

ЕКСПРЕС-ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ЗА ВІДСУТНОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ВИТРАТИ

В. С. Костишин, П. М. Николин*

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15; тел. (03422) 48003,
e-mail: ep eo@n i n g . e d u . u a

За допомогою математичної моделі, створеної на основі методу електрогідролічної аналогії, розроблено методологію експрес-оцінки енергетичної ефективності відцентрового насоса. Визначено розрахунковий кут навантаження для аналізу ефективності режимів роботи гідравлічних машин. Встановлено залежність споживаної з валу приводного двигуна потужності та сумарного коефіцієнта корисної дії відцентрового насоса від його розрахункового кута навантаження. Визначено взаємозв'язок між кутом навантаження та коефіцієнтом швидкохідності, який є прототипом електромагнітного кута навантаження, що характеризує режим роботи електричної синхронної машини. Встановлено залежність витрати магістрального насоса від розрахункового кута навантаження та диференційного напору, що створюється відцентровим насосом. Розроблена методологія дає можливість уникнути значних труднощів технічного та фінансового характеру, оскільки витратоміри мають велику вартість та певні вимоги до встановлення, а манометри встановлені штатними вимогами технологічного процесу. Визначено розрахункове значення кута навантаження відцентрового насоса через його каталогові параметри. Розраховано та побудовано робочі характеристики для магістрального відцентрового насоса типу НМ-7000-210 без експериментального визначення його витрати. Такий підхід показав хороший збіг розрахункових та отриманих експериментально характеристик. Відносна похибка енергетичних характеристик не перевищує десяти відсотків. Запропоновану методологію можна використати для експрес оцінки ефективності енергетичних перетворень цілого електроприводного насосного агрегата. Експрес-аналіз є запорукою успішного ведення енергетичного господарства через своєчасне виявлення неефективних режимів роботи електроприводних насосних агрегатів та здійснення проведення енергетичних дослідження.

Ключові слова: енергетична ефективність; відцентровий насос; розрахунковий кут навантаження; споживана потужність; сумарний коефіцієнт корисної дії.

С помощью математической модели, созданной на основе метода электрогидравлической аналогии, разработана методология экспресс-оценки энергетической эффективности центробежного насоса. Определены расчетный угол нагрузки для анализа эффективности режимов работы гидравлических машин. Установлена зависимость потребляемой с вала приводного двигателя мощности и суммарного коэффициента полезного действия центробежного насоса от его расчетного угла нагрузки. Определена взаимосвязь между углом нагрузки и коэффициентом быстроходности, который является прототипом электромагнитного угла нагрузки, характеризующий режим работы электрической синхронной машины. Установлена зависимость подачи магистрального насоса от расчетного угла нагрузки и дифференциального напора, создаваемого центробежным насосом. Разработанная методология позволяет избежать значительных трудностей технического и финансового характера, поскольку расходомеры имеют большую стоимость и определенные требования к установке, а манометры установлены штатными требованиями технологического процесса. Определены расчетное значение угла нагрузки центробежного насоса через его каталожные параметры. Рассчитаны и построены рабочие характеристики для магистрального центробежного насоса типа НМ-7000-210 без экспериментального определения его подачи. Такой подход показал хорошее совпадение расчетных и полученных экспериментально характеристик. Относительная погрешность энергетических характеристик не превышает десяти процентов. Предложенную методологию можно использовать для экспресс-оценки эффективности энергетических преобразований целого электроприводного насосного агрегата. Экспресс-анализ является залогом успешного ведения энергетического хозяйства через своевременное выявление неэффективных режимов работы электроприводных насосных агрегатов и осуществления проведения энергетических исследований.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; центробежный насос; расчетный угол нагрузки; потребляемая мощность; суммарный коэффициент полезного действия.

Using a mathematical model, created on the basis of the electrohydraulic analogy method, a methodology for express estimation of the energy efficiency of a centrifugal pump was developed. The design load angle for analyzing the efficiency of operating modes of hydraulic machines is determined. The dependence of the power-driven engine shaft and the total efficiency of the centrifugal pump on its calculated load angle is established. The relationship between load angle and speed coefficient, which is a prototype of an electromagnetic load angle which characterizes the synchronous machine operating mode, is determined. It is established the dependence of the main pump head on the calculated load angle and the differential pressure created by the centrifugal pump. The developed methodology makes it possible to avoid significant technical and financial difficulties, since flow meters have a high cost and certain requirements for installation, while manometers are established by the standard requirements of the technological process. The estimated value of the load angle of the centrifugal pump through its catalog parameters is determined. The operating characteristics for the main centrifugal pump of type HM-7000-210 were calculated and built without experimental determination of its head. Such approach showed a good coincidence of calculated and experimental characteristics. Relative error of energy characteristics does not exceed ten percents. The proposed methodology can be used for express estimation of the efficiency of energy transformations of the whole electric drive pump unit. Express-analysis is a key to successful management of the energy economy through timely detection of inefficient modes of operation of electric-driven pump units and makes energy research cheaper..

Key words: energy efficiency; centrifugal pump; estimated load angle; power consumption; total efficiency.

Вступ

Відцентрові насоси (ВН) є одними з найбільш енергоємних світових електроспоживачів промислових підприємств та об'єктів комунального господарства, які споживають близько 8% всієї виробленої людством електроенергії [1]. Тому підвищення енергоефективності роботи ВН за допомогою її експрес-аналізу є визначальним завданням, успішне вирішення якого є запорукою конкурентоспроможності, безпеки та стійкості роботи енергетичних систем [2,3]. Однак на сьогодні велика кількість ВН працює неефективно, зважаючи на їх неправильний підбір, неоптимальні режими роботи або фізичний та моральний знос.

Велику роль у визначенні енергетичної ефективності насоса відіграє інформація про напір та витрату насоса. Якщо із вимірюванням напору (або тиску) ВН за допомогою манометрів технічних проблем зазвичай не виникає, то для вимірювання витрати застосовують витратоміри різних типів та конструкцій, встановлення та експлуатація яких пов'язана зі значними труднощами технічного та фінансового характеру. Так, турбінні витратоміри вимагають складного розміщення їх всередині потоку рідини. В свою чергу, електромагнітні та ультразвукові витратоміри, які дають змогу дистанційно вимірювати витрату, мають свої недоліки. Зокрема електромагнітні витратоміри вимагають відповідної провідності рідини. Крім того, на їх електродах виникають гальванічна електрорушійна сила (ЕРС) та ЕРС поляризації, що вносять похибки у результат вимірювань, тож виникає необхідність у компенсації завод. Електромагнітні витратоміри неможливо застосовувати поблизу електросилових пристроїв,

які утворюють сильні електромагнітні поля. Ультразвукові витратоміри теж потребують місця для приєднання до трубопроводу, а правильність вимірів залежить від точності встановлення давачів. Вартість магнітних, електромагнітних та ультразвукових витратомірів, в залежності від параметрів, коливається від десяти до сотні тисяч гривень, а тому їх встановлення є економічно доцільним лише на насосних станціях із потужними насосними агрегатами, на відміну від ВН середньої та малої потужності, що унеможливує проведення енергетичного аудиту.

Таким чином, особливо актуальним є експрес визначення ефективності режиму ВН без отриманої експериментальним шляхом інформації про його витратне навантаження. Вирішення цієї задачі можливе на основі використання такої математичної моделі ВН, яка б дала змогу визначати витрату непрямим способом, а, відповідно, і його енергетичні характеристики, за допомогою інших параметрів режиму, зокрема напору, споживаної з валу приводного двигуна потужності та швидкості обертання робочого колеса.

Метою роботи є розроблення методології експрес-оцінки енергетичної ефективності насоса ВН за допомогою створеної на основі методу електрогідравлічної аналогії його математичної моделі без виконання процедури вимірювання витрати.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Огляд літературних джерел показав, що лише за останні десятиліття було розроблено

багато методів оцінки ефективності роботи ВН. Так, авторський колектив фінських науковців під керівництвом Тего Аһонен [4] запропонував новий метод оцінки енерговитрат, який використовує поточні значення лише трьох параметрів режиму ВН: диференційного напору H_D , споживаної з валу приводного двигуна потужністю N_C і швидкості обертання робочого колеса n . Окрім них, необхідно знати ще номінальне значення об'ємної витрати насоса $Q_D^{ном}$ та його коефіцієнт швидкохідності n_C . В основі методу лежить ідея використання великого масиву отриманої експериментальним шляхом інформації про залежність ККД ВН від цих параметрів, яку автори формалізували у вигляді поліномних функцій. Запропонована оцінка простіша для використання, оскільки вимагає невеликої кількості вхідних параметрів, а також не потребує знання заводських характеристик насоса. Однак за експериментальними дослідженнями запропонована методика дає змогу визначити витрату відцентрового насоса Q_D з похибкою 7–15% в діапазоні 60–100% номінальної витрати $Q_D^{ном}$. В режимі перевантаження ВН цей метод дає похибку понад 20%. Таким чином, представлений метод є не достатньо точним, щоб його можна було використовувати під час проведення енергетичного аудиту. Однак він може бути використаний для експрес-оцінки ефективності роботи для групи ВН з метою виявлення найменш ефективного насоса.

В останні десятиліття у світі набув поширення метод Ятесметра (Yatesmeter) [5], який базується на термодинамічному підході. Суть цього методу полягає у визначенні ефективності ВН за різницею температур робочої рідини на його вході і виході. Цей підхід є подібним до калориметричного методу визначення ККД для електродвигунів за кількістю тепла, що виділяється в машині під час роботи. Але складність застосування цих методів полягає в тому, що частина тепла вивільняється через фундамент, корпус, вал та підшипники ВН. Крім цього, необхідно виконувати складну технічну операцію з розміщення термодавачів усередині потоку рідини для точнішого визначення підвищення її температури, а використання накладних термодавачів вимагає ретельного шліфування поверхні труби та корекції впливу температури навколишнього середовища. Зазвичай термодавачі із низькою роздільною здатністю непридатні для такого роду вимірювань, а ті, що мають високу роздільну здатність, дуже дорогі. Необ-

хідність застосування термодавачів робить неможливим проведення енергоаудиту ВН під час перехідних процесів, оскільки зміна в часі параметрів координат динамічної системи при переході від одного усталеного режиму роботи до іншого характеризується відносно невеликою тривалістю і в електричних колах найчастіше становить від десятих секунди до декількох секунд [6,7,8]. Процес нагрівання електричних та гідравлічних машин зазвичай є тривалішим, тому при дослідженні перехідних процесів тепловими перехідними процесами зазвичай нехтують через їх велику інерційність.

Для вирішення поставленої задачі на сьогоднішній день все частіше використовують математичні моделі ВН, які уможливають непряме визначення витратного навантаження насоса без використання високовартісних вимірювальних приладів. Передумовою теоретичної побудови адекватних енергетичних характеристик ВН було створення на основі методу електрогідравлічної аналогії математичної моделі ВН [9], яка дає змогу теоретичної побудови робочих характеристик насоса за його конструктивними даними з врахуванням таких фізичних властивостей робочої рідини, як її густина та в'язкість.

Схема заміщення гідромашини, що оперує із зосередженими комплексними параметрами, зображена на рисунку 1.

Реактивні опори x_i в цій схемі характеризують внутрішній енергообмін у машині, викликаний силами інерції, в той час як активні опори r_i – незворотні процеси, спричинені силами тертя та дисипації теплової енергії у доквіллія. Так, опори x_{mex} та r_{mex} враховують механічні втрати, x_t – внутрішній гідроопір ВН, $x_{\mu H}$ та $x_{\mu Q}$ – вплив скінченої кількості лопатей на витрату і напір машини, $x_{\Delta Q}$ та $r_{\Delta Q}$ – об'ємні втрати у насосі, $x_{\Delta H}$ та $r_{\Delta H}$ – гідравлічні втрати у спіральному відводі, $r_{нав}$ – гідроопір напірного тракту гідромережі, H_0 , Q_∞ – напір та витрата ідеалізованого ВН, Q_μ та Q_Δ – об'ємні втрати рідини, спричинені відповідно скінченою кількістю лопатей та зворотними зв'язками через ущільнення та байпаси, Q_D та H_D – витрата і напір на виході насоса.

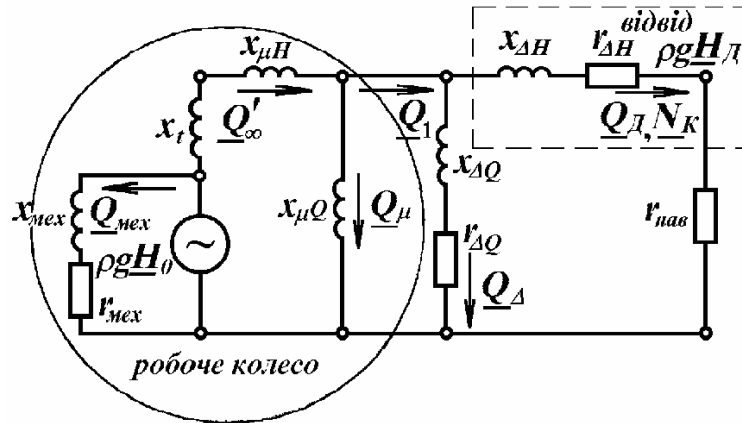


Рисунок 1 – Повна комплексна заступна схема ВН

Виклад основного матеріалу

Застосування методу електрогідравлічної аналогії базується на використанні теорії електричних кіл для математичного опису процесів енергетичного перетворення у гідромашинах. Електричні рівняння трансформуються у відповідні гідромеханічні співвідношення, що дає змогу аналізувати ефективність роботи ВН.

Для порівняння характеристики лопатевих насосів різного типу в гідромеханіці зазвичай використовують коефіцієнт швидкохідності n_s , який об'єднує насоси однієї геометричної і кінематичної подібності. Універсальність цього параметру полягає в тому, що він одночасно враховує три найважливіші параметри режиму насоса: витрату (подачу) Q_D , напір H_D і частоту обертання n .

$$n_s = 3,65 n^{ном} \sqrt[4]{\left(\frac{Q_D^{ном}}{M}\right)^2 \left(\frac{L}{H_D^{ном}}\right)^3}, \quad (1)$$

де k_{Dp} - частота обертання ротора ВН, об/хв;

$Q_D^{ном}$ - продуктивність ВН у номінальному режимі роботи;

$H_D^{ном}$ - диференційний напір ВН у номінальному режимі роботи;

L, M - відповідно кількість робочих ступенів тиску та робочих потоків ВН.

В електромеханіці для характеристики аналізу надійності та ефективності режимів синхронних електричних машин використовують такий технічний параметр, як кут їх електромагнітного навантаження θ [10]. Це кут між векторами електрорушійної сили машини (електричного генератора чи двигуна) та напруги на її затискачах, який пропорційно змінюється залежно від моменту на валу. Зазвичай його значення складає 60-90 градусів.

В роботі [9] була запропонована модель ВН у координатах дійсних чисел (скалярна модель), яка дає змогу визначити енергетичний баланс насоса шляхом розрахунку взаємозв'язаних гідравлічних, об'ємних та механічних втрат на повному інтервалі функціонування машини. Також там запропоновані зручні для практичного використання спрощені тригонометричні та поліноміальні аналітичні вирази характеристики ВН у системі відносних одиниць, характерною особливістю яких є використання як головного конструктивного параметра номінального значення розрахункового кута навантаження $\gamma_p^{ном}$, введеного за аналогією з кутом електромагнітного навантаження θ синхронної електричної машини, точне визначення якого ведеться через каталогові параметри ВН

$$\gamma_p^{ном} = \pi \left(1 - \frac{k_{Dp}}{H_{*0} \mu_H \eta_c^{ном}}\right) \mu_Q \eta_o^{ном}, \quad (2)$$

де k_{Dp} - коефіцієнт приведення зовнішнього та внутрішнього діаметра робочого колеса;

H_{*0} - відносне значення напору неробочого ходу ВН;

μ_H, μ_Q - відповідно коефіцієнти зниження напору та об'ємного стиснення робочого потоку внаслідок кінцевої кількості лопатей;

$\eta_c^{ном}, \eta_o^{ном}$ - відповідно гідравлічний та об'ємний ККД ВН.

Спростивши повну комплексну заступну схему ВН, отримаємо еквівалентну заступну схему заміщення [9] (рис. 2).

Для номінального режиму роботи ВН можна визначити розрахунковий кут навантаження через параметр еквівалентної схеми

$$\gamma_p^{ном} \approx 2 \arctg(x_{*ек}), \quad (3)$$

де $x_{*ек}$ - еквівалентний індуктивний опір схеми заміщення ВН.

Таблиця 1 – Номінальні та розрахункові параметри насоса НМ-7000-210

$H_D^{ном}$, м	$Q_D^{ном}$, м ³ /с	$n^{ном}$, с ⁻¹	$\eta_{ном}$	$\gamma_p^{ном}$	$x_{*ек}$	n_s	μ_Q	μ_H	$N_c^{ном}$, кВт
210	1,944	3000	0,87	1,38	0,892	195	0,897	0,831	4604

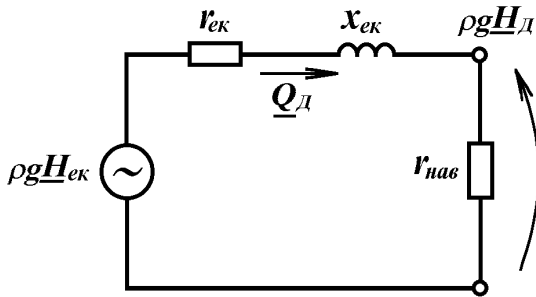


Рисунок 2 – Еквівалентна заступна схема ВН

У першому наближенні розрахунковий кут навантаження $\gamma_p^{ном}$ можна визначити за значенням коефіцієнта швидкохідності n_s [9]

$$\gamma_p^{ном} = 0.475 \left(1 + \frac{n_s}{100} \right). \quad (4)$$

Номінальні та розрахункові параметри насоса НМ-7000-210 наведені у таблиці 1.

Розрахунковий кут навантаження $\gamma_p^{ном}$, який також є аналогом коефіцієнта швидкохідності n_s , дає змогу за визначеним експериментально значенням напору H_D ВН розрахувати його витрату Q_D за виразом

$$Q_{*D} = \sqrt{\frac{\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin(\gamma_p^{ном})} - H_{*D}}{\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin(\gamma_p^{ном})} - 1}}, \quad (5)$$

де H_{*D} , Q_{*D} – відповідно значення напору та витрати на вихідному патрубку ВН у системі відносних одиниць, де базовими прийняті номінальні параметри насоса [9].

Система відносних одиниць передбачає вираження величин, що характеризують режим роботи насоса, в частках базових величин тієї ж розмірності. За базові параметри ВН приймають зазвичай напір та витрату, за допомогою яких визначають базові потужність та гідравлічний опір. Застосування системи відносних одиниць широко використовують в теорії електричних машин. Такий підхід дає змогу спростити аналіз режимів роботи ВН та встановити закономірності їхньої поведінки.

$$\left. \begin{aligned} H_{баз} &= H_D^{ном}; \\ Q_{баз} &= Q_D^{ном}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Тоді базова потужність $N_{баз}$ і базовий опір $Z_{баз}$ будуть

$$\left. \begin{aligned} N_{баз} &= \rho g H_{баз} Q_{баз}, \\ Z_{баз} &= \frac{\rho g H_{баз}}{Q_D^{ном}}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

а відносні значення параметрів режиму та заступної схеми позначатимемо індексом “*”

$$\left. \begin{aligned} H_* &= \frac{H}{H_{баз}}; Q_* = \frac{Q}{Q_{баз}}; \\ N_* &= \frac{N}{N_{баз}}; Z_* = \frac{Z}{Z_{баз}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Зокрема, у системі відносних одиниць (для нестисливої рідини) безрозмірні значення тиску P_* та напору H_* рівні між собою

$$P_* = \frac{\rho g H}{\rho g H_{баз}} = \frac{H}{H_{баз}} = H_*. \quad (9)$$

Аналогічно визначаємо споживану з валу приводного двигуна потужність ВН

$$N_{*C} = \frac{1}{\eta_{ном}} \left[1 + \left(3 - 2 \frac{\gamma_p^{ном}}{\sin(\gamma_p^{ном})} \right) \times \left(\frac{\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin(\gamma_p^{ном})} - H_{*D}}{\frac{\gamma_p^{ном}}{\sin(\gamma_p^{ном})} - 1} \right) \right]. \quad (10)$$

де $\eta_{ном}$ – номінальне значення ККД ВН.

Сумарний ККД ВН розраховуємо за формулою

$$\eta = \frac{\sin(\gamma_p^{ном}) Q_{*D}}{\sin(\gamma_p^{ном}) + \left[(Q_{*D} - 1) \gamma_p^{ном} \right] \cos(\gamma_p^{ном})}. \quad (11)$$

Зазвичай робочі характеристики ВН визначають залежність параметрів H_D , N_C та η від витрати Q_D . У нашому випадку зображені на рисунку 3 енергетичні характеристики магістрального насоса НМ-7000-210 побудовані відносно значення напору H_{*D}

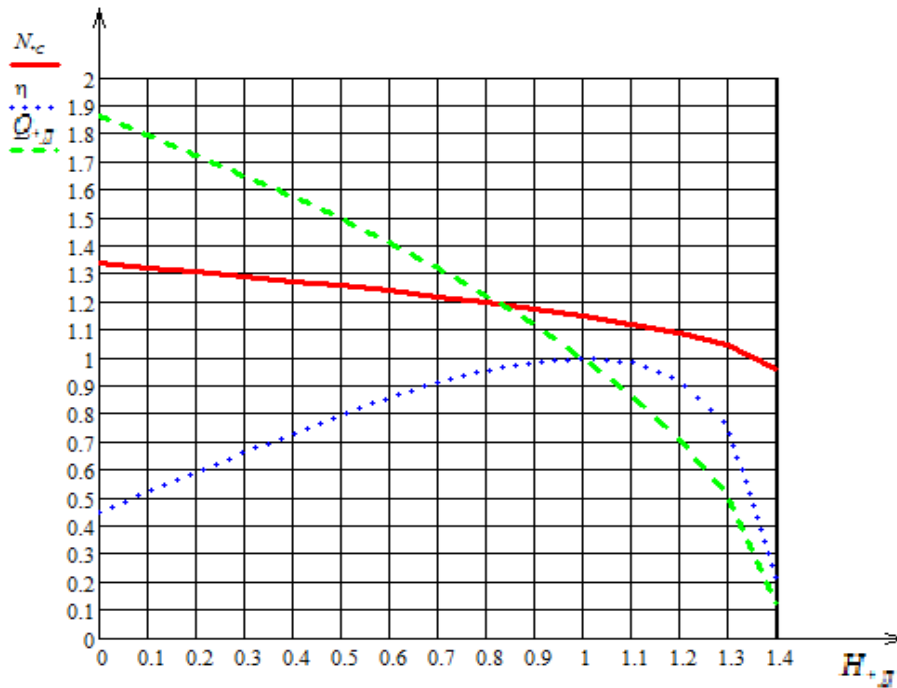


Рисунок 3 – Робочі характеристики магістрального відцентрового насоса НМ-7000-210, які побудовані відносно значення напору $H_{*Д}$

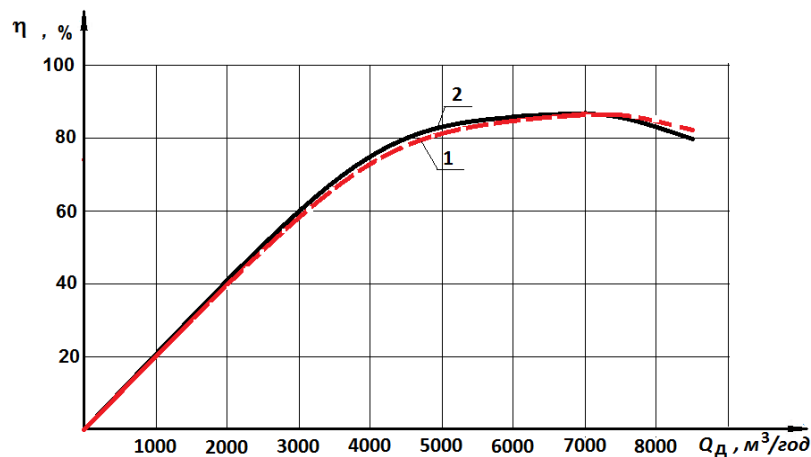


Рисунок 4 - Залежність характеристик ККД η від витрати $Q_{Д}$ магістрального насоса НМ 7000-210, розрахованих за допомогою представленої моделі (крива 1) та отриманих експериментально (крива 2)

В свою чергу, рисунок 4 ілюструє хороший збіг розрахованих за допомогою математичної моделі та отриманих експериментально характеристик ККД магістрального відцентрового насоса НМ-7000-210. Відносна похибка на всьому робочому інтервалі витратного навантаження не перевищує 8-10%.

Таким чином, проведення експрес-оцінки ефективності роботи ВН вимагає експериментального визначення за допомогою штатних манометрів лише одного технологічного параметра режиму ВН, а саме диференційного напору $H_{Д}$.

Висновки

1. На основі математичної моделі ВН розраховано та побудовано робочі характеристики для насоса типу НМ-7000-210 без експериментального визначення його витрати.

2. Хороша збіжність розрахованої та експериментальної характеристик ефективності функціонування ВН підтверджує адекватність підходу.

3. Запропоновану методологію можна використовувати для експрес-оцінки ефективності функціонування електроприводного насосного агрегата загалом.

Література

References

1. Waide P. and Brunner C. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. International Energy Agency. 2011.

2. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council: Energy efficiency and its contribution to energy security and the 2030 framework for climate and energy policy. Brussels, 2014. 23, 7.

3. European Commission. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. *Official Journal of the European Union*. 2012.

4. Specific speed-based pump flow rate estimator for large-scale and long-term energy efficiency auditing Santeri Pöyhönen & Tero Ahonen & Jero Ahola & Pekka Punnonen & Simo Hammo & Lauri Nygren, Accepted: 13 November 2018.

5. URL: <http://www.atap.ca/yatesmeter.html>

6. URL: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/21644/1/12-64-67.pdf>

7. URL: <http://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=5712>

8. URL: www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi_2012/132.pdf

9. Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії. Івано-Франківськ : Факел, 2000. 163 с.

10. Яцун М.А. Електричні машини : навчальний посібник. Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2001. 428 с.

1. Waide P. and Brunner C. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. International Energy Agency. 2011.

2. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council: Energy efficiency and its contribution to energy security and the 2030 framework for climate and energy policy. Brussels, 2014. 23, 7.

3. European Commission. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. *Official Journal of the European Union*. 2012.

4. Specific speed-based pump flow rate estimator for large-scale and long-term energy efficiency auditing Santeri Pöyhönen & Tero Ahonen & Jero Ahola & Pekka Punnonen & Simo Hammo & Lauri Nygren, Accepted: 13 November 2018.

5. URL: <http://www.atap.ca/yatesmeter.html>

6. URL: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/21644/1/12-64-67.pdf>

7. URL: <http://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=5712>

8. URL: www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi_2012/132.pdf

9. Kostyshyn V.S. Modelyuvannya rezhimiv roboti vidcentrovih nasosiv na osnovi elektrohidravlichnoyi analogiyi. Ivano-Frankivsk : Fakel, 2000. 163 p.

10. Yacun M.A. Elektrichni mashini : navchalnji posibnyk. Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnogo universytetu "Lvivska politehnika", 2001. 428 p.