

## СПОСІБ ОПОСЕРЕДКОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ НАСОСНОГО АГРЕГАТА В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Вінницький національний технічний університет;

### *Анотація*

Отримав подальшого розвитку спосіб визначення коефіцієнта корисної дії насосного агрегату. Спосіб базується на використанні математичної залежності спожитої насосним агрегатом енергії від параметрів його роботи. При цьому, визначення коефіцієнта корисної дії відбуватиметься в процесі роботи установки в режимі реального часу.

Запропонований спосіб можна використати для аналізу ефективності роботи систем водопостачання шляхом комп'ютерного моделювання, а також для розробки пристрою визначення ефективності роботи насосних агрегатів.

**Ключові слова:** *спосіб, ефективність, насосний агрегат, коефіцієнт корисної дії, електричний двигун, відцентровий насос, опосередковане визначення, комп'ютерна модель.*

### **Abstract**

The method of determining the efficiency of the pumping unit received further development. The method is based on the use of the mathematical dependence of the energy consumed by the pump unit on the parameters of its operation. At the same time, the efficiency factor will be determined during the operation of the installation in real-time mode.

The proposed method can be used to analyze the efficiency of water supply systems by computer modeling, as well as to develop a device for determining the efficiency of pumping units.

**Key words:** *method, efficiency, pump unit, efficiency, electric motor, centrifugal pump, indirect determination, computer model.*

### **Вступ**

Визначення коефіцієнта корисної дії насосу та електричного двигуна відбувається на стадії випуску готової продукції заводами-виробниками відповідного обладнання. Часто такі випробовування виконуються лише для окремої кількості відібраних одиниць готової продукції із великої кількості установок під час серійного випуску.

В процесі роботи відцентрових насосів та електричних двигунів їх ефективність зменшується. Зростає кількість несправностей та кількість спожитої енергії за виконання однієї і тієї ж роботи. Число несправностей характеризує надійність роботи установки, а кількість спожитої енергії – її ефективність. Основним показником ефективності роботи насосу чи електричного двигуна насосного агрегату є коефіцієнт корисної дії (ККД). Саме питання визначення ККД насосного агрегату (НА) і розглядається у даній статті.

**Мета роботи:** підвищення ефективності роботи насосного агрегату за рахунок оцінки його коефіцієнта корисної дії в процесі роботи в режимі реального часу.

**Об'єктом дослідження** є процес визначення коефіцієнта корисної дії насосного агрегату в процесі роботи в режимі реального часу.

**Предметом дослідження** математичні вирази та комп'ютерна модель для визначення коефіцієнта корисної дії насосного агрегату в процесі роботи в режимі реального часу.

### **Результати дослідження**

Як зазначалося раніше, сучасна тенденція розвитку електроприводу для систем транспортування води полягає у активному використанні регульованого приводу замість традиційно нерегульованого. Це дозволяє покращити його енергетичні характеристики, розширити діапазон регулювання продуктивності насосного агрегату за суттєвого зменшення споживання електричної енергії, підвищити ККД, збільшити енергоефективність системи в цілому [1-3]. У реальних умовах насосні установки (НУ) працюють з подачею яка постійно змінюється у діапазоні 70...90% . Тиск води в мережі також підлягає постійним коливанням.

Тиск у трубопроводі зменшується через збільшення споживання води у вечірній і ранковий періоди.

Регулювання при знижених витратах призводить до зменшення втрат енергії (на створення надлишкового тиску) та рідини за рахунок зменшення витоків у негерметичних стиках, а також до зменшення зношення обладнання і експлуатаційних витрат. Тобто, доцільною є стабілізація напору в напірному трубопроводі [1, 2]. Для підтримки стабілізації необхідного тиску за умови нерівномірності споживання води протягом доби використовують інформацію з датчика тиску, який встановлюють на верхньому поверсі багатоповерхового будинку [3]. Для забезпечення енергоефективних режимів насосних комплексів на основі регульованих асинхронних двигунів (АД) визначають конкретні закони регулювання, які враховують характер навантаження та зміну технологічних параметрів [1].

Насосна установка багатоповерхового житлового будинку забезпечує підвищення напору у його трубопроводі для гарантованого підйому води на останній поверх у режимі максимальних витрат води. Відповідно до умов даного режиму здійснюється вибір насоса та приводного двигуна. При цьому, насос часто обирається за умови знаходження робочої точки за максимальної подачі біля правої межі його області економічної роботи, а також із відсутністю умов виникнення помпажу [2, 3], які з'являються при перевищенні напору насоса за нульової подачі над величиною статичного напору водопровідної мережі. Двигун обирається за максимумом потужності на валу насоса. За нерегульованого електроприводу насоса зниження витрат води супроводжується зменшенням енергоефективності системи внаслідок перевищення напору насоса над необхідним напором мережі для даних витрат. Регулювання із стабілізацією величини напору [3] забезпечує підвищення енергоефективності НУ, проте не у максимальному об'ємі, оскільки не враховує особливості енергетичних характеристик усіх складових системи та їхній взаємний вплив.

Електромеханічна система (ЕМС) водопостачання складається з трубопроводу, насоса, асинхронного двигуна, регулятора частоти та напруги живлення, системи керування. Ефективність цієї системи оцінюють із визначенням: ККД перетворення електричної енергії у гідравлічну або енергоефективності, яка є співвідношенням витраченої електроенергії і отриманої корисної дії [1]. Використання першого способу визначення критерію ефективності системи при її проектуванні і порівняльних дослідженнях не дозволяє мінімізувати втрати енергії у системі внаслідок зарахування до корисної дії непродуктивного надлишкового напору на виході насоса, який втрачається при дроселюванні у елементах гідравлічної мережі. Корисна дія такої системи полягає у підйомі заданої кількості води на потрібну висоту або у створенні мінімальної потрібної гідравлічної корисної потужності на виході насоса, яка визначається характеристикою гідравлічної мережі та її зміною.

Режим роботи насоса однозначно характеризують каталогові експериментальні залежності напору і ККД або споживаної потужності від подачі, які відповідають умовам сталої частоти обертання. Робота насоса у складі електроприводу, особливо регульованого, супроводжується зміною швидкості, що обов'язково повинно відображатися на характеристиках насоса при математичному моделюванні. Неадекватність моделі стосовно цієї зміни може призводити до похибок у десятки відсотків. У роботі [2] аналітично визначено залежності напору і ККД насоса у функції подачі для різних частот обертання двигуна з використанням каталогових характеристик, положень теорії подоби насосів, класичних припущень про розподіл втрат потужності у насосі. Дані аналітичні залежності характеристик насоса крім даних каталогу спираються на інформацію про максимум ККД насоса при деякій неномінальній швидкості і потребують визначення ряду апроксимаційних коефіцієнтів.

У представленому дослідженні (відповідно до закономірностей зміни характеристик насоса за подачею та обертами [1]) отримано і застосовано апроксимацію без залучення додаткових умов визначення апроксимаційних коефіцієнтів. Для цього використано ряд загальноприйнятих припущень: залежність ККД насоса від подачі води симетрична відносно лінії номінальної подачі; ККД залежить від подачі у степені 2,3 [1]; згідно з теорією подоби подача за максимуму ККД змінюється пропорційно швидкості обертання двигуна; максимум залежності ККД насоса від подачі та швидкості обертання має місце при номінальній швидкості; залежність зміни максимуму ККД від швидкості, як у [1], визначається за інформацією про максимуми ККД насоса при неномінальних швидкостях.

Математичну модель ЕМС НУ у системі імітаційного моделювання MATLAB представлено на рис. 1.

Енергоефективність даної системи оцінюється за сталими режимами роботи, які можуть досліджуватися за результатами сумісного розв'язку систем статичних рівнянь складових системи. При цьому, для забезпечення точності математичного моделювання враховано нелінійні властивості складових системи і зв'язків між ними. Розв'язок статичних рівнянь з нелінійними зв'язками здійснюють за допомогою ітераційних циклів, що часто ускладнюється проблемами їхньої збіжності. Ці проблеми відсутні при моделюванні об'єкта з нелінійностями параметрів системою диференціальних рівнянь. Така динамічна модель для забезпечення пошуку усталеного режиму в умовах нелінійностей параметрів і зв'язків реалізована у даній роботі.

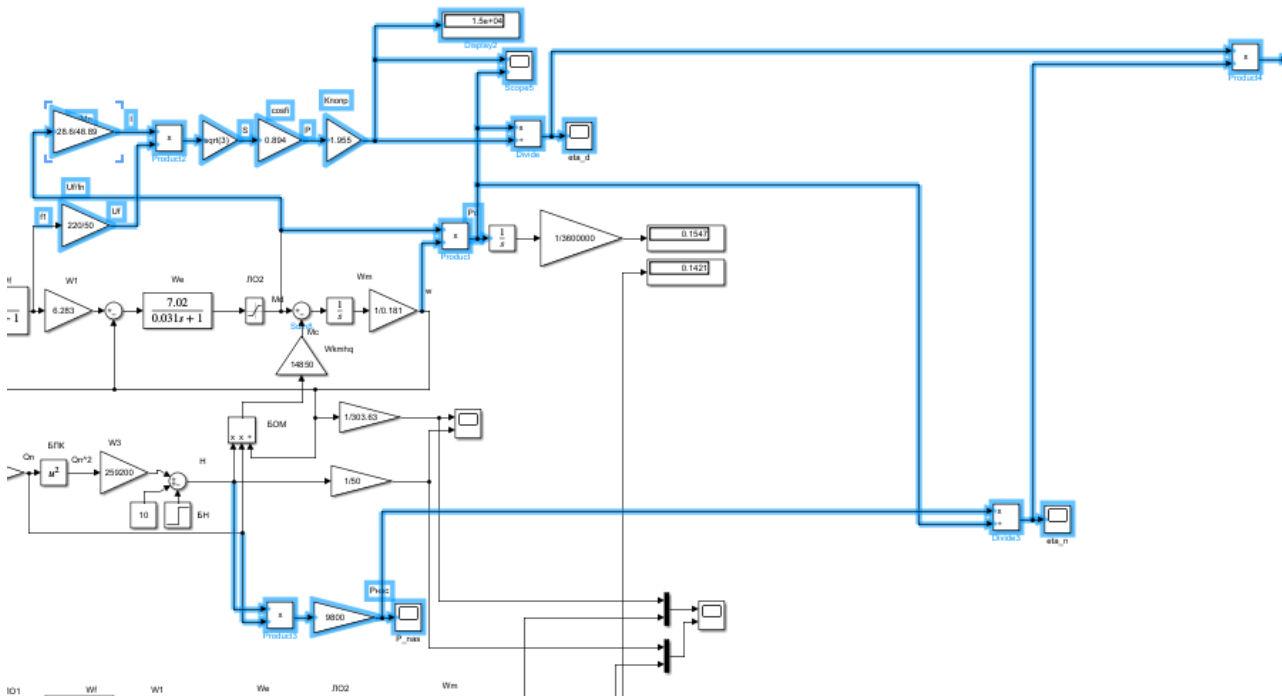


Рис. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** – Комп’ютерна модель ЕМС НУ для визначення ККД у системі імітаційного моделювання MATLAB

У моделі системи (рис. 1), яка складається з блоків джерела живлення, асинхронного приводу, характеристик насоса та мережі, структурна математична модель АД [1] представлена блоком АД1. Її інтеграція до імітаційної моделі системи здійснюється трьома блоками виводів фаз обмотки статора із реалізацією схеми з’єднання «зірка». Математична модель АД за величинами напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання дозволяє визначити величини електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат АД. Математична модель насоса за заданою величиною витрат системи водопостачання і частоти обертання дозволяє визначити напір, гідравлічну корисну потужність і ККД насоса, потужність і момент на його валу. В залежності від співвідношення електромагнітного моменту АД і моментів опору насоса і механічних втрат у АД розраховується залежність змінної швидкості, яка впливає на характеристики двигуна і насоса. Перехідний процес закінчується із визначенням усталеного режиму, коли моменти рухомий та опору на валу стають рівними. У процесі розрахунку за величинами моментів електромагнітного та власного опору АД коригуються корисна потужність АД і втрати у його підшипниках. За результатами розрахунку режиму роботи АД визначається величина індукції у повітряному проміжку, яка є вхідною величиною для визначення коефіцієнта насичення магнітного кола за основним полем, відповідних індуктивних параметрів АД і втрат у сталі. Дві–три ітерації у ручному режимі повторного розрахунку дозволяють визначити усталене значення індукції, що, враховуючи швидкодію моделі, не створює практичних складнощів [1].

За результатами розрахунку режиму визначаються ККД насоса як співвідношення відповідних вихідних і вхідних потужностей.

Дані ККД оцінюють ефективність перетворювачів енергії ЕМС НУ, але не можуть бути критеріями її ефективності при проектуванні та порівняльних дослідженнях, оскільки не враховують результуючої корисної дії системи. Для її визначення використовується математична модель гідравлічної мережі, яка за заданими витратами дозволяє розрахувати мінімальний достатній напір насоса і гідравлічну оптимальну корисну потужність, яка характеризує корисну дію системи і дозволяє визначити коефіцієнт її енергетичної ефективності  $\text{Keф}$ , як співвідношення оптимальної гідравлічної корисної потужності насоса і потужності споживання електричної енергії; ККД кінцевих гідравлічних вентилів мережі  $\eta_{Г.В.}$ , значення яких збільшуються із ступенем відкриття водопровідних кранів споживачами; інтегральний добовий ККД насосної ЕМС як співвідношення потенційної енергії піднятої води і спожитої електричної енергії  $\text{K}_{\text{EMCp}}$ .

$$K_{efp} = P_{gopt} / P_1; \quad \eta_{Г.В.} = K_{efp} / \eta_{азр}; \quad K_{EMCP} = \frac{\rho g h_{ст} 0,5(k+1)}{3600 \cdot W_{доб}} \sum_{j=1}^n Q_j T_j, \quad (1)$$

де  $W_{доб}$  – споживання електричної енергії за добу, Вт·год;  $Q_j$ ,  $T_j$  – подача та час у годинах  $j$ -го етапу добового графіка водоспоживання;  $n$  – кількість його етапів.

Ефективність роботи насосної станції визначається роботою її насосних агрегатів. Основним показником, який показує ефективність роботи насосного агрегату, є його ККД. Знайдемо аналітичний вираз ККД насосних агрегатів.

ККД насосного агрегату визначається як частка від ділення корисної потужності насоса  $P_k$  (подача води з певним напором) до затраченої електричної потужності двигуна насоса  $P_3$ :

$$\eta_{НА} = \frac{P_k}{P_3}. \quad (2)$$

У свою чергу ККД насосного агрегату складається з ККД самого насоса  $\eta_H$  та ККД електричного двигуна з пружною муфтою  $\eta_D$ :

$$\eta_{НА} = \eta_D + \eta_H. \quad (3)$$

Для подальшого аналізу припустимо, що ККД двигуна постійний і дорівнює номінальному значенню.

ККД насоса можна розрахувати як частку від ділення корисної потужності  $P_k$  на потужність насоса  $P_H$ :

$$\eta_H = \frac{P_k}{P_H}. \quad (4)$$

Корисну потужність насоса можна знайти з формули розрахунку його потужності через підстантовку в неї аналітичного виразу напору. Але для того, щоб отримати математично правильний вираз, напор має залежати від подачі в одиницях вимірювання –  $m^3/s$ .

## Висновки

Розроблено математичний апарат, придатний для опосередкованого визначення ККД насосного агрегату під час роботи в режимі реального часу. Розроблено комп'ютерну модель НА, за допомогою якої перевірено працездатність запропонованого математичного апарату. Результати моделювання підтвердили можливість використання даного математичного апарату для оцінки ефективності роботи НА. Запропонований підхід дозволить оцінювати ефективність роботи НА в режимі реального часу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мошнорізі М. М. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання. Монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошнорізі. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 138 с.
2. Moshnoriz, S. Babiy, A. Payanok, A. Zhukov, D. Protsenko (2021). Improving the efficiency of distributed water supply systems by means of an adjustable electric drive. Scientific Horizons. <https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/tom-24-5-2021/pidvishchennya-efektivnosti-roboti-rozpodilenikh-sistem-vodopostachannya-zasobami-regulovanogo-elektroprivoda;>  
[https://doi.org/10.48077/scihor.24\(5\).2021.19-34](https://doi.org/10.48077/scihor.24(5).2021.19-34).
3. Мошнорізі М. М. Підвищення енергетичної ефективності роботи електроприводів насосних агрегатів станції водопостачання / М. М. Мошнорізі, О. Л. Лівандовський // Матеріали X International Scientific and Practical Conference @ Priority directions of science and technology development" (2021), м. Київ, 13-15 червня 2021 р. - Київ, 2021. С. 275 - 281. ISBN 978-966-8219-84-9. Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/06/PRIORITY-DIRECTIONS-OF-SCIENCE-AND-TECHNOLOGY-DEVELOPMENT-13-15.06.21.pdf>

**Мошнорізі Микола Миколайович** – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, e-mail: moshnoriz@vntu.edu.ua.

**Грибовський Олександр Анатолійович** – студент групи ІЕМ-19б, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: sashok19931993@gmail.com.

**Moshnoriz Mykola Mykolayovych** – Cand. tech. Sciences, Associate Professor of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, e-mail: moshnoriz@vntu.edu.ua.

**Oleksandr Anatoliyovych Hrybovskiy** - student of group IEM-19b, Faculty of Electric Power Engineering and Electro-Mechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: sashok19931993@gmail.com.