадного використання електричної енергії та води у системах водопостачання).

3. X Міжнародна науково-технічної конференції Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта), м. Київ, Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження, 19 жовтня 2023 р. (Підвищення енергетичної ефективності систем водопостачання за паралельного зонування).

4. XXIV Міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 18–19 травня 2023 року (Зоноване водопостачання як реалізація заходів для енергозбереження та енергоефективності в системах водопостачання багатоповерхових будинків).

5. XVIII Міжнародна науково-технічна конференція ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ – 2024, м. Київ, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, 25 – 27 червня 2024 р. (Дослідження економії енергетичних і водних ресурсів в системі водопостачання багатоповерхового будинку за дворівневих стояків).

6. 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National

University, September 18-21, 2024 (Study of the efficiency of water supply systems in multi-storey buildings with parallel zoning with three risers).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (83 найменування) та 5 додатків. Основну частину роботи викладено на 140 сторінках друкованого тексту. Робота містить 20 рисунків та 18 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 150 сторінок.

**Практичне значення полягає у наступному.**

Розроблена математична модель дає змогу:

- порівняти ефективність різних систем водопостачання багатоповерхових будинків за показниками енерго- та ресурсоефективності;
- оцінити величину економії, виражену в гривнях відповідно до діючої вартості води та електроенергії;
- розрахувати терміни окупності як застосованого додаткового обладнання, необхідного для побудови систем паралельного зонного водопостачання, так і системи водопостачання в цілому.

Отримані результати вказують на те, що впровадження системи паралельного зонного водопостачання замість системи водопостачання з одним стояком дозволяє зекономити як електроенергію так і воду; також отримана економія дозволить компенсувати додаткові витрати, пов'язані із збільшенням вартості системи з паралельними стояками по відношенню до системи з одним стояком (труби, насосний агрегат (НА) тощо) і повністю повернути кошти, витрачені на створення системи водопостачання.

Запропоновано конструкцію насосного агрегату спеціальної конструкції, застосування якого підвищить ефективність систем паралельного зонного водопостачання. Основними перевагами розробленого насосного агрегату є: надійність конструкції та простота зборки; понижений рівень шуму; герметичність конструкції; ефективне охолодження (що збільшує довговічність роботи пристрою); високий ККД обумовлений як зменшенням втрат електричної енергії так і зменшення об'ємних втрат. Завдяки своїм характеристикам даний

насосний агрегат може бути задіяних і в інших сферах побуту, промисловості, агросекторі.

За застосування паралельного зонного водопостачання зменшуються надлишкові тиски у системі, що зменшує вірогідність виникнення аварійних ситуацій та наслідків, до яких вони призводять (втрата води, псування майна, припинення водопостачання споживачам тощо).

Практичне значення полягає в отриманій можливості кількісного обґрунтування рекомендацій з економії водних ресурсів та електроенергії за умови впровадження систем паралельного зонного водопостачання.

# **РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ ТА ВОДА: ЗРОСТАННЯ ПОТРЕБ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ. СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДИНКІВ: ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ**

## **1.1 Аналіз ситуації із потребами у воді та електроенергії**

У 2022 році кількість населення планети перетнуло межу у 8 млрд, і тренд на зростання продовжиться наступні десятиліття: за даними ООН до 2050 року населення планети збільшиться більше ніж на 20% [1]. При цьому буде збільшуватись і частка населення, що проживає у містах: за даними «Світового банку» до 2050 року частка міського населення буде складати 70% при тому що на 2023 рік у містах проживало близько 56% населення планети [2]. Однією з характерних ознак сучасних міст є багатоповерхові будинки. Обов'язковим атрибутом сучасних багатоповерхових будинків є електро- та водопостачання. За даними [3] щорічно будинки споживають 40% загального світового об'єму споживання електроенергії (освітлення, опалення, охолодження, водопостачання тощо); а також близько 8% від загального споживання води людством припадає на житлові будинки. При цьому прогнозується, що і на електричну енергію, і на воду буде зростати попит наступні десятиліття.

За прогнозами «Міжнародної енергетичної агенції» на 2026 рік [4], найближчі роки, у світі, попит на електричну енергію буде зростати щонайменше на 3% кожного року. Зростання попиту на електричну енергію буде пов'язано як із розвитком технологій: дата центри, електромобілі тощо, так і з розвитком різних галузей промисловості. Також на зростання потреб у електроенергії буде впливати і розвиток технологій, пов'язаних із побутом: прогнозується, що до 2050 року, в середньому, потреба домогосподарств в електроенергії зросте на 75% [5]. З огляду на зазначені дані щодо зростання попиту на електроенергію, потрібно зауважити, що системи водопостачання багатоповерхових будинків є потужними споживачами води: насосні агрегати споживають до 15% всієї електричної енергії, що споживається будинком [6]. Певно що із збільшенням висоти будівлі ця частка

збільшується через застосування більш потужних насосних агрегатів. При цьому керування насосним обладнанням не завжди є ефективним: за даними дослідження [7] втрати електроенергії в системах водопостачання будинків можуть сягати більше за 50%. На енергоефективність систем водопостачання також впливає і вік обладнання: при заміні старого насосного обладнання на більш сучасне можна підвищити енергоефективність системи водопостачання на 8% [8]. При цьому при заміні обладнання на більш сучасне можна додатково підвищити енергоефективність від 3 до 12% за рахунок класу електродвигуна в насосному агрегаті, обравши НА з двигунами найвищого класу [9]. Зменшення енергоефективності систем водопостачання також відбувається і за рахунок того, що в їх основу закладається обладнання більшої потужності (через вимоги певних норм та стандартів) ніж в дійсності потрібно для забезпечення споживачів необхідною кількістю води [10].

Що стосується води, то попит на неї теж буде збільшуватись. У звіті ЮНЕСКО від 2024 року зазначається, що потреби у прісній воді будуть зростати кожен рік на 1% [11]. Найближчі роки все більше країн стикнуться із проблемами доступу до питної води. Україна теж може стикнутися з проблемою дефіциту прісної води: за оцінками «Світового банку» у 2021 році Україна займала 125 місце із 180 країн за кількістю води на душу населення. У такій ситуації важливо звернути увагу на ефективність систем водопостачання через те що серед усіх споживачів у країні доля комунальних господарств складає 16% [12]. При цьому Державна служба статистики у статистичному збірнику України приводить інформацію про кількість прісної води на питні та санітарно-гігієнічні потреби, яка у 2020 році склала 1169 млн.м<sup>3</sup> (що відповідає 17% загального споживання прісної води в країні) [13]. І очевидно, що із зростанням міського населення кількість спожитої води буде тільки збільшуватись. Системи водопостачання та водовідведення – є важливим елементом функціонування сучасних міст і запорукою комфортного проживання людей у містах. В Україні системи водопостачання відносяться до об'єктів критичної інфраструктури.

Річки – основне джерело прісної води в Україні. На даний час додатковою загрозою щодо якості та кількості питної води в Україні є транзитність річкових вод. В Україні формується тільки четверта частина річкових вод, а три четвертих – води, що формуються на території Росії, Білорусі та Румунії [14]. Транзитність – це зовнішній фактор, що впливає на кількість придатної до використання води. До внутрішніх факторів можна віднести якість систем транспортування води, насосні станції та розподільчі мережи. За даними [15] втрати води від її забору з джерела до отримання води кінцевим користувачем можуть перевищувати 40%. Також зауважено про критичність і низьку ефективність обладнання та систем розподілу води: надлишкові потужності насосного обладнання можуть перевищувати у 1,2 – 5,5 реальну потребу; вік розподільчих мереж може перевищувати 40 років – зношеність мереж, що впливає на збільшення систематичних витоків та аварійність; завищене енергоспоживання насосного обладнання через його низький ККД, пов'язаний як з якістю так і з зношуваністю (моральне та фізичне старіння); широко застосовується регулювання роботи насосних агрегатів за допомогою засувки тощо [15].

В Україні поки що широко не відчувається дефіцит прісної води. Але в деяких частинах світу це питання вже стоїть гостро. Критичність проблеми і нагальність її вирішення підкреслює різноплановість підходів у вирішенні питання прісної води: це і різні заходи, направлені на безпосередню економію води, або її часткову заміну, але це і виникнення комплексних підходів, наприклад, - концепція віртуальної води [16]. В основі концепції віртуальної води закладена ідея постачання, до регіонів з дефіцитом води, продукції, що потребує значних об'ємів води для її отримання. Віртуальну воду поділяють на «зелену» та «голубу»: «зелена» – отримана від опадів та добута з-під землі, «голуба» – що міститься в річках та озерах [17]. Поняття віртуальної води в більшості стосується сільськогосподарської продукції та продукції тваринного походження. Наприклад, через експорт рису відбувається експорт мільярдів тон води щорічно [18]. Для країн, що відчувають певний дефіцит водних ресурсів, покупка

віртуальної води може виступати вагомим чинником у політиці керування водними ресурсами країни та забезпеченні продовольчої безпеки [17].

При тому, що у людей ніби однакова потреба у воді, але як показують дані [19] добове споживання на людину в різних країнах може значно відрізнятись: Іспанія 270 л/д, Франція 151 л/д, Німеччина – 129 л/д, а в Дубай споживання може сягати 500 л/д. Частково через дефіцит води, частково через високі тарифи існують різні підходи для зниження витрат води у побуті. Через дефіцит прісної води у Гонконзі вже більше ніж 50 років для організації змиву (у туалетах) використовують морську воду [20], [21]. Застосовуються і менш радикальні методи: коли повторно, після певного рівня очищення, використовуються побутові води для пральних машин, зливу в туалеті тощо. Такий підхід крім економії води більше ніж на 20% [22] дозволяє зменшити навантаження на системи водовідведення, а отже на їх транспортування, очищення тощо. Крім цього є дослідження і про застосування дощових вод у системах водопостачання житлових будинків і які доводять ефективність і обґрунтовують використання дощових вод для побутових потреб мешканців житлових будинків [23]. Зокрема цим займаються бразильські вчені, країна яких вже стикається із питанням дефіциту питної води. Дощова вода чи повторне використання у побуті води як технічної замість звичайної питної – поки що не є розповсюдженою практикою. При цьому за даними дослідження [24] використання дощової води та «сірої» води можуть зменшити споживання питної води більше ніж на 30% та 25% відповідно. За даними [25] використання сірої води для змиву у туалетах дає змогу зменшити споживання питної води на 35%. За оцінками [26] використання дощової та сірої води разом із заходами направленними на економію питної води, в залежності від поточного рівня споживання, можна зменшити витрати питної води на рівні 30-50%.

На сьогодні, більш широко для підвищення ефективності систем водопостачання багатоповерхових будинків (зменшення споживання електроенергії та води) використовуються такі підходи як: регулювання роботи насосних агрегатів відповідно до поточних потреб чи графіків споживання, зонне



водопостачання (до якого можна віднести як послідовне (каскадне) так і паралельне різнорівневе зонне постачання) тощо.

## **1.2 Системи водопостачання багатоповерхових будинків. Способи підвищення ефективності систем водопостачання**

Через те що питання водопостачання багатоповерхових будинків існує більше ніж століття, існує багато різних підходів до вирішення цього питання. Зупинимось тільки на деяких: на тих, що отримали розповсюдження, та тих, що мають перспективу як енерго- та ресурсозберігаючі.

Україна. Більша половина житлового фонду – будинки, збудовані більше ніж 30 років тому. Переважна більшість систем водопостачання таких будинків влаштована за одним принципом. Для постачання води до будинків використовуються насосні станції чи котельні, що зазвичай є джерелом води для десятків будинків. Перевагою такого підходу було те, що системи водопостачання будинків не потребували власного насосного обладнання – тиск і подача забезпечувалися магістральним трубопроводом. З часом, при розбудові до розподільчих мереж додавалися нові споживачі. Це вплинуло на водопостачання – потужності насосних станцій перестало вистачати. Мешканці багатоповерхових будинків відчули це у вигляді зниження об'ємів води, що перешкоджає нормальній роботі побутових приладів і комфортному користуванню водою. В більшості з такою особливістю роботи систем водопостачання стикаються мешканці, що проживають на верхніх поверхах будинків (переважно у пікові години).

Такий обмежений режим водопостачання є не тільки не комфортним для мешканців будинків, але і порушує Державні будівельні норми (ДБН) [27], за якими мінімальний тиск на ввіді до споживача (тобто у квартиру) має бути не меншим за 0,2 МПа.

Під час вирішення проблеми низьких тисків тільки заміною насосного обладнання станцій на більш потужне – без відповідної заміни застарілих

зношених розподільчих мереж – підвищується аварійність таких мереж та підвищуються витрати [28].

Проектувальники більш сучасних багатоповерхових будинків вирішують проблему низьких тисків розподільчих мереж підпірними насосами. Але такий підхід – використання високонапірних насосів, що створюють високі тиски у системі водопостачання будинку – має свій недолік: нижні поверхи будинку стикаються із досить високими тисками. За нормами [27] ці тиски можуть бути до 0,6 МПа, але не перевищувати це значення. У випадках, коли тиски перевищують норму, необхідно встановлювати редуктори тиску (але до місця вводу до споживача). Великі тиски, до них можна віднести і 0,6 МПа, створюють загрозу для побутового обладнання мешканців (наприклад, бойлерів) і в такому випадку мешканці повинні самотужки вирішувати проблему великих тисків на вводі в квартиру. Крім того, надлишкові тиски є причиною великих витрат електричної енергії та води в мережах водопостачання.

### **1.2.1 Робота насосних агрегатів відповідно до графіку сталого споживання**

Одним із підходів, що дозволяє уникнути великих надлишкових тисків у випадку застосування підпірних насосів, – є підключення кількох насосних агрегатів, змонтованих паралельно (див. додаток 2), але які включаються в роботу за необхідності: чи то відповідно до «команди від електроніки», чи то у відповідності до діаграми споживання. Ефективність роботи насосних агрегатів відповідно до діаграми споживання розкрито у [29].

У [29] досліджується ефективність роботи паралельно під'єднаних насосних агрегатів із включенням їх в роботу відповідно до реальних потреб споживачів. Проаналізувавши роботу насосних агрегатів, дослідники виявили, що робочий режим насосів не є оптимальним. Для проведення дослідження відповідно до графіка навантаження було зменшено час їх роботи, зменшено кількість одночасно працюючих насосних агрегатів та зменшено швидкість

обертання. В результаті проведення дослідження було отримали економію електроенергії у 33% [29].

Застосування підходу з підключенням паралельних насосів має кілька обтяжуючих факторів. Крім додаткового насосу (чи насосів) необхідна ще вимірювальна апаратура та апаратура для комутації (та/чи регулювання режиму роботи). У випадку включення насосів відповідно до циклограми, необхідно якомога точніше знати необхідний графік включення насосів, інакше вони будуть працювати не ефективно (чи не зможуть задовільнити вимоги державних будівельних норм (ДБН) [27]). Для певних категорій будівель (як наприклад офісні будівлі, навчальні заклади тощо) можна передбачити оптимальний графік роботи, але для житлових будинків такий графік передбачити вкрай важко (зміна кількості мешканців будинку, культурні особливості мешканців, рівень достатку, сезонність та інші фактори можуть впливати на потребу людей у воді).

### **1.2.2 Каскадне водопостачання**

Одним з підходів до вирішення питання водопостачання багатоповерхового будинку – є каскадне водопостачання. У [21] розглядається один з видів каскадного водопостачання: з використанням баків, що з одного боку використовуються для забезпечення водою певних поверхи будівлі (окремих зон), а з іншого боку, проміжні баки використовують для підйому води на вищі поверхі і до самого даху. Підйом води – за допомогою насосних агрегатів.

До переваг такої системи водопостачання можна віднести:

- не потребують дорогих високонапірних насосних агрегатів (установок);
- зручні для використання у місцях з тимчасовим але короткочасним передбачуваним чи регулярним відключенням електроенергії (через можливість подавати воду до споживачів, використовуючи накопичену воду у баках).
- гарне рішення для систем водопостачання де в пікові години попит на воду перевищує можливості забезпечити споживачів напряму від джерела

водопостачання об'єкту (наприклад, від магістрального трубопроводу, свердловини тощо).

- є можливість мінімізувати надлишкові тиски в системі.

Основними недоліками каскадних систем водопостачання:

- необхідність облаштування технічних приміщень на проміжних поверхах, що може бути критичним з точки зору вартості квадратного метра, наприклад, в бізнес-центрах, де кожен метр простору має приносити прибуток;

- необхідність забезпечення нормативного рівня якості води у баках (пов'язано з появою та розмноженням небезпечних бактерій);

- потрібні додаткові заходи спрямовані на зменшення шуму від роботи насосних агрегатів на проміжних поверхах, що є критично важливим для більшості різновидів будинків: житлові, офісні, готелі тощо;

- потрібні заходи, направлені на мінімізацію ризиків для резидентів будівель у випадку аварій, пов'язаних з витоком води у технічних приміщеннях на проміжних поверхах та на даху (чи верхньому технічному поверху);

- є вірогідність появи бактерій *Legionellapneumophila*, що є небезпечними для здоров'я людини. Поява бактерій можлива через застій води в баках. Потрібно зауважити, що дана проблема характерна не тільки для каскадної системи водопостачання з проміжними баками, а для будь-якої де є ємності, в яких може з'явитися стояча вода.

- підвищена складність у ремонтах: а саме пов'язана із заміною обладнання (в тому числі і баків) на проміжних поверхах.

За принципом розподілу будинку на певні зони з виокремленими споживачами, каскадне водопостачання можна віднести до зонного водопостачання.

Різновидом описаного вище каскадного водопостачання можна вважати системи водопостачання з одним накопичувальним баком, розташованим на даху чи верхньому технічному поверсі [30].

За задумом такої конструкції системи водопостачання вода подається з нижнього технічного поверху (або підвального приміщення) у резервуар,

розташований на верхньому технічному поверсі або безпосередньо на даху будинку.

До основних недоліків системи можна віднести: потрібен високонапірний насосний агрегат; в системі створюються надлишкові тиски, що є причиною збільшення споживання електроенергії та ймовірне виникнення втрат води через витоки, підвищенню вірогідності виникнення аварій тощо; обмеженість застосування (через технічні складнощі пов'язані з подачею води на збільшену висоту, об'єм накопичувального резервуару тощо). Крім того, баки на даху будівель чи на верхніх технологічних поверхах, що можуть нагріватися під дією сонячного випромінювання – додаткова загроза якості води. За даними [31] в таких ємностях можуть з'являтися водорості та інші органічні матеріали, що несуть загрозу здоров'ю мешканців будівлі.

Порівняно із системою водопостачання, де баки та обладнання розташовано на проміжних поверхах, ця система позбавлена важливого недоліку, як то: немає необхідності займати та обладнувати окремі приміщення для розташовувати обладнання на проміжних поверхах. Крім того, до переваги можна віднести можливість наповнювати накопичувальний бак під час дії «нічного» тарифу (що особливо має сенс за умов використання потужного насосного агрегату).

### **1.2.3 Паралельне зонне водопостачання**

Під час реалізації зазначених вище підходів до побудови систем водопостачання, мабуть, окрім каскадного із розміщенням проміжних баків на поверхах, в мережах водопостачання мають місце великі надлишкові тиски. З одного боку, як показано у дослідженнях [28], [32], [33], [34] збільшення тиску призводить до збільшення витрати та споживання електроенергії. З іншого боку норми [27] забороняють тиски більші за 0,6 МПа. Ці ж самі норми рекомендують знижувати тиски або редукторами тиску, або використанням зонного водопостачання. Якщо це робити редукторами тиску але без зміни режиму роботи

насосного обладнання, то це призводить до витрат електроенергії через те, що насосні агрегати будуть працювати на створення надлишкових тисків у системі. Застосування паралельного зонного водопостачання дозволяє побудувати систему що відповідає «Державним будівельним нормам», крім цього – побудувати енерго- та ресурсозберігаючу систему водопостачання за рахунок зменшення надлишкових тисків.

Ідея паралельного зонного водопостачання полягає у наступному. В не зонному водопостачанні вода до всіх споживачів від першого до останнього поверху подається по одній трубі тобто - по одному стояку: труба стояку відгалужується від горизонтальної труби, яку прокладено у підвалі чи на нижньому технічному поверху, і піднімається від першого поверху до останнього, при цьому на кожному поверсі відбувається відгалуження, як правило, в одну квартиру (існують варіанти систем водопостачання, коли відгалуження на поверсі може жити кілька квартир). В паралельному зонному водопостачанні стояк, по якому вода подається до споживачів (що описано вище) – замінюється кількома, що встановлені паралельно, але кожен з них подає воду до однієї зони, що відповідає кільком поверхам. До зазначених стояків вода подається від кількох насосів різної потужності. При такому підході енергія насосних агрегатів в системі з паралельним зонуванням менше витрачається на створення надлишкових тисків, ніж це відбувається у системі водопостачання з одним стояком. Це відноситься і до таких окремих випадків систем водопостачання з одним стояком, як системи водопостачання з накопичувальним резервуаром на даху будівлі: як показало експериментальне дослідження [6], системи водопостачання з накопичувальним баком на даху будівлі, вода до якого подається по одному стояку, споживає на 30% більше електроенергії за систему паралельного зонного водопостачання.

У дослідженні [35] було зроблено порівняння п'яти систем водопостачання багатоповерхових будинків: з одним стояком з використанням одного бустерного насосу; з баком на даху вода до якого подається від високонапірного насосу; системи з баками на проміжних поверхах; системи що складалась із бустерних

насосів що були розташовані на проміжних поверхах; та системи паралельного зонного водопостачання. В результаті експерименту було встановлено, що система паралельного зонного водопостачання найменш енерговитратна із зазначених систем.

Недоліки. Основним недоліком системи паралельного зонного водопостачання є матеріальні витрати, пов'язані витратами на труби для паралельного (паралельних) стояків, придбанням додаткового насосу чи насосного агрегату та супутнього обладнання (засувки, крани тощо).

Переваги. До переваг можна віднести зменшення тисків у системі водопостачання, що зменшує вірогідність виникнення аварійних ситуацій, а також псування чутливого до високих тисків побутового обладнання. Але головною перевагою систем паралельного зонного водопостачання є енерго- та ресурсоефективність по відношенню до систем водопостачання з одним стояком [6], [35]. І вказаний недолік – необхідність додаткових труб та насосного агрегату може – може компенсуватися зекономленими коштами за рахунок зменшення споживання електроенергії та води.

#### **1.2.4 Використання регульованого приводу насосних агрегатів**

Регульований електропривод давно отримав широке розповсюдження, і системи водопостачання не виключення. Важливість застосування регульованого електроприводу в системах водопостачання полягає у створенні режиму роботи наближеного до оптимального: регульований електропривод може забезпечити режиму работ насосу, що забезпечує необхідні подачу та тиск у необхідні проміжки часу, що є особливо важливим у системах водопостачання багатоповерхових будинків. Особливістю водоспоживання у житлових будинках є те, що в різні періоди доби споживання може відрізнятися у десять разів [36]. Отже, регульований електропривод у проміжки часу із зменшеною потребою мешканців будинку у воді дозволяє зменшити енергоспоживання насосними

агрегатами системи водопостачання. У [36] зазначається, що завдяки застосуванню регульованого електроприводу можна зменшити споживання електроенергії в системі водопостачання семиповерхового будинку на 23%.

Частотне регулювання відноситься до одного з найбільш ефективних способів регулювання з погляду на економічну сторону цього питання [37]. Особливо порівняно з все ще розповсюдженим – регулюванням дроселюванням. Дроселювання, на відміну від частотного регулювання не потребує застосування коштовного обладнання, але є неекономічним: на створеному опорі витрачається велика частина енергії, спожита насосним агрегатом [37]. В умовах водопостачання будинків частото регульований електропривод має обмежений діапазон регулювання подачі внаслідок особливостей роботи за великої частки статичних напорів [37].

Підлаштування роботи системи водопостачання під реальну потребу споживачів у воді із значною економією електроенергії – це велика перевага регульованого електроприводу порівняно до нерегульованих систем. Недоліком такої системи можна вважати додаткові кошти на необхідне обладнання, що забезпечують регулювання. Крім цього, не дивлячись на те що регульований електропривод дозволяє створити необхідні умови в системі водопостачання (подача, тиск), але в системі все одно створюються надлишкові тиски, що можуть бути причиною збільшення витрат води та електроспоживання (особливо на нижніх поверхах).

### **1.3 Дослідження впливу тиску на споживання води та електроенергії в системах водопостачання**

Дослідження впливу тиску мають глобальний характер – вони проводяться в різних країнах і для різних ситуацій: житлові і офісні багатоповерхові будинки; багатоповерхові будівлі громадського користування (наприклад лікарні); котеджні містечка; розподільчі мережі міст тощо.



За результатами впровадження заходів відповідно до проекту «Модернізація системи муніципального водопостачання м. Львів», відмічено, що при зменшенні тиску у мережі розподілу води з 0,4 - 0,6 МПа до 0,3 - 0,45 МПа втрати у розподільчій мережі скоротились з 46% до 30% [28]. У зазначеному дослідженні великі об'єми використання водних та енергетичних ресурсів пов'язують із: втратами води у магістральних та розподільчих мережах міст; втратами води у внутрішньо будинкових системах; транспортування надлишкових об'ємів води пов'язаних із факторами, зазначеними у попередніх двох пунктах; використанням фізично та морально застарілого обладнання у мережах водопостачання, розподілу та на місцях споживання; низька культура (обізнаність) споживачів щодо економії води тощо.

Комплексно зазначені проблеми впливають на зростання використання електричної енергії і як наслідок на зростання вартості послуг постачання води для споживачів. Це пов'язано з тим, що вартість води більш ніж на чверть залежить від вартості електроенергії [38].

Досліджено вплив тиску на споживання мешканцями котеджного містечка [32]. Після вивчення даних було відмічено, що протягом доби в системі водопостачання містечка напір змінювався у діапазоні від 36 м до 63 м. Для проведення експерименту було встановлено редуційний клапан для усунення коливань: напір обмежили значенням 29,5 м. В результаті було встановлено зниження споживання води на 30%. Також в роботі дослідники вказують на те, що збільшення тиску в мережі, крім збільшення витоків, призводить і до збільшення споживання води (але без зазначення певних цифр чи закономірностей).

Досліджено вплив тиску на споживання води та витрати енергії у 23 громадських будинках висотою від 10 до 24 поверхів [33]. Для проведення дослідження в одному з будинків, – 20 поверховому будинку лікарні, – на поверхах де тиски перевищували дві атмосфери, було встановлено редуктори тиску, що обмежували його двома атмосферами. В результаті дослідження було встановлено, що зменшення тиску в системі водопостачання призвело до

зменшення споживання води мешканцями будинків: було відмічено зменшення споживання води на 11,9%.

Проведено дослідження впливу тиску на споживання води в офісній будівлі. Дослідження відрізняється від попередніх тим, що в мережі водопостачання було проведено збільшення тиску. В результаті встановлено, що збільшення тиску на 1 - 1.5 атм призвело до збільшення споживання більше ніж на 20% [34].

Наведені дослідження впливу тиску на витрати – незначна частина досліджень, що проводиться в цій області. Як було показано вище, а також в інших подібних дослідженнях, у більшості випадків використовують зниження тисків і задля цієї мети застосовуються редуктори тиску. Такий підхід, як застосування редукторів тиску, показав свою ефективність з погляду на зменшення витрат води. Але при такому підході насосні агрегати, що подають воду у систему, працюють без зміни режиму роботи, тобто – на створення надлишкових тисків. Одним з шляхів вирішення проблеми великих надлишкових тисків – є застосування паралельного зонного водопостачання. Для оцінки рівня ефективності систем зонного постачання, а також оцінки плюсів та мінусів зонного водопостачання, варто розглянути різні підходи до побудови систем водопостачання багатоповерхових будинків та вирішення питань підвищення енергоефективності таких систем.

#### **1.4 Складові систем водопостачання багатоповерхових будинків**

Вище розглянуто декілька варіантів побудови систем водопостачання багатоповерхових будинків. Зазвичай такі системи мають в своєму складі: насосні агрегати (та обладнання призначене для керуванням їх роботи); трубопровід, що складається з горизонтальних труб від яких відгалужуються вертикальні труби – стояки, через які вода подається до споживачів на поверхах; арматуру: запірну,

водорозбірну, змішувальну, регулювальну; фільтри; фітинги (кутники, трійники, перехідники тощо); контрольно-вимірювальні пристрої.

Крім цього, часто використовуються редуктори тиску та прилади, що захищають мережу водопостачання від гідроударів. Також до мереж можуть входити водонапірні резервуари чи резервуари для акумулювання води. Зупинимось на основних елементах – трубах і насосних агрегатах.

### 1.4.1 Труби

За вимогами ДБН [27] для побудови систем внутрішнього водопроводу у багатоповерхових будинках можна використовувати труби з полімерних матеріалів, сталеві та мідні труби. Сталеві труби широко використовувались під час будівництва багатоповерхових будинків кілька десятиліть тому. У будинках, що збудовані за останні двадцять років, водопровід влаштовано із полімерних труб. До полімерних відносяться труби: поліетиленові, металополімерні, поліпропіленові та труби з полівінілхлориду.

Сталеві труби втратили свою актуальність через певні вади: корозія; шорсткість поверхонь що є причиною збільшення опору, а також утворенню відкладень (наприклад, вапняних); труднощі, пов'язані з їх монтажем (порівняно з поліпропіленовими, наприклад); утворення конденсату у випадку застосування для трубопроводу холодного водопостачання; зниження температури води у випадку застосування для трубопроводу гарячого водопостачання тощо.

Корозія та внутрішні відкладення впливають на фізичні параметри трубопроводу: з часом, під дією зазначених факторів змінюється внутрішній діаметр трубопроводу, що значно впливає на збільшення гідравлічних втрат, і може стати причиною збільшення витрат електроенергії при експлуатації таких трубопроводів, а також причиною підвищення аварійності трубопроводів.

Крім того, сталеві труби можуть впливати на споживчу якість води, а саме – на її смак.

Серед полімерних труб найбільше розповсюдження для побудови систем водопостачання отримали поліпропіленові труби. Поліпропіленові труби мають ряд властивостей важливих для систем водопостачання: довговічність (строк служби до 50 років); високі теплоізоляційні властивості; можуть використовуватись для систем гарячого та холодного водопостачання (залежить від конкретного виробника і моделей труб); здатні працювати за умови високих тисків. Наприклад, за даними каталогу виробника [39], мають робочі тиски більше за двадцять атмосфер; не схильні до утворення відкладень через гладкість внутрішніх поверхонь(що є важливим чинником що забезпечує стабільність режиму роботи мережі та зменшенню вірогідності виникнення аварійних ситуацій); зручність і швидкість монтажу; міцність та надійність з'єднань.

Довговічність та надійність труб є важливим чинником не тільки з погляду на безпеку експлуатації систем водопостачання, але і з погляду на комерційну сторону питання: економія на ремонтах та заміні (демонтаж, монтаж).

#### **1.4.2 Насосні агрегати**

Будинки що зводяться останні десятиліття у містах України у більшості за висотою перевищують стару забудову. Часто етажність сучасних будинків у спальних районах перевищує двадцять поверхів: як житловий комплекс від МЖК «Оболонь» – тридцятиповерхові будинки; чи будинки житлового комплексу Silver Breeze по 33 поверхи кожний; чи то житловий комплекс Manhattan City де висота кожного будинку сягає 36 поверхів. Будинки у центральних районах не поступаються висотою як то: «БЦ Carnegie Center + Tower» де висота житлового будинку сягає 47 поверхів (168 м), а бізнес-центру 18 поверхів; чи то бізнес-центр "Гулівер" – 36 поверхів (141 м); бізнес-цент «Парус» – 33 поверхи (136 м) [40]. Такі будинки вже потребують бустерні насоси чи навіть власні теплові пункти з насосними агрегатами для постачання води мешканцям чи орендарям. Як правило, для забезпечення водою в таких випадках використовується не один

насосний агрегат, а включені паралельно кілька насосних агрегатів, що утворюють насосну установку. Приклад такої насосної установки наведено у додатку 2 (рис. Д2.1).

Для систем водопостачання багатоповерхових будинків здебільшого застосовуються відцентрові насоси. Поширене використання відцентрових насосів пов'язано з їх певними властивостями:

- високі значення ККД (в залежності від моделі може бути більшим за 80%), відносна простота конструкції, надійність, що на практиці виражається у довготривалій безперебійній роботі та легкості в обслуговуванні та ремонті [37], [42], [43];

- плавна подача води [44];

- простота з'єднання з двигуном (можуть бути розташовані на одному валу без муфтового з'єднання, що виключає необхідність центрування валів насоса та двигуна), що дозволяє отримувати насосні агрегати невеликих габаритів [44];

- конструкція насоса дозволяє перекачувати забруднену воду (що важливо для систем каналізації та стоків) [44].

До недоліків відцентрових насосів можна віднести:

- зниження ККД у високонапірних насосах за рахунок використання декількох послідовно встановлених робочих коліс;

- ускладнення, пов'язані із специфікою запуску насоса в роботу: перед запуском у роботу насос обов'язково повинен бути заповнений водою.

Також до слабких місць консольних відцентрових насосних агрегатів можна віднести: знос ущільнень призводить до витоків води та зменшенню тиску; пошкодження підшипників ковзання є причиною зменшення потужності, збільшення вібрацій насосного агрегату, витoku мастила, а знос підшипників ковзання – до збільшення вібрацій; порушення співвісності є причиною збільшення вібрацій [45].

Крім консольних НА також широке розповсюдження мають вертикальні багатоступінчасті НА (див. Додаток 3, рис. Д3.1), а також часто мають попит і насоси двостороннього всмоктування.

З метою розробки конструкції спеціалізованого насосного агрегату (СНА), що мав би два виходи (по кількості стояків системи паралельного зонного водопостачання), було проведено дослідження: аналіз конструкції насосних агрегатів що були б близькі по конструкції до бажаної, а також конструкцій асинхронних двигунів (АД), що дозволили б отримати спеціалізований насосний агрегат із характеристиками краще за відомі моделі (див. розділ 5).

Системи паралельного зонного водопостачання вимагають окремий НА на кожен гілку що живить відповідну групу стояків. В такому разі, якщо відбувається заміна системи водопостачання що живилася від одного НА на систему паралельного зонного водопостачання, що має дві гілки для живлення двох зон будівлі, де кожна гілка буде мати НА меншої потужності. В такому випадку система паралельного зонного водопостачання буде споживати меншу потужність, але може скластися ситуація, що ККД такої системи знизиться за рахунок зменшення ККД окремих НА. Для кількісної оцінки було проведено дослідження взаємозв'язку потужності НА з їх ККД (див. розділ 5). В результаті проведеного дослідження підтверджено, що в більшості випадків із зменшенням потужності НА зменшується і його ККД. Таким чином, для підтримки ККД системи на високому рівні необхідно вибирати моделі НА що мають найвищий ККД за однакової потужності; або застосувати один НА більшої потужності який при цьому має кількість виходів по кількості гілок.

Важливим елементом, що впливає на надійність роботи насосного агрегату, є приводний двигун. Зазвичай, для приводу відцентрових насосів (ВН) використовують асинхронні двигуни. Широке розповсюдження асинхронних двигунів обумовлено простотою конструкції, надійністю, високою ефективністю та відносно невеликою ціною [48]. При цьому застосовуються різні способи приєднання насосів та двигунів: як за допомогою муфтових з'єднань, так і через розробку конструкцій насосних агрегатів, що дозволяють розміщувати робочі колеса насоса безпосередньо на валу двигуна.

З розглянутих вище підходів (щодо реалізації систем водопостачання) видно, що насоси які мають два чи більше виходи, були б ефективно використані

в системах паралельного зонного водопостачання: один такий спеціалізований насос міг би замінити декілька звичайних, кожен з яких подає воду до окремого стояку. Ймовірно, в результаті такої заміни підвищилася би ефективність всієї системи.

### **1.5 Гідравлічний розрахунок систем водопостачання багатоповерхових будинків (за ДБН)**

Профільні навчальні посібники, зокрема [49], при розгляді питання розрахунків внутрішнього водопроводу, рекомендують відштовхуватись від вимог зазначених у Державних будівельних нормах. У вказаних нормах та правках до них, зазначено основні вимоги, які необхідно врахувати при розрахунках внутрішнього трубопроводу.

По-перше, забезпечення необхідного тиску в системі водопостачання будинку. Мінімальний тиск на вводі до споживача – тобто на вводі в квартиру – має бути не меншим за 0,2 МПа. При цьому, максимальний тиск не повинен перевищувати 0,6 МПа.

По-друге, обмеження швидкості руху води по трубах системи водопостачання будинку. Відповідно до [27] швидкість води не повинна перевищувати: 2,5 м/с – для труб з полімерних матеріалів та 1,5 м/с – для металевих труб.

По-третє, забезпечення необхідної добової норми води на одного мешканця. Добова норма залежить від типу будинку: з водопроводом та каналізацією але без ван, з газовим постачанням чи без нього, з централізованим гарячим водопостачанням (з ванною довжиною більше чи менше 1500 мм) тощо; та залежить від кліматичного району. Приналежність до кліматичного району визначається Національним стандартом України [50]. Для прикладу, для Києва норма споживання води однією людиною буде складати 250 л/добу (в тому числі гарячої води – 100 л/добу).

Втрати напору за [27] необхідно розраховувати з урахуванням матеріалу труб і визначатися як:

$$H = il(1 + k_i)$$

Де  $i$  – питомі втрати тиску на тертя при розрахунковій витраті, Па/м;

$l$  – довжина розрахункової ділянки трубопроводу, м;

$k_i$  – коефіцієнт який враховує втрати тиску в місцевих опорах. Значення коефіцієнту для житлових та громадських будинків дорівнює 0,3.

Втрати тиску у вузлах об'єднання стояків розраховується за формулою:

$$H = \frac{f * \sum il(1 + k_i)}{m}$$

де  $f$  – коефіцієнт що визначається типом водорозбору (0,3 – для об'єднаних систем: холодного водопостачання та протипожежного водопроводу; 0,5 – для систем холодного водопостачання);

$m$  – кількість стояків у такому вузлу.

## 1.6 Математичні моделі електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків

Оскільки електромеханічні системи водопостачання багатоповерхових будинків існують досить давно, існує і багато різних підходів до розрахунку параметрів таких систем.

У [51] представлено кілька підходів до розрахунку витрат: детерміністичний, імовірнісний та Байєсівський підхід. Розглянемо кілька рекомендацій за [51], що відносяться до детерміністичного підходу. За одним із підходів розрахункові витрати  $Q_s$  визначаються як сума трьох складових: стандартних витрат найбільшого приладу  $Q_{imax}$ , середніх витрат інших приладів та складової що враховує випадкові зміни середніх витрат інших приладів:

$$Q_s = Q_{imax} + p_i \left( \sum Q_i - Q_{imax} \right) + k \sqrt{Q_i p_i \left( \sum Q_i - Q_{imax} \right)},$$



де  $Q_i$  – номінальні витрати  $i$ -го приладу;

$p_i$  – вірогідність середньої витрати кожного приладу;

$k$  – константа, що враховує фактор відмови приладів.

Визначення розрахункової витрати для житлових приміщень із загальною кількістю приладів  $M$  за [51]:

$$Q_s = 0,048M^{0,72}, \quad M \geq 30$$

Для будинків із кількістю приладів  $M$  з номінальною витратою  $Q_i$  розрахункове значення витрат  $Q_s$  можна отримати із рівнянь [51]:

$$Q_s = 0,5544 \left( \sum M_i Q_i \right)^{0,5462}, \quad 4 \leq \sum M_i Q_i \leq 44$$

$$Q_s = 0,2023 \left( \sum M_i Q_i \right)^{0,7982}, \quad 45 \leq \sum M_i Q_i \leq 500$$

Описані у [51] підходи для розрахунку витрат для багатоповерхових будинків ймовірно можна використати як перевіірочні при розрахунках описаних у п.1.6 (розрахунок відповідно до ДБН); а також для оцінки характеристик НА, а також визначити діаметри трубопроводу системи водопостачання будинку

В дослідженні [51] представлено і інші підходи до того як розрахувати витрати для багатоповерхових будинків, але в жодному не враховується вплив тиску на витрати.

Відомо про ряд ґрунтовних досліджень, направлених на підвищення ефективності систем водопостачання багатоповерхових будинків, наприклад, описані у [36], [6] та [52].

У [52] дослідники пропонують оцінювати енергоефективність систем водопостачання по відношенню потенційної енергії піднятої на поверхи води до енергії, що була затрачена на підняття цієї води. У дослідженні розглядається система водопостачання що крім НА, труб та інших елементів включає в себе накопичувальні ємності: одна знаходиться на рівні підвального приміщення, інша – на даху будівлі. Якщо опустити рівняння пов'язані із розрахунком об'ємів накопичувальних ємностей, розрахунками щодо їх заповнення та деталізацію

щодо змінних, пов'язаними із їх розташуванням, то алгоритм розрахунку енергоефективності за [52] має наступний вигляд.

Енергоефективність  $\alpha$  розраховується за рівнянням:

$$\alpha = E_{out} / E_{pump} ,$$

де  $E_{out}$  – потенційна енергія води, що потрібна в місцях споживання;

$E_{pump}$  – енергія витрачена НА на подачу води до системи водопостачання.

В свою чергу  $E_{out}$  визначається:

$$E_{out} = \rho g \sum_{i=1}^n v_i h_i ,$$

де  $v_i$  – об'ємні витрати на висоті  $h_i$ ;

$\rho$  – густина води;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Енергія витрачена НА визначається за рівнянням:

$$E_{pump} = \rho g \left( h_l \sum_{i=1}^n v_i + H_f + H_0 \right) / \eta_c , \quad H_f = f L_e u^2 / (2 g d) ,$$

де  $h_l$  – відстань між площиною розташування мінімального рівня води у ємності, розміщеній у підвальному приміщенні та площиною, в якій розміщено патрубок по якому вода потрапляє у ємність на даху будівлі;

$H_0$  – бажаний рівень тиску на вході ємність на даху;

$f$  – коефіцієнт тертя;

$u$  – швидкість потоку води;

$d$  – гідравлічний діаметр;

$L_e$  – еквівалентна довжина труби з урахуванням усіх фітінгів;

$H_f$  – напір, необхідний для подолання тертя в трубі для подачі води до ємності на даху будівлі;

$\eta_c$  – ККД приводу.

Потреба у воді  $q_w$ , що визначається кількістю приладів водоспоживання  $k$  із витратою  $Q_c$ :

$$q_w = \sum_k Q_{c,k}(t).$$

Наступним кроком через врахування необхідних об'ємів води в обох ємностях та визначену потребу для забезпечення споживачів водою визначається об'єм води необхідний для функціонування системи водопостачання будинку.

Один із підходів визначення енергоефективності систем водопостачання, описано [52]. Але якщо брати енергозатрати пов'язані із доставкою всієї води що вважається доставленою до споживачів, тоді може виникнути неточність за такої оцінки. Неточність може з'явитись у зв'язку із тим, що виникають додаткові витрати пов'язані із надлишковими тисками в системі водопостачання будинку: не зовсім коректно вважати всю воду як доставлену до споживача через те що за результатами досліджень [28], [32], [33], [34] однією з причин виникнення додаткових витрат є витоки у системі постачання (місцях з'єднання труб, обладнання тощо) та приладах зокрема.

Ще один з підходів для розрахунку параметрів та подальшої оцінки ефективності систем водопостачання представлено у [6]. Автори у роботі порівнюють ефективність двох систем водопостачання: системи паралельного зонного водопостачання та системи водопостачання із накопичувальним баком на даху будівлі. Порівняння виконується для 35-ти поверхового будинку. Підхід базується на методі економічної оцінки «вартість життєвого циклу» відомим як LCC (Life Cycle Cost). У [6] розглядають LCC як суму складових:

$$LCC = C_i + C_m + C_e,$$

де  $C_i$  – капітальні витрати (насосні агрегати, труби тощо);

$C_m$  – витрати на обслуговування системи водопостачання;

$C_e$  – витрати енергії (результат отримано завдяки лабораторному експерименту та подальшим розрахункам).

За [6] розрахунки потужності насосу та його ККД здійснюються за формулами:

$$N_{pump} = \rho * g * H * Q / 102,$$

$$\eta_{pump} = (\text{Pump Hydraulic Power Output} * 100\%) / \text{Pump input Shaft Power}$$

де  $H$  – напір, м;

$Q$  – витрати;

$\rho$  – густина води;

$g$  – прискорення вільного падіння;

*Pump Hydraulic Power Output* – вихідна гідравлічна потужність насосу;

*Pump input Shaft Power* – вхідна потужність на валу насосу.

Для порівняння систем водопостачання за [6] проводиться лабораторний експеримент під час якого, протягом 24 годин, імітується робота обох систем водопостачання. Всі необхідні значення фіксуються: значення напору та витрати беруться з відповідних дисплеїв насосної установки, а вихідна потужність на валу визначається за вимірюваннями напруги та струму.

У роботі [6] порівняно ефективність двох систем водопостачання: системи з баком, розташованим на даху будівлі, до якого вода подається по одному стояку, а виходячи з бака, розподіляється на кілька стояків та системи паралельного зонного водопостачання з різнорівневим розподілом. В результаті проведення експерименту встановлено, що система водопостачання з баком на даху споживає на 30% більше електроенергії за систему паралельного зонного водопостачання, що складається з двох стояків.

Ймовірно, слабким місцем такого підходу є – проведення експерименту. В лабораторних умовах досить важко відтворити умови багатоповерхового будинку: з надлишковими тисками у стояках, витоках, гідравлічними опорами тощо. Вплив надлишкових тисків на витрати за [28], [32], [33], [34] може складати більше ніж десять відсотків при надлишкових тисках у кілька атмосфер. Для більш точної оцінки ефективності систем водопостачання важливо врахувати як витрати, пов'язані з використанням води споживачами, так і витрати води, пов'язані із надлишковими тисками у стояках системи водопостачання.

Наступним підходом щодо оцінки ефективності електромеханічних систем є дослідження [36]. В результаті проведеного дослідження встановлено, що завдяки регулюванню – зміні напруги та частоти відповідно до діаграми споживання води мешканцями будинку - отримано підвищення ефективності

системи водопостачання на 23% по відношенню до системи без регулювання. Для оцінки енергоефективності було використано критерій енергетичної ефективності. У [36] як і у [52] (описаному вище) для оцінки ефективності використано досить схожі критерій енергетичної ефективності систем водопостачання.

Відповідно до [36] комплексним критерієм ефективності є відношення корисної потужності, що виражена у потенційній енергії піднятої води до затраченої на підйом цієї води електричної енергії:

$$K_{ef} = \rho g \sum_{j=1}^J H_j Q_j T_j / \sum_{j=1}^J P_{1j} T_j$$

де  $\rho$  – густина води;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$J$  – кількість етапів циклограми;

$T$  – тривалість етапу циклограми;

$H$  – статичний напір стояку;

$Q$  – подача, що відповідає певному етапу циклограми;

$P_1$  – потужність споживання електричної енергії.

У [36] та [52] розрахунок саме коефіцієнту ефективності є дуже подібним. Головною відмінністю цих досліджень є розрахунок витрат: у [52] витрати розраховуються спираючись на кількість приладів, що споживають воду, вірогідності, що враховує їх роботу, заповнення накопичувальних ємностей тощо; в свою чергу у [36] отримання значення витрат для розрахунку коефіцієнту ефективності спирається на циклограму споживання мешканцями семиповерхового будинку. Якщо порівнювати надійність підходів щодо отримання даних по витратам, то спиратись на реальну циклограму споживання надійніше, ніж на розрахунок за ймовірною кількістю приладів і врахуванням ймовірності їх одночасної роботи. Ще одним підходом для отримання даних по витратам є опитування [53] що може бути добрим інструментом для підтвердження розрахованих даних чи даних отриманих на базі циклограми.

Даний підхід дозволяє оцінити та порівняти системи водопостачання за критерієм енергоефективності. Але для більш точної оцінки не вистачає врахування обсягів спожитих водних ресурсів і їх комерційної складової; а також порівняльної оцінки з урахуванням співвідношення вартості спожитих водних ресурсів із вартістю електроенергії.

## **Висновки до Розділу 1**

Будівництво багатоповерхових будинків пов'язано з їх довготерміновою експлуатацією що вимірюється десятиліттями. В зв'язку з цим проаналізовано тренди пов'язані з будівництвом багатоповерхових споруд на наступні 25 років. Зокрема проаналізовано тренди на зміни населення планети, а також на потреби в електричній енергії та воді. В результаті можна узагальнити тенденції розвитку:

- потреби у багатоповерхових будинках будуть зростати: буде зростати їх кількість і висотність.

- будуть зростати потреби в електроенергії: в найближчій перспективі буде зростати її вартість, а отже буде зростати необхідність в енергозберігаючих системах та технологіях в тому числі – енергоефективних системах водопостачання.

- будуть зростати потреби у прісній воді, що вплине на її вартість і доступність. Для деяких регіонів України прісна вода належної якості може стати дефіцитним ресурсом (як це має місце для окремих громад у південній частині України починаючи з середини 2023 року і по цей день).

- існує тренд на покращення якості систем водопостачання: на зменшення їх енергоспоживання, а також на впровадження заходів, за яких питну воду можна замінити дощовою чи «сірою» водою, а в деяких місцях навіть морською, що використовується для побутових цілей господарств: для використання у пральних машинах, змивних системах в туалетах, поливу тощо.

Значна частина систем водопостачання багатоповерхових будинків – із бустерними насосами в підвальних приміщеннях, каскадні системи із проміжними баками на поверхах, з баками на даху будівлі тощо – можуть бути незамінним для деяких окремих ситуацій, але взагалі є енерговитратними [6] і можуть бути покращені чи замінені на більш ефективні.

Певна кількість досліджень, в тому числі і [28], [32], [33], [34], свідчить про тренд розробки систем водопостачання, що направлений на зниження надлишкових тисків у цих системах. Але не всі підходи до зниження надлишкових тисків є досить енергоефективними.

Системи паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків потребують більш детального вивчення: оцінки енергоефективності та оцінки впливу зменшення надлишкових тисків на витрати води порівняно з іншими системами, що, наприклад, отримали розповсюдження в Україні. Через те що система паралельного зонного водопостачання буде мати більші первинні капітальні вкладення, ніж, наприклад, розповсюджена система з одним стояком, також необхідна оцінка комерційної доцільності використання таких систем.

Розглянуті математичні моделі відображають різні підходи до розрахунку параметрів електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків, зокрема, оцінку їх ефективності. У розглянутих дослідженнях пропонується оцінювати ефективність систем водопостачання за показником енергоефективності. У розглянутих математичних моделях, у розрахунках витрати, відсутнє врахування зміни величини витрат від надлишкових тисків. Оскільки розглядаються багатоповерхові будинки, в системах водопостачання яких завжди є надлишкові тиски, було б доцільно розглядати вплив надлишкових тисків на витрати. У зв'язку з цим також було б доцільного для порівняння систем водопостачання розраховувати крім енергоефективності і ресурсоефективність, оскільки деякі системи водопостачання завдяки особливостям своєї конструкції здатні знижувати надлишкові тиски у стояках системи водопостачання. До таких систем можна віднести системи паралельного зонного водопостачання.

Оскільки у розглянутих прикладах коефіцієнт енергоефективності виражено у відносних одиницях, така оцінка може бути покращеною за рахунок додаткових критерії оцінювання. Наприклад, коефіцієнт ефективності системи водопостачання може включати оцінку енергетичної ефективності, ресурсної ефективності, а також оцінку ефективності представлену в грошовому еквіваленті відповідно до вартості електроенергії та води.

### **Формулювання мети і наукових задач дослідження**

**Метою** дисертаційного дослідження є визначення закономірностей співвідношення конструктивних і режимних параметрів ефективних електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків із паралельним зонуванням, розробка засобів комплексного математичного моделювання, отримання практичних рекомендацій з підвищення ефективності даних систем.

Досягнення поставленої мети потребує розв'язання наступних задач:

1. Дослідити та визначити існуючі тенденції щодо області застосування, складу та структур розгалужених електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків.

2. Розробити математичні моделі і їх програмну реалізацію для комплексного дослідження розгалужених електромеханічних систем водопостачання із асинхронним електроприводом, які б, враховували вплив зміни надлишкових тисків у мережі водопостачання на витрати; розробити рівняння втрат напору у розгалуженій гідравлічній системі трубопроводу водопостачання багатоповерхового будинку, яке враховувало б вплив надлишкових тисків на витрати.

3. Розробити вираз комплексного критерію ефективності розгалужених електромеханічних систем водопостачання, який би врахував їх енергетичну та



ресурсну ефективність; дав би змогу оцінити економічну ефективність від впровадження системи водопостачання.

4. Провести чисельний експеримент із визначення співвідношення конструктивних і режимних параметрів розгалужених електромеханічних систем водопостачання, яке забезпечує підвищення їх ефективності, а саме:

- дослідити співвідношення розподілу споживачів за стояками з метою знаходження оптимального співвідношення;

- дослідити вплив зміни тиску зовнішньої (магістральної) мережі водопостачання на ефективність роботи систем водопостачання багатоповерхового будинку;

- дослідити вплив зміни коефіцієнту впливу надлишкового тиску на збільшення водоспоживання на ефективність роботи системи водопостачання.

5. Надати економічне обґрунтування доцільності впровадження систем паралельного зонного водопостачання замість систем водопостачання з одним стояком.

6. Розробити практичні рекомендації з підвищення ефективності розгалужених систем водопостачання.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

### **2.1 Вихідні положення, система припущень**

Для проведення ґрунтового дослідження системи паралельного зонного водопостачання необхідно встановити її енергетичну ефективність. Для оцінки ефективності даної системи її необхідно порівняти з іншою системою водопостачання. Через те що в Україні найбільш розповсюджені системи водопостачання в яких вода до мешканців подається по одному стояку, через це буде зроблено порівняння саме з такою системою водопостачання.

Уточнення щодо вживання терміну «стояк». В роботі даний термін буде вживатись часто і, щоб не виникало неоднозначності, потрібно визначити що мається на увазі при використанні словосполучень «один стояк», «два стояка», «три стояка». Поняття стояка відповідає Державним будівельним нормам [27]. Під словосполученням «один стояк» слід розуміти описове спрощення конструктивної особливості системи водопостачання при якій вода подається по вертикальній трубі з першого до останнього поверху і, як правило, тільки до однієї квартири на поверсі. Вказана вертикальна труба – є одним із відгалужень від горизонтальної труби, прокладеної в підвальному приміщенні по якій подається вода від насосного агрегату до таких вертикальних труб-стояків.

Візьмемо для прикладу дванадцятиповерховий будинок. Для системи з одним стояком в даному випадку характерно те, що вертикальна труба проходить з підвального приміщення до дванадцятого поверху, має тільки одне відгалуження на кожному поверсі. Для системи з двома паралельними стояками ситуація наступна: обидві труби піднімаються з підвального приміщення, при цьому один зі стояків – «більший» – доходить до дванадцятого поверху і має по одному відгалуженню на кожному з 7 по 12 поверх; «менший» стояк починається в підвальному приміщенні і доходить тільки до шостого поверху і теж має по

одному відгалуженню на кожному поверсі (див. рис. 2.1). Аналогічний принцип і для системи паралельного зонного водопостачання з трьох стояків.

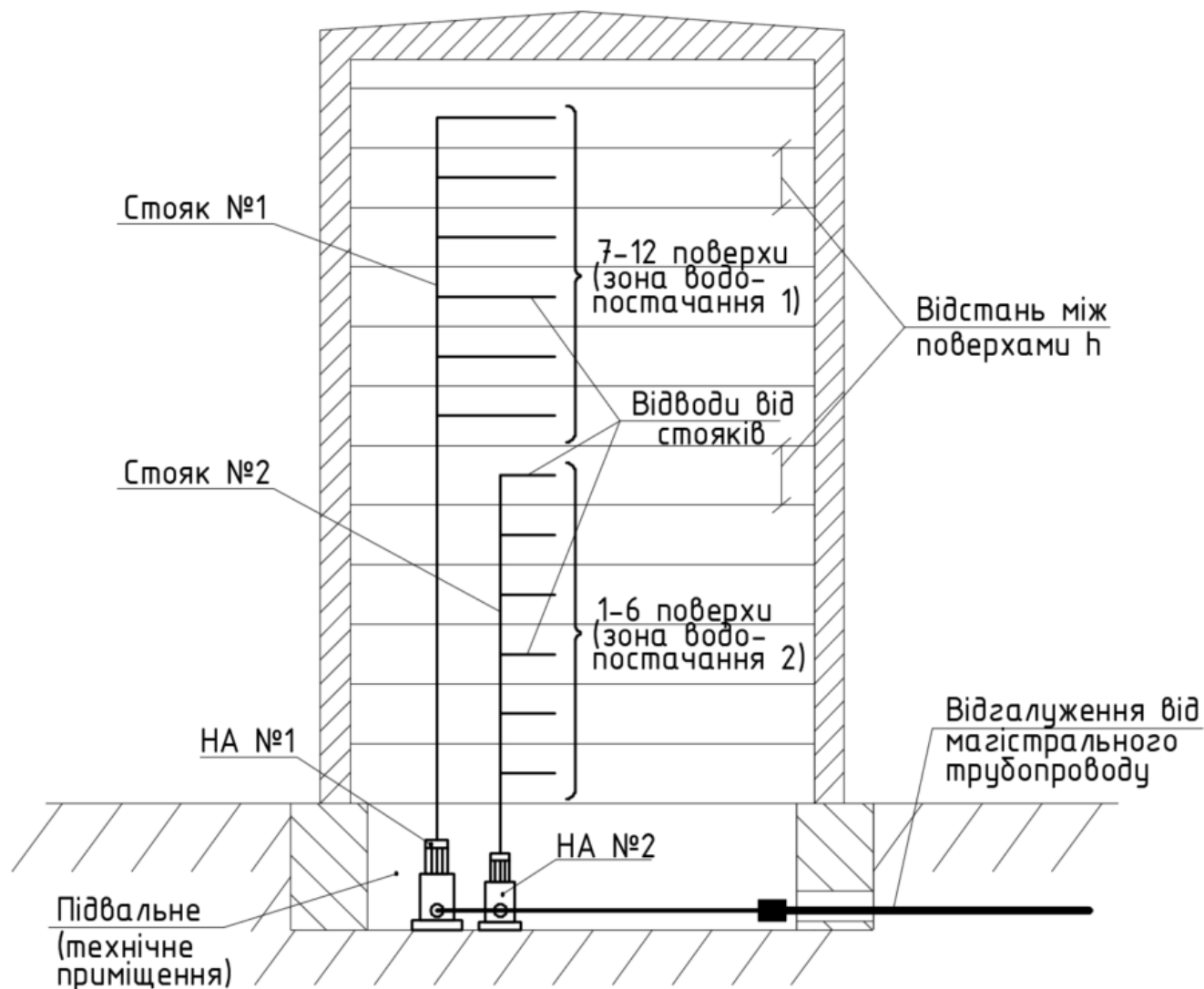


Рисунок 2.1 – Система паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків

Багатоповерхові будинки в своїй більшості представлені житловою та комерційною забудовою (офіси, готелі тощо). У такого типу будинках потреба у воді змінюється постійно: в кожному окрему хвилину є різні витрати – попит змінюється динамічно. Але в межах більших проміжків часу, наприклад, таких як доба можна знайти закономірності споживання, що продиктовані певними умовами перебування людей у багатоповерхових будинках. Ймовірно, що в будинках де розташовано офіси, піки споживання прийде на денні години (ранок, обід,

кінець робочого дня), а у нічні години споживання якщо і буде, то буде мінімальним. Із житловими будинками подібна ситуація: добу можна представити у вигляді певних відрізків часу, в які день у день об'єм споживаної води буде повторюватись – представити споживання у вигляді циклограм споживання. Даний підхід – прийняти за основу циклограми споживання – використовується досить широкого, зокрема його використано у [29], [21] та [36]. Як приклад, добова циклограма споживання за [36] представлена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Добова циклограма споживання житлового семиповерхового будинку [36]

Споживання, м <sup>3</sup> /год.	20	16	12	10	8	6	4	2
Час дії періоду, год.	5	3	3	2	2	3	2	4

В подальшому дані наведеної циклограми дозволяють екстраполювати їх для житлових будинків іншої висоти з аналогічною кількістю мешканців на поверх.

Не дивлячись на те, що споживання в певні суміжні періоди циклограми споживання можуть відрізнятись на десятки відсотків, зміна стану системи не відбувається стрибкоподібно: попит на воду має наростаючий/спадаючий характер, обумовлений певними потребами великої кількості людей у відповідний проміжок часу. Перехідні етапи зростання та падіння попиту у житловому будинку мають розтягнутий у часі характер. Таким чином можна вважати, що перехідні процеси не мають значного впливу на роботу системи у розрізі добової оцінки її роботи. Отже, буде розроблено і програмно реалізовано математичну модель усталених режимів роботи електромеханічної системи водопостачання багатоповерхових будинків із паралельним зонуванням, яка забезпечує визначення величини показників ефективності роботи системи з урахуванням взаємного впливу електромеханічного і гідравлічного обладнання.

У дослідженнях, присвячених системам водопостачання багатоповерхових будинків, часто приймається умова, що споживання води за поверхами однакове.

З одного боку це логічно: за умовами ДБН прийнято однакова норма споживання на кожного мешканця будинку; з іншого боку це протирічить дослідженням впливу надлишкового тиску на витрату: при збільшенні тиску збільшується витрата (більш докладно про залежність витрат від тиску у першому розділі цієї роботи). В даному випадку це означає, що при однаковій кількості споживачів на поверхах і однаковій потребі у воді, очікується, що витрата на нижніх поверхах буде більшою ніж на верхніх.

Таким чином, далі буде використано терміни «потреба» чи «потреба у воді», що мають наступне значення: при одночасному споживанні на різних поверхах в один і той самий період часу (один окремий етап циклограми) потреби користувачів у воді будуть однакові. У період максимуму циклограми вони будуть відповідати витратам на найвищому поверсі (прийнято, що у даному випадку нема надлишкових тисків). Витрати на поверхах нижче будуть більшими внаслідок дії надлишкових тисків і будуть збільшуватись у міру наближення до нижнього поверху.

Отже, споживачі будинку мають однакові потреби у воді, але споживання за поверхами буде різним внаслідок впливу надлишкових тисків (це відбувається через витoki, застарілість обладнання, особливості споживання тощо).

Визначення впливу надлишкового тиску на витрати. У першому розділі роботи було проаналізовано кілька досліджень впливу тиску на витрати. Жодне з відомих досліджень не дає чіткої відповіді на те, на скільки змінюються витрати при збільшенні чи зменшенні тиску на одну атмосферу. Виходячи з того, що на найвищому поверсі найменше споживання води і споживання збільшується із зниженням поверху, потрібно встановити на яку саме величину будуть збільшуватись витрати від поверху до поверху. Як показують дослідження [28], [32], [33], [34] витрати залежать від тиску: при збільшенні тиску збільшуються і витрати. З наведених даних зазначених досліджень можна припустити, що при зміні тиску на 1 атмосферу, витрати змінюються приблизно на 10% (для зазначеної умови «коридор» зміни витрат складає 5–15%). Але в результаті аналізу вказаних досліджень важко точно оцінити як саме змінюються витрати,

при збільшенні чи зменшенні тиску у системі водопостачання на 1 атмосферу. Отже, спираючись на вказані дослідження прийнято мінімальний відомий вплив надлишкового тиску, тобто припущення, що при збільшенні тиску у системі водопостачання на одну атмосферу, витрати збільшуються на 5,5%: в жодному з наведених вище досліджень не було зазначено зміну впливу 1 атмосфери на витрати на величину меншу за 5,5%.

## **2.2 Математичні моделі складових системи**

### **2.2.1 Визначення рівняння руху рідини і витратної характеристики гідравлічної мережі**

Комплексне моделювання ЕМС напірного переміщення рідини здійснюється з урахуванням взаємного впливу складових системи. Швидкість обертання ротору насоса, яка відповідає швидкості ротора АД, визначає залежність зміни напору насоса за зміни подачі (напірну характеристику). Величина витрат рідини у гідравлічній системі (за відсутності стискання рідини дорівнює подачі насоса) визначається співвідношенням напірної характеристики насоса із витратною характеристикою гідравлічної мережі (залежністю втрат напору у трубопроводі від витрат), а також інерційними властивостями рухомих частин. Величина подачі насоса визначає його ККД і споживану потужність, що за відомої швидкості обумовлює величину моменту навантаження на валу АД. Його співвідношення із електромагнітним моментом АД визначає ковзання ротора, яке за відомої частоти живлення визначає швидкість обертання.

У загальному випадку умов дослідження величина параметрів усталеного режиму роботи системи (струми, частота обертання, подача рідини) визначається за результатами розв'язку диференціальних рівнянь електричної, механічної і гідравлічної рівноваги. У часткових випадках, коли величина деяких змінних

заздалегідь обумовлена, потрібне число диференціальних рівнянь зменшується. Наприклад, якщо відомі подача і частота обертання [54] треба визначати лише напір насосу і споживану потужність АД. Якщо невідома ще і швидкість, треба додати розв'язок рівняння механічної рівноваги і визначати ковзання АД [55].

Загальний випадок дослідження має місце при врахуванні перехідних процесів гідравлічної системи за наперед невідомої циклограми. Для даних умов потрібно застосовувати диференціальні рівняння гідравлічної рівноваги з урахуванням інерційних властивостей потоку рідини. Це виконано у роботі [56] для знаходження параметрів усталених робочих режимів. У випадках, де шуканими є параметри усталених робочих режимів, характер перехідного процесу не є суттєвим (врахування інерції рідини забезпечує стійке знаходження розв'язку), то визначення параметрів диференціального рівняння гідравлічної рівноваги виконано із припущеннями. При отриманні даного рівняння використано наступні положення:

$$\text{Маса рідини визначається: } m = \rho L \pi d^2 / 4 .$$

де  $\rho$  – густина води;

$d$  – діаметр трубопроводу;

$L$  – довжина трубопроводу.

$$\text{Прискорення зосередженої маси рідини } a = \frac{dQ}{dt} / (\pi d^2 / 4) , \text{ а її швидкість:}$$

$$v = Q / (\pi d^2 / 4) .$$

Напір  $H$  є енергією, яка передається одиниці ваги рідини, а енергія це добуток рушійної сили  $F$  на переміщення  $vt$  (добуток швидкості і часу). За даних умов силу можна визначити:  $F = Hmg / (vt) .$

Приймаємо: силовий вплив, який визначає динаміку руху рідини є пропорційним різниці напору насосу ( $H_p$ ) і втрат напору ( $H_m$ ) у мережі (за рівності цих напорів має місце усталений рух рідини). Тоді з урахуванням наведених рівнянь, відповідно до другого закону Ньютона:

$$a = F / m = g (H_P - H_m) / (vt) = g (H_P - H_m) / (tQ / (\pi d^2 / 4)) = g (H_P - H_m) / L = \frac{dQ}{dt} / (\pi d^2 / 4) .$$

В результаті можна отримати наступне диференціальне рівняння [56]:

$$\frac{dQ}{dt} = g \pi d^2 (H_P - H_m) / 4L .$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Витратну характеристику системи водопостачання багатоповерхового будинку за умови рівномірного водоспоживання поверхами можна представити рівнянням [54]:

$$H_m = h_1 + h_k + k_{R1} R_1 Q^2 + k_{Rk} \frac{R_k Q^2}{k^2} + \sum_{i=2}^{k-1} \left[ h_i + R_i \left( Q - Q \frac{i-1}{k} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

де  $k$  – кількість поверхів на які подається вода по стояку;

$h_i$  – відстань між двома сусідніми відгалуженнями від стояку (в даному випадку відповідає висоті поверху);

$Q$  – подача насосу;

$R_i$  – гідравлічний опір ділянки стояку  $i$ -го поверху;

$k_{R1}$  – коефіцієнт збільшення гідравлічного опору трубопроводу від стояку до насосу;

$k_{Rk}$  – коефіцієнт збільшення гідравлічного опору трубопроводу останнього поверху будівлі (врахування гідравлічного опору горизонтальної ділянки трубопроводу останнього поверху).

Коефіцієнти  $k_{R1}$  та  $k_{Rk}$  – коефіцієнти збільшення опору що враховують певні ділянки трубопроводу (в даному випадку опір трубопроводу від стояку до насосу та горизонтальну розводку по поверху) і визначаються у відносних одиницях опору стояку одного поверху. Змінні  $h_1$  та  $h_k$  – винесені окремо через те що висота технічного поверху чи поверхів де розташоване обладнання може відрізнитись від висоти житлових поверхів будинку; те саме стосується і висоти останнього поверху будинку.



У припущенні рівності висоти всіх поверхів будинку і сталості гідравлічних опорів  $R$ , рівняння витратної характеристики (2.1) можна трансформувати у рівняння:

$$H_m = H_{st} + Q^2 \frac{R}{k^2} \left[ k^2 k_{R1} + k_{Rk} + \sum_{i=2}^{k-1} (k+1-i)^2 \right], \quad (2.2)$$

де  $H_{st} = \sum_{i=1}^k h_i$  – статичний напір води.

### 2.2.2 Визначення напірної характеристики насосу

Спираючись на координати робочої точки насоса  $H_p, Q_p$ , враховуючи що у сталому режимі  $H_m = H_p$ ,  $Q = Q_p$ , отримана залежність (2.2) дає змогу визначити гідравлічний опір  $R$ . Для виконання цієї задачі можна скористатись підходом з [36] де апроксимацію характеристик напору насоса було визначено з рівнянь:

$$H = H_0 (n/n_h)^2 + A Q n / n_h - B Q^2; \eta = \eta_m \left( 1 - \left| \frac{Q \cdot n_h}{Q_h \cdot n} - 1 \right|^{2.3} \right), \quad (2.3)$$

За умов:

$$\eta_m = \eta_h \left[ 1 - \left( \frac{n}{n_h} - 1 \right)^{2m} \right], n \leq n_h$$

$$\eta_m = \eta_h \left[ 1 - \frac{\eta_h - \eta''}{(n'' - n_h)^2} (n - n_h)^2 \right], n \geq n_h$$

де  $A, B$  та  $m$  – константи:

$$A = \frac{(H' - H_0) Q''^2 - (H'' - H_0) Q'^2}{Q' Q'' (Q'' - Q')}; B = \frac{(H' - H_0) Q'' - (H'' - H_0) Q'}{Q' Q'' (Q'' - Q')};$$

$$m = \frac{\ln(1 - \eta' / \eta_h)}{\ln(n' / n_h - 1)^2};$$

де  $\eta$  – ККД насоса;

$n$  – швидкість обертання;

$\eta'$ ,  $\eta''$  – величини максимальних значень ККД що відповідають швидкостям  $n'$  та  $n''$ .

Вирази (2.2), (2.3) дають змогу отримати апроксимацію характеристик напору насоса і його ККД від подачі та швидкості.

### **2.2.3 Асинхронний двигуни в математичній моделі. Визначення характеристик асинхронного двигуна**

Асинхронні двигуни є складовою частиною насосних агрегатів, таким чином асинхронні двигуни є частиною даного дослідження.

Для оцінки ефективності ЕМС водопостачання буде використано коефіцієнт ефективності. Для розрахунку коефіцієнта ефективності необхідно отримати значення напору та ККД для кожного етапу циклограми споживання: дані, необхідні для розрахунку потужності асинхронного двигуна насосного агрегату на кожному інтервалі роботи, що відповідає інтервалу циклограми споживання; а також для розрахунку корисної потужності.

Для системи водопостачання з двома паралельними стояками механічна потужність, пов'язана з насосними агрегатами, розраховується окремо через різний вплив надлишкових тисків на витрати за стояками. Потім потужності додаються, щоб отримати навантаження асинхронного двигуна. Для отримання універсального засобу аналізу (для довільної кількості поверхів) енергоефективність двигуна визначається за апроксимаційними залежностями за довідником: номінального ККД в залежності від споживаної двигуном потужності та зміні ККД від рівня його завантаження [57]. За необхідності більш детального аналізу із врахуванням різних параметрів АД використано математичну модель та підхід реалізації моделі у Matlab (Simulink) [54, 58].

## 2.2.4 Визначення комплексного критерію ефективності

За [36] комплексний критерій ефективності визначається як відношення потенційної енергії води, доставленої споживачам, до електричної енергії що була витрачена насосним агрегатом на подачу зазначеного об'єму води. Для ЕМС з одним стояком за умови рівномірності споживання за поверхами, потужність накопичення корисної потенційної енергії води можна визначити як:

$$P = \rho g \frac{Q}{k} \sum_{i=1}^k h_{sti} = \frac{\rho g Q H_{st}}{k^2} \sum_{i=1}^k i = \rho g Q H_{st} \left( 1 + \left( \frac{1}{k} \right) / 2 \right), \quad (2.4)$$

де  $H_{sti}$  – статичний опір  $i$ -го поверху.

Якщо прийняти нерівномірність споживання води (що представлена циклограмою споживана – таблиця 2.1) певними етапами  $j$  тривалістю  $T$ , а потужність, що споживається НА, за  $P_l$  тоді коефіцієнт енергоефективності можна визначити як:

$$Keef = \left( \frac{\sum_{j=1}^J P_j T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j} \right) \quad (2.5)$$

## 2.3 Визначення параметрів математичної моделі систем водопостачання багатоповерхових будинків за умов впливу надлишкових тисків на витрати

В розділі 1 було проведено аналіз різних систем водопостачання багатоповерхових будинків, в тому числі було проаналізовано і системи зонного водопостачання. Не дивлячись на те, що застосовані у згаданих дослідженнях підходи знижують надлишкові тиски у системах водопостачання, в жодній з робіт не було проведено дослідження впливу зниження надлишкового тиску на роботу системи водопостачання.

Відповідно до [28], [32], [33], [34] при зменшенні надлишкових тисків зменшуються і витрати. Порівняно із системами водопостачання з одним стояком, системи паралельного зонного водопостачання зменшують надлишкові тиски. На основі цього можна зробити припущення: із зниженням надлишкових тисків у системі водопостачання, повинні знизитись і витрати.

Звернемось до припущень що були зазначені на початку розділу: що споживачі будинку мають однакову потребу у воді, але споживання за поверхами буде різним внаслідок впливу надлишкових тисків (це відбувається через витоки, застарілість обладнання, особливості споживання тощо); та те, що при збільшенні тиску у системі водопостачання на одну атмосферу, витрати будинку збільшаться на 5,5%.

Якщо застосувати зазначене для будинку у  $k$  поверхів, тоді розрахунок витрат для кожного поверху будинку можна визначити наступним чином:

$$\begin{aligned} Q_{k-1} &= Q_k [1 + (h_k + RQ_k^2)f] \\ Q_{k-2} &= Q_k [1 + (h_k + h_{k-1} + RQ_k^2 + R(Q_k + Q_{k-1})^2)f] \\ &\dots \\ Q_i &= Q_k + fQ_k \sum_{j=i+1}^k \left[ h_j + R \left( \sum_{q=j}^k Q_q \right)^2 \right], \end{aligned}$$

де  $Q_i$  – подача на  $i$ -ому поверсі;

$h_j$  – різниця висот між поверхами;

$f$  – коефіцієнт, що враховує вплив надлишкового тиску на зміну витрат поверху.

Коефіцієнт розраховується за формулою:  $f=F/(100*10)$ . Де  $F$  – коефіцієнту впливу 1 атмосфери надлишкового тиску на відсоток збільшення водоспоживання. Наприклад, якщо витрати збільшуються на 5,5% на кожную надлишкову атмосферу, в такому випадку  $F= 5,5$ .

Отримавши рівняння подачі на поверсі, можна визначити рівняння сумарної подачі всіх поверхів будівлі:

$$Q = Q_k + \sum_{i=1}^{k-1} [Q_i] = kQ_k + fQ_k \sum_{i=1}^{k-1} \left\{ \sum_{j=i+1}^k \left[ h_j + R \left( \sum_{q=j}^k Q_q \right)^2 \right] \right\} \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) визначає сумарні витрати за поверхами, що відповідає подачі насосу в певний часовий проміжок циклограми. Тоді величину еквівалентних втрат напору у мережі водопостачання будинку, що відповідають напору насосу, можна визначити з рівняння:

$$H_m = H_{st} + k_{R1} RQ^2 + k_{Rk} RQ_k^2 + R \sum_{i=2}^{k-1} \left( \sum_{q=i}^k Q_q \right)^2, \quad (2.7)$$

де  $H_{st}$  – статичний напір (визначається як сума статичних напорів за поверхами та відповідає сумі всіх  $h_j$  будинку).

Рівняння (2.6) та (2.7) дозволяють визначити величину опору  $R$  і витрати на останньому поверсі ( $Q_k$ ) за умови відомої подачі насосу, яка відповідає максимальній подачі за циклограмою (за даних умов витрати останнього поверху є потребою, а за менших подач втрати напору у мережі будуть меншими і на останньому поверсі також будуть надлишкові напори). Через те що графік споживання води у житловому будинку нерівномірний – про що свідчить циклограма споживання (Таблиця 2.1) – необхідно розраховувати витрати за поверхами для кожного періоду циклограми. Для цього необхідно розрахувати мінімально потрібний напір на поверсі  $H_{min}$  (відповідає випадку відсутності надлишкових напорів на поверсі і є базою для визначення величини надлишковості напору). В нашому випадку мінімально потрібний напір на поверсі може відповідати напору на останньому поверсі за максимальної подачі, і визначається у виразі (2.7) як  $k_{Rk} RQ_k^2$ . Для подальших розрахунків трансформуємо цей вираз:

$$k_{Rk} RQ_k^2 = RQ_k^2 + k_{Rk} RQ_k^2 - RQ_k^2 = RQ_k^2 + R(k_{Rk} - 1)Q_k^2$$

Вираз мінімально необхідного напору на останньому поверсі має вигляд:

$$H_{r \min} = H_m - H_{st} - k_{R1} RQ^2 - R \sum_{i=2}^k \left( \sum_{q=i}^k Q_q \right)^2 = R(k_{Rk} - 1)Q_k^2, \quad (2.8)$$

Визначивши мінімально необхідний напір, можна визначити потребу у воді для кожної ділянки циклограми (за умови що надлишковий тиск на ввіді в будинок дорівнює нулю,  $H_{\Delta} = 0$ ).

$$\begin{aligned}
Q_{1c} &= Q_{rc} + fQ_{rc} \left[ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta} - H_{r\min} - k_{R1}RQ_c^2 - h_1 \right]; \\
Q_{2c} &= Q_{rc} + fQ_{rc} \left[ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta} - H_{r\min} - k_{R1}RQ_c^2 - h_1 - h_2 - R(Q_c - Q_{1c})^2 \right]; \\
Q_{3c} &= Q_{rc} + fQ_{rc} \left[ \begin{aligned} &H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta} - H_{r\min} - k_{R1}RQ_c^2 - h_1 - h_2 - h_3 - R(Q_c - Q_{1c})^2 - \\ &- R(Q_c - Q_{1c} - Q_{2c})^2 \end{aligned} \right]; \\
&\dots \\
Q_{ic} &= Q_{rc} + fQ_{rc} \left\{ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta} - H_{r\min} - k_{R1}RQ_c^2 - h_1 - \sum_{j=2}^i \left[ h_j + R \left( Q_c - \sum_{q=j-1}^{i-1} Q_{qc} \right)^2 \right] \right\}; \\
Q_c &= k \left\{ Q_{rc} + fQ_{rc} \left[ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta} - H_{r\min} - k_{R1}RQ_c^2 - h_1 \right] + \right. \\
&\quad \left. + fQ_{rc} \sum_{i=2}^k \left\{ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta} - H_{r\min} - \sum_{j=2}^i \left[ h_j + R \left( Q_c - \sum_{q=j-1}^{i-1} Q_{qc} \right)^2 \right] \right\} \right\}, \quad (2.9)
\end{aligned}$$

де  $Q_{ic}$  – витрата води  $i$ -го поверху для періоду циклограми споживання з номером  $c$ ;

$Q_{rc}$  – потреба у воді для періоду циклограми споживання з номером  $c$ ;

$H_{pc}(Q_c)$  – напір насосу для періоду циклограми з витратами  $Q_c$  (визначається за апроксимацію напірної характеристики насосу).

Розв’язок рівняння (2.9) відносно  $Q_{rc}$  для кожного періоду циклограми споживання з відомим значенням  $Q_c$  дозволяє визначити циклограму потреб. Визначені циклограми потреб дозволяють порахувати добові витрати  $Q_d$ , м<sup>3</sup>/добу.

$$Q_d = \sum_{c=1}^{N_c} T_c \left\{ \begin{aligned} &kQ_{rc} + kfQ_{rc} \left[ H_{pc}(Q_{c\Delta}) + H_{\Delta} - H_{r\min} - k_{R1}RQ_{c\Delta}^2 - h_1 \right] + \\ &+ fQ_{rc} \sum_{i=2}^k \left\{ H_{pc}(Q_{c\Delta}) + H_{\Delta} - H_{r\min} - \sum_{j=2}^i \left[ h_j + R \left( \sum_{q=j}^k Q_{qc} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (2.10)$$

де  $N_c$  – кількість періодів циклограми;

$T_c$  – тривалість періоду у годинах.

Для визначення добових витрат за (2.10) на кожному періоді циклограми споживання необхідно розв’язувати рівняння (2.8) відносно  $Q_c$  (у (2.9)  $Q_c$

відповідає  $Q_{c\Delta}$ ) з відомими значеннями  $Q_{rc}$  та  $H_{\Delta}$ . Добові витрати за (2.10) будуть відповідати добовим витратам за заданою циклограмою, якщо задана вірна величина  $f$ . Цю величину визначено ітераційно. За умови впливу тиску на витрати на рівні 5% на кожен атмосферу надлишкового тиску відповідно до експериментальних даних вона становить 5,5%.

Отже проведено уточнення математичної моделі системи водопостачання багатоповерхового будинку: враховано вплив надлишкових тисків в системі водопостачання на зміну витрат. Отримані результати дозволять більш точно оцінити ефективність систем водопостачання через те, що для розрахунку коефіцієнта енергоефективності у виразі (2.4) буде використано значення витрат що відповідають потребам споживачів, а не загальна кількість спожитої за циклограмою води.

## **2.4 Врахування зміни тиску зовнішньої мережі і для оцінки ефективності ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку**

В п. 2.3 представлено рівняння (2.9), (2.10) для розрахунку витрат з урахуванням впливу надлишкових тисків в зовнішній системі. Оскільки наслідком впровадження системи паралельного зонного водопостачання (замість системи водопостачання з одним стояком) є зниження надлишкового тиску, важливо врахувати вплив зменшення надлишкового тиску на витрату в математичній моделі з урахуванням надлишкових тисків в зовнішній системі.

Рівняння (2.6), (2.7) дозволять визначити параметри опору ділянки стояка  $R$  та потреби  $Q_k$  для періоду максимальної подачі циклограми. При цьому, за умови конструкції системи водопостачання, коли вода подається з підвального приміщення до останнього поверху з відгалуженнями на поверхах, на останньому поверсі немає надлишкових тисків, що впливали б на збільшення витрат; витрати в такому випадку відповідають потребам споживачів. Потреба однакова для усіх споживачів будинку. Якщо на останньому поверсі потреба дорівнює витратам, то

на всіх інших потреба буде меншою за витрати, і витрати будуть відрізнятись в залежності від величини надлишкового тиску з урахуванням коефіцієнта  $f$ .

При зміні періоду максимального споживання мешканцями будівлі на менше споживання (відповідно до циклограми), зменшуються втрати напору у мережі водопостачання будинку. Можна зробити припущення, що у сусідніх житлових будинках також зменшаться втрати напору у мережах водопостачання. В такому випадку, за умови живлення житлових будинків від централізованої мережі водопостачання, зменшення споживання у будинках приєднаних до даної мережі, може викликати збільшення напору у центральній мережі, а отже і до збільшення напорів на ввіді будинків. Таке збільшення напору у (2.9), (2.10) позначено через  $H_{\Delta}$ .

Оскільки зміна тиску зовнішньої мережі може впливати на роботу системи водопостачання будинку, зокрема на витрати, пов'язані із збільшенням цього тиску, необхідно врахувати добову зміну  $H_{\Delta}$  у подальших розрахунках. Для цього встановимо взаємозв'язок між зміною тиску в зовнішній мережі із подачею у певний період циклограми. Якщо зміна втрат напору у зовнішній мережі та у мережі водопостачання будинку співпадають у часі (наприклад, відповідають діаграмі споживання), тоді справедливими є співвідношення витрат за циклограмою  $Q_c/Q_{cmin}$  та співвідношення для зовнішньої мережі  $Q_z/Q_{zmin}$ , отже справедливим буде і співвідношення  $Q_z = Q_{zmin} * Q_c/Q_{cmin}$ . Якщо розглядається зміна напору зовнішньої мережі, тоді необхідно врахувати і діапазон зміни напору, тобто  $H_{\Delta max} = H_{zmax} - H_{zmin}$ . Тоді максимум та мінімум значення напорів зовнішньої мережі можна визначити як:

$$H_{z max} = H_{zp} - R_z Q_{z min}^2; H_{z min} = H_{zp} - R_z Q_{z min}^2 (Q_{c max} / Q_{c min})^2;$$

$$H_z = H_{zp} - R_z Q_{z min}^2 (Q_c / Q_{c min})^2,$$

Через різницю першого та другого та першого та третього рівняння можна виразити величину  $R_z Q_{z min}^2$ . Врахувавши що  $H_{\Delta} = H_z - H_{zmin}$ , а також прирівнявши праві частини цих рівнянь після перетворення отримаємо рівняння у залежності від величини витрат за циклограмою споживання:



$$\frac{H_{z \max} - H_{z \min}}{(Q_{c \max} / Q_{c \min})^2 - 1} = \frac{H_{z \max} - H_z}{(Q_c / Q_{c \min})^2 - 1},$$

$$H_{\Delta}(Q_c) = H_{\Delta \max} \left( 1 + \frac{Q_{c \min}^2}{Q_{c \max}^2 - Q_{c \min}^2} - \frac{Q_c^2}{Q_{c \max}^2 - Q_{c \min}^2} \right) \quad (2.11)$$

Тоді рівняння для етапів циклограми потреб мають вигляд:

$$Q_c = k \left\{ Q_{rc} + f Q_{rc} \left[ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta}(Q_c) - H_{r \min} - k_{R1} R Q_c^2 - h_1 \right] + \right. \\ \left. + f Q_{rc} \sum_{i=2}^k \left\{ H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta}(Q_c) - H_{r \min} - \sum_{j=2}^i \left[ h_j + R \left( Q_c - \sum_{q=j-1}^{i-1} Q_{qc} \right)^2 \right] \right\} \right\}, \quad (2.12)$$

$$Q_{ic} = Q_{rc} + f Q_{rc} \left\{ \begin{aligned} & H_{pc}(Q_c) + H_{\Delta}(Q_c) - H_{r \min} - k_{R1} R Q_c^2 - h_1 - \\ & - \sum_{j=2}^i \left[ h_j + R \left( Q_c - \sum_{q=j-1}^{i-1} Q_{qc} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\}, \quad (2.13)$$

де  $Q_{qc}(Q_{ic})$  – витрата поверху з індексом  $q$  ( $i$ ) для періоду циклограми з номером  $c$ ;

$Q_{rc}$  – потреба поверху у воді для періоду циклограми з номером  $c$ ;

$H_{pc}(Q_c)$  – напір первинного насосу для періоду циклограми споживання що відповідають витратам  $Q_c$  (визначається за апроксимацією напірної характеристики насосу із урахуванням завантаження асинхронного двигуна насосного агрегату);

$H_{\Delta}(Q_c)$  – величина зміни вхідного тиску від магістрального трубопроводу (тиск на ввіді в будинок);

$H_{r \min} = R(k_{Rk} - 1)Q_k^2$  – мінімальне значення напору на поверсі (визначено гідравлічними опорами розгалуженої мережі на стороні споживача), що розраховується для періоду циклограми споживання за максимальної подачі насосу.

Розв'язок рівняння (2.13) відносно  $Q_{rc}$  для відповідних витрат по циклограмі споживання дозволяє розрахувати циклограму потреб з урахуванням добових коливань тиску зовнішньої мережі.

Отже, отримано загальні рівняння для розрахунку параметрів систем водопостачання, що можуть бути використані як для систем з одним стояком, так і для систем паралельного зонного водопостачання.

## **2.5 Корекція характеристик насосного агрегату: трансформація відповідно до зміни кількості поверхів та зміни типу системи водопостачання**

Для подальшого дослідження необхідно виконати корекцію експлуатаційних характеристик базового насосного агрегату. Параметри системи водопостачання за поверхами ( $R$  – гідравлічний опір ділянки стояку; мінімально потрібний напір на поверсі  $H_{min}$ ; циклограма потреб  $Q_{rc}$ ) визначено відносно прийнятого базового варіанту системи 7 поверхового будинку. За зміни умов дослідження, наприклад, для систем водопостачання дванадцятиповерхового будинку (за незмінних параметрів поверху) необхідно змінити характеристики насосу відповідно до потрібного збільшення напору і подачі.

Для коректного порівняння варіантів систем дослідження залишимо незмінною енергетичну ефективність насосу, як у базовому варіанті. Для цього застосуємо трансформацію коефіцієнтів поліномів (2.3) характеристик базового насосу відповідно до зміни умов роботи. Так, для системи водопостачання дванадцятиповерхового будинку з одним стояком, необхідно використати модельний насос, координати точок характеристик якого (тиск та подача для визначення констант  $A$ ,  $B$  у (2.3)) збільшено у  $12/7$  разів. Коефіцієнт  $12/7$  отримано через те, що базовий насосний агрегат було вибрано для системи водопостачання семиповерхового будинку, відповідно модельний насос по своїм характеристикам має відповідати потребам системи водопостачання дванадцятиповерхового будинку. Отриманому модельному насосу має відповідати і потужність асинхронного двигуна, яка повинна бути більшою за потужність базового насосного агрегату у  $144/49$  рази. Коефіцієнт  $144/49$

отримано відповідно до рівняння корисної потужності [37]:  $N_k = \rho g H Q$  (тобто через збільшення  $H$ , і  $Q$  у  $12/7$  рази).

Необхідно трансформувати напір та подачу  $i$  для системи паралельного зонного водопостачання з двома стояками. Для меншого стояка (водопостачання на 1-6 поверхи) коефіцієнт зменшення подачі –  $6/7$  (через те що  $12/7/2 = 6/7$ ); напір відповідає  $H_{st}$  шести поверхам. Для більшого стояка (водопостачання 7-12 поверхів) коефіцієнт зменшення подачі –  $6/7$ ; коефіцієнт збільшення напору –  $12/7$  (розрахований за аналогією із системою з одним стояком).

Для розрахунку коефіцієнта ефективності (подібного до описаного рівнянням (2.5)) необхідно отримати значення напору та ККД для кожного етапу циклограми споживання: це необхідно для розрахунку потужності асинхронного двигуна що приводить в рух вал насоса. Також це необхідно для розрахунку корисної потужності. Для цього необхідно для кожного етапу циклограми потреб розв'язувати рівняння (2.12) та (2.13) відносно  $Q_c$ .

Для системи водопостачання з двома паралельними стояками механічна потужність, пов'язана з насосами, розраховується окремо через різний вплив надлишкових тисків на витрати за стояками. Потім потужності додаються, щоб отримати навантаження асинхронного двигуна. Енергоефективність двигуна визначається за апроксимаційними залежностями за довідником: номінального ККД в залежності від споживаної двигуном потужності та зміні ККД від рівня його завантаження [33]. Закономірність зміни ККД від потужності на валу двигуна, визначається із розв'язанням рівняння відносно номінальної споживаної потужності.

## **2.6 Розробка комплексного критерію для оцінки енергоефективності та ресурсоефективності та програмна реалізація математичної моделі**

Якщо питання енергоефективності систем водопостачання розкрито досить добре, то термін «ресурсоефективність» потребує пояснення. В даному

дослідженні під ресурсоефективністю необхідно розуміти наскільки одна система водопостачання є більш ефективною по відношенню до іншої з погляду на споживання води за однакових умов (однакова кількість поверхів, однакова кількість споживачів, однакові патерни споживання тощо). Отже в даному контексті ресурс – це вода.

У [36] дослідження енергоефективності систем водопостачання обмежується розрахунком саме коефіцієнту енергоефективності. Ймовірно, що для більш повної оцінки ефективності системи водопостачання, її варто оцінити і за коефіцієнтом ресурсоефективності. Певно що для кращого розуміння наскільки одна система є ефективнішою за іншу, є сенс оцінити ефективність у кількості зекономлених грошей: тобто оцінити ефективність системи водопостачання виразивши її у гривнях.

Оскільки у системах паралельного зонного водопостачання за однакових умов із системами водопостачання з одним стояком (кількість поверхів, однакова циклограма споживання (потреб), однаковий діаметр труб стояків тощо) менші надлишкові тиски, можна припустити що і витрата в такій системі буде нижчою. В такому випадку комплексні коефіцієнти ефективності повинні враховувати і енергетичну складову, і ресурсну.

Комплексні коефіцієнти ефективності будуть розраховуватись як відношення витраченої корисної енергії на підйом води до споживачів відповідно до визначених потреб, до енергії що була витрачена асинхронним двигуном, що приводив у рух насоси та спожитої системою води. Уточнення по підходу до розрахунку коефіцієнту енергоефективності по відношенню до підходів описаних у [36]: у цьому дослідженні для розрахунку затраченої корисної енергії на підйом води береться не весь об'єм піднятої води відповідно до циклограми споживання, а береться тільки та частина піднятої до споживачів води що відповідає їх потребам.

Також для більш детального підходу до оцінки ефективності систем водопостачання до формул розрахунку комплексних коефіцієнтів ефективності введено відповідні вартості води та електроенергії, що дозволять оцінити ефект

економії від впровадження системи паралельного зонного водопостачання у гривневому еквіваленті. Даний підхід дозволяє оцінити доцільність заміни систем водопостачання з одним стояком на систему паралельного зонного водопостачання не взагалі, а за конкретних умов – цін, що встановлені на воду та електроенергію у певному місті чи регіоні.

Розроблений коефіцієнт ефективності представлено рівнянням (2.14):

$$K_{ef} = \rho g H_{st} 0.5(k+1) \sum_{c=1}^{N_c} Q_{rc} T_c \left/ \sum_{c=1}^{N_c} T_c (c_e P_{1c} + c_w Q_c) \right., \quad (2.14)$$

де  $c_e$  – вартість електроенергії, кВт\*год;

$c_w$  – вартість 1 м<sup>3</sup> води;

$P_{1c}$  – потужність електроенергії спожитої асинхронним двигуном насосного агрегату;

$N_c$  – кількість періодів добової циклограми споживання.

Трансформація виразу (2.14) дозволить отримати рівняння комплексних критеріїв оцінки ефективності системи водопостачання з двома паралельними стояками. При використанні виразу (2.14) для оцінки ефективності системи водопостачання з одним стояком та системи з двома паралельними стояками, в обох випадках можна вилучити чисельники через їх рівність, і визначити ступінь збільшення коефіцієнту енергоефективності системи паралельного зонного водопостачання з двома стояками та питому вагу економії води за умови застосування такої системи (а також порівняння цих показників економії через їх відношення):

$$\delta K_{ef} = \sum_{c=1}^{N_c} T_c (c_e P_{1cI} + c_w Q_{cI}) \left/ \sum_{c=1}^{N_c} T_c (c_e P_{1cII} + c_w Q_{cII}) \right.; \quad (2.15)$$

$$\delta c = \sum_{c=1}^{N_c} T_c c_w (Q_{cI} - Q_{cII}) \left/ \sum_{c=1}^{N_c} T_c c_e (P_{1cI} - P_{1cII}) \right., \quad (2.16)$$

Індекси I та II у рівняннях (2.15) та (2.16) вказують на значення що відповідають системі з одним стояком чи системі з двома паралельними стояками відповідно.

Програмна реалізація математичної моделі описаної у пункті 2.4 представлена на рис. 2.2

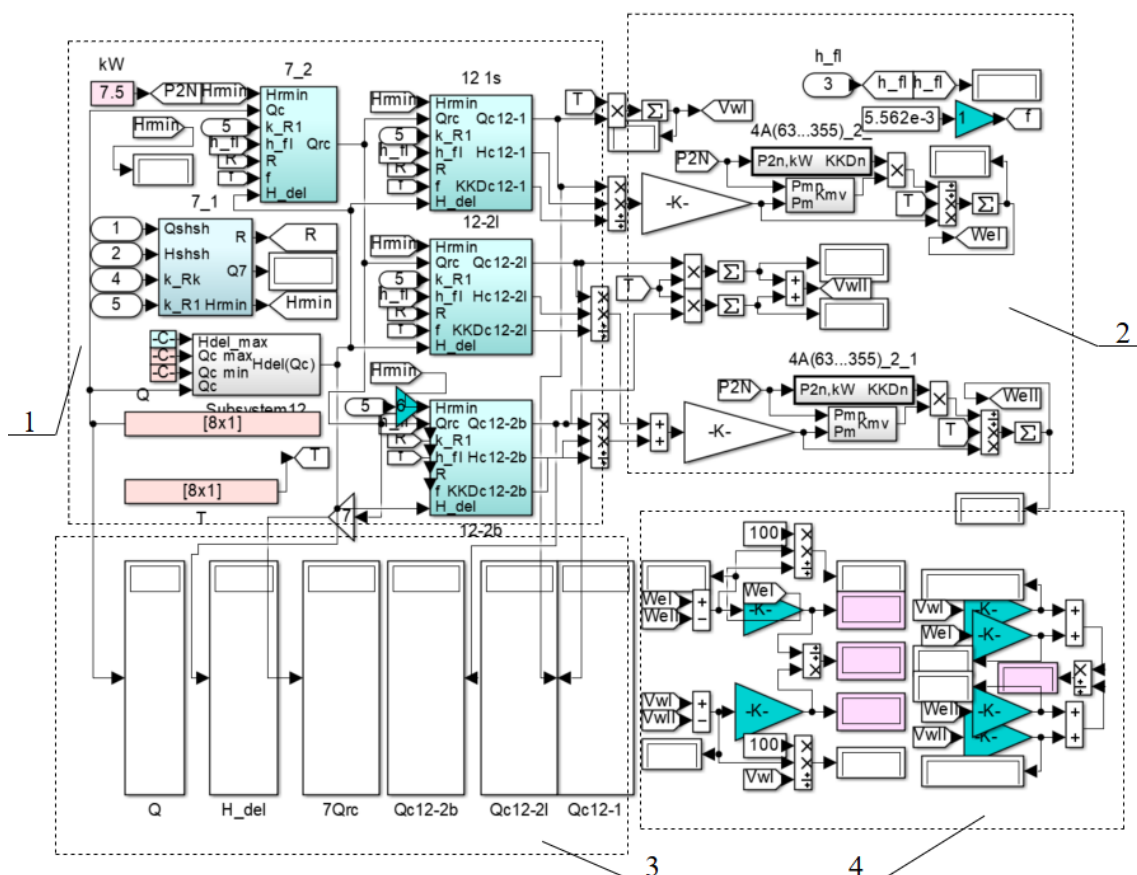


Рисунок 2.2 – Програмна реалізація математичної моделі для оцінки ефективності ЕМС водопостачання з одним стояком та з двома паралельними

Математичну модель реалізовано за допомогою засобів Matlab (Simulink). Для спрощення навігації по моделі представлений на рис. 2.2 окремі елементи моделі зібрано у певні групи (пронумеровані на рисунку 1-4), а також додатково на рис. 2.3. представлено алгоритм за яким будуть відбуватися розрахунки.

Умовно можна зазначити, що групи полів 1 та 2 «відповідають» за розрахунки; групи 3 та 4 – за індикацію. Розрахунок починається з визначення значень  $R$  та  $H_{min}$  (група полів 1, блок 7\_1), а потім визначається  $Q_{rc}$  (група полів 1, блок 7\_2). Отримані дані дають змогу розрахувати  $Q_c$  та  $H_c$  для обох систем водопостачання: блок 12 1s – для системи водопостачання з одним стояком; блоки 12-2l та 12-2b – для системи паралельного зонного водопостачання, для меншого

(12-2l) та для більшого (12-2b) стояків. Параметри циклограми задаються у двох довгих блоках (група 1), що мають рожевий колір із значеннями в кожному  $8 \times 1$ , відповідні значення подач будуть відображатися у блоці Q (крайній зліва у групі полів 2). Розраховані значення потреб для відповідних етапів циклограми будуть відображено у блоках  $Q_{c12-2b}$ ,  $Q_{c12-2l}$ ,  $Q_{c12-1}$  (група 2): для більшого стояка ( $Q_{c12-2b}$ ), меншого ( $Q_{c12-2l}$ ) системи паралельного зонного водопостачання та у блоці  $Q_{c12-1}$  – для ЕМС з одним стояком. У групі полів 4 у трикутних блоках задаються відповідні значення вартості води та електроенергії. Результати розрахунків енергоефективності, представлені як у відсотках так, у гривні, а також їх співвідношення, також будуть виведено у групі 4 (вертикально розташовані п'ять прямокутників з трьома рожевими посередині).

Зображений на рис. 2.3 алгоритм доповнює програмну реалізацію математичної моделі, показану на рис 2.3. Алгоритм візуалізує послідовність розрахунків, необхідних для отримання значень коефіцієнту ефективності. Числами у дужках позначено номери рівнянь, що використовуються для виконання вказаної в даному блоці операції.

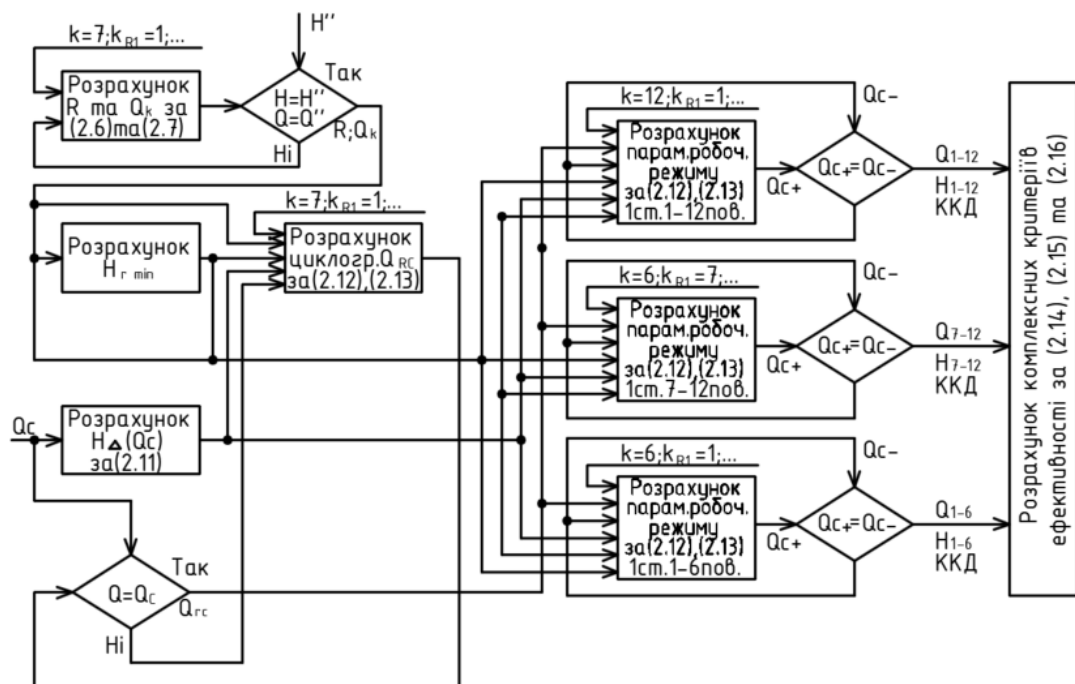


Рисунок 2.3 – Алгоритм розрахунку за математичною моделлю, рис. 2.2

## **2.7 Засоби дослідження ефективності системи паралельного зонного водопостачання з трьома різнорівневими стояками**

Вище представлено модель для дослідження ефективності системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків, а також «програмний інструмент» порівняння ефективності ЕМС з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання з двох стояків. Отримані результати дають змогу припустити, що система паралельного зонного водопостачання з трьох стояків може дати кращі показники ефективності як по відношенню до ЕМС з одним стояком так і по відношенню до системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків.

Для подальшого дослідження і коректного порівняння результатів ефективності обох систем паралельного зонного водопостачання візьмемо ті самі умови і вихідні дані що і для системи з двома паралельними стояками. Житловий будинок – дванадцять поверхів із висотою поверху 2,8 м. Добова циклограма споживання – таблиця 2.1. Споживання за поверхами не рівномірне: коефіцієнт  $F$  що відповідає за вплив надлишкового тиску на витрату у системі водопостачання теж дорівнює 5,5%. Мінімально необхідний тиск забезпечується централізованою системою водопостачання до якої приєднано даний будинок. Насосний агрегат компенсує втрати тиску пов'язані із транспортуванням води до споживачів будинку. На відміну від попереднього, даний НА забезпечує подачу води до трьох паралельних трубопроводів (тобто насос має три виходи для подачі води до трьох стояків).

В пункті 2.3 було представлено алгоритм розрахунку параметрів ЕМС за умови впливу надлишкових тисків на витрату. Окремі параметри рівняння визначення сумарних витрат за нерівномірного розподілу витрат за поверхами, а також рівняння для розрахунку еквівалентних втрат напору у системі що відповідають напору насосу, отриманих у 2.3 потребують уточнення:



$$Q = kQ_k + fQ_k \sum_{i=1}^{k-1} \left\{ \sum_{j=i+1}^k \left[ h_j + R \left( \sum_{q=j}^k Q_q \right)^2 \right] \right\}, \quad (2.17)$$

$$H_p(Q) = H_{st} + k_{RI} R Q^2 + k_{Rk} R Q_k^2 + R \sum_{i=2}^{k-1} \left( \sum_{q=i}^k Q_q \right)^2, \quad (2.18)$$

де  $k$  – кількість поверхів у будівлі (значення для системи з одним стояком – 12, за використання під час розрахунків ЕМС з трьома паралельними стояками – 4);

$k_{RI}$  та  $k_{Rk}$  – коефіцієнти збільшення опору що враховують опір трубопроводу від насосу до першого відгалуження у стояку та опір горизонтального розведення локального трубопроводу (квартири) відповідно, для ЕМС з трьома стояками:  $k_{RI}=1$  – для стояка по якому вода подається з 1 по 4 поверхи,  $k_{RI}=4$  – для стояка по якому подається вода з 5 по 8 поверхи,  $k_{RI}=8$  – для стояка по якому подається вода з 9 по 12 поверхи;

$f$  – коефіцієнт, що враховує вплив надлишкового тиску на зміну витрати – залишається без змін:  $f=5,5 \cdot 10^{-3}$ .

Скористаємось рівняннями (2.17), (2.18) для визначення гідравлічного опору  $R$  та потреби  $Q_k$  (тобто витрати на дванадцятому поверсі). Розв’язок системи рівнянь виконано для точки максимальної подачі у робочому діапазоні насосу. Отримання значення гідравлічного опору дає змогу визначити потреб для кожної ділянки добової циклограми споживання.

Для розрахунку коефіцієнту ресурсної та енергетичної ефективності скористаємось рівнянням (2.14). Для порівняння ефективності системи водопостачання з трьома стояками із системою з одним стояком, через рівність чисельників у рівнянні (2.14), чисельники можна прибрати. Тоді коефіцієнт порівняльної ефективності буде мати вигляд:

$$\delta Kef = \sum_{c=1}^{Nc} T_c (c_e P_{1cI} + c_w Q_{cI}) / \sum_{c=1}^{Nc} T_c (c_e P_{1cIII} + c_w Q_{cIII}) \quad (2.19)$$

Де індекси I та III вказують на кількість стояків.

Відповідно, питому вагу економії води порівняно з енергетичною економією можна визначити з рівняння (2.20):

$$\delta c = \frac{\sum_{c=1}^{N_c} T_c c_w (Q_{cl} - Q_{cIII})}{\sum_{c=1}^{N_c} T_c c_e (P_{1cl} - P_{1cIII})} \quad (2.20)$$

Підхід до реалізації отриманої математичної моделі порівняльного дослідження системи з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання з трьох стояків за допомогою засобів Matlab (Simulink) досить близький до реалізації порівняльного дослідження ефективності ЕМС з одним стояком із системою паралельного зонного водопостачання з двох стояків.

Принципова відмінність полягає у додаванні блоку 12-2m (рис. 2.4) для обрахунку

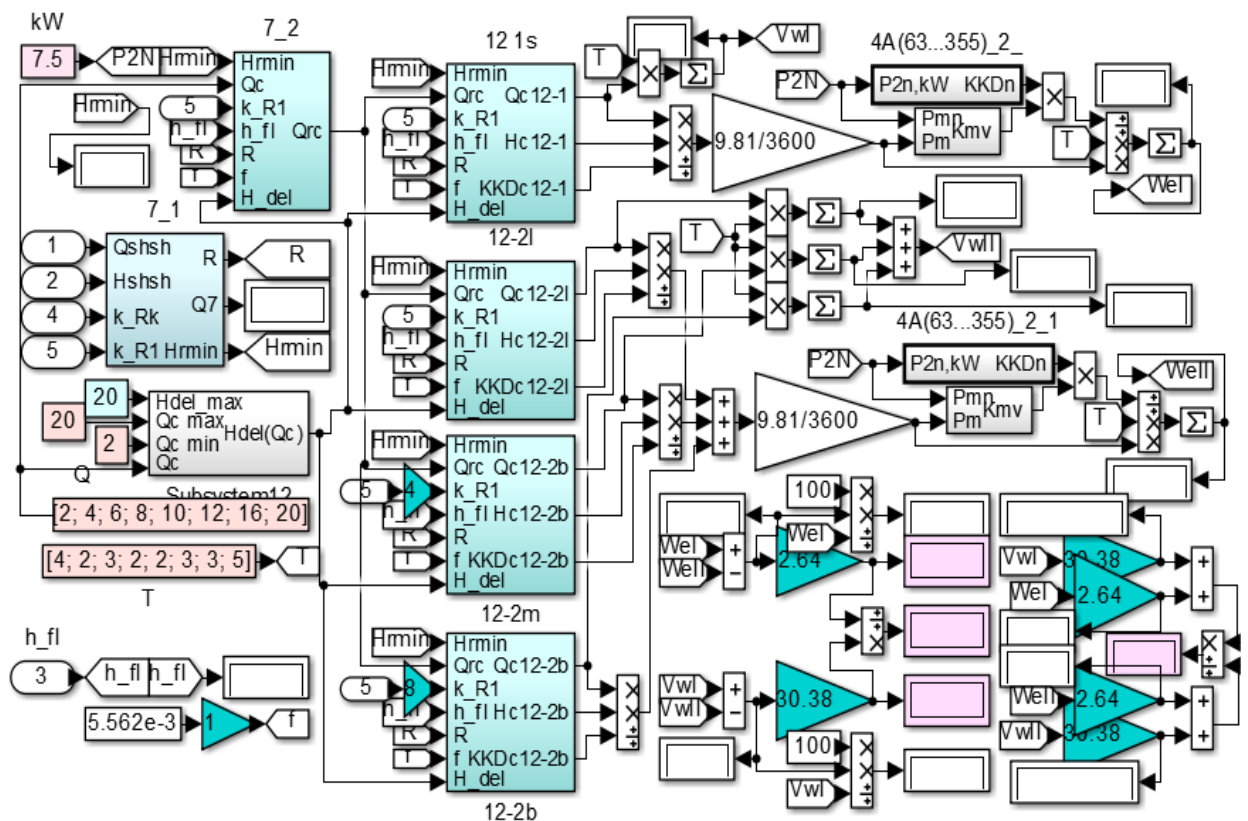


Рисунок 2.4 – Програмна реалізація математичної моделі для порівняльної оцінки ефективності ЕМС водопостачання з одним стояком та з трьома паралельними

Наукові результати отримані у розділі 2 опубліковано у [54], [59], [56], [55], та пройшли апробацію [60], [61], [62].

## **Висновки до Розділу 2**

Розроблено математичні моделі і їх програмну реалізацію для комплексного дослідження розгалужених електромеханічних систем водопостачання із асинхронним електроприводом.

На першому етапі розроблено математичну модель що дає змогу розраховувати параметри електромеханічних систем паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків. Також запропонована модель дає змогу порівнювати ЕМС водопостачання з одним стояком із системою паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків. Запропоновано здійснювати порівняння за параметром енергоефективності. Розроблена модель не враховувала вплив надлишкових тисків на витрати, тому потребувала уточнення: оцінити вплив надлишкових тисків що виникають у стояках системи водопостачання на витрати за поверхами.

Проведено корегування математичної моделі з урахуванням впливу надлишкового тиску на витрати з метою отримання більш точних результатів при оцінці ефективності ЕМС водопостачання багатоповерхових будинків. Внесені зміни дали можливість описати математичну модель для більш точного визначення витрат, а також розширити можливості оцінки ефективності систем водопостачання – як за параметром енергоефективності так і за параметром ресурсоефективності. В результаті проведених уточнень розроблено математичні моделі для розрахунку параметрів ЕМС паралельного зонного водопостачання що складаються з двох та трьох стояків.

Розроблено вираз комплексного критерію ефективності розгалужених електромеханічних систем водопостачання, що визначає співвідношення корисного продукту системи (обсяг потрібної і доставленої споживачу води) із спожитими ресурсами. Комплексний коефіцієнт оцінки ефективності систем водопостачання дає змогу виконати порівняння енергетичної та ресурсної ефективності як у відносних одиницях, так і грошовому еквіваленті відповідно до вартостей води та електроенергії. Виконано програмну реалізацію вказаних математичних моделей (з допомогою засобів Matlab Simulink).

### **РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ, РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА РЕСУРСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

#### **3.1 Порівняння ЕМС паралельного зонного водопостачання із системою з одним стояком за критерієм енергетичної ефективності**

У розділі 2 розроблено математичну модель для проведення досліджень ефективності систем паралельного зонного водопостачання та її програмну реалізацію у середовищі Matlab (Simulink). За допомогою розробленої математичної моделі, першим кроком є порівняння ефективності двох ЕМС водопостачання: системи з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання, що складається з двох стояків.

Визначаємо опір  $R$ , використавши рівняння (2.6), (2.7). Для цього можна скористатись прикладом семиповерхового будинку і підходом [36] із використанням відцентрового насосу К-20/30. Циклограма водоспоживання представлена у табл. 2.1. Для обраного насосу величина напору за нульової подачі  $H_0$  становить 21,1 м; значення номінальної подачі  $Q_n$  – 19 м<sup>3</sup>/год; номінальний ККД – 0,625; номінальна швидкість обертання – 2900 об/хв. Координати початкової та кінцевої точок робочої ділянки напірної характеристики (для ККД що становить 0,9-0,95 від номінального): ( $Q' = 10,3$ ;  $H' = 27,2$ ) та ( $Q'' = 23,3$ ;  $H'' = 23,2$ ) відповідно. Величини максимумів ККД при швидкостях меншій та більшій за номінальну:  $n' = 2000$  об/хв.,  $n'' = 4000$  об/хв. Відповідно до (2.2) та (2.3) для семиповерхового будинку ( $k=7$ ), за значення максимальної подачі  $Q''=23,3$  м<sup>3</sup>/год, за рівності висоти всіх поверхів будинку (із висотою поверху 2,8 м) та за значень  $k_{Rk} = 250$  та  $k_{RI} = 1$ , визначено гідравлічний опір ділянки стояку  $R$ :  $R = 0,000835$  год<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>.

За умов розрахунку коефіцієнта енергоефективності для семиповерхового будинку за циклограмою споживання [36] (табл. 2.1) відповідно до (2.5) слід уточнити що кожному етапу циклограми із споживанням  $Q_j$  буде відповідати відтинок часу  $T_j$  (позначений у таблиці як час дії періоду, год). Приводним двигуном у складі ЕМС обрано АД 4А90L2У3 потужністю 3 кВт. Відповідно до зазначених умов коефіцієнт енергоефективності за (2.5) для ЕМС буде дорівнювати:  $Keef = 0,1761$ .

Для порівняння ефективності ЕМС з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання з двох стояків візьмемо дванадцятиповерховий будинок ( $k = 12$ ) без зміни параметрів поверху, застосувавши для порівняння визначені раніше параметри ( $R = 0,000835 \text{ год}^2/\text{м}^5$ ,  $k_{Rk} = 250$ ,  $k_{RI} = 1$ ,  $h_i = 2,8 \text{ м}$ ). Щоб для подальшого розрахунку скористатись характеристикою насосу К-20/30, її необхідно трансформувати у відповідні характеристики модельного насосу, який би був за своїми показниками ефективності ідентичним насосу К-20/30. Для умов дванадцятиповерхового будинку для отримання необхідних характеристик, відповідні величини напорів та подачі необхідно збільшити у 12/7 рази. Відповідно до збільшених подач та напорів, необхідно пропорційно збільшити і потужність АД ЕМС. Якщо і напір, і подача було збільшено у 12/7 разів, тоді потужність АД відповідно має бути збільшеною у 144/49 рази. Таким вимогам відповідає двигун асинхронний двигун 4А112М2У3 із номінальною потужністю 7,5 кВт. В результаті розрахунку коефіцієнту енергоефективності ЕМС з одним стояком, отримано значення  $Keef = 0,1697$ . Слід відмітити, що збільшення кількості поверхів призвело до зменшення енергоефективності системи водопостачання.

Для розрахунку коефіцієнту ефективності для ЕМС, що буде складатись з двох паралельних стояків, приймемо рівний розподіл споживачів за стояками: «більший» стояк подає воду до споживачів 7-12 поверхів, «менший» – до споживачів 1-6 поверхів. Також необхідно зробити певне припущення і для модельного насосу.

Вище для розрахунків параметрів мережі для дванадцятиповерхового будинку було прийнято модельний насос. Для здійснення подальших розрахунків для двох стояків системи водопостачання, представимо даний модельний насос у вигляді наступної конструкції: насос представлено у вигляді двох пар робочих коліс, де колеса в кожній парі встановлено послідовно, а пари робочих коліс включено до мережі паралельно (прикладом конструкції такого насосного агрегату може бути СНА з двома виходами). При цьому всі чотири колеса є однаковими. За аналогією до того як було використано коефіцієнт 12/7, щоб отримати відповідний модельний насос до насосу К-20/30, застосуємо цей підхід, щоб отримати модельний насос для системи паралельного зонного водопостачання (докладніше розділ 2, п.2.5).

Оскільки кожна з пар коліс призначена для окремого стояка, параметри рівняння витратної характеристики будуть наступними: для обох стояків  $k = 6$ ; для «меншого» стояка коефіцієнт залишається незмінним ( $k_{RI} = 1$ ), а для «більшого» стояка  $k_{RI} = 7$ . Відповідно до зазначених умов рівняння статичних напорів будуть мати вигляд:

$$H_{st6} = \sum_{i=1}^k h_i, \quad H_{st12} = 2H_{st6} = 2 \sum_{i=1}^k h_i$$

Якщо два послідовно з'єднаних робочих колеса забезпечують відповідне значення напору, необхідне для забезпечення споживачів 7-12 поверхів, тоді можна вважати, що для забезпечення водою споживачів 1-6 поверхів достатньо одного робочого колеса. В цьому випадку один насосний агрегат забезпечує водою два паралельні потоки («більший» та «менший» стояки) і для забезпечення його роботи достатньо трьох робочих коліс. Якщо припустити конструкцію насоса за якої всі робочі колеса розміщені на одному валу, тоді для приводу насоса теж можна використати двигун 4A112M2Y3.

Рівняння потужності збільшення потенційної енергії води, що доставлено споживачам, (2.4) ЕМС паралельного зонного водопостачання буде мати вигляд:

- вираз потужності збільшення потенційної енергії води, що доставлено до споживачів меншого стояка (1-6 поверхи):

$$P_s = \rho g \frac{Q}{2k} \sum_{i=1}^k h_{sti} = \frac{\rho g Q H_{st6}}{2k^2} \sum_{i=1}^k i = \rho g Q H_{st} 0,25(0,5 + 0,5/k) \quad (3.1)$$

- вираз потужності збільшення потенційної енергії води, що доставлено до споживачів більшого стояка (7-12 поверхи):

$$P_B = \rho g \frac{Q}{2k} \sum_{i=1}^k (h_{sti} + kh_i) = \frac{\rho g Q H_{st6}}{2k^2} \sum_{i=1}^k (i + k) = \rho g Q H_{st} 0,25(0,5 + 0,5/k + 1) \quad (3.2)$$

Загальна потужність збільшення потенційної енергії, доставленої до споживачів обох стояків:

$$P = P_s + P_B = \rho g Q H_{st} 0,25(1 + 1/k + 1) = \rho g Q H_{st} 0,5(1 + 0,5/k) \quad (3.3)$$

Розраховуючи коефіцієнт енергоефективності за (п.2.5), для ЕМС паралельного зонного водопостачання, із зазначеного вище, коефіцієнт зміни подачі та напору прийнято 6/7. Значення розрахованого коефіцієнта ефективності відповідно до зазначеного вище і відповідно до циклограми споживання становить  $Keef = 0,2206$ .

Порівнюючи коефіцієнти ефективності обох систем водопостачання:  $Keef = 0,1697$  (для ЕМС що базується на одному стояку) та  $Keef = 0,2206$  (для системи паралельного зонного водопостачання з двох стояків), можна дійти висновку, що система паралельного зонного водопостачання є на 30% ефективнішою за систему водопостачання з одним стояком. Результати відповідних розрахунків наведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Результати оцінки ефективності ЕМС за коефіцієнтом енергетичної ефективності

Розподіл за стояками	Кількість поверхів	$H_{st}$	$Keef$	%
Один (семиповерхового будинку)	7	$7h_i$	0,1761	103,8
Один (дванадцятиповерхового будинку)	12	$12h_i$	0,1697	100
Два паралельні (дванадцятиповерхового будинку)	6	$6h_i$	0,2206	130
	6	$6h_i$		

### 3.2 Оцінка величини впливу надлишкових тисків на витрати у багатоповерховому будинку

У розділі 2.3 було розроблено математичну модель що дозволяє врахувати дію надлишкових тисків що виникають у стояках трубопроводів на витрати. Відповідно до даної моделі оцінимо вплив надлишкових тисків для семиповерхового будинку.

З розв'язку рівнянь (2.6), (2.7) визначимо опір  $R$  і витрат на останньому поверсі  $Q_7$  за умов максимальної подачі в робочому діапазоні насосу. Прийmemo, що напір такого насосу є достатнім для забезпечення необхідного рівня тиску за ДБН [21] у максимально віддаленій точці мережі (на найвищому поверсі будинку) при цьому подача такого насосу повинна повністю забезпечувати подачу відповідно до циклограми споживання будинку (табл. 2.1). Зазначеним умовам відповідає відцентровий насос К-20/30, що забезпечує подачу і напір:  $Q''=23,3$  м<sup>3</sup>/год та  $H''=23,2$  м. Висоту поверху, значення коефіцієнтів опору прийmemo такими що були у п. 3.2:  $h_i = 2,8$  і  $k_{Rk} = 250$ ,  $k_{RI} = 1$ .

Розрахунки виконаємо за допомогою засобів Matlab (Simulink). Для знаходження значень витрат на останньому поверсі та опору застосуємо ітераційний метод, використавши стандартний функціонал Matlab блок Algebraic constraint (фрагмент реалізації програми представлено на рис. 3.1)



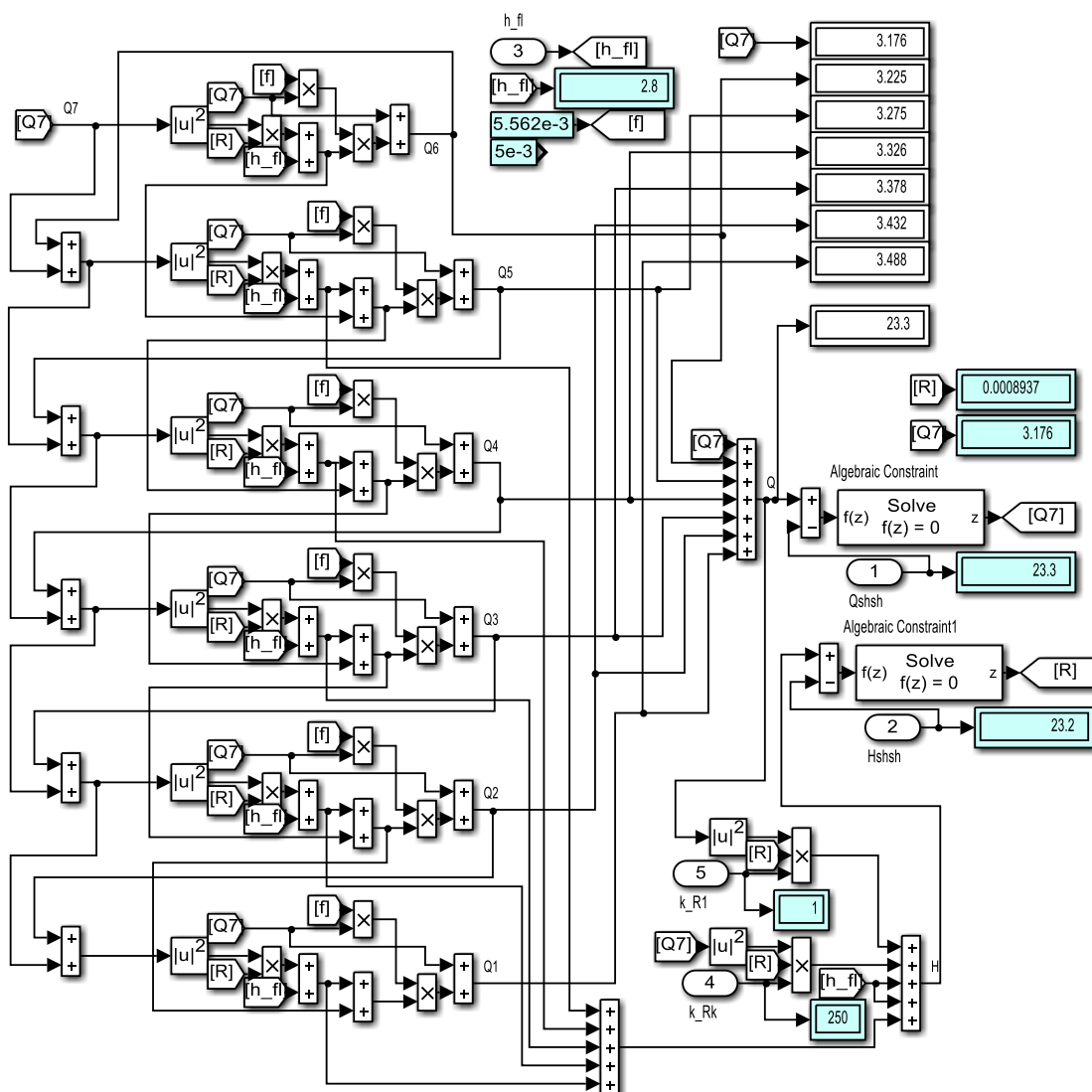


Рисунок 3.1 – Програмна реалізація знаходження значень витрат та опору із застосуванням блоку Algebraic constraint (Matlab)

В результаті розрахунку отримано значення:  $R = 0,0008937 \text{ год}^2/\text{м}^5$ ; потреби для даного періоду максимуму циклограми становлять:  $Q_7 = 3,176 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Наступним кроком оцінимо величину впливу надлишкових напорів на витрати: розрахуємо значення витрат для циклограми споживання (табл. 2.1) для надлишкових напорів на вході системи 10, 20, 30 та 40 м.

Аналіз отриманих результатів показав, що залежність між напором на вході системи та витратами є нелінійною; річні надлишкові витрати відповідно до

зазначених надлишкових напорів на вході системи водопостачання становлять: 4718, 9400, 14070 та 18696 м<sup>3</sup> відповідно. Деталізацію розрахунків для надлишкових напорів представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку витрат для надлишкових напорів  $H_{\Delta} = 10$  та 20 м

Значення за циклограмою, м <sup>3</sup> /год	$H_{\Delta}=10$				$H_{\Delta}=20$			
	Розрахункове значення, м <sup>3</sup> /год	Різниця, м <sup>3</sup> /год	Час (за циклограмою), год	Разом, м <sup>3</sup>	Розрахункове значення, м <sup>3</sup> /год	Різниця, м <sup>3</sup> /год	Час (за циклограмою, год)	Разом, м <sup>3</sup>
20	20,99	0,99	5	4,95	21,96	1,96	5	9,8
16	16,81	0,81	3	2,43	17,62	1,62	3	4,86
12	12,62	0,62	3	1,86	13,24	1,24	3	3,72
10	10,52	0,52	2	1,04	11,04	1,04	2	2,08
8	8,422	0,422	2	0,844	8,843	0,843	2	1,686
6	6,317	0,317	3	0,951	6,635	0,635	3	1,905
4	4,213	0,213	2	0,426	4,426	0,426	2	0,852
2	2,106	0,106	4	0,424	2,212	0,212	4	0,848
Разом за добу				12,92 5				25,75 1

Отже наявність надлишкових напорів на вході системи водопостачання призводить до збільшення витрат. Для семиповерхового будинку, за умов надлишкових напорів 10 – 40 м, отримано зростання витрат від 4718 до 18696 м<sup>3</sup>. Якщо оцінити зазначені надлишкові витрати у гривні (відповідно до вартості води в Києві станом на перший квартал 2024 року – 30,384 грн/м<sup>3</sup>), то витрати в гривні складуть від 143 тис. грн. до 568 тис. грн відповідно.

Розрахунки за (2.10) дають змогу оцінити розподіл надлишкових витрат для кожного поверху від першого до сьомого, для періоду циклограми з найбільшим значенням –  $Q_c=20$  м<sup>3</sup>/год. Дані розрахунків наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розподіл споживання за поверхами (м³/год)

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$
$H_{\Delta}=0$ м	2,99	2,944	2,9	2,856	2,813	2,771	2,729
$H_{\Delta}=10$ м	3,13	3,084	3,04	2,996	2,954	2,911	2,87

Таким чином, розрахунок показав, що надлишковий тиск, що виникає у стояку може значно вплинути на витрати: для семиповерхового будинку різниця витрат між першим та сьомим поверхом може складати 9%. Застосування паралельного зонного водопостачання може знизити надлишкові тиски, а отже знизити і витрати. Отримані результати показують, для подальшої оцінки ефективності при порівнянні ЕМС водопостачання з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання, важливо врахувати вплив надлишкових тисків на зміну витрат.

Надлишкові тиски в мережі водопостачання будинку можуть виникати не тільки через конструктивні особливості ЕМС (для одного і того ж будинку величини надлишкових тисків у системах з одним стояком та з кількома паралельними будуть різні), а також можуть виникати через вплив зовнішньої мережі водопостачання, до якої приєднано будинок. У розділі 2.4 представлено рівняння що описують взаємозв'язок між зміною тиску в системі водопостачання із витратами за періодом циклограми.

Зміна залежності  $H_{\Delta}(Q_c)$  за (2.11) показана на рис. 3.2

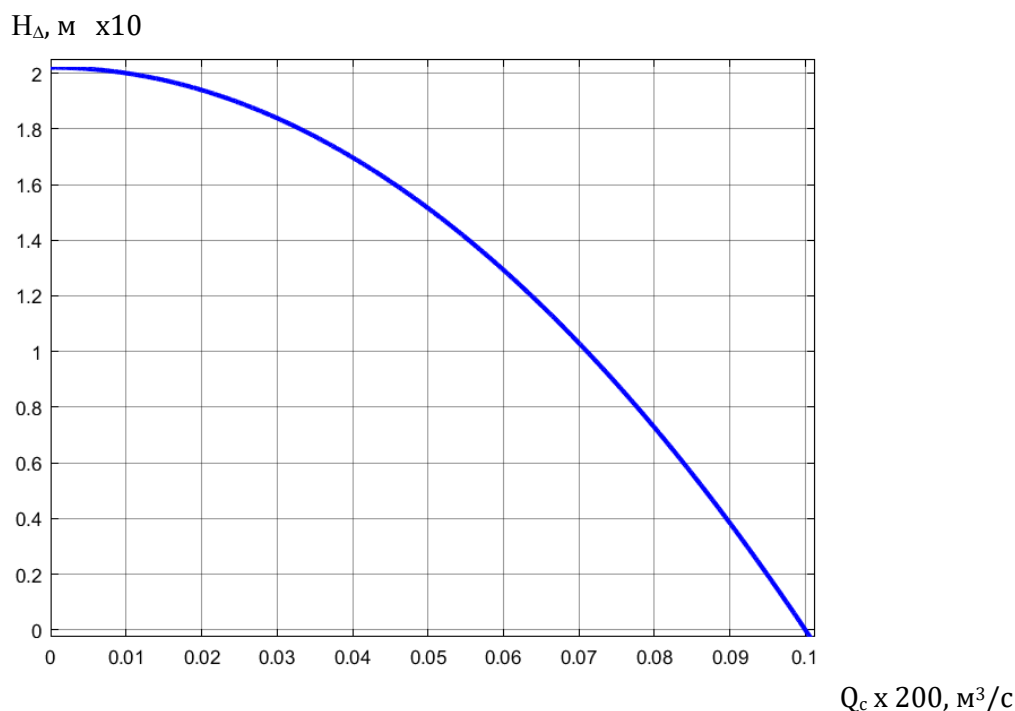


Рисунок 3.2 – Графік зміни залежності  $H_{\Delta}(Q_c)$

Досліджені впливи тиску на витрати будуть використані для уточнення математичної моделі, зокрема, використані для розрахунку циклограм за (2.12) та (2.13) і в подальшому – для розрахунку коефіцієнту енергетичної та ресурсної ефективності (2.15), (2.16).

### 3.3 Порівняльний аналіз ЕМС паралельного зонного водопостачання із системою з одним стояком за критерієм енергетичної та ресурсної ефективності (з урахуванням впливу надлишкового тиску на витрати)

У розділі 3.1 було проведено порівняння енергетичної ефективності ЕМС паралельного зонного водопостачання що складалася з двох стояків та системи водопостачання з одного стояка. Для отримання більш точного результату під час проведення подібного порівняльного аналізу, було зроблено додаткові дослідження які направлені на корекцію математичної моделі, що враховують вплив надлишкових тисків на витрати та вплив зміни тиску на вході систем

водопостачання, що відбувається через зміну тиску в магістральній мережі. Крім того було збільшено кількість критеріїв для оцінки ефективності систем водопостачання: додано критерій ресурсної ефективності, а також показники оцінки енергетичної та ресурсної ефективності виражені у грошах (з урахуванням вартості води та електроенергії). Опис розробки зазначеного критерію ефективності наведено у розділі 2.6. Виконаємо розрахунок коефіцієнтів ефективності за допомогою програмної реалізації представленої у розділі 2.6.1. Результати розрахунку представлено на рис. 3.3.

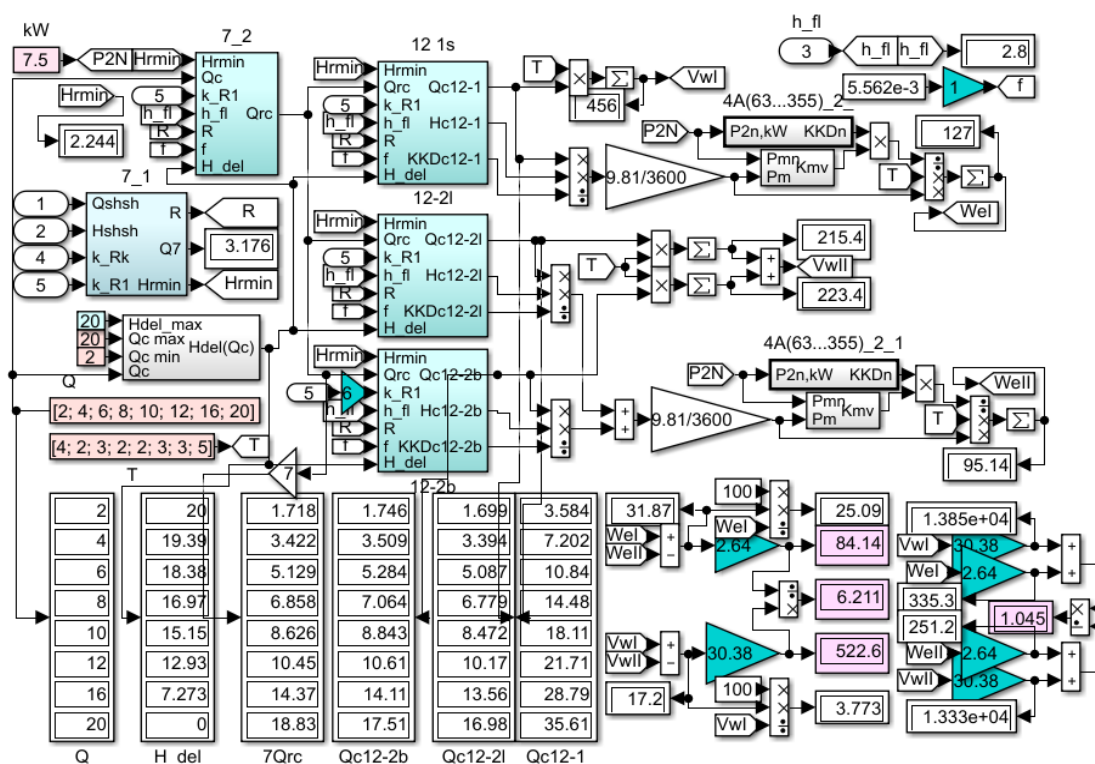


Рисунок 3.3 – Результати розрахунку оцінки ефективності ЕМС водопостачання з одним стояком та з двома паралельними

Для розрахунку було використано наступна вартість електроенергії та води: 2,64 грн/(кВт\*год) та 30,38 грн./м<sup>3</sup> відповідно (вартості відповідають тарифам у Києві станом на перший квартал 2024 року).

Отже, виконаний аналіз показав, що застосування паралельного зонного водопостачання є ефективнішим за ЕМС з одним стояком: відносна економія електроенергії становить 25,09%, а відносна економія води – 3,77%. При цьому за

умови врахування вартості води та електроенергії можна отримати добову економію коштів на оплату електроенергії у розмірі 84,14 грн., а добова економія на оплату води складає 522,6 грн.

Проведемо дослідження ефективності ЕМС паралельного зонного водопостачання відповідно до підрозділу 2.7.

Для дослідження використаємо ті самі вартості електроенергії та води: 2,64 грн/(кВт\*год) та 30,38 грн./м<sup>3</sup> відповідно. Результати розрахунку представлено на рис. 3.4.

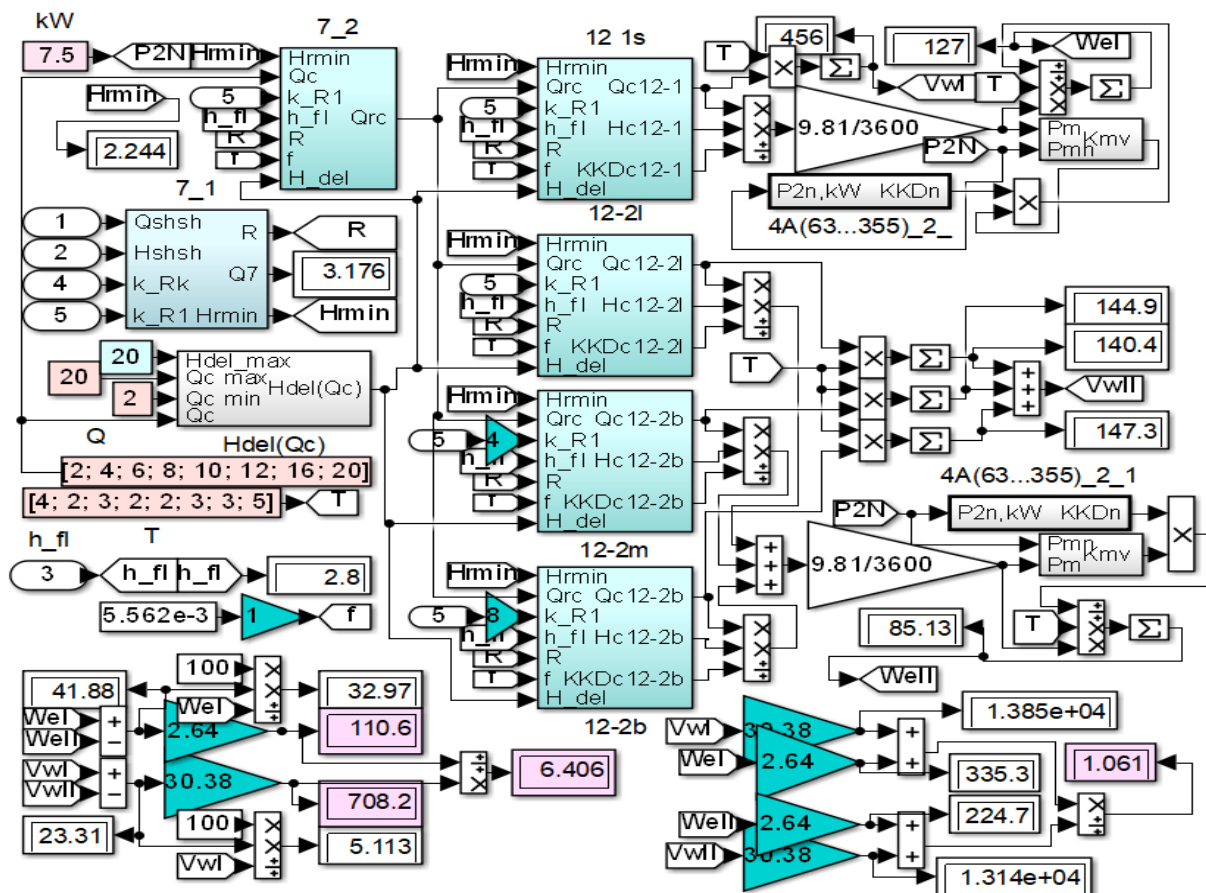


Рисунок 3.4 – Результати розрахунку оцінки ефективності ЕМС водопостачання з одним стояком та з трьома паралельними

Виконаний аналіз показав, що застосування ЕМС паралельного зонного водопостачання що складається з трьох стояків є ефективнішим і за ЕМС з одним стояком, і за систему паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків: відносна економія електроенергії склала 32,97%, а відносна

економія води – 5,11%. При цьому за умови врахування вартості води та електроенергії можна отримано можливу добову економію коштів на оплату електроенергії у розмірі 110,60 грн., а добова економія на оплату води складає 708,20 грн.

Оцінюючи ефективність ЕМС водопостачання багатоповерхових будинків, слід зауважити, що з урахуванням вартості електроенергії та води, співвідношення економії води та електроенергії, виражені в грошах, становлять 6,2 та 6,4 для систем паралельного зонного водопостачання з двох та трьох стояків відповідно. Даний факт вказує на те, що при порівнянні ефективності систем водопостачання важливо враховувати фактор ресурсної ефективності; крім того вказує на важливість вживання заходів на зменшення споживання як електроенергії, так і на вживання заходів на зменшення витрат у системах водопостачання, що як виявляється є не менш важливим. Наприклад, одним із заходів по зменшенню витрат в ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку є зниження надлишкових тисків усіма доступними способами (паралельне зонне водопостачання, редуктори тиску тощо).

### **3.4 Дослідження впливу зміни величини коефіцієнту $F$ на витрати в системі водопостачання**

Вченими було проведено ряд досліджень впливу зміни тиску в системі водопостачання на витрати, результати яких показують, що зменшення тиску в системі призводить до зменшення витрат води [28], [32] [33], і що збільшення тиску призводить до збільшення витрат [34]. При цьому однозначної кількісної оцінки – наприклад, на скільки підвищуються витрати, якщо тиск буде підвищено на 1 атмосферу, – дослідження поки що не дають оскільки жодним з них не встановлено чіткої закономірності. Також з досліджень поки не можливо однозначно сказати які саме фактори та в якій пропорції на це впливають: чи то особливості сантехнічного та побутового обладнання, а також розподільчої

мережі (їх фізична та моральна застарілість), чи то через особливості поведінки споживачів (сезонність, культура споживання, рівень матеріальних статків тощо). З зазначених досліджень відомо, що: зниження тиску в системі водопостачання призводить до зменшення витрат на 11,9% [33], на 16% [28], на 30% [32], або збільшення тиску на 1-1,5 атм призвело до збільшення споживання більш ніж на 20% [34].

Виходячи з того, що підвищення тиску в системі водопостачання призводить до підвищення витрат, але при цьому точної закономірності поки не знайдено, тоді є доцільним дослідити певний діапазон зміни коефіцієнту  $F$ . Даний коефіцієнт використовується для врахування впливу надлишкового тиску на витрату (більш детально див. розділ 2). Дослідження буде проведено для діапазону  $F = 5-10\%$  з кроком 1% за сталості тиску на вході в систему (тиск відповідає оптимальному режиму роботи систем водопостачання, тобто  $H_{del\_max} = 0$ ). Результати дослідження відображено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Зміна показників ефективності системи водопостачання для діапазону зміни коефіцієнту  $F$

	F (при надлишковому напорі 0 м ), %					
	5	6	7	8	9	10
Відносна енергетична ефективність, %	24,98	25,18	25,36	25,53	25,69	25,84
Добова економія від зменшення споживання електроенергії, грн.	83,86	84,55	85,44	86,29	87,09	87,84
Співвідношення ефективності систем водопостачання	5,71	6,586	7,396	8,145	8,84	9,487
Відносна ресурсоефективність (вода), %	3,46	4	4,519	4,996	5,442	5,86
Добова економія від зменшення споживання води, грн.	477,4	5568,9	631,9	702,8	769,9	833,3



Як було зазначено вище, що тиск на вході системи водопостачання може відхилятися від оптимального, є сенс оцінити вплив підвищеного тиску на показники ефективності при тому ж діапазоні зміни  $F = 5-10\%$  з кроком  $1\%$ . Результати дослідження представлені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Зміна показників ефективності системи водопостачання для діапазону зміни коефіцієнту  $F$  та збільшеному вхідному тиску

	F (при надлишковому напорі 20 м ), %					
	5	6	7	8	9	10
Відносна енергетична ефективність, %	24,94	25,12	25,29	25,44	25,58	25,715
Добова економія від зменшення споживання електроенергії, грн.	83,39	84,27	85,08	85,84	86,55	87,21
Співвідношення ефективності систем водопостачання	5,512	6,324	7,065	7,745	8,37	8,947
Відносна ресурсоефективність (вода), %	3,337	3,844	4,31	4,742	5,141	5,511
Добова економія від зменшення споживання води, грн.	459,7	532,9	601,1	664,9	724,5	780,3

Результати експерименту показують, що система паралельного зонного водопостачання є ефективнішою за систему з одним стояком (див. табл. 3.4 та 3.5). Ефективність збільшується за обома показниками: енергоефективність – більше  $24\%$ , ресурсоефективність – більша за  $3,3\%$ . Необхідно зауважити, що при оцінці комерційної сторони ефективності, ресурсоефективність, виражена в гривні, перевищує енергоефективність мінімум у  $5,5$  рази. Що є важливим чинником при комплексній оцінці ефективності паралельного зонного водопостачання.

Оцінюючи зміну показників ефективності, зокрема, зростання показника ресурсоефективності на  $75\%$  (з  $477,4$  до  $833,3$  грн.) при зміні значення  $F$  від  $5$  до

10% вказує на важливість правильного визначення коефіцієнта  $F$ . Важливість полягає в тому, що помилка у визначенні даного коефіцієнту негативно вплине на подальші розрахунки, наприклад, на розрахунок термінів окупності (що може бути критично важливим, особливо якщо було залучено кредитні кошти).

Якщо коефіцієнт  $F$  визначати на базі досліджень в цій галузі (в тому числі згаданих вище [28], [32], [33] та [34], для яких значення  $F$  може бути визначеним на рівні 10% або більше), необхідно звернути увагу на фактори, що можуть вплинути на величину даного коефіцієнту. Дане питання потребує окремих досліджень але напевне до цих факторів можна віднести: ступінь зношеності розподільчих мереж, моральна та фізична новизна обладнання (та правильність його вибору); «портрет споживача» - ставлення до води як до ресурсу та особливості їх поведінки (пов'язані з бажанням обережно та ощадливо використовувати водні ресурси, спричинені обмеженістю водних ресурсів чи ощадливістю, що пов'язана із високими тарифами на воду) та інші фактори, пов'язані з особливістю конкретних мереж водопостачання (офіс, готель, житловий будинок, котеджне містечко тощо).

В даному дослідженні використовується  $F$  на найнижчому рівні 5%, щоб показати важливість впливу тиску на витрати (споживання води, витоки тощо) і при цьому з максимальною вірогідністю дати надійні результати розрахунку: бо при розрахунку, наприклад, термінів окупності краще покладатись на економічну ефективність 477,4 грн./добу (при тому що виходячи з [28], [32], [33], [34] можна використати значення економічної ефективності на рівні 800 грн.).

### **3.5 Дослідження впливу розподілу споживачів (поверхів) по стоякам на ефективність системи паралельного зонного водопостачання з двох стояків**

Мета розподілу споживачів по стоякам – зменшити надлишкові тиски що виникають у стояках системи водопостачання. Тому з метою зменшення надлишкових тисків запропонований розподіл за різними рівнями: тобто для

будинку у 12 поверхів при впровадженні системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків для зменшення надлишкових тисків у споживачів за умови однакової потреби у воді рекомендовано розділення споживачів за поверхами у рівній пропорції – один стояк 1-6 поверхи, другий – 7-12 поверхи. Підхід рівного розподілу потребує перевірки його ефективності; також важливо визначити оптимальне співвідношення розподілу поверхів за стояками для отримання максимальної економії електроенергії та води (за умови однакової потреби у воді за поверхами).

Для перевірки даного припущення використаємо математичну модель описану у другому розділі, реалізація якої в програмі Matlab (Simulink) представлена на рис. 2.1. Результат проведеного дослідження представлено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Результат дослідження відображено у таблиці та на графіку.

	Співвідношення поверхів (менший/ більший стояки)						
	3/9	4/8	5/7	6/6	7/5	8/4	9/3
Відносна енергетична ефективність, %	18,5	22,07	24,27	25,18	24,55	22,61	19,24
Відносна ресурсоефективність (вода), %	2,478	3,185	3,611	4	3,688	3,372	2,835
Добова економія від зменшення споживання електроенергії, грн.	62,02	74,01	81,37	84,55	82,31	75,81	64,53
Добова економія від зменшення споживання води, грн.	343,3	441,3	500,2	556,9	510,9	467,1	392,8
Співвідношення ефективності систем водопостачання	5,534	5,962	6,147	6,586	6,207	6,161	6,087

За результатами розрахунків побудовано графіки зміни економії електричної енергії та води в залежності від співвідношення кількості поверхів паралельних стояків (відповідно рис. 3.5 та рис. 3.6).



Рисунок 3.5 – Графік зміни добової економії електричної енергії в залежності від співвідношення кількості поверхів

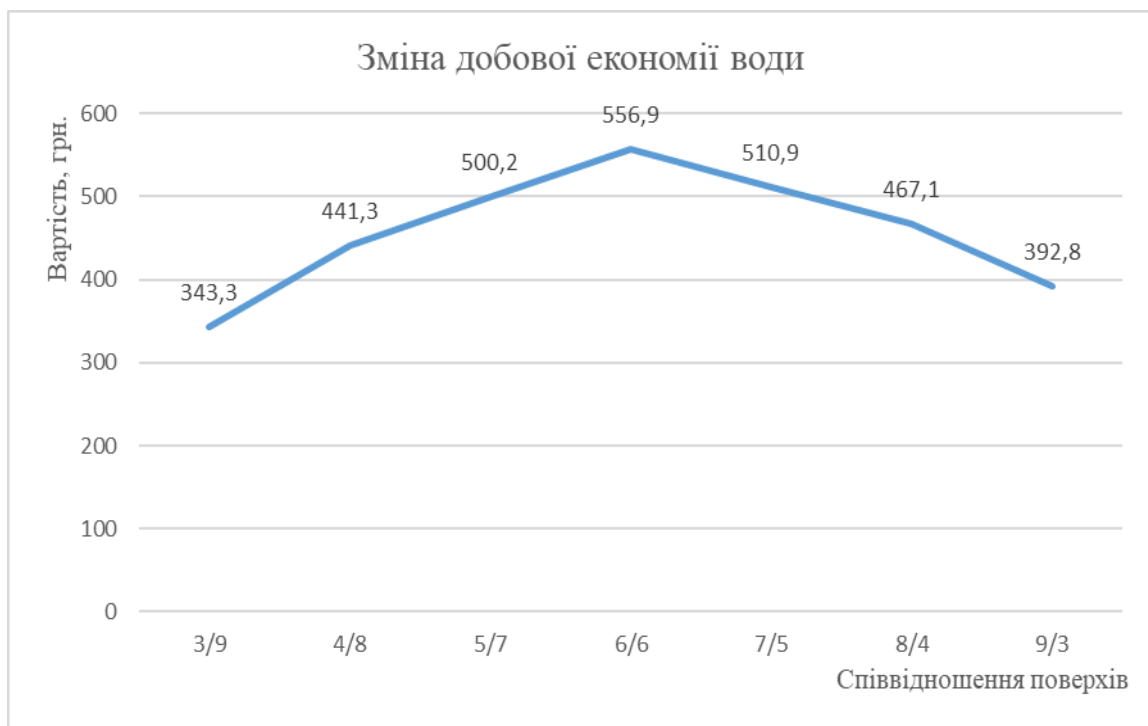


Рисунок 3.6 – Графік зміни добової економії води в залежності від співвідношення кількості поверхів

Розподіл споживачів по стоякам впливає на ефективність системи паралельного зонного водопостачання. За припущення однакової потреби у воді по всіх поверхах оптимальним розподілом буде: однакова кількість поверхів на кожен стояк. Отже при моделюванні систем зонного водопостачання з розподілом за різними рівнями для отримання найбільшого ефекту в економії електроенергії та води необхідно прагнути до рівного розподілу за поверхами. Це загальна рекомендація для моделювання систем водопостачання багатоповерхових житлових будинків. При моделюванні систем водопостачання багатоповерхових будинків комерційного призначення, що можуть мати потужних споживачів води на певних рівнях/поверхах (спортзал, басейн, СПА тощо) необхідно враховувати таку нерівномірність у споживанні (тобто однаковий розподіл за поверхами може okazatись не ефективний). Крім того фактор розподілу за поверхами можна врахувати і для такого виду комерційних будинків як готелі. Цей фактор можна врахувати при моделюванні систем водопостачання будівель такого типу і зменшити витрати на електроенергію та воду (тобто намагатися розміщувати гостей на нижніх поверхах, заповнюючи номерний фонд з нижніх поверхів до верхніх, тим самим зменшуючи витрати електроенергії та води).

Наукові результати отримані у розділі 3 опубліковано у опубліковано у [54], [59], [56], [55], та пройшли апробацію [60], [61], [62].

### **Висновки до Розділу 3**

Проведено дослідження та розрахунки за допомогою розроблених математичних моделей описаних у другому розділі.

В результаті порівняння ефективності ЕМС водопостачання з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків за коефіцієнтом енергетичної ефективності, було встановлено, що завдяки зменшенню надлишкових тисків і втрат у двигуні можна підвищити на 30% енергетичну ефективність системи водопостачання багатоповерхового будинку, якщо замість системи з одним стояком встановити систему паралельного зонного

водопостачання що складається з двох стояків. Результати дослідження опубліковано у [54].

Проведено корегування математичної моделі пов'язане із врахуванням впливу надлишкових тисків на витрати. В результаті дослідження, направлено на корегування математичної моделі відповідно до встановленого взаємозв'язку між впливом надлишкових тисків на витрати, було встановлено, що збільшення надлишкового тиску у стояку може призвести до значного збільшення у споживанні води мешканцями будинку: при оцінці споживання мешканцями семиповерхового будинку, за однакової потреби у воді, різниця між споживанням мешканцями першого та сьомого поверхів може складати 9%. В розрізі дослідження впливу тиску на витрати також було проаналізовано вплив зміни тиску зовнішньої (магістральної) мережі водопостачання на витрати у будинку. Було встановлено, що для семиповерхового будинку при збільшенні зовнішнього тиску у діапазоні від 1 до 4 атмосфер, річні надлишкові витрати становлять 4718 - 18696 м<sup>3</sup> . Якщо виразити зазначені додаткові витрати в грошах, відповідно до вартості води в Києві станом на перший квартал 2024 року – 30,384 грн/м<sup>3</sup>, то витрати в гривні складуть від 143 тис. грн. до 568 тис. грн. Отриманий результат вказує на важливість контролю вхідного тиску в мережах водопостачання багатоповерхових будинків. Результати дослідження опубліковані у [59].

Після врахування впливу надлишкових тисків на витрати було повторно проведено порівняння ефективності ЕМС водопостачання з одним стояком та системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків. Порівняння здійснювалось за оновленим коефіцієнтом ефективності, який дає змогу оцінити енергетичну та ресурсну ефективність систем що порівнюються. В результаті дослідження встановлено, що для дванадцятиповерхового будинку:

- система з двома паралельними стояками є ефективнішою за систему з одним стояком на 25% за показником енергоефективності та на 3,8% за показником витрати води;

- застосування системи паралельного зонного водопостачання з двома стояками замість системи водопостачання з одним стояком, у дослідженому у

роботі прикладі, забезпечує добову економію коштів на оплату електроенергії – 84,14 грн., добову економію коштів на оплату води – 522,6 грн. (за цінами станом на перший квартал 2024 року). Результати дослідження опубліковано у [55].

Для подальшої оцінки перспективи використання паралельного зонного водопостачання у багатоповерхових будинках, було проведено порівняння ефективності системи водопостачання з одним стояком та трьома паралельними стояками. Отримано наступні результати:

- система з трьома різнорівневими паралельними стояками є ефективнішою за систему з одним стояком на 32,97% за показником енергоефективності та на 5,11% за показником витрати води;

- застосування системи паралельного зонного водопостачання з трьома стояками замість системи водопостачання з одним стояком забезпечує добову економію коштів на оплату електроенергії – 110,60 грн., добову економію коштів на оплату води – 708,20 грн. (за цінами станом на перший квартал 2024 року).

На базі отриманих результатів порівняння систем водопостачання, що підтверджують ефективність систем паралельного зонного водопостачання, було проведено додаткові дослідження направлені на встановлення оптимального розподілу споживачів по стоякам, а також було проведено дослідження, направлене на оцінку важливості впливу вибраного коефіцієнту впливу тиску на витрати  $F$  на результати розрахунків. В результаті було встановлено, що для житлового будинку за припущення однакової потреби у воді по всіх поверхах, оптимальним є рівний розподіл: для ЕМС водопостачання що складається з двох стояків, в умовах дванадцятиповерхового будинку, оптимальним буде розподіл 6/6 (за такого розподілу відмічено найвищі показники ефективності). Щодо впливу величини коефіцієнту  $F$ : зміна значення даного коефіцієнта з 5% до 10% відсотків призвела до збільшення значення коефіцієнту ресурсоефективності (вираженого в гривні) на рівні 70%, що вказує на важливість обґрунтованого зваженого ставлення до визначення даного коефіцієнту для оцінки ефективності систем водопостачання.

## **РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНЕ ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ З ВДОСКОНАЛЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ ПАРЕЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

### **4.1 Економічний ефект від впровадження системи водопостачання з двома паралельними стояками замість системи водопостачання з одним стояком**

Як показали розрахунки у розділі 3, системи з двома паралельними стояками є ефективнішими за системи з одним стояком з погляду на економію ресурсів (води та електроенергії), а значить – такі системи є ефективними і з погляду на економію грошей за експлуатації системи. Але важливо отримати розуміння: наскільки така система є ефективною за урахування матеріальних витрат, що необхідні для її створення; наскільки змінюється її собівартість. Як було встановлено вище – паралельне зонне водопостачання зменшує надлишкові тиски у системі та сприяє економії електроенергії та води. Але для організації паралельного зонного водопостачання, порівняно із традиційною системою з одним стояком, необхідні додаткові капітальні витрати на: труби для ще одного стояка (якщо система складається з двох паралельних стояків), ще один насос чи насосний агрегат, арматура тощо. Дещо зменшити витрати, які пов'язані з придбанням другого насосу (насосного агрегату) та супутньої арматури можна, якщо застосувати спеціалізований насосний агрегат, що має два виходи для подачі води у два стояки одночасно. Поки розглянемо випадок, для системи з двома паралельними стояками та відповідно двома насосними агрегатами (як найбільш витратний).



#### 4.1.1 Вибір обладнання та оцінка його вартості

Для оцінки економічної ефективності при застосуванні паралельного зонного водопостачання необхідно співставити вартість додаткового обладнання для створення системи зонного водопостачання із економією за зменшення споживання електричної енергії та води, що має місце при цьому. Для співставлення візьмемо приклад дванадцятиповерхового будинку, з параметрами що були представлені вище. До складу системи водопостачання з одним стояком буде входити трубопровід, що складається з горизонтальної труби і стояків, що відгалужуються від нього, та насосний агрегат. До складу системи паралельного зонного водопостачання буде входити трубопровід, що складається з двох горизонтальних труб, стояків, що відгалужуються від них та два насосних агрегати. В системі паралельного зонного водопостачання стояки будуть розділені за довжиною: «великий» – постачання води на 7 – 12 поверхи, але який починається в підвальному приміщенні і піднімається до дванадцятого поверху і «малий» – постачання на 1 – 6 поверхи, що починається у підвальному приміщенні і доходить до шостого поверху. Труби для обох систем водопостачання обрано поліпропіленові, при цьому, з однаковими діаметрами труб стояків для обох систем водопостачання.

Державні будівельні норми [27] встановлюють необхідну добову кількість води на одного мешканця (в залежності від типу будинку, системи водопостачання, кліматичного району тощо). Відповідно до умов ДБН [27], для подальших розрахунків, прийнято норму споживання на одного мешканця 250 л/добу (показник відповідає першому кліматичному району [63], Північно-Західна частина України). Також врахуємо, що відповідно до ДБН [27] швидкість руху води не повинна перевищувати 2,5 м/с (показник для труб із полімерних матеріалів). Спираючись на дані циклограми споживання води мешканцями будинку; врахувавши згадані норми ДБН; та прийнявши певні припущення щодо кількості мешканців у квартирі, кількості квартир на поверсі тощо – можна

розрахувати діаметри труб стояків та діаметри горизонтальних труб, від яких відгалужуються труби стояків.

Для розрахунку прийнято будинок з наступними параметрами: 12 поверхів; висота поверху (з перекриттям) – 2,8 м (для розрахунку довжини труб буде прийнята величина 3 м через витрати на монтаж та інш.); кількість під'їздів у будинку – 5; кількість квартир на поверсі в одному під'їзді – 8; довжина будинку – 150 м; норма споживання на кожну людину – 250 л/добу; в кожній квартирі проживає до чотирьох мешканців (кількість людей у будинку обумовлена загальним споживанням води всіма мешканцями будинку). Циклограма споживання води мешканцями будинку представлена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Циклограма споживання води мешканцями дванадцяти поверхового будинку

Споживання, м <sup>3</sup> /год.	34,29	27,43	20,57	17,14	13,71	10,29	6,86	3,43
Час дії періоду, год.	5	3	3	2	2	3	2	4

Дана циклограма споживання отримані шляхом перерахунку: за основу була прийнята циклограма споживання семиповерхового будинку [36] де кожне значення витрат було збільшено у 12/7 рази.

З циклограми (таблиця 4.1) для розрахунків візьмемо значення споживання 34,29 м<sup>3</sup>/год, як найбільше завантажений проміжок роботи трубопроводів: ця величина дозволить розрахувати як діаметри горизонтальних ділянок трубопроводів обох систем водопостачання, так і діаметри стояків. Врахувавши умову ДБН, що швидкість руху води не повинна перевищувати 2,5 м/с, виберемо діаметр горизонтальної труби, від якої відгалужуються труби стояків, для системи з одним стояком – 75 мм; для системи з паралельними стояками – 63 мм; діаметри стояків для обох систем водопостачання – 32 мм. На основі наведених вище даних щодо параметрів будинку та циклограм споживання, для системи водопостачання з одним стояком буде необхідно 150 м труби діаметром 75 мм та 1440 м труби

діаметром 32 мм; для систем з паралельним зонуванням – 300 м труби діаметром 63 мм та 2160 м труби діаметром 32 мм.

**Вартість труб.** Для розрахунків обох систем вибрано поліпропіленові труби. Відповідно, ціна труб становить: 32 мм – 206 грн./м, 63 мм – 781 грн./м, 75 мм – 1129 грн./м [64].

**Насосні агрегати.** Для вибору насосних агрегатів для обох систем необхідно врахувати: подача (за циклограмою потреб), напір, розраховані раніше потужності. Для системи водопостачання з одним стояком обрано насосний агрегат Pedrollo НТ 30/4 вартістю 116000 грн [65]. Для системи зонного водопостачання обрано два насосних агрегати Pedrollo НТ 15/3 та Pedrollo НТ 15/2R вартістю 85000 грн. та 77500 грн. відповідно [65].

Дані щодо кількості та вартості труб та насосних агрегатів зібрано до таблиць 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.2 – Розрахункові витрати на труби та насосні агрегати: система водопостачання з одним стояком

Найменування	Труба 32 мм, м	Труба 75 мм, м	НА НТ 30/4, шт.
Кількість	1440	150	1
Ціна за одиницю, грн.	206	1129	116000
Ціна разом, грн.	296640	169350	116000
Вартість разом, грн.			<b>581990</b>

Таблиця 4.3 – Розрахункові витрати на труби та насосні агрегати: система паралельного зонного водопостачання з двох стояків

Найменування	Труба 32 мм, м	Труба 63 мм, м	НА НТ 15/3, шт.	НА НТ 15/2R, шт.
Кількість	2160	300	1	1
Ціна за одиницю, грн.	206	781	85000	77500
Ціна разом, грн.	444960	234300	85000	77500
Вартість разом, грн.				<b>841760</b>

Отже, вартість труб та насосного агрегату для системи водопостачання з одним стояком становить 581990 грн.; відповідно, вартість системи паралельного

зонного водопостачання становить 841760 грн. Щоб врахувати вартості витратних матеріалів, монтажних робіт та супутніх витрат, помножимо отримані вартості систем водопостачання на коефіцієнт 1,25. Відповідно отримаємо 727488 та 1052200 грн. Таким чином різниця вартостей двох систем водопостачання буде складати 324712 грн.

Відповідно до розрахунків розділу 3 системи паралельного зонного водопостачання є ефективнішими за системи водопостачання з одним стояком і ефективність показана у вигляді добової економії у гривневому виразі. Враховуючи визначену економічну експлуатаційну ефективність за впровадження системи паралельного зонного водопостачання необхідно розрахувати термін, за який вказана економія компенсує різницю вартості двох систем водопостачання (324712 грн.). А також доцільно розрахувати економічну вигоду отриману протягом 10 років від впровадження системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків. Насосні агрегати призначені для довготермінової роботи яка може вимірюватися десятиліттям [66]. Було б добре оцінити економічний ефект від впровадження системи водопостачання з паралельними стояками через 20, 30 чи 40 років роботи. За даних умов важко передбачити які саме тарифи на електроенергію та воду будуть через, наприклад, двадцять років, але, спираючись на дані попередніх років [67], [68] можна зробити певні припущення щодо їх зміни найближчі 10 років. Отже для розрахунків будуть використані прогнозовані тарифи на електроенергію та воду, а сам розрахунок буде проводитись за умови: добове значення суми економії на оплату води та електроенергії отримані для відповідних тарифів помножуються на кількість днів у році (365).

#### **4.1.2 Аналіз та прогнозування тарифів**

Для аналізу економічної ефективності застосування систем паралельного зонного водопостачання необхідно спрогнозувати величину тарифів електроенергії та води на найближчі десять років. Для оцінки зміни тарифів з плином часу звернемося до архівних даних. Відповідно до [67] вартість води за

період з 1.05.2015 по 1.01.2022 зросла з 8,688 до 30,384 грн. за 1 м<sup>3</sup>, з ПДВ; за період з 1.10.2012 по 1.06.2024 вартість електроенергії зросла з 95,76 до 432 коп. за 1 кВт·год., з ПДВ [68]. Для подальшого аналізу тарифів важливо відмітити, що за період з 01.06.2023 по 01.06.2024 тариф на електроенергії виріс на 63,63%. Динаміка зміни вказаних тарифів відображена у таблицях: зміна вартості води – Таблиця 4.4, зміна вартості електроенергії – Таблиця 4.5.

Таблиця 4.4 – Зміна вартості води за період з 01.05.2015 по 2025 р.

<b>Вартість грн. за 1 м<sup>3</sup>, з ПДВ</b>	<b>Період дії тарифу</b>
8,6880	з 1.05.2015 по 1.08.2016
12,3480	з 2.08.2016 по 11.05.2017
14,2080	з 12.05.2017 по 16.12.2017
14,1840	з 17.12.2017 по 27.06.2018
15,7800	з 28.06.2018 по 13.10.2018
18,2880	з 14.10.2018 по 31.01.2019
20,3760	з 1.02.2019 по 27.11.2019
20,8200	з 28.11.2019 по 4.02.2020
22,9920	з 5.02.2020 по 31.12.2020
25,3800	з 1.01.2021 по 30.06.2021
25,3800	з 1.07.2021 по 31.12.2021
30,3840	з 1.01.2022

Таблиця 4.5 – Зміна вартості електроенергії за період з 01.05.2015 по 2025 р

<b>Тариф (коп. за 1 кВт·год., з ПДВ)</b>	<b>Період дії тарифу</b>
95,76	з 1.10.2012 по 31.05.2014
134,04	з 1.06.2014 по 31.03.2015
140,7	з 1.04.2015 по 31.08.2015
147,9	з 1.09.2015 по 29.02.2016
156	з 1.03.2016 по 31.08.2016
163,8	з 1.09.2016 по 28.02.2017
168	з 1.03.2017 по 31.12.2020
168	з 1.01.2021 по 30.09.2021
168	з 1.10.2021 по 31.05.2023
264	з 1.06.2023 по 1.06.2024
432	з 1.06.2024

З першого червня 2024 відбулось підвищення тарифу на електроенергію, але не відбулось підвищення тарифу на воду. Тариф на воду залежить від багатьох факторів в тому числі і від вартості електроенергії. Відповідно до [69] у запланованому підвищенні тарифу на воду: частка вартості електроенергії в тарифі на водопостачання складає 26%, частка на водовідведення – 29%. Також важливо відмітити, що величина тарифу також залежить від вартості паливно-мастильних матеріалів, реагентів, матеріалів що пов’язані з ремонтом обладнання, а також з широким спектром економічних чинників (амортизація, оплата праці, витрати на обслуговування кредитів тощо). Якщо врахувати зазначену частку електроенергії у тарифі на воду (і зростання вартості електроенергії на 63,63%), а також зростання вартості паливно-мастильних матеріалів, реагентів та інших чинників [69], можна припустити, що зростання тарифу на воду може сягнути 40% по відношенню до існуючого, що є нормальним з огляду на вартості складових тарифу та історію зростання тарифів на воду [67]. Отже для подальшого розрахунку приймемо тариф на воду (що відповідав би актуальному тарифу на електроенергію) – 42,50 грн.

Відповідно до даних [67], [68] та враховуючі зростаючі потреби у електроенергії та воді, описані у першому розділі дослідження, вплив факторів пов’язаних з активними воєнними діями на території України, рівень інфляції тощо можна зробити консервативні припущення, що найближчі 10 років в Україні вартість електричної енергії буде зростати мінімум на 7% на рік; відповідно вартість води – на 12% кожен рік. Виходячи з даних припущень сформуємо таблицю зміни тарифів на найближчі десять років (Таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 – Прогнозовані тарифи на електричну енергію та воду (на 10 років)

Рік	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Вода, грн. за 1 м³, з ПДВ	42,5	47,6	53,3	59,7	66,9	74,9	83,9	93,9	105,2	117,9
Електроенергія, грн. за 1 кВт·год., з ПДВ	4,32	4,62	4,95	5,29	5,66	6,06	6,48	6,94	7,42	7,94

Спираючись на зроблені розрахунки вартості систем водопостачання, прогнозовані тарифи та економію електроенергії та води, можна розрахувати економічний ефект від запровадження системи паралельного зонного водопостачання з двома стояками у порівнянні з системою з одним стояком.

#### **4.1.3 Порівняльний аналіз витрат на систему паралельного зонного водопостачання, терміну її окупності та економії від впровадження даної системи**

Для розрахунку терміну окупності додаткових вкладень (різниці у вартості двох систем) та комерційного ефекту від впровадження системи паралельного зонного водопостачання з двома стояками замість системи з одним стояком зробимо декілька припущень. Система водопостачання запускається в роботу 01 січня 2025 року. Тарифи діють з 01 січня по 31 грудня кожного року. Кожен рік тарифи збільшуються на одну і ту саму величину: вартість електроенергії на 7%, вартість води на 12%.

Розрахуємо добову економію для системи паралельного зонного водопостачання що складається з двох стояків для тарифів Таблиця 4.6. Результати розрахунків представлено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Добова економія: показники по воді та електроенергії

Рік	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Вода, грн.	685,2	767,4	859,5	962,6	1078	1208	1352	1515	1697	1900
Електро енергія, грн.	133,7	143	153,2	163,8	175,2	187,6	200,6	214,8	229,7	245,8
Разом, грн	818,9	910,4	1012,7	1126,4	1253,2	1395,6	1552,6	1729,8	1926,7	2145,8

На основі отриманих даних щодо добової економії (табл. 4.7) можна розрахувати терміни необхідні для компенсації зазначеної суми у 324712 грн. За прогнозованих тарифів (табл. 4.6.) та добової економічної ефективності (табл. 4.7) для компенсації зазначеної суми необхідно 14 місяців (див. рис. 4.1).

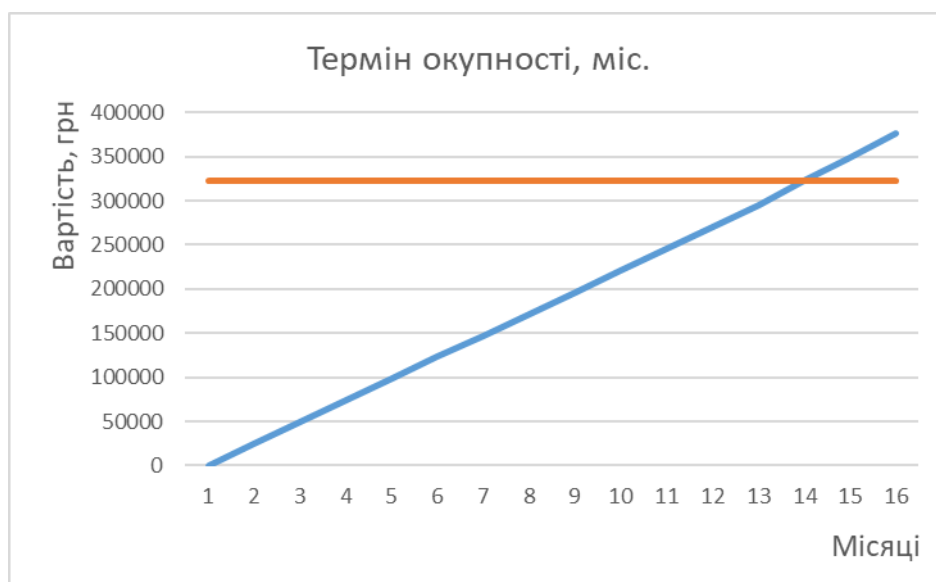


Рисунок 4.1 – Розрахунок терміну окупності різниці собівартості обох систем (два паралельних стояка)

Спираючись на дані табл. 4.6 та 4.7 можна розрахувати економічний ефект від впровадження системи паралельного зонного водопостачання замість системи з одним стояком. Розрахунки показують, що якщо у дванадцятиповерховому будинку замість системи з одним стояком встановити систему з двома паралельними стояками, то за десять років роботи такої системи буде зекономлено 5063316,5 грн. (враховуючи 324712 грн. на оплату різниці собівартості обох систем).



#### **4.2 Економічний ефект від впровадження системи водопостачання з трьома паралельними стояками замість системи водопостачання з одним стояком**

Аналогічно до того як було розраховано економічні показники для системи з двома паралельними стояками можна розрахувати ті ж самі показники і для системи водопостачання з трьома паралельними стояками.

Більшість параметрів для розрахунків залишаються без змін. Незмінні циклограма споживання (табл. 4.1) та прогнозовані тарифи (табл. 4.6). Параметри будинку: кількість поверхів, квартир, стояків тощо – залишаються незмінними. Незмінними залишаються і параметри труби та обладнання, обрані для системи з одним стояком.

Система паралельного зонного водопостачання буде складатись: з трьох горизонтальних ділянок трубопроводу діаметром 50 мм, трьох насосних агрегатів: НТ 8/4 – 45000 грн., НТ 30/2R – 72000 грн, НТ 15/3R – 72000 грн [65]. Кількість стояків та їх діаметр не зміниться, але збільшиться їх довжина до 2880 м.

Розрахована вартість труба та НА для системи водопостачання з одним стояком 727488 грн. Вартість системи водопостачання з трьома паралельними стояками – 1254600 грн. В даному випадку різниця вартостей обладнання та матеріалів систем складе – 527112 грн.

Отримані дані дають змогу розрахувати добову економію отриману від впровадження системи водопостачання з трьома паралельними стояками замість системи з одним стояком; розрахувати терміни повернення коштів у розмірі – 527112 грн.; а також розрахувати економічний ефект від роботи цієї системи – 10 років (з тих же міркувань, що і для системи з двома паралельними стояками).

Розрахуємо добову економію для системи паралельного зонного водопостачання що складається з трьох стояків для тарифів табл. 4.6. Результати розрахунків – табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Добова економія від впровадження системи водопостачання з трьома паралельними стояками: показники по воді та електроенергії

Рік	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Вода, добова економія, грн.	990,8	1110	1243	1392	1559	1746	1956	2190	2453	2748
Ел. ен., добова економія, грн.	180,9	193,5	207,3	221,5	237	253,8	271,4	290,6	310,7	332,5
Разом, грн	1171,7	1303,5	1450,3	1613,5	1796,0	1999,8	2227,4	2480,6	2763,7	3080,5

На основі отриманих даних можна розрахувати термін повернення 527112 грн., а також ефективність роботи системи виражену в гривнях за десять років ймовірної роботи системи паралельного зонного водопостачання з трьома стояками замість системи з одним стояком. Термін повернення коштів складає 15 місяців – рис. 4.2.

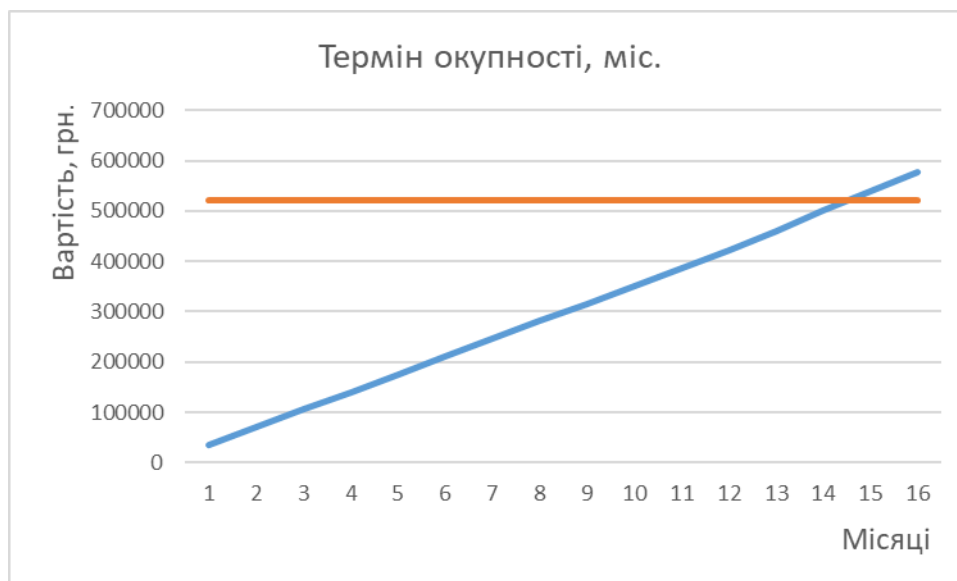


Рисунок 4.2 – Розрахунок терміну окупності різниці собівартості обох систем (три паралельних стояка)

Економічна ефективність від впровадження системи паралельного зонного водопостачання з трьома стояками замість системи з одним стояком за десять

років буде виражена у 7258755 грн. (в тому числі і 527112 грн. на оплату різниці собівартості обох систем).

#### **Висновок до розділу 4**

Розрахунки показали, що завдяки економічній ефективності системи паралельного зонного водопостачання, в залежності від вартості матеріалів і обладнання, за кілька років можна повернути різницю вартості на яку система з двома чи трьома стояками є дорожчою за систему з одним стояком: у наведеному прикладі термін повернення коштів для системи з двома паралельними стояками склав 14 місяців, для системи з трьома – 15 місяців. Крім цього, ефективність обох систем паралельного зонного водопостачання показує що також можливе повне повернення коштів, що були витрачені на створення цих систем водопостачання: розрахована ефективність від впровадження системи з двома паралельними стояками порівняно із системою з одним стояком за десять років роботи склала 5063317 грн., при розрахунковій вартості системи з двома паралельними стояками 1052200 грн.; розрахункова ефективність від впровадження системи з трьома паралельними стояками порівняно із системою з одним стояком за десять років роботи склала 7258755 грн., при розрахунковій вартості системи з трьома паралельними стояками 1254600 грн.

Отже результати дослідження показують, що системи водопостачання з паралельними стояками можуть бути частиною рішення глобальної проблеми зростаючих потреб у воді та електроенергії, як такі, що, по відношенню до інших систем водопостачання, сприяють зменшенню витрат електроенергії та води.

## **РОЗДІЛ 5. СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ НАСОСНИЙ АГРЕГАТ ДЛЯ СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗОННОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ. КОНСТРУКЦІЯ, ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ**

### **5.1 Спеціалізований насосний агрегат з інтегрованим електродвигуном. Опис конструкції**

У розділах 1 та 2 розглянуто системи паралельного зонного водопостачання: їх структуру, складові, математичну модель. Системи паралельного зонного водопостачання потребують кілька насосів чи насосних агрегатів, щоб забезпечували водою відповідні зони із споживачами. Зменшити кількість насосів можна шляхом використання насосних агрегатів із кількістю виходів, що відповідає кількості трубопроводів для живлення відповідних зон. Одним з рішень такої проблеми міг би бути консольний багатоступеневий відцентровий насос, що має необхідну кількість виходів. Такі насоси мають нижчий ККД (порівняно із одноступеневими відцентровими насосами) та мають недолік – осьове навантаження на підшипники. Для багатоступеневих насосів такі навантаження можуть вимірюватися у сотнях кН [37]. В режимі постійного навантаження, наприклад, при роботі на систему водопостачання житлового будинку ця проблема може проявлятися у вигляді підвищеної аварійності таких агрегатів, їх частих ремонтів, як наслідок перебоїв в роботі системи водопостачання чи навіть її зупинки. З іншого боку, відцентрові насоси двостороннього входу у порівнянні із консольними мають кращі показники: вищий ККД, не мають такої проблеми з витоками, і порівняно, наприклад, з консольними, не мають проблеми з підшипниками. Насосний агрегат такого типу (із вбудованим асинхронним двигуном) міг би бути влучним доповненням системи паралельного зонного водопостачання.

Одним з рішень, що підвищило б ефективність систем паралельного зонного водопостачання багатоповерхових будинків був би винахід що мав би:

- надійну герметичну конструкцію;

- вбудований асинхронний двигун;
- кількість відводів води по кількості паралельних трубопроводів системи водопостачання (кількості зон);
- ККД співрозмірний з існуючими сучасними моделями відцентрових насосів (наприклад, консольних одноступеневих);
- компактну конструкцію;
- меншу схильність до вібрацій;
- понижений рівень шуму під час роботи.

Враховуючи певні недоліки існуючих конструкцій насосів та двигунів (див. додаток 4) з метою їх покращення, а також врахувавши потребу систем зонного водопостачання (з двома паралельними стояками), запропоновано конструкцію насосного агрегату двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором. Даний насосний агрегат відноситься до виробів напірного переміщення рідини, що здійснюється із використанням електроприводу. Конструкція виробу є герметичною і органічно поєднує елементи відцентрового насоса та асинхронного двигуна. Даний виріб можна застосовувати для подачі води до мережі водопостачання будинків чи для подачі рідин в інших умовах (агросектор, промисловість, побут тощо). Конструкцію даного насосного агрегату представлено на рисунку 5.1.

Числами на рисунку позначено: 1 – магнітопровід статора; 2 – опорна стінка; 3 – зовнішня труба; 4 – наскрізний отвір; 5 – котушка статорної обмотки; 6 – кільцевий паз; 7 – радіальний отвір; 8 – патрубок всмоктування; 9 – патрубок нагнітання; 10 – відвід; 11 – обтікач; 12 – направляючий апарат; 13 – радіально-упорних підшипник; 14 – шпилькове з’єднання; 15 – кільцеве ущільнення; 16 – паз у феромагнітному циліндрі; 17 – вал; 18 – паз; 19 – робоче колесо; 20 – шпонковий паз; 21 – гайка; 22 – шпонка; 23, 24 – короткозамкнені кільця; 25 – порожнина; 26 – зазор; 27 – немагнітний проміжок; 28, 29 – отвори для протікання рідини; 30 – проміжок між елементом валу та магнітопроводом статора; 31 – мембрана з феромагнітного матеріалу.

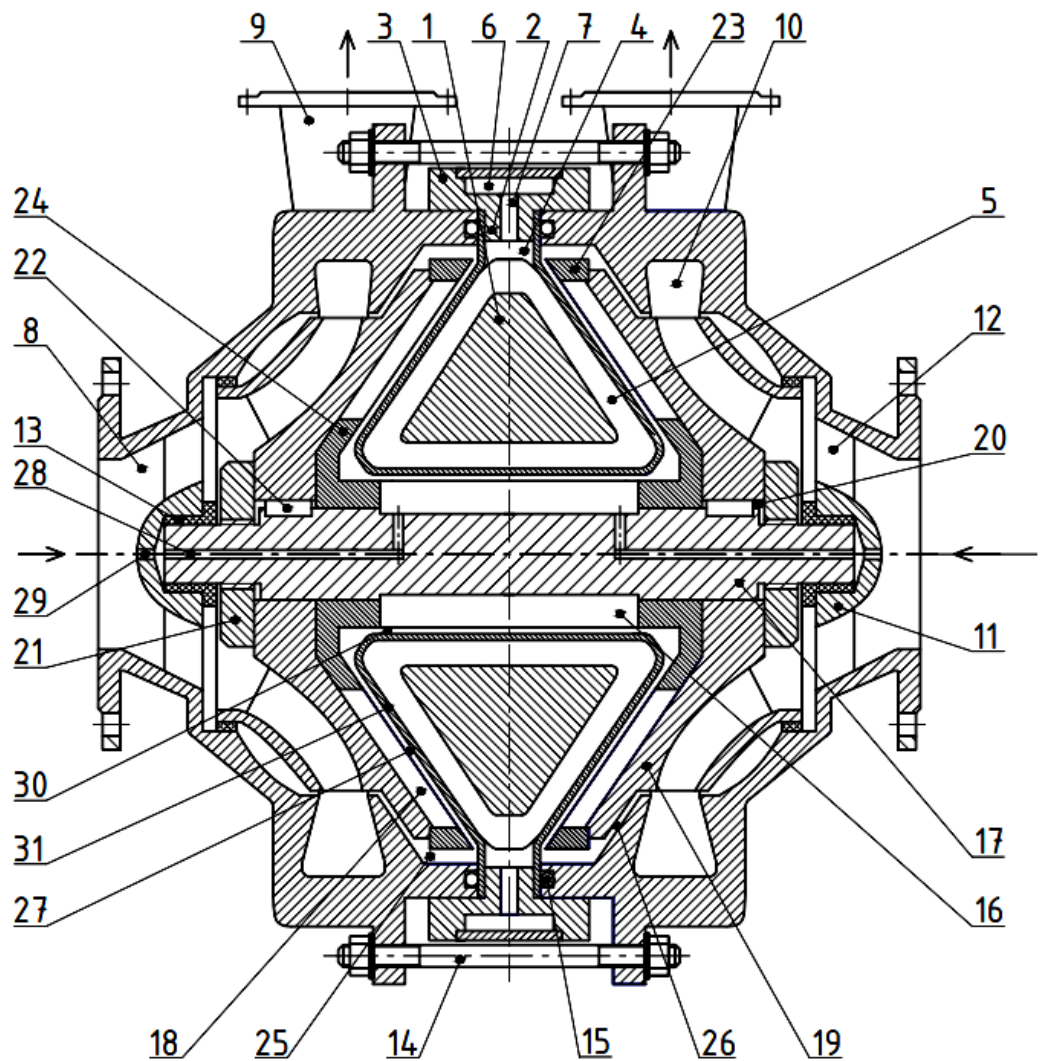


Рисунок 5.1 - Насосний агрегат двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором [55]

Осьовий розріз, що доповнює рисунок 5.1 показано на рисунку 5.2. На рисунку 5.2 позначено: 1 – магнітопровід статора; 4 – наскрізний отвір; 5 – котушка статорної обмотки; 6 – кільцевий паз; 7 – радіальний отвір; 9 – патрубок нагнітання; 14 – шпилькове з’єднання; 16 – паз у феромагнітному циліндрі; 17 – вал; 18 – паз; 30 – проміжок між елементом валу та магнітопроводом статора; 31 – мембрана з феромагнітного матеріалу.

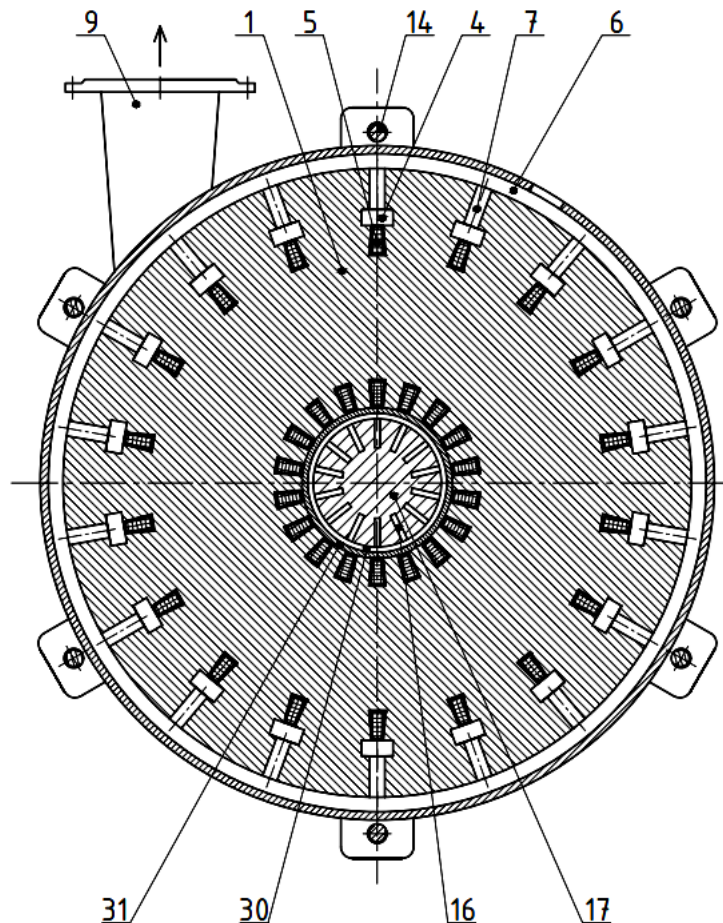


Рисунок. 5.2 - Насосний агрегат двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором (осьовий розріз)

Базуючись на знаннях про недоліки існуючих моделей насосних агрегатів, метою розробки даного виробу, було створення насосного агрегату із кращими показниками ККД, підвищити надійність шляхом спрощення технології виробництва, покращити енергоефективність за рахунок зміни до підходу охолодження елементів конструкції. Крім зазначених якісних характеристик нового насосного агрегату, також на меті було створити насосний агрегат, який би органічно доповнював систему паралельного зонного водопостачання за рахунок мінімізації кількості застосованих насосних агрегатів та зменшення матеріальних затрат на супутнє обладнання (включаючи вентилі та пуско-регулюючу апаратуру).

Представлена модель насосного агрегату, у порівнянні з відомими, дозволяє покращити якісні параметри (ККД, масо-габаритні параметри тощо) шляхом зміни конфігурації робочого електромагнітного поля у двигуни за якої струм кожної котушки обмотки статора приймає участь в електромеханічному перетворенні електроенергії у двох дискових та циліндричній частині двигуна, що підвищує потужність та зменшує розсіювання через зменшення лобових частин котушок статора. Виконання роторів двигуна масивними спрощує інтеграцію роторів двигуна з робочими колесами насосу і валом, що підвищує надійність виробу та знижує його вартість, збільшує теплопровідність роторів та сприяє збільшенню передачі тепла втрат у АД рідині (в окремих випадках може використовуватись для нагріву води, що перекачується). Пазова структура масивних роторів підвищує енергетичну ефективність двигуна. Використання мембрани з феромагніту, що закриває пази статора, сприяє підвищенню ККД двигуна. Підвищення ККД в даному випадку відбувається за рахунок зниження додаткових втрат від пульсацій магнітного потоку в роторі через зміну провідності немагнітного проміжку. Гідроуп'яті в конструкції насосного агрегату мають вагомe значення: стабілізують осьове положення ротора, підвищують надійність роботи насосного агрегату завдяки зменшенню навантаження на підшипники та збільшують ККД за рахунок забезпечення стабільності немагнітних проміжків.

Отже, сукупність характеристик насосного агрегату, на відміну від відомих, дають змогу вважати запропонований насосний агрегат таким що має більшу енергоефективність, кращі умови охолодження електродвигуна і має більш надійну конструкцію.

## **5.2 Принцип роботи насосного агрегату двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором**

Робоча рідина (далі – «вода») потрапляє до патрубку 8, далі – рухається в напрямку маточини робочого колеса 19. Під дією відцентрових сил, що



створюються робочим колесом, вода рухається в радіальному напрямку. Під час взаємодії води з колесом, частина теплової енергії від нагрітого колеса передається воді. Далі вода поступає до зазору 26 між конусоподібними поверхнями робочого колеса та бокової частини корпусу, потім – до порожнини 25 та немагнітного проміжку 27 між статором та ротором 18. Через отвори 28 вода у валу 17 вода поступає до підшипників ковзання 13. Проходячи повз підшипники вода їх охолоджує. Після – повертається на всмоктування в робоче колесо.

Під час роботи насосного агрегату в порожнинах 25 виникають тиски, що змінюються протягом циклу роботи. Зміна тисків дозволяє врівноважувати осьові сили, що діють на ротор (що призводить до зменшення навантаження на підшипники). Коли ротор відхиляється від врівноваженого положення, через зменшення зазору 26, в порожнині 25 зменшується тиск. У немагнітному проміжку 27 тиск зменшується. З протилежної сторони від осі теж відбуваються зміни і вони мають зворотній характер. Співвідношення тисків на задні частини робочих коліс 19 змінюються, що призводить до зміни величини осьової сили, яка і повертає ротор до рівноважного стану

Обертання робочих коліс відбувається за рахунок перетворення електричної енергії змінного струму в механічну завдяки перетворенню у двигуні. Змінний струм подається до багатовиткових котушок 5 обмотки статора. Обмотка статора є трифазною і розміщується в пазах на поверхні тороїду магнітопроводу 1. Підведення струму здійснюється через отвори 7 за допомогою дроту. Електричне з'єднання дротів котушок 5 та кабелю від джерела живлення здійснюється у кільцевому пазу 6. Схема з'єднання котушок статора показана на рисунку 4.3.

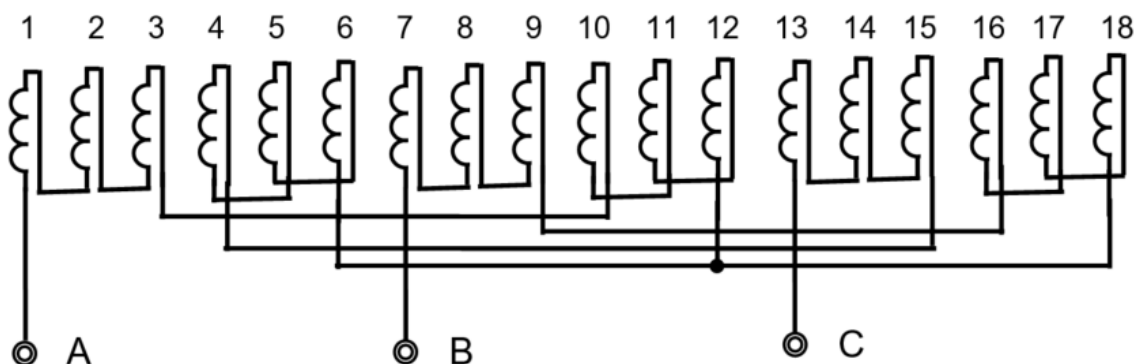


Рисунок 5.3 - Схема з'єднання котушок статора

Після підключення насосного агрегату до джерела живлення в обмотках статора протікають струми і в результаті вздовж немагнітного проміжку 30 між ротором і статором виникає обертове магнітне поле. Обертове магнітне поле також виникає і у робочих проміжках 27. Обертові магнітні поля у цих проміжках забезпечують взаємну індуктивність електричних контурів статора з контурами ротора у дисковій та циліндричній частинах, в яких індукуються струми і виникають електромагнітні моменти. Через наявності пульсацій магнітного поля відбувається додатковий нагрів ротора. У запропонованому насосному агрегаті додаткові втрати зменшуються завдяки застосуванню феромагнітної мембрани 31. Феромагнітна мембрана у пазах статора з котушками 5 створює магнітопровідні містки, завдяки чому знижується нерівномірність провідності немагнітного проміжку і відповідні коливання магнітного потоку. Виконання котушок 5 статора мають особливість: котушки обмотки мають різну кількість витків, що призводить до нівелювання впливу вищих просторових гармонік намагнічуючої сили статора.

Конструкція описаного насосного агрегату характеризується надійністю та відносною простотою збирання. Крім цього насосний агрегат характеризується низьким рівнем шуму завдяки тому, що всі рухомі елементи знаходяться у воді. Низький рівень шуму – особливо важлива характеристика при використанні насосного агрегату для подачі води до житлових чи офісних будівель, готелів та інших місць з тривалим перебуванням людей.

Крім зазначених якостей, що характеризують запропонований насосний агрегат, його конструкція може служити базовою для отримання мультифункціонального НА. В даному випадку запропонований НА в подальшому може бути розглянутий для використання нагріву (донагріву) рідини що перекачується.

Конструкція даного насосного агрегату дозволяє сприяти втіленню ідеї зменшення надлишкових тисків, яка є ключовою у створенні систем паралельного зонного водопостачання – яка дозволяє зменшити витрати електроенергії та води. Крім зменшення витрат електроенергії та води, зменшення надлишкових тисків позитивно впливають і на інші чинники, пов'язані із роботою ефективних надійних систем водопостачання:

- зменшення зношуваності обладнання (як безпосередньо системи водопостачання так і обладнання споживачів);
- зменшення вірогідності виникнення аварій [75], [76];
- зменшення навантаження на систему каналізації та комплекс очисних споруд тощо.

### **5.3 Умови ефективного використання спеціалізованого насосного агрегату у системах паралельного зонного водопостачання**

Як показали результати дослідження третього розділу, система паралельного зонного водопостачання має пік ефективності за балансованого розподілу подачі. Наприклад, якщо потреба у воді однакова для усіх мешканців будинку, тоді для системи водопостачання з двома паралельними стояками дванадцяти поверхового будинку ефективним буде рівний розподіл за поверхами: один стояк живить 1-6 поверхи, інший – 7-12. При зміні конфігурації підключення споживачів, ефективність системи буде знижуватись (рис. 5.4 та рис. 5.5).



Рисунок 5.4 – Графік зміни добової економії електричної енергії в залежності від співвідношення кількості поверхів

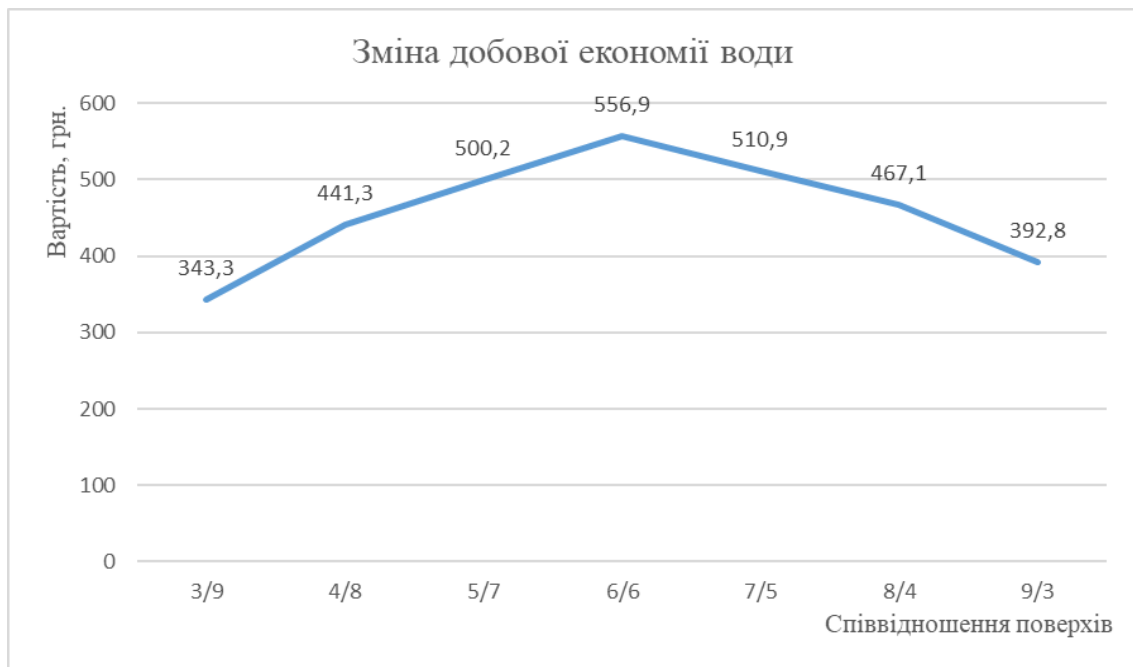


Рисунок 5.5 – Графік зміни добової економії води в залежності від співвідношення кількості поверхів

Отже, для отримання максимального ефекту від використання насосного агрегату з двома виходами у системі паралельного зонного водопостачання, конструкція насосного агрегату повинна відповідати вимогам системи – забезпечувати необхідний тиск та подачу. Зазвичай для підлаштування роботи насосного агрегату під конкретні умови роботи використовують ряд підходів, наприклад, за [77] можуть бути наступні:

- використання дроселювання;
- регулювання роботи двигуна насосного агрегату (регулювання частоти обертання);
- регулювання кількості одночасно працюючих насосів;
- вплив на конфігурацію робочого колеса (наприклад, поворот робочих лопаток).

Перелічені методи мають свої переваги та недоліки. Але більшість із них не релевантна для регулювання запропонованого насосного агрегату двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором: дроселювання знижує ККД системи; регулювання частоти обертання одного колеса не дозволяє запропонована конструкція.

#### **5.4 Дослідження кореляції між потужністю насосного агрегату та його ККД**

Як зазначалось у першому розділі, в системах водопостачання багатоповерхових будинків часто використовується зміна кількості одночасно працюючих насосів для забезпечення мешканців необхідною кількістю води (що за [78] є одним із підходів до підвищення економічної ефективності роботи систем водопостачання).

Вагомим фактором що впливає на загальний ККД насосного агрегату є ККД приводного двигуна. Особливістю асинхронних двигунів є те, що їх номінальний ККД залежить від їх потужності. В роботі [79] досліджено закономірність зміни залежності ККД асинхронних двигунів від їх потужності: із

збільшенням потужності асинхронного двигуна його ККД збільшується. Важливо звернути увагу на те, що в межах одиниці-десятки кіловат потужності двигунів їх ККД може відрізнятись на десятки відсотків.

Отже, враховуємо, що ККД асинхронного двигуна залежить від потужності: більш потужні асинхронні двигуни мають вищий ККД за менш потужні моделі. Вказана закономірність впливає і на загальний ККД насосних агрегатів, що використовують такі двигуни. Щоб кількісно оцінити дане положення, залежність ККД насосного агрегату від потужності можна дослідити на прикладі насосних агрегатів виробника Pedrollo. Розглянуто вказану залежність для кількох випадків: для обраної моделі насосного агрегату, але різних потужностей; а також насосних агрегатів різних типів – консольних та вертикальних (див. додаток 5).

Збільшення ККД насосного агрегату від його потужності (і апороксимаційна залежність [79]) – це загальна закономірність. Але потрібно зауважити, що мають місце і відхилення від неї: в залежності від конструктивних особливостей виконання чи комплектації певних моделей, вони можуть «випадати» із зазначеної закономірності. Навіть в асортименті одного виробника, насосні агрегати однакової потужності можуть мати різне значення ККД, а також мають місце і випадки коли насосний агрегат більшої потужності має нижчий ККД за інший насосний агрегат меншої потужності.

Таким чином, згадана вище практика використання кількох насосних агрегатів меншої потужності замість одного більшої потужності, впливає на ефективність використання електроенергії при подачі води до споживачів через зменшення ККД. Зменшити кількість насосних агрегатів можна за рахунок використання спеціалізованих насосних агрегатів що мають кілька виходів для подачі води до різних стояків: на кшталт консольного відцентрового багатоступінчатого насосного агрегату чи насосного агрегату двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з торойдним статором рисунок [83].

Запропонована конструкція НА оформлена у вигляді заявки на винахід № а 2023 01994 від 27.04.2023 [83].

## Висновки до Розділу 5

Проаналізовано різні конструкції відцентрових насосів. Визначено прототипи які б служили основою для створення оптимального насосного агрегату який би органічно доповнив систему паралельного зонного водопостачання на основі двох стояків.

Тож поєднання обох надійних та ефективних пристроїв (відцентрового насосу та асинхронного двигуна) в одну конструкцію дозволило запропонувати винахід – насосний агрегат двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором. Основними перевагами розробленого насосного агрегату є:

- надійність конструкції та простота зборки;
- ефективне охолодження (що збільшує довговічність роботи пристрою);
- герметичність конструкції;
- понижений рівень шуму;
- високий ККД обумовлений як зменшенням втрат електричної енергії так і зменшення об'ємних втрат (за рахунок зменшення перетоків і мінімізації можливості виникнення витоків через герметичність конструкції).

Зазначені переваги є передумовами для широкого використання запропонованого насосного агрегату, в тому числі і у системах водопостачання багатоповерхових будинків.

## ВИСНОВКИ

Дане дослідження присвячено актуальній проблемі, що стосується як України так і більшості країн світу: підвищення енергетичної та ресурсної ефективності систем водопостачання багатоповерхових будинків. У роботі розв'язано наукове завдання: обґрунтування конструктивних параметрів електромеханічних систем водопостачання багатоповерхових будинків із паралельним зонуванням для збільшення енергетичної та ресурсної ефективності.

В результаті проведення дослідження отримано наступні результати.

1. Досліджено перспективи зміни попиту на електроенергію та воду. Встановлено, що у світі, найближчі два десятиліття, попит на електроенергію та воду буде зростати. Очікується зростання попиту на електроенергію у промисловості, транспортній галузі, побуті тощо. В залежності від галузі, прогнозоване зростання попиту може сягнути десятків відсотків по відношенню до сьогодення, зокрема, прогнозується, що до 2050 року попит домогосподарств електроенергії може зрости на 75%. Очікується зростання попиту і на воду: прогнозується щорічне збільшення попиту на 1% (за оцінками фахівців даний тренд збережеться до 2050 року).

Виконано аналіз поширених систем водопостачання багатоповерхових будинків: їх різновиди, елементи конструкції та ефективність. Найбільш розповсюдженими є: системи в яких вода до споживачів подається по одному стояку; системи з накопичувальною ємністю на даху; різновиди систем зонного водопостачання, зокрема системи з установкою насосних агрегатів на проміжних поверхах з використанням накопичувальних ємностей та без них, системи паралельного зонного водопостачання. Встановлено, що найбільш дешевими у побудові є системи з одним стояком, але ці системи водопостачання є одними з найбільш енерговитратних в процесі експлуатації; одними з дорожчих у побудові є системи паралельного зонного водопостачання, але вони є одними з найменш енерговитратних в процесі їх експлуатації.

Встановлено, що найбільш поширеними насосними агрегатами для систем водопостачання багатоповерхових будинків є такі, що складаються із



асинхронного електродвигуна (з короткозамкненими ротором) та відцентрового насосу. Широке використання таких насосних агрегатів обумовлено їх надійністю, високим значенням ККД, невибагливістю в обслуговуванні та відносно невеликою вартістю.

Виконано аналіз досліджень впливу надлишкових тисків у системах водопостачання. Встановлено, що збільшення надлишкових тисків призводить до збільшення витрат електроенергії та води, а також підвищує вірогідність виникнення аварій. За даними проаналізованих досліджень збільшення тиску на 1 атмосферу призводить до збільшення витрат в межах 5-15%.

2. Розроблено і програмно реалізовано математичну модель усталених режимів роботи електромеханічної системи водопостачання багатопверхових будинків із паралельним зонуванням, яка забезпечує визначення з урахуванням взаємного впливу електромеханічного і гідравлічного обладнання: параметрів математичної моделі за поверхами будинку із використанням даних про режимні параметри (добової циклограми витрат і тиску на вході системи, координати робочих точок і напірної характеристики насосу, ступеня збільшення добового водоспоживання будинком за зміни тиску на вході системи) базового варіанту системи для дослідження в умовах зміни кількості поверхів і розподілу їх на зони паралельного водопостачання; розподілу витрат води за поверхами з урахуванням впливу величини надлишкового напору; напорів і споживаної системою потужності; інтегральної за цикл величини показника ефективності системи за варіювання кількості поверхів і зон, тиску на вході.

3. Розроблено вираз комплексного критерію ефективності розгалужених електромеханічних систем водопостачання, який визначає співвідношення корисного продукту системи (обсяг потрібної і доставленої споживачу води) із спожитими ресурсами, враховуючи вартість електроенергії та води, за яким порівняно ефективність системи водопостачання з одним стояком та систем паралельного зонного водопостачання.

Проведена порівняльна оцінка ефективності системи водопостачання з одним стояком та двома паралельними стояками показала, що для дванадцятиповерхового будинку:

- система з двома паралельними стояками є ефективнішою за систему з одним стояком на 25% за показником енергоефективності та на 3,8% за показником витрати води;

- застосування системи паралельного зонного водопостачання з двома стояками замість системи водопостачання з одним стояком, у дослідженому у роботі прикладі, забезпечує добову економію коштів на оплату електроенергії – 84,14 грн., добову економію коштів на оплату води – 522,6 грн. (за цінами станом на перший квартал 2024 року).

Проведена порівняльна оцінка ефективності системи водопостачання з одним стояком та трьома паралельними стояками показала:

- система з трьома різнорівневими паралельними стояками є ефективнішою за систему з одним стояком на 32,97% за показником енергоефективності та на 5,11% за показником витрати води;

- застосування системи паралельного зонного водопостачання з трьома стояками замість системи водопостачання з одним стояком забезпечує добову економію коштів на оплату електроенергії – 110,60 грн., добову економію коштів на оплату води – 708,20 грн. (за цінами станом на перший квартал 2024 року).

4. На базі розробленої математичної моделі проведено чисельний експеримент і визначено наступні закономірності.

За критерієм максимуму енерго- та ресурсоефективності проведено аналіз співвідношення розподілу споживачів за стояками системи паралельного зонування, який показав, що в межах співвідношень кількості поверхів на зону для 12 поверхового будинку від 3/9 по 9/3 (з кроком 1 поверх), оптимальним є рівномірний розподіл споживачів по стоякам: 6/6.

В результаті проведення дослідження в діапазоні зміни коефіцієнту впливу 1 атмосфери надлишкового тиску на відсоток збільшення водоспоживання (F) в межах 5-10%, встановлено, що в умовах проведеного дослідження для

дванадцятиповерхового будинку поточні грошові витрати на постачання води зросли до рівня 70%. Враховуючи важливий вплив величини коефіцієнту  $F$  на результати дослідження, його величина повинна уточнюватись в умовах конкретного аналізу, у загальному випадку вона рекомендується на рівні 5-8% (за результатами даних літератури – діапазон коливання  $F$  становить 5% - 15% ).

5. Капітальні витрати на систему паралельного зонного водопостачання вищі за витрати на систему водопостачання з одним стояком. Збільшення вартості відбувається за рахунок збільшення витрат на насосний агрегат, труби та інше супутнє обладнання та монтажні роботи. На базі отриманих значень добової економії електроенергії та води, виражених у гривні, що були отримані при порівнянні ефективності системи водопостачання з одним стояком та систем паралельного зонного водопостачання що склалися з двох та трьох стояків, було обґрунтовано доцільність впровадження систем паралельного зонного водопостачання. Результати розрахунків показали, що завдяки зекономленим експлуатаційним витратам при впровадженні системи паралельного зонного водопостачання замість системи водопостачання з одним стояком для умов дванадцятиповерхового будинку, терміни окупності різниці капітальних витрат складають: для системи з двома паралельними стояками – 14 місяців; для системи з трьома – 15 місяців.

Крім цього, ефективність обох розглянутих систем паралельного зонного водопостачання показує що можливе повне повернення коштів, що були витрачені на створення цих систем водопостачання: для дванадцятиповерхового будинку розрахована ефективність від впровадження системи з двома паралельними стояками порівняно із системою з одним стояком (але без експлуатаційних затрат, пов'язаних із обслуговуванням та ремонтами) за десять років роботи склала 5063317 грн., при розрахунковій вартості системи з двома паралельними стояками 1052200 грн.; розрахункова ефективність від впровадження системи з трьома паралельними стояками порівняно із системою з одним стояком за десять років роботи склала 7258755 грн., при розрахунковій вартості системи з трьома паралельними стояками 1254600 грн.

6. Проведені в даній роботі дослідження показують, що електромеханічні системи паралельного зонного водопостачання, що складаються з двох чи трьох стояків, є ефективнішими за системи водопостачання з одним стояком як за показником енергетичної ефективності так і за показником ресурсної ефективності. На підставі цього рекомендовано, при проектуванні систем водопостачання багатоповерхових будинків, застосовувати системи паралельного зонного водопостачання замість системи з одним стояком, використовуючи для оцінки ефективності математичну модель, запропоновану в даній роботі.

Для систем паралельного зонного водопостачання рекомендовано застосування спеціалізованих насосних агрегатів. В результаті проведеного дослідження було встановлено, що одним із факторів підвищення ККД системи водопостачання є заміна двох насосних агрегатів паралельних стояків одним більш потужним, продуктивність якого дорівнювала двом менш потужним. Щоб забезпечити подачу води до двох паралельних стояків було розроблено конструкцію насосного агрегату, що має два виходи, на яку подано заявку на винахід: «Насосний агрегат двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором» [83]. Основними перевагами розробленого насосного агрегату є: надійність конструкції та простота складання; герметичність конструкції; знижений рівень шуму; ефективне охолодження (що збільшує довговічність роботи пристрою); високий ККД обумовлений зменшенням втрат електричної енергії, як на подолання втрат на нагрів і тертя (компенсація осьової сили за двобічного всмоктування), так і за зменшенням об'ємних втрат (за рахунок зменшення перетоків і мінімізації можливості виникнення витоків через герметичність конструкції).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. United Nations, Department of economic and social affairs, The World Population Prospects: The 2017 Revision
2. World Bank Group, Urban Development, 2023, [Online]. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
3. Rodrigues F., Afonso S., Mariano N., Water efficiency in buildings: a contribute to energy efficiency, 36th international Symposium of CIB W062 on ‘Water Supply and Drainage for Buildings’, July 2012.
4. International Energy Agency, Electricity 2024 Analysis and forecast to 2026 (Report), Typeset in France by IEA, January 2024
5. ExxonMobil, Energy demand: Three drivers, Report, January, 2024.
6. Nguyen Lan Huong, Nguyen Viet Anh, Dang Thi Thanh Huyen, Tran Hoai Son, Dinh Viet Cuong, Optimization to water supply system design and operation scheme in high rise buildings. Journal of Science and Technology in Civil Engineering. 2018. Vol. 12. No 3. Pp. 123-131. DOI: [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(3\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(3)-12)
7. Wong, L. T., Mui, K. W., Lau C. P., Zhou, Y. Pump efficiency of water supply systems in buildings of Hong Kong. Energy Procedia, 61:335–338. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.1119
8. Zimoch I, Bartkiewicz E, Optimization of energy cost in water supply system, E3S Web of Conferences 22, 00204 (2017). DOI: 10.1051/e3sconf/20172200204
9. Danilo Ferreira de Souza, Emeli Lalesca Aparecida da Guarda, Ildo Luis Sauer, Hédio TatizawaEnergy, Efficiency Indicators for Water Pumping Systems in Multifamily Buildings, Energies 2021, 14, 7152. <https://doi.org/10.3390/en14217152>
10. Kepa U., Stepniak L., Stanczyk-Mazanek E., Chudzik K. Analysis of the Structure of Water Demand with the Example of Selected Buildings, Proceedings 2019, 16, 47. doi:10.3390/proceedings2019016047
11. United nations, The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO, Paris, 2024.

12. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт)// Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021, 68 с.
13. Прокопенко О., Вишнеvsька О. Статистичний збірник «Довкілля України», Державна служба статистики України, 2022.
14. Луцько В.С. Екологічна безпека водних ресурсів України в умовах глобалізації, Український центр водно-екологічних проблем, 2018.
15. Гіпп Т.Р. Технічний стан систем централізованого водопостачання та водовідведення, Український центр водно-екологічних проблем, 2018.
16. Hoekstra A.Y. Virtual water trade Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series No. 12, IHE Delft, The Netherlands December 2002
17. Hedieh Ahmadpari1, Elnaz Namdari ghareghani, Farzaneh Vakili tajareh, Virtual Water a Solution to Water Resources Management, Interational conference in Agriculture, natural resoures and Eviroment, 2018
18. Shiv Narayan Nishad, Naresh Kumar, Virtual water trade and its implications on water sustainability, Water Supply (2022) 22 (2): 1704–1715., doi: 10.2166/ws.2021.322
19. Bergel T., Kotowski T., Woyciechowska O., Daily water consumption for household purposes and its variability in a rural household, Journal of Ecological Engineering Volume 17, Issue 3, July 2016, pages 47–52  
DOI: 10.12911/22998993/63312
20. Matt Burdett, Case study of water supply and sanitation infrastructure: Hong Kong, GeographyCaseStudy.Com, 2019, [Online]. URL:  
<https://geographycasestudy.com/case-study-of-water-supply-and-sanitation-infrastructure-hong-kong/>
21. Yang Zhou, Eric Wai Ming Lee, Ling-Tim Wong, Kwok-Wai Mui. Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. Water. 2019. Vol. 11(12). 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122580>

22. Marinoski Ana Kelly, Rupp Ricardo Forgiarini, Enedir Ghisi, Environmental benefit analysis of strategies for potable water savings in residential buildings, *Journal of Environmental Management* 206 (2018), 28-39
23. Vianna J.T.D.S., Sant'Ana D. A financial analysis of water conservation technologies in residential dwellings of the Federal District, Brazil, *Symposium CIB W062*, 2021
24. Enedir Ghisi, Sulayre Mengotti de Oliveira, Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil, 2006 Elsevier Ltd., doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.001
25. Khaldoun A. Mourad, Justyna C. Berndtsson, Ronny Berndtsson, Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria, *Journal of Environmental Management*, Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.jenvman.2011.05.004
26. Schuetze T., Santiago-Fandiño V. Quantitative Assessment of Water Use Efficiency in Urban and Domestic Buildings, *Water* 2013, 5, 1172-1193; doi:10.3390/w5031172
27. Державні будівельні норми України, Внутрішній водопровід та каналізація, Частина I. Проектування, частина II. Будівництво, ДБН В.2.5-64:2012, Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012 – 122 с
28. Гипп Т.Р., Тихонова И.А., Тазалова Н.Н., Энергосбережение в системах водоснабжения, Український центр водно-екологічних проблем, 2018
29. Alexandre Magno Ferreira Diniz, Cristiano Horade Oliveira Fontes, Caiuby Alves Da Costa, Gloria Meyberg Nunes Costa. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energyefficiency. *Energy Efficiency*. 2015. No 8. Pp. 417-432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9292-4>
30. C.T. Cheung, K.W. Mui, L.T. Wong, Energy efficiency of elevated water supply tanks for high-rise buildings, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.041>
31. Hassan I. Mohamed, Ali A. M. Gad, Effect of Cold-Water Storage Cisterns on Drinking-Water Quality, *Journal of water resources planning and management*, ASCE, September/October, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000132

32. Branislav Babić, Aleksandar Đukić, Miloš Stanić, Managing water pressure for water savings in developing countries, *Water SA*, Vol. 40 No. 2 (2014), 221-232, doi.org/10.4314/wsa.v40i2.4
33. Jinhui Zhao, Xi Xie, Ranbin Liu, Yao Sun, Mengke Wu, Jiahua Gu, Water and energy saving potential by adopting pressure-reducing measures in high-rise building: A case analysis, *Building Services Engineering Research & Technology* 39(5), 2018.
34. Suchacek T., Tuhovcak L., Rucka J., Sensitivity analysis of water consumption in an office building, *E3S Web of Conferences* 30, 01002 (2018) *Water, Waste water and Energy in Smart Cities*, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183001002>
35. B. Srinivasa Rajkumar, Anders Neilsen, Water distribution in high rise buildings, Grundfos, [Online]. URL: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400727.pdf>
36. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>
37. Шевчук С.П., Попович О.М., Світлицький В.М. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки, Підручник, - К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 308 с.
38. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, Відповіді на запитання по темі можливого перегляду тарифів на централізоване водопостачання та централізоване водовідведення (ЦВВ), 2023
39. FADO, Запірна арматура, труби, шланги, інструмент: Каталог, 2018
40. Чорнобривець І. ТОП-10 найвищих будинків Києва: рейтинг та фото [Online]. URL: [https://realestate.24tv.ua/top-10-nayvishhih-budinkiv-kiyeva-foto-opisom-ostanni-novini\\_n1628918](https://realestate.24tv.ua/top-10-nayvishhih-budinkiv-kiyeva-foto-opisom-ostanni-novini_n1628918)
41. Dwyer T. Pumping wholesome water in buildings, *CIBSE journal*, 2019, [Online]. URL: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2019-10-wat/>
42. Сашко В. О., Терещенко Т. М. Водопостачання. Навчальний посібник, Ресурсний центр ГУРТ, 2019



43. Кравченко В. С., Водопостачання та каналізація. Підручник. – «Кондор», Київ, 2009 – 288с.
44. Герасимов Г. Г. Гідравлічні та аеродинамічні машини: Підручник. – Рівне: НУВГП, 2008. – 241 с.
45. Заміховський Л.М., Паньків Ю.В. Контроль технічного стану відцентрових насосних агрегатів систем підтримання пластового тиску, Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2012. № 2(43)
46. Вертикальні багатоступеневі електричні насоси, що обладнані двигунами, Каталог, LOWARA a xylem brand, код 19100207C, Ред. F, Вид. 09/2017, 148 с.
47. HT, HT-Pro Vertical multistage electric pumps, Pedrollo, Product Catalog
48. Попович О. М., Головань І.В., Засоби комплексного проектування для вдосконалення електромеханічних систем з асинхронними двигунами, Технічна електродинаміка, №2 (2022), с 52-59, <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>
49. Шадура В.О., Кравченко Н.В., Водопостачання та водовідведення: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2018. 343 с.
- 50 Національний стандарт України, Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі, Будівельна кліматологія, ДСТ-Н Б В.1.1-27:2010, Київ, Мінрегіонбуд України, 2011 – 123 с.
51. Wong, L. T., Mui, K. W. A Review of Demand Models for Water Systems in Buildings including a Bayesian Approach, Water 2018, 10(8), 1078; <https://doi.org/10.3390/w10081078>
52. Wong, L. T., Mui K. W., Zhou Y. Energy efficiency evaluation for the water supply systems in tall buildings, Building Services Engineering Research and Technology (Volume 38 and issue 4) pp. 400-407. DOI: 10.1177/0143624417699857
53. Yuet Fai Lo, Ling TimWong, Kwok Wai Mui, Mosaic analysis for personal water consumption in residential buildings in Hong Kong, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 121 (2018) 052086 doi :10.1088/1755-1315/121/5/052086
54. Попович О.М., Яшин Р. В. Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку із

дворівневими стояками, Технічна електродинаміка, 2023 №1, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.042>

55. Попович О.М., Яшин Р. В., Дослідження економії енергетичних і водних ресурсів в системі водопостачання багатоповерхового будинку за дворівневих стояків, Технічна електродинаміка, 2025. - №1. – С.57 – 64, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.057>

56. Попович О.М., Головань І.В., Сліденко В.М., Лістовщик Л.К., Поліщук В.О., Яшин Р.В. Математична модель електромеханічної системи нафтовидобування для комплексного проектування, Енергетика: економіка, технології, екологія, 2021. - № 3. – С. 78 – 87, DOI 10.20535/1813-5420.3.2021.251209

57. Попович О.М. Моделювання систем з сезонними тепловими акумуляторами відновлюваної енергетики // Відновлювана енергетика. – 2023. – № 3. – С. 115 – 126. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\)115-126](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74)115-126)

58. Попович О.М., Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання, Технічна електродинаміка. – 2010. – № 4. – С. 25–32

59. Яшин Р. В. Визначення параметрів математичної моделі системи водопостачання багатоповерхового будинку за зміни вхідного тиску, Енергетика: економіка, технології, екологія, 2024. - № 3 . – С. 40 – 46, DOI 10.20535/1813-5420.3.2024.314532

60. Попович О.М., Яшин Р.В. Комплексний підхід до ощадного використання електричної енергії та води у системах водопостачання Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник наукових праць ІХ Міжнародної науково-технічної конференції у місті Києві 22-24 листопада 2023 р. – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С.97.

61. Попович О.М., Яшин Р. В. Підвищення енергетичної ефективності систем водопостачання за паралельного зонування, Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування, Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції м. Київ, 19 жовтня 2023 р. с.110-111.

62. Яшин Р. В. Зоноване водопостачання як реалізація заходів для енергозбереження та енергоефективності в системах водопостачання багатопверхових будинків. Збірник наукових праць XXIV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 18–19 травня 2023 року – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С.149-150.
63. Національний стандарт України, Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі, Будівельна кліматологія, ДСТ-НБ В.1.1-27:2010, Київ, Мінрегіонбуд України, 2011 – 123 с.
64. Fado, Трубні системи, шланги, запірна арматура, інструменти та матеріали, Прайс, [Online]. URL: <https://f-kyiv.com/rus/shop/trubni-systemy/fado-truby/polipropilenovi-trubi-fado-ppr/>
65. Pedrollo, Насоси, труби, комплектуючі : прайс-каталог, 2023.
66. Elsey J. 13 Common Factors that Affect Pump Life, Pumps and Systems, 2016, [Online]. URL: <https://www.pumpsandsystems.com/13-common-factors-affect-pump-life>
67. Тарифи на водопостачання в Києві [Online]. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/kyiv/water/2015-05-01/>
68. Тарифи на електроенергію [Online]. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/2012-10-01/>
69. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, Відповіді на запитання по темі можливого перегляду тарифів на централізоване водопостачання та централізоване водовідведення (ЦВВ), 2023 НКРЕКП про можливого перегляду тарифів на централізоване водопостачання та централізоване водовідведення (ЦВВ), [Online]. URL: <https://www.nerc.gov.ua/news/nkrekp-pidgotuvala-vidpovidi-na-zapitannya-po-temi-mozhlivogo-pereglyadu-tarifiv-na-centralizovane-vodopostachannya-ta-centralizovane-vodovidvedennya-cvv>

70. Герметичний аксіальний мотор-насос двостороннього входу: пат. 122698 Україна: МПК F04D 13/06 (2006.01), F04D 7/02 (2006.01). № u 2017 07159; заявл. 07.07.2017; опубл. 25.01.2018; Бюл.№ 2
72. Multi-tunnel electric motor/generator, US11374442B2, 2022, H02K 1/02 (2006.01), H02K 1/17 (2006.01)
73. Козлов В. Д. Електричні апарати. Модуль І. Загальні питання електричних апаратів: Посібник – К.: НАУ, 2005. – 92 с.
74. Тришаровий масивний ротор асинхронного двигуна, Патент на корисну модель №26574 Україна, МПК H02K 1/22. / О.М. Попович, І.В. Головань І.В (Україна). – № 45784530/32; Заявл. 04.06.07; Опубл. 25.09.07. – Бюл. №15. – 4 с.
75. Шадура В. О., Кравченко Н. В. Водопостачання та водовідведення. Навчальний посібник, Рівне, 2018, 343 с.
76. Ashish R. Phanse, Dr. Pitroda J. R., Water Efficiency and Management in Green Building: A Review, ADBU-Journal of Engineering Technology, Phanse, AJET, ISSN: 2348-7305, Volume 10, Issue 2, July, 2021 0100200134(8PP)
77. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навчальний посібник – Кременчук: видавництво ПП Щербатих О. В., 2014. – 200 с.
78. Маляренко В.А., Немировский И.А. Энергосбережение и энергетический аудит. Учебное пособие, (2008), ХНАМГ, Харьков. ISBN 966-695-085-5
79. Попович О. М., Моделювання систем з сезонними тепловими акумуляторами відновлюваної енергетики, Відновлювана енергетика, 2023 №3 (74), с.115 - 126
80. Електронасоси відцентрові з двома робочими колесами, 2CP, Pedrollo, Каталог продукції
81. Насоси відцентрові з нержавіючої сталі, CP-ST, Pedrollo, Каталог продукції
82. Електронасоси відцентрові стандартизовані згідно з EN733, модель F , Pedrollo, Каталог продукції
83. Насосний агрегат двостороннього входу з інтегрованим електродвигуном з тороїдним статором: заявка на винахід № а 2023 01994 від 27.04.2023

## **Додаток 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації**

1. Попович О.М., Яшин Р. В. Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку із дворівневими стояками, Технічна електродинаміка, 2023 №1. – С. 42 – 50, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.042>

2. Попович О.М., Головань І.В., Сліденко В.М., Листовщик Л.К., Поліщук В.О., Яшин Р.В. Математична модель електромеханічної системи нафтовидобування для комплексного проектування, Енергетика: економіка, технології, екологія, 2021. - № 3. – С. 78 – 87, DOI 10.20535/1813-5420.3.2021.251209

3. Яшин Р. В. Визначення параметрів математичної моделі системи водопостачання багатоповерхового будинку за зміни вхідного тиску, Енергетика: економіка, технології, екологія, 2024. - № 3 . – С. 40 – 46, DOI 10.20535/1813-5420.3.2024.314532

4. Попович О.М., Яшин Р. В. Дослідження економії енергетичних і водних ресурсів в системі водопостачання багатоповерхового будинку за дворівневих стояків, Технічна електродинаміка, 2025. - №1. – С.57 – 64, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.057>

5. Попович О.М., Яшин Р.В., Комплексний підхід до ощадного використання електричної енергії та води у системах водопостачання Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-технічної конференції у місті Києві 22-24 листопада 2023 р. – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С.97.

6. Попович О.М., Яшин Р. В, Підвищення енергетичної ефективності систем водопостачання за паралельного зонування, Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування, Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції м. Київ, 19 жовтня 2023 р. с.110-111.

7. Яшин Р. В. Зоноване водопостачання як реалізація заходів для енергозбереження та енергоефективності в системах водопостачання багатоповерхових будинків. Збірник наукових праць XXIV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 18–19 травня 2023 року – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С.149-150.

**Додаток 2. Модуль паралельно підключених насосних агрегатів на базі  
вертикальних відцентрових насосів**



Рисунок Д2.1 – Модуль із паралельно підключених насосних агрегатів для  
подачі води у багатоповерховому будинку [41]

### Додаток 3. Вертикальні багатоступінчасті насосні агрегати

Одним з різновидів багатоступінчатих насосних агрегатів, що застосовуються у системах водопостачання багатоповерхових будинків, – є вертикальні моделі (див. рис. Д3.1).

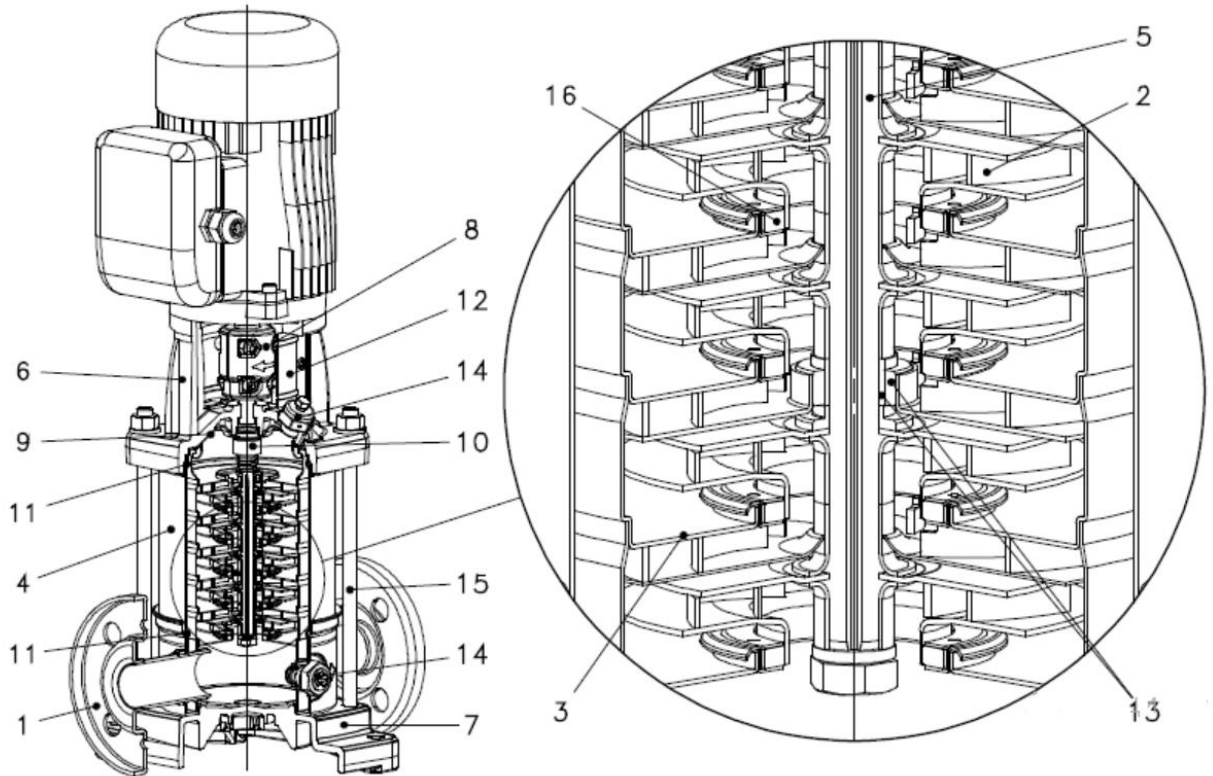


Рисунок Д3.1 – Конструкція вертикального насосного агрегату на базі асинхронного двигуна та багатоступінчатого відцентрового насосу [46]

В основі конструкції цих НА також – відцентровий насос та асинхронний двигун. Особливістю таких моделей є те, що дуже часто такі насоси мають кілька ступеней, що дозволяє створювати високі тиски, як результат – використовувати у системах водопостачання багатоповерхових будинків.

Представлений насос складається: 1 – корпус; 2 – робоче колесо; 3 – дифузор; 4 – зовнішня гільза; 5 – вал; 6 – перехідник; 7 – основа; 8 – муфта; 9 – ущільнювальна камера; 10 – торцеве ущільнення; 11 – еластomers; 12 – захист



муфти; 13 – втулка валу та фланець-втулка; 14 – заливна та зливна пробки; 15 – з'єднувальні шпильки; 16 – кільце.

Загальною рисою багатоступінчастих відцентрових насосів є відносно невеликі значення ККД. Вертикальні моделі не виключення. Підтвердженням цього твердження може служити лінійка сучасних насосних агрегатів Pedrollo (модельний ряд НТ): в розглянутому діапазоні потужностей 1,8 – 15 кВт значення ККД відповідно коливається у межах 38 – 63 % [47]. Не дивлячись на низький ККД такі насоси мають і переваги, зокрема: є можливість узгодження характеристики насоса із характеристикою мережі завдяки зміні кількості робочих коліс [37].

Ще одним різновидом, але менш відомим є насоси двостороннього всмоктування (двопотічні насоси, насоси типу «Д»). В залежності від особливостей будови конкретної моделі, двостороннього всмоктування насоси мають розвантаження конструкції від осьових та радіальних зусиль – зменшують навантаження на відповідні підшипники [37], [44]. Зазначена особливість підвищує надійність та довговічність роботи таких насосів.

Ще одною позитивною рисою насосів двостороннього всмоктування є вищий ніж у консольних насосів ККД. В консольних насосах для зменшення осьових сил, що прискорюють зношування підшипників і зменшують механічний ККД застосовуються заходи що зменшують їх гідравлічний ККД та ускладнюють конструкцію: попарний монтаж робочих коліс з метою їх врівноваження; встановлення на задньому диску розвантажувальних лопаток; встановлення додаткового кільцевого ущільнення на задньому диску робочого колеса; застосування розвантажувальних втулок чи дисків; відвід частини рідини з виходу машини на її вхід тощо [31].

#### Додаток 4. Аналіз конструкції відомих технічних рішень (НА та АД)

По своїм параметрам, найбільш близькою до зазначеного вище є модель аксіального мотор-насосу двостороннього входу [70], див рис. Д4.1

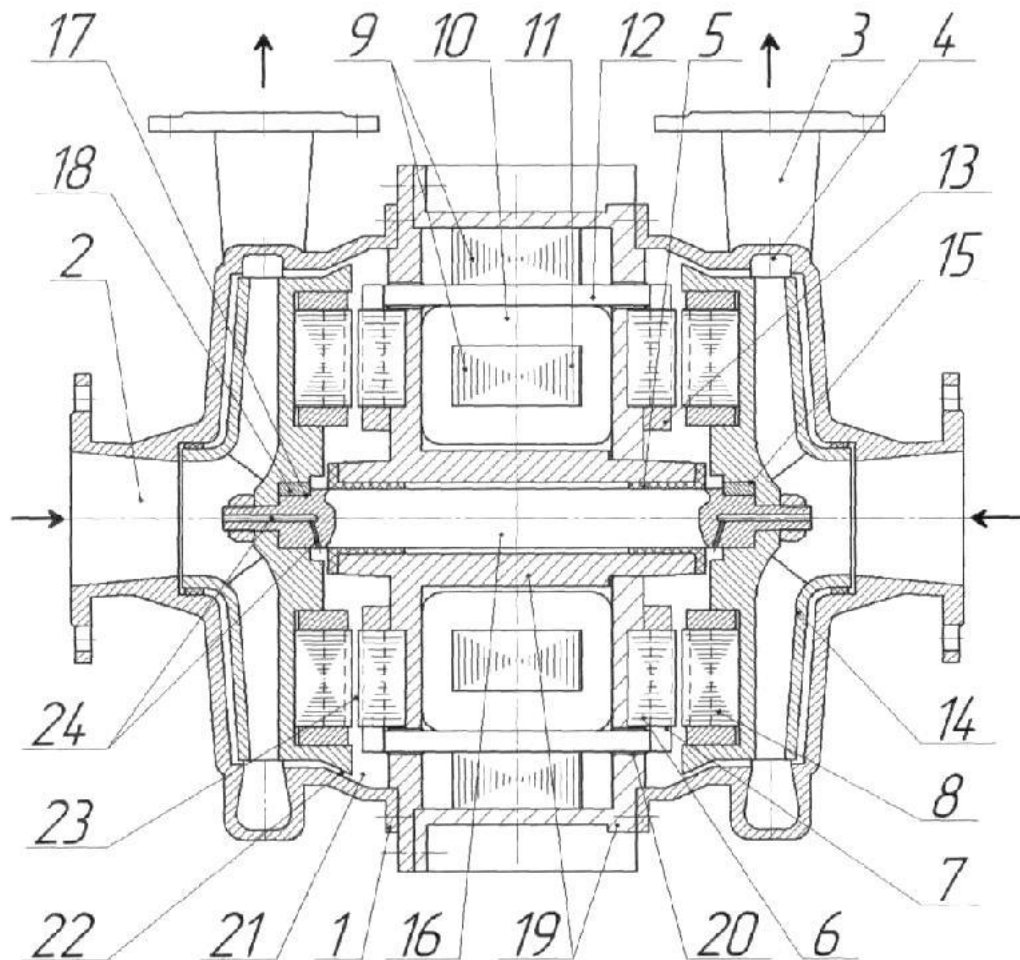


Рисунок Д4.1 – Герметичний аксіальний мотор-насос двостороннього входу [70]

Числами на рисунку позначено: 1 - корпус; 2 – патрубок всмоктування; 3 – патрубок нагнітання; 4 – відвід; 5 – радіально-упорні підшипники ковзання; 6 – статор; 7 – низьковольтна стрижнева обмотка; 8 – ротор з короткозамкненою обмоткою; 9 – магнітопровід; 10 – обмотка; 11 – ярмо; 12 – стрижнева вторинна

обмотка; 13 – короткозамкнені кільця; 14 – робоче колесо; 15 – шпоночний паз; 16 – вал; 17 – шпоночний паз; 18 – шпонка; 19 – станина; 20 – гермовводи; 21 – порожнина; 22 – зазор; 23 – щілина; 24 – отвір (для проходження рідини).

Недоліком даного насосного агрегату є трансформатор, що знижує пускові властивості і енергетичну ефективність через подвійну трансформацію електричної енергії. Влаштування магнітопроводу ротора на робочому колесі знижує надійність конструкції (через вплив температурних коливань на міцність з'єднання); крім цього знижує і енергетичну ефективність через труднощі забезпечення рівномірного немагнітного зазору між ротором та статором. Надійність конструкції також знижується через наявність гермовводів: впродовж циклу роботи агрегату виникають значні температурні коливання між корпусом та струмопроводом. Зниження енергетичної ефективності через наявність довгих стрижневих з'єднань трансформатора та обмоток статора.

Американськими розробниками запропоновано конструкцію мульти-тунельного електричного двигуна/генератора [72]. Недоліком даного двигуна є невірноваженість аксіального положення ротора. Вона може призвести до виникнення невірноваженої аксіальної електромагнітної сили тяжіння через проміжки торцевих поверхонь між статором та ротором, як наслідок – аксіальних зусиль на підшипники. Додаткові навантаження на підшипники збільшать механічні втрати та вплинуть на довговічність роботи підшипників. Крім того, відведення тепла ускладнено через щільне оточення статора обертовими поверхнями ротору: в процесі експлуатації не відведене тепло вплине на надійність його обмотки (наприклад, довготривале перевищення температури ізоляції на вісім градусів вище номінальної знижує термін її служби удвічі [73]). Значна кількість складових елементів зубців статора та опорної конструкції погіршує надійність та зменшує точність закріплення статора, що спричинить нерівномірність немагнітних проміжків між ротором та статором, що стане причиною збільшення втрат на зменшення надійності механічних вузлів конструкції.

Також відомий асинхронний двигун [74] з тришаровим масивним ротором, з валом, на якому змонтовано циліндричне шихтоване осердя, зовні якого розміщено втулки (феромагнітні) з наскрізними осьовими прорізами (крім торцевих зон та центральної частини). Будова даного виробу має певні недоліки: конфігурація зубцевої зони, що призначена працювати за умов нерівномірного повітряного проміжку за наявності напіввідкритих пазів статора, які є причиною значних втрати у масивних елементах ротора. На додачу, зіставна конструкція ротора ускладнює його поєднання з робочим механізмом, що призводить до зниження надійності конструкції.

## Додаток 5. Дослідження взаємозв'язку потужності НА з їх ККД

Проаналізовано залежність заявлених ККД від потужності для насосних агрегатів Pedrollo модельний ряд 2CP [80]. Насосні агрегати 2CP відносяться до відцентрових електронасосів з двома робочими колесами. Для порівняння було вибрано п'ять насосних агрегатів потужністю від 1,1 до 7,5 кВт із зазначенням максимального показника ККД для даного насосного агрегату. Дані наведено в таблиці Д5.1.

Таблиця Д5.1 – Значення потужності та ККД для НА 2CP

Артикул	Потужність, кВт	ККД, %
2CP 25/14B	1,10	37,00
2CP 25/16B	1,50	44,50
2CP 32/200	4,00	47,00
2CP 40/180B	5,50	56,00
2CP 40/180A	7,50	56,50

Для розглянутих насосних агрегатів показовими є дані: 2CP 25/14B потужністю 1,1 кВт має ККД 37%, модель 2CP 40/180B потужністю 5,5 кВт має ККД 56%.

Наступним проведено дослідження відцентрового насосу з одним робочим колесом (лінійка невеликої потужності 0.37 – 1.1 кВт) [81]. Дані щодо відповідності моделі-потужності-ККД для лінійки насосних агрегатів CP-ST– у таблиці Д5.2.

Таблиця Д5.2 – Значення потужності та ККД для НА CP-ST

Артикул	Потужність, кВт	ККД, %
CP 130-ST4	0,37	45,00
CP 132-ST4	0,55	48,00
CP 150-ST4	0,75	50,00
CP 180-ST4	1,10	54,00

Одна з лінійок насосних агрегатів Pedrollo, що позначається як F [82], представлена моделями різної потужності від 1.5 до 22 кВт, що також дає змогу оцінити залежність ККД від потужності. Дані наведено в таблиці Д5.3.

Таблиця Д5.3 – Значення потужності та ККД для НА СР-ST

Артикул	Потужність, кВт	ККД, %
F 32/160C	1,50	57,00
F 32/160B	2,20	58,00
F 32/160A	3,00	62,00
F 40/160A	4,00	68,00
F 50/160B	5,50	70,00
F 50/160A	7,50	72,00
F 65/160A	15,00	81,00
F 80/160A	22,00	84,00

За даними [82] також можна відслідкувати закономірність зміни величини ККД від потужності: наприклад, для насосного агрегату F 32/160C потужністю 1,5 кВт значення ККД 57%, а для моделі F 80/160A потужністю 22 кВт відповідає значення ККД - 84%.