

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ В УСТАЛЕНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

І. І. Яремак, Я. В. Бацала, Р. О. Яремак

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 72-71-72;
e-mail: yaremak_iryua@ukr.net*

За результатами досліджень усталених режимів електроприводних насосних агрегатів нафтоперекачувальних станцій України визначено основні причини зниження ефективності їхньої роботи під час експлуатації. Встановлено, що нормативні документи, які регламентують ефективну роботу насосних установок магістральних нафтопроводів України, потребують удосконалення. Проведено оцінку потенціалу енергоефективності магістрального насосного агрегата на прикладі насоса НМ-3600-230 з синхронним електроприводом СТД-2500-2 та проаналізовано основні способи підвищення ефективності використання електроенергії на нафтоперекачувальних станціях магістральних нафтопроводів. Застосовано комплексну математично-графічну модель відцентрового насоса та синхронного електродвигуна для визначення параметрів процесу енергоспоживання та енерговикористання гідравлічної та електричної підсистем насосного агрегата, що дало змогу врахувати можливі зміни характеристик обладнання і режимів роботи нафтотранспортної системи. Розраховано значення відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини для регульованого та нерегульованого електроприводів на основі комплексної електрогідравлічної моделі магістрального насоса, що дало змогу оперативно перерахувати характеристики відцентрового насоса та електродвигуна з урахуванням їхнього технічного стану та визначити потенціал енергоефективності насосного агрегата. Встановлено, що ефективним способом зменшення енергоспоживання магістральними насосними агрегатами є впровадження регульованого електропривода на нафтоперекачувальних станціях, проте доцільність такого заходу потребує додаткових техніко-економічних розрахунків. Визначено, що для підвищення ефективності насосних агрегатів необхідно уникати маловитратних режимів, формувати карти режимів магістральних нафтопроводів так, щоб забезпечити оптимальні, з точки зору енергоефективності, режими роботи електрогідравлічного обладнання нафтоперекачувальних станцій та змінити регламент роботи насоса та електродвигуна за технічним станом.

Ключові слова: енергоефективність, електричний двигун; відцентровий насос; нафтоперекачувальна станція, коефіцієнт корисної дії.

По результатам исследований установленных режимов электроприводных насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций Украины определены основные причины снижения эффективности их работы при эксплуатации. Установлено, что нормативные документы, регламентирующие эффективную работу насосных установок магистральных нефтепроводов Украины, требуют совершенствования. Проведена оценка потенциала энергоэффективности магистрального насосного агрегата на примере насоса НМ-3600-230 с синхронным электроприводом СТД-2500-2 и проанализированы основные способы повышения эффективности использования электроэнергии на нефтеперекачивающих станциях магистральных нефтепроводов. Применена комплексная математически-графическая модель центробежного насоса и синхронного электродвигателя для определения параметров процесса энергопотребления и энергоиспользования гидравлической и электрической подсистем насосного агрегата, что позволило учесть возможные изменения характеристик оборудования и режимов работы нефтетранспортной системы. Рассчитано значение относительного удельного расхода электроэнергии на перекачку рабочей жидкости для регулируемого и нерегулируемого электроприводов на основе комплексной электрогидравлической модели магистрального насоса, что позволило оперативно пересчитать характеристики центробежного насоса и электродвигателя с учетом их технического состояния и определить потенциал энергоэффективности насосного агрегата. Установлено, что эффективным способом уменьшения энергопотребления магистральными насосными агрегатами является внедрение регулируемого электропривода на нефтеперекачивающих станциях, однако целесообразность такого мероприятия требует дополнительных технико-экономических расчетов. Определено, что для повышения эффективности насосных агрегатов необходимо избегать малозатратных режимов, формировать карты режимов магистральных нефтепроводов так, чтобы обеспечить оптимальные, с точки зрения энергоэффективности, режимы работы электрогидравлического оборудования нефтеперекачивающих станций и изменить регламент работы насоса и электродвигателя по техническому состоянию.

Ключевые слова: энергоэффективность, электрический двигатель; центробежный насос; нефтеперекачивающая станция, коэффициент полезного действия.

According to the results of studies of steady operation modes of electric pumping units of Ukrainian oil pumping stations, have been identified the main reasons of efficiency decrease of their performance during operation. It is determined that the normative documents regulating the efficient operation of pumping units of the main oil pipelines of Ukraine need to be improved. The assessment of energy efficiency potential of the main pumping unit on the example of pump HM-3600-230 with synchronous electric drive СТД-2500-2 is carried out and the main ways to increase the efficiency of electricity use at oil pumping stations of main oil pipelines are analyzed. A complex mathematical-graphic model of a centrifugal pump and a synchronous electric motor is used to determine the parameters of the process of energy consumption and energy use of hydraulic and electrical subsystems of the pump unit, which allowed to take into account possible changes in equipment characteristics and modes of operation. The value of the relative specific consumption of electricity for pumping of working fluid for regulated and unregulated electric drive based on a complex electro-hydraulic model of the main pump was calculated, which allowed to promptly recalculate the characteristics of the centrifugal pump and electric motor taking into account their technical condition and to determine the potential of the pumping unit. It is determined that an effective way to reduce energy consumption by main pumping units is applying of a controlled electric drive at oil pumping stations, but the feasibility of such a measure requires additional technical and economical calculations. It is determined that to increase the efficiency of pumping units is necessary to avoid low flow-duty modes, to form maps of main oil pipelines in a way to ensure optimal in terms of energy efficiency operation modes of electro-hydraulic equipment of oil pumping stations and to change operation mode of pump and motor in terms of their technical condition.

Keywords: energy efficiency, electric motor, centrifugal pump, oil pumping station, efficiency.

Постановка проблеми

Україна має розгалужену мережу трубопровідного транспорту енергоносіїв (рис. 1). Загальна довжина системи магістральних нафтопроводів (МН) 3,5 тис. км, які пролягають територією 19 областей України [1]. Транспортування нафти забезпечує 51 нафтоперекачувальна станція (НПС). На НПС встановлено 176 насосних агрегатів (НА) продуктивністю до 12500 м³/год з електроприводами загальною потужністю 357,6 тисяч кВт [1]. Основні витрати при транспортуванні нафти пов'язані з енергоспоживанням технологічного обладнання НПС.

Відповідно до загальної номінальної пропускної потужності системи МН України

(114 млн. т на вхід, 56,3 млн. т на вихід), завантаження нафтопроводів складає [1]:

- за 2018 рік 11,7% на вхід, 23,7% на вихід;
- за 2019 рік 11,5% на вхід, 23,3% на вихід;
- за 2020 рік 11,5% на вхід, 23,4% на вихід.

У зв'язку з тим, що частина нафтотранспортних маршрутів на даний час не використовуються через дискримінаційну політику РФ щодо українських нафтогазових систем, кризових явищ у вітчизняній нафтовидобувній та нафтопереробній галузях тощо, фактична потужність системи МН України наразі складає 47,6 млн. т на вхід та 28,8 млн. т на вихід. Таким чином, МН України часто працюють в умовах неповного завантаження.

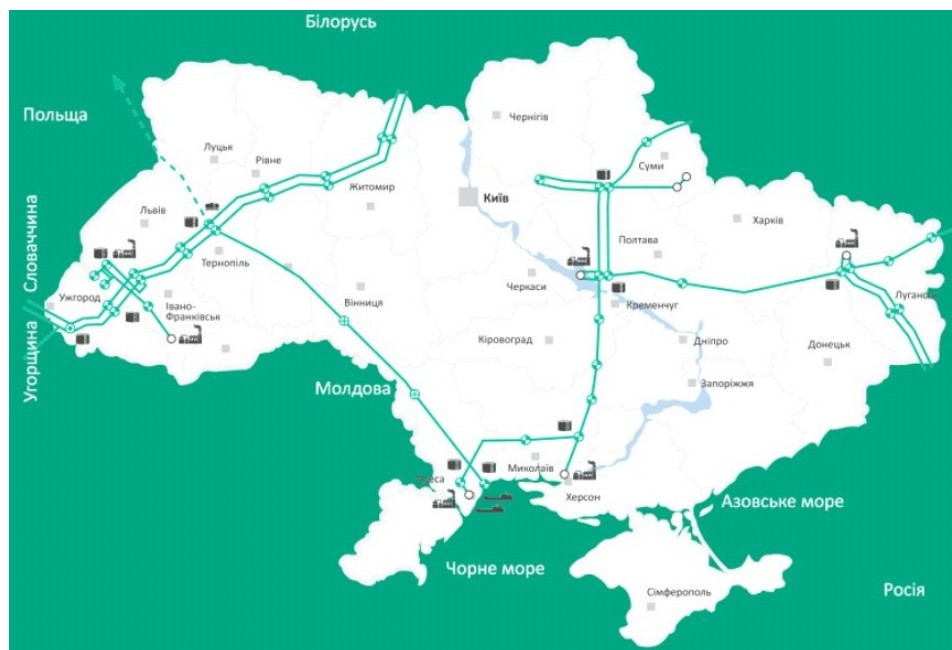


Рисунок 1 – Система магістральних нафтопроводів України

Електроприводні НА – основа енергетичного обладнання НПС. Робота НА в режимах малих подач характеризується низькими значеннями коефіцієнта корисної дії насоса. На сьогодні значна частина НА МН України є фізично та морально зношеними, що стало причиною втрати енергії в усталених режимах електрогидравлічної системи. Тому оцінка потенціалу енергоефективності НА є актуальною задачею в умовах сучасного стрімкого росту ціни на енергоносії, а успішне її вирішення дасть змогу зменшити енергоспоживання на НПС та збільшити ресурс роботи НА.

Аналіз досліджень і публікацій

Енергоефективність – характеристика обладнання, технології, виробництва або системи загалом, що показує ступінь використання енергії на одиницю кінцевого продукту [2].

Аналіз нормативних документів щодо забезпечення ефективної роботи насосних установок МН проведено в роботі [3]. Встановлено, що переважна більшість з них спрямовані на проектування, експлуатацію і ремонт МН. Єдиним документом, що визначає ефективність роботи МН, є Стандарт РД 39-3-477-80 [4]. Застосовують також тимчасову методику визначення к.к.д НА МН [5], однак, вона лише регламентує спосіб визначення ефективності і не дозволяє нею керувати. З існуючих на сьогодні документів лише один розглядає питання ефективності роботи НА, проте в ньому відсутня методика визначення енергооптимального режиму роботи насосів і його підтримання при зміні параметрів технологічного процесу на НПС. Отже, нормативні документи, які регламентують ефективну роботу насосних установок МН України, потребують удосконалення.

Ефективним шляхом зменшення енерговитратності трубопровідного транспорту є покращання транспортувальних властивостей робочої рідини [6]. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень [6] визначено взаємозв'язок реологічних властивостей високов'язких і малов'язких нафт з енерговитратністю їхнього перекачування МН.

В [7] розроблено методику визначення оптимального значення витратного навантаження за критеріями енергоефективності та надійності методом багатоцільової оптимізації. Проте існуючі автоматизовані системи керування МН не забезпечують оптимальних режимів НА.

Аналіз літературних джерел показав масштабність і актуальність завдання підвищення ефективності на об'єктах магістрального транспортування нафти в Україні. Тому оцінка поте-

нціалу енергоефективності НА НПС є актуальною задачею, а успішне її вирішення дасть змогу зменшити споживання електроенергії на НПС та знизити експлуатаційні витрати.

Виділення невирішеної раніше частини спільної проблеми

Для оцінки потенціалу енергоефективності НА НПС необхідно провести теоретичні і експериментальні дослідження усталених режимів НПС України, сформувані математичні моделі фізичних явищ у відцентровому насосі (ВН) та електричному двигуні (ЕД), визначити умови ефективної роботи НА в усталених режимах і способи підтримання оптимальних режимів для заданих умов експлуатації НА.

Метою роботи є оцінка потенціалу енергоефективності електричної та гідравлічної підсистем НА НПС в усталених режимах.

Матеріали дослідження

Основними параметрами мережі МН є її витрата і напір, які повинна забезпечити НА НПС. Робочі режими насосних станцій та напірні характеристики встановлених ВН дозволяють визначити відповідність наявного обладнання параметрам мережі та енергоспоживання встановлених НА.

За результатом теоретичних і експериментальних досліджень режимів МН України визначено основні причини зниження ефективності роботи НА під час експлуатації.

1) Робота насоса в режимі неповного завантаження. МН України спроектовані так, що задане проектне значення витрати нафти забезпечується насосними станціями в номінальних режимах (за умов номінальної частоти обертання роторів НА і максимального значення к.к.д). На практиці МН ніколи не працюють тільки в одному режимі з максимальною (визначеною проектом) продуктивністю. З огляду на нерівномірність поставок нафти, виведення в ремонт частини НА, усунення дефектів на лінійній частині тощо, трубопроводи працюють у режимах з різним витратним навантаженням. Фактичне завантаження діючих МН України складає [1]:

- за 2018 рік 32,1% на вхід, 46,3% на вихід;
- за 2019 рік 32,2% на вхід, 45,6% на вихід;
- за 2020 рік 31,0% на вхід, 45,7% на вихід.

Отже, фактичне завантаження МН значно менше за проектне значення. В умовах неповного завантаження на НПС передбачають зменшення кількості робочих насосів. За таких умов НА працюють в режимах, які відрізня-

Таблиця 1 – Основні причини погіршення енергоефективності насосного обладнання

1	Робота насоса при $Q < 0,5Q_{ном}$
2	Значне (більше 5%) зменшення к.к.д. насоса. Зменшення величини напору.
3	Дросельне регулювання (втрати напору 15-60%)
4	Недостатня кількість інформації щодо стану обладнання на НПС
5	Кавітаційні режими

Таблиця 2 – Основні способи підвищення ефективності насосного обладнання

1	Підвищення к.к.д. насосного обладнання
2	Оптимізація технологічних режимів перекачування нафти
3	Застосування регульованого електропривода
4	Зміна регламенту роботи насосів
5	Впровадження цифрових систем збудження синхронних електродвигунів
6	Встановлення енергоефективних насосів та електродвигунів

ються від оптимальних, що спричиняє зниження ефективності їхньої роботи.

2) Погіршення напірних характеристик і зниження к.к.д насосів. Зміна даних характеристик, як правило, відбувається через збільшення проміжку в щільних ущільненнях робочого колеса внаслідок їхнього зношення. Зношення щільних ущільнень характерне для насосів, які експлуатуються тривалий час, а також для випадків перекачування рідини з підвищеним вмістом твердих частинок. Зменшення значення к.к.д досягає 10%.

3) Дросельне регулювання. Якщо зміною кількості працюючих НА неможливо забезпечити задане витратне навантаження нафтоприводу, а також з метою виконання обмежень за напором, на виході НПС встановлюють регулятори тиску (дроселі). Дроселювання дозволяє зменшити значення витрати нафти в трубопроводі Q , але одночасно відбувається зниження к.к.д НА, що підвищує додаткові енерговитрати на НПС.

4) Недостатня кількість інформації щодо технічного стану обладнання на НПС. Повний опис математичної моделі електрогідралічного комплексу потребує проведення експериментальних досліджень роботи ВН та ЕД в різних режимах для встановлення реальних закономірностей, які мають місце під час їхньої експлуатації. Для цього необхідне довготривале збирання статистичної інформації (вибірок), який складно реалізувати на практиці (немає служб, затрати часу, обладнання вимірювальних пристроїв). Тому часто математичні моделі, побудовані за допомогою паспортних характеристик елементів НА, не дають можливості оцінити ефективність роботи електрогідралічного обладнання НПС.

5) Кавітаційні режими. Робота насоса з мінімальним значенням витрати нафти, що виникає під час запуску НА, зазвичай супроводжується кавітаційним режимом та підвищенням температури. В маловитратних режимах також можлива кавітація, яка спричиняє додаткову вібрацію обертових елементів та зменшення ефективності роботи ВН.

Основні причини погіршення енергоефективності насосного обладнання на НПС України наведено в таблиці 1.

Ґрунтовний аналіз причин погіршення енергоефективності НА НПС показав, що для зниження енергоспоживання необхідно провести оцінку потенціалу енергоефективності роботи НА в усталених маловитратних режимах та розробити алгоритми ефективної роботи ВН та ЕД. Під час планування заходів підвищення енергоефективності насосного обладнання необхідно враховувати не тільки їхню початкову вартість, але і витрати на обслуговування, плани зі зміни об'ємів перекачування НПС. Це дозволить підібрати обладнання потрібного типу-розміру і уникнути необґрунтованих витрат.

Основні способи підвищення ефективності НА представлено в таблиці 2.

Для дослідження способів підвищення енергоефективності НПС (табл. 2) застосовано математичну модель НА [8], сформовану на основі системного підходу [9]. З цією метою ЕНА представлено як складний об'єкт, що містить електричну (електричний двигун (ЕД)), гідравлічну (відцентровий насос (ВН) та механічну (вал НА) підсистеми (рис. 2)

Комплексна математично-графічна модель розроблена професором Костишиним В.С. на основі узагальненої теорії кіл Кірхгофа [9] і представлена у вигляді еквівалентної схеми заміщення з активними та індуктивними еле-

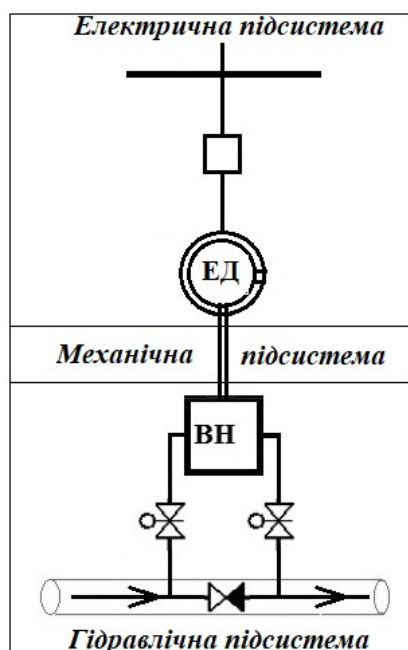


Рисунок 2 – Структурна схема електроприводного насосного агрегата

ментами, що дало змогу врахувати конструктивні особливості гідромашини та властивості рідини, що перекачується на НПС [9]. Схема заміщення дозволяє визначити споживану з боку приводного ЕД потужність насоса N_C .

$$N_C = N_T' + \Delta N_{\text{мех}}, \quad (1)$$

$$\Delta N_{\text{мех}} = \Delta N_{\text{мех}}^{\text{const}} + \Delta N_{\text{мех}}^{\text{var}}, \quad (2)$$

де N_T' - внутрішня потужність N_T' %;

$\Delta N_{\text{мех}}$ - потужність механічних втрат ВН.

Стала (при постійній швидкості обертання) складова втрат $\Delta N_{\text{мех}}^{\text{const}}$ характеризує потужність дисипативних втрат дискового тертя, які не залежать від витратного режиму, тертя в підшипниках і тертя ущільнення валу. $\Delta N_{\text{мех}}^{\text{const}}$ дорівнює потужності механічних втрат за умов номінального режиму ВН $N_{\text{мех}}^{\text{ном}}$ і визначається за законами подібності [10]

$$\Delta N_{\text{мех}}^{\text{const}} = \Delta N_{\text{мех}}^{\text{ном}} = \frac{1 - \eta_{\text{мех}}^{\text{ном}}}{\eta_{\text{ВН}}^{\text{ном}}}, \quad (3)$$

де $\eta_{\text{ВН}}^{\text{ном}}$ та $\eta_{\text{мех}}^{\text{ном}}$ - значення повного та механічного к.к.д. ВН у номінальному режимі.

ВН містить також змінні втрати $\Delta N_{\text{мех}}^{\text{var}}$, які залежать від режиму НПС і супроводжуються ударним зіткненням рідини з робочою поверхнею лопаті. Їх також віднесено до механічних втрат [9], оскільки вони відображають дисипативні теплові процеси у ВН. Дані втрати доцільно представити у вигляді функції

$$\Delta N_{\text{мех}}^{\text{var}} = (\Delta N_{\text{мех}}^{\text{нх}} - \Delta N_{\text{мех}}^{\text{ном}}) (Q - 1)^2, \quad (4)$$

де $\Delta N_{\text{мех}}^{\text{нх}}$ - відносне значення механічних втрат в режимі неробочого ходу [9].

Математичну модель регульованого ВН представлено у вигляді рівнянь (5) – (9) [11].

$$r_{\text{мех p}} = \frac{H_{\text{ек}}^2}{\Delta N_{\text{мех p}}}; \quad (5)$$

$$N_{\text{Cp}} = N_T' + \Delta N_{\text{мех p}}; \quad (6)$$

$$\Delta N_{\text{мех p}} = \Delta N_{\text{мех p}}^{\text{const}} + \Delta N_{\text{мех p}}^{\text{var}}; \quad (7)$$

$$\Delta N_{\text{мех p}}^{\text{const}} = \Delta N_{\text{мех p}}^{\text{ном}} = \frac{k_n^3 (1 - \eta_{\text{мех}}^{\text{ном}})}{\eta_{\text{ВН}}^{\text{ном}}}; \quad (8)$$

$$\Delta N_{\text{мех p}}^{\text{var}} = (\Delta N_{\text{мех p}}^{\text{нх}} - \Delta N_{\text{мех}}^{\text{ном}}) \left(\frac{Q}{k_n} - 1 \right)^2, \quad (9)$$

де $k_n = \frac{n_{\text{var}}}{n_{\text{ном}}}$ - коефіцієнт регулювання частоти

ти обертання насоса відносно номінального значення;

$n_{\text{ном}}$, n_{var} - номінальна і змінна частота обертання, с^{-1} ;

Для аналізу режимів роботи електрогідравлічного комплексу математичну модель електропривода ВН також необхідно сформулювати в залежності від витрати Q НА. З цією метою застосовано математичну модель ефективності роботи ЕД [12] залежно від витратного навантаження:

$$\eta_{\text{ЕД}} = \left[1 + \frac{a_0 + a_1 \left(\frac{N_C \eta_{\text{НА}}^{\text{ном}}}{\eta_{\text{ЕД}}} \right) + a_2 \left(\frac{N_C \eta_{\text{НА}}^{\text{ном}}}{\eta_{\text{ЕД}}} \right)^2}{N_C} \right]^{-1}, \quad (10)$$

де a_i - коефіцієнти апроксимації характеристики втрат активної потужності в ЕД;

$\eta_{\text{НА}}^{\text{ном}}$ - номінальне значення ефективності НА загалом ($\eta_{\text{НА}}^{\text{ном}} = \eta_{\text{СД}}^{\text{ном}} \eta_{\text{ВН}}^{\text{ном}}$).

Аналіз енергетичних характеристик ЕД доводить, що при зміні швидкості обертання ЕД його к.к.д. залишається практично незмінним. Отже, для визначення к.к.д. регульованого НА доцільно застосувати вираз (10).

Дослідження ефективності електричної та гідравлічної підсистем НА виконано на прикладі магістрального насоса НМ-3600-230 з електродвигуном СТД-2500-2. Номінальні параметри електродвигуна та насоса наведені в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 – Номінальні параметри електричного двигуна СТД-2500-2

$N^{\text{НОМ}}$, кВт	$\cos \varphi^{\text{НОМ}}$	$U^{\text{НОМ}}$, В	$n^{\text{НОМ}}$, об/хв	$I^{\text{НОМ}}$, А	$\eta^{\text{НОМ}}$, %
2500	0,9	6000	3000	276	97,4

Таблиця 4 – Номінальні параметри відцентрового магістрального насоса НМ-3600-230

$H^{\text{НОМ}}$, м	$Q^{\text{НОМ}}$, м ³ /год	$N_c^{\text{НОМ}}$, кВт	$n^{\text{НОМ}}$, об/хв	$\eta^{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{мех}}^{\text{НОМ}}$
230	3600	2593	3000	0,87	0,968

Для оцінки потенціалу енергетичної ефективності НА НПС застосовують різноманітні показники та параметри, зокрема:

- загальний обсяг енергоспоживання (для технологічної ділянки електрогидравлічного комплексу);
- обсяг споживання електроенергії на транспортування рідини і на власні потреби;
- питоме енергоспоживання (відносно обсягу транспортованої рідини);
- коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) агрегатів, насосних станцій.

Вибір того чи іншого показника зумовлений наявністю інформації про об'єкт дослідження та формалізованої математичної моделі ефективності НА в різних режимах. Оскільки МН України працюють в умовах неповного завантаження, то для визначення потенціалу енергоефективності застосовуємо показник N' - відносна питома витрата електроенергії на перекачування робочої рідини при розрахунковій подачі насоса. N' дасть змогу оцінити питоме енергоспоживання відносно обсягу транспортованої рідини.

$$N' = \frac{N_c}{\eta_E \cdot Q} \cdot (1 - \eta_H), \quad (11)$$

де N_c - споживана з боку приводного ЕД потужність насоса при розрахунковому значенні витрати Q , кВт;

η_H - к.к.д насоса при розрахунковому значенні витрати Q ;

η_E - к.к.д ЕД.

Результати розрахунку N' показали, що для паспортних характеристик ВН типу НМ-3600-230 з електродвигуном СТД-2500-2 за витрати $Q = 3600$ м³ відносне значення питомої витрати електроенергії складає $N'_{\text{ном}} = 0,0961$ кВт/м³, а для фактичних характеристиках насоса до ремонту і тієї ж подачі – $N'_{\text{факт}} = 0,1257$ кВт/м³. Фактичні характеристики НА отримано на основі параметричних випробувань насоса НМ 3600-230.

Таким чином, зміна величини питомої витрати електроенергії на перекачування зі зниженням к.к.д складатиме

$$\Delta N' = N'_{\text{факт}} - N'_{\text{ном}}. \quad (12)$$

Зменшення значення к.к.д спричинить додаткові витрати електроенергії, кВт·год

$$\Delta W = \Delta N' \cdot Q \cdot \tau \cdot 24, \quad (13)$$

де τ – тривалість роботи насоса протягом року, доба.

Додаткові витрати електроенергії для НА типу НМ-3600-230 з електроприводом СТД-2500-2 протягом року складатимуть $\Delta W = 895104$ кВт·год. З врахуванням діючого тарифу на електроенергію затрати сягають 3,8 млн грн. Витрати розраховані тільки для одного магістрального насоса, але на НПС в роботі можуть знаходитися до трьох електроприводних НА. Тому підвищення к.к.д НА дозволить уникнути даних витрат.

Значення відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини для різних режимів роботи НА типу НМ-3600-230 з електроприводом СТД-2500-2 при номінальному значенні частоти обертання робочого колеса (3000 хв⁻¹) визначено за допомогою комплексної математично-графічної моделі ВН та ЕД та відображено на рисунку 3.

Як видно з рисунку 3, зі зменшенням витратного навантаження зростають значення відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини. Тому для підвищення енергоефективності роботи НА необхідно формувати карту режимів таким чином, щоб уникати роботи насоса в режимах недовантаження. З цією метою в існуючу автоматизовану систему керування технологічним процесом МН необхідно інтегрувати методику визначення оптимального режиму роботи ділянки МН для регулювання витратного навантаження [7], що дасть можливість ВН та ЕД працювати в діапазоні максимальних к.к.д.

Ефективним способом зменшення енергоспоживання насосного обладнання є впровадження на НПС регульованого електропривода

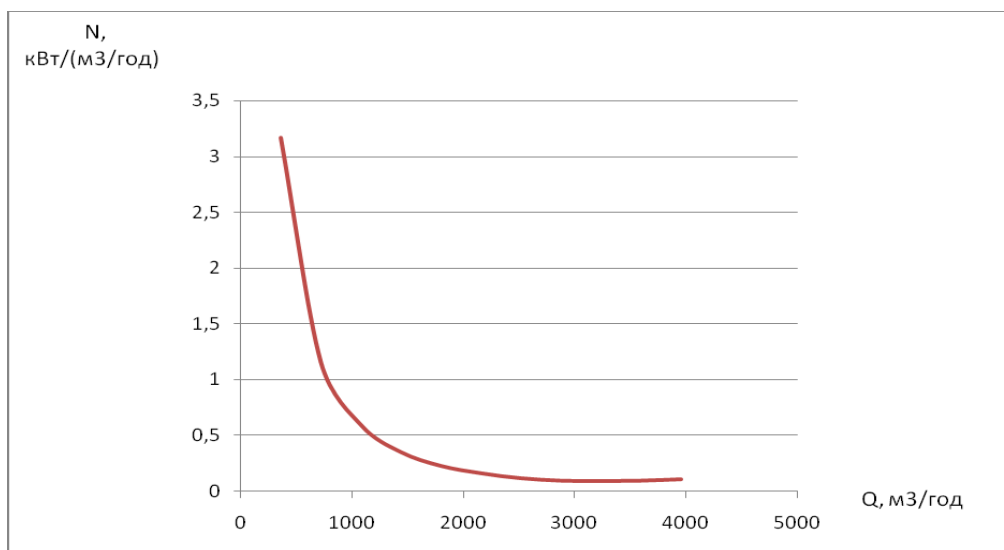
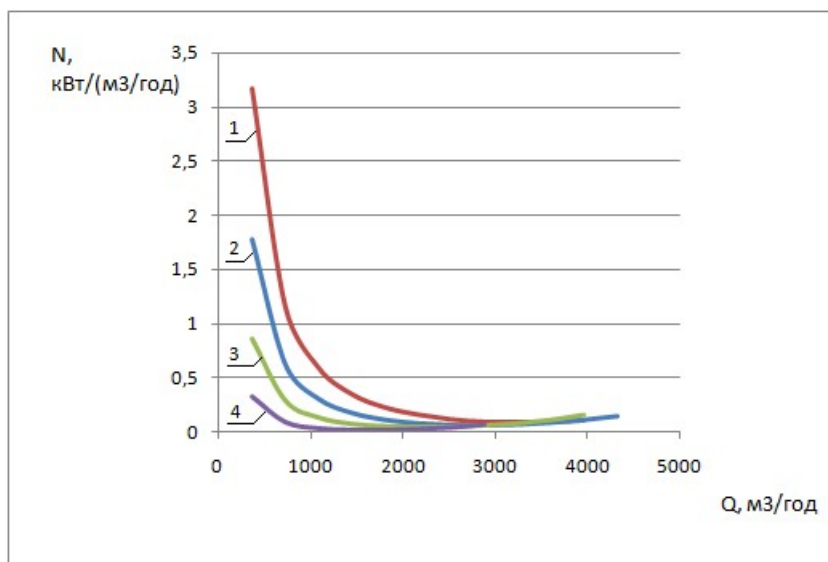


Рисунок 3 – Залежність відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини від витратного навантаження Q НА типу НМ-3600-230 з електродвигуном СТД-2500-2



1 – $n=3000 \text{ хв}^{-1}$; 2 – $n=2500 \text{ хв}^{-1}$; 3 – $n=2000 \text{ хв}^{-1}$; 4 – $n=1500 \text{ хв}^{-1}$

Рисунок 4 – Графічні залежності відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини від витратного навантаження для різних значень частоти обертання робочого колеса

ВН. Залежність відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини від витратного навантаження для різних значень частоти обертання робочого колеса n представлено на рис 4.

Рисунок 4 ілюструє значний потенціал енергоефективності регульованого електропривода. Даний спосіб дає змогу забезпечити роботу насосів у зоні максимальних к.к.д., проте має суттєві недоліки: висока вартість перетворювачів частоти для двигунів потужністю понад 500 кВт; додаткові капітальні витрати, оскільки

частотні перетворювачі треба встановлювати в спеціальних приміщеннях; оплата праці фахівців з обслуговування частотно-керованого електропривода. Тому для встановлення регульованого НА на НПС необхідно провести додаткові техніко-економічні розрахунки.

Аналіз фактичних показників роботи НА при перекачуванні нафти показав, що в процесі експлуатації значення к.к.д. зменшується в середньому на 6%, а напору – на 8-10% порівняно з паспортним значенням [13]. Для забезпечення довговічності, технічного ресурсу, нормованих

значень параметрів НА на НПС проводять регламентне обслуговування та регламентні роботи відповідно до вимог, експлуатаційних документів на насоси, двигуни та їхні елементи. Регламентні роботи є видом періодичного технічного обслуговування і проводяться з метою поглибленої перевірки технічного стану НА і приведення його технічних характеристик у відповідність до вимог. Ремонт також проводять відповідно до регламентних робіт, які відображені експлуатаційних документах заводу-виготовлювача. Під час експлуатації стан НА змінюється внаслідок зносу деталей і вузлів. Зменшення значення к.к.д. насоса типу НМ-3600-230 на 2% вимагає виведення його в ремонт. Поточний ремонт НМ-3600-230 проводять з періодичністю 3000 год напрацювання, а капітальний відповідно з періодичністю 12000 год. Поточний ремонт STD-2500-2 проводять з періодичністю 5000-6000 год напрацювання, але не рідше 1 разу на 2 роки, а капітальний відповідно до вимог показників надійності. Технічне обслуговування СД проводиться 1 раз на 6 місяців. Часто вартість підтримання працездатності обладнання значно перевищує початкові капіталовкладення. Дослідження роботи електроприводних НА НПС показали, що система планово-попереджувальних ремонтів, яка регламентує терміни та об'єми ремонтних робіт, має багато недоліків. Така ситуація спричинена тим, що діючі нормативні документи системи планово-попереджувальних ремонтів обладнання НПС недостатньо враховують вплив умов експлуатації на технічне обслуговування машин.

Для зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонт обладнання більш ефективним є застосування підходу, який базується на результатах контролю і оцінки фактичного технічного стану обладнання НПС. Ефективність такої системи полягає в тому, що терміни виведення в ремонт і об'єми робіт встановлені не як наперед визначені середньостатистичні і нормовані величини, а призначаються індивідуально для кожного агрегата шляхом математичних розрахунків діагностичних параметрів їхнього стану. Тобто елемент замінюють, лише тоді, коли значення прогнозованого параметра НА наблизиться до граничного рівня. В іншому випадку, експлуатація продовжується до наступної перевірки його стану. Тоді значно зменшаться затрати на обслуговування, розхід високовартісних вузлів та деталей. Впровадження методу заміни за технічним станом забезпечить збільшення значення середнього напрацювання деталей і вузлів між замінами та зменшення пи-

томих затрат на технічне обслуговування і відновлення працездатності.

Частина НА НПС України обладнані синхронним електроприводом. Синхронні ЕД мають ряд переваг: значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ близьке до одиниці; високий к.к.д; максимальний момент синхронного двигуна залежить від напруги в першій степені (у асинхронних ЕД ця залежність квадратична), тому він більш стійкий до коливань напруги в мережі; має велике значення пускового моменту $M_{пуск} = (3 - 4)M_{ном}$ і кращі показники стійкості роботи в порівнянні з асинхронними двигунами при різкозмінних навантаженнях і перевантаженнях. Ефективним способом зменшення енергоспоживання СД є впровадження цифрових систем збудження. Морально застарілі системи збудження СД з аналоговим керуванням (серій ТЕ8, ВТЕ, БВУ, ТВ, ТВ2, ТПЕ10, ТПЕ) і електромашинних систем збудження, необхідно замінити на цифрові, що дозволить значно підвищити швидкодію і надійність систем збудження, а також знизити енергоспоживання ЕД.

Таким чином, за результатами проведених досліджень визначено потенціал енергоефективності НА на прикладі НМ-3600-230 з електроприводом STD-2500-2 та проаналізовано основні способи підвищення ефективності використання електроенергії. До них відносяться: підвищення к.к.д. НА, оптимізація технологічних режимів перекачування нафти, встановлення регульованого електропривода, зміна регламенту роботи насосів, впровадження цифрових систем збудження синхронних електродвигунів. Застосування комплексної математично-графічної моделі ВН та СД дало змогу визначити параметри процесу енергоспоживання та енерговикористання підсистем НА з врахуванням можливих змін характеристик обладнання і режимів роботи.

Надалі необхідно вирішувати задачу вибору найбільш доцільного способу підвищення енергоефективності НА залежно від фактичного стану ВН і СД та режиму роботи НПС ділянки МН.

Висновки

1. За результатами досліджень ustalених режимів роботи електроприводних насосних агрегатів нафтоперекачувальних станцій України визначено основні причини зниження ефективності їхньої роботи під час експлуатації.

2. Розраховано значення відносної питомої витрати електроенергії на перекачування робочої рідини для регульованого та нерегульованого електропривода на основі комплексної елек-

трогидравлічної моделі НА, що дало змогу оперативніо перераховувати характеристики ефективності ВН та ЕД з урахуванням їхнього технічного стану та визначити області енергоефективних режимів роботи НА.

3. Встановлено, що ефективним способом зменшення енергоспоживання магістральними насосними агрегатами є впровадження регульованого електропривода на нафтоперекачувальних станціях, проте доцільність такого заходу потребує додаткових техніко-економічних розрахунків.

4. Визначено, що для підвищення ефективності насосних агрегатів необхідно уникати маловитратних режимів, формувати карти режимів магістральних нафтопроводів так, щоб забезпечити оптимальні, з точки зору енергоефективності, режими роботи електрогидравлічного обладнання нафтоперекачувальних станцій та змінити регламент роботи насоса та електродвигуна за технічним станом.

Література

1. АТ «Укртранснафта». URL: <https://www.ukrtransnafta.com/shema-sistemi-magistralnih-naftoprovodiv-ukrayini/>

2. Закон України «Про енергозбереження» №74/94-ВР від 01.07.94.

3. Князєва В.М., Канюк Г.І., Мезєря А.Ю., Андрєєв О.В. Аналіз нормативних документів щодо забезпечення ефективної роботи насосних установок магістральних нафтопроводів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. № 5 (1330). С. 27-33. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.04.

4. РД 39-3-477-80. Временная методика определения КПД насосных агрегатов магистральных нефтепроводов.

5. Державний стандарт України. ДСТУ 2709-94. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення. Основні положення.

6. Середюк М.Д., Грудз В.Я. Шляхи підвищення ефективності та зменшення енерговитратності процесів транспортування та зберігання нафти і газу. *Нафтогазова енергетика*. 2007. №2(3). С. 24-31.

7. Яремак І.І., Костишин В.С. Багатоцільова оптимізація усталених режимів роботи електроприводної нафтоперекачувальної станції. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2018. Випуск 1(108). С.15-21. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.1.15-21.

8. Костишин В. С., Яремак І. І. Математична модель надійності та ефективності роботи насосного агрегата нафтоперекачувальної станції. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2017. № 5(161). С. 62–68.

9. Костишин В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии. *Нефтегазовое дело*. 2004.

10. Gülich J. F. Centrifugal Pumps. Springer-Verlag Berlin Heidelberg - 3rd edition, 2014.

11. Костишин В. С., Яремак І. І. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1(62). С.50–60.

12. Яремак І. І., Костишин В. С., Костишин А. В. Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. № 27(3). С.166–170.

13. Акбердин А.М., Сазонов А.З., Еронец В.И., Рахимов А.С. К определению расхода электроэнергии на объектах магистральных нефтепроводов. *Нефтегазовое дело*. 2006. Том 6. № 1. С. 133 - 141.

References

1. АТ «Ukrtransnafta». URL: <https://www.ukrtransnafta.com/shema-sistemi-magistralnih-naftoprovodiv-ukrayini/> [in Ukrainian]

2. Zakon Ukrainy «Pro energozberezhennya» №74/94-VR vid 01.07.94. [in Ukrainian]

3. Kniazieva V. M., Kaniuk H. I., Mezeria A. Yu., Andreiev O. V. Analiz normatyvnykh dokumentiv shchodo zabezpechennia efektyvnoi roboty nasosnykh ustanovok mahistralnykh naftoprovodiv. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2019. No 5 (1330). P. 27-33. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.04. [in Ukrainian]

4. RD 39-3-477-80. Vremennaya metodika opredeleniya KPD nasosnykh agregatov magistralnykh nefteprovodov. [in Russian]

5. Derzhavnyi standart Ukrainy. DSTU 2709-94. Avtomatyzovani systemy keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy. Metrolohichne zabezpechennia. Osnovni polozhennia. [in Ukrainian]

6. Serediuk M.D., Hrudz V.Ya. Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti ta zmeshennia enerhovytratnosti protsesiv transportuvannia ta zberihannia nafty i hazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2007. No 2(3). P. 24-31. [in Ukrainian]

7. Yaremak I.I., Kostyshyn V.S. Bahatotsilova optymizatsiia ustalenykh rezhymiv roboty elektroprivodnoinaftoperekachuvalnoi stantsii. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. 2018. Vol. 1(108). P.15-21. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.1.15-21. [in Ukrainian]
8. Kostyshyn V. S., Yaremak I. I. Matematychna model nadiinosti ta efektyvnosti roboty nasosnoho ahrehata naftoperekachuvalnoi stantsii. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2017. No 5(161). P. 62–68. [in Ukrainian]
9. Kostyshyn V. S. Modelirovanie rezhimov raboty tsentrobezhnyih nasosov na osnove elektrogidravlicheskoj analogii. *Neftegazovoe delo*. 2004. No 1. [in Russian]
10. Gülich J. F. Centrifugal Pumps. Springer-Verlag Berlin Heidelberg - 3rd edition, 2014.
11. Kostyshyn V. S., Yaremak I. I. Analiz pokaznykiv efektyvnosti ta nadiinosti roboty nasosnoho ahrehata na zasadakh systemnoho pidkhotu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2017. No 1(62). P.50–60. [in Ukrainian]
12. Yaremak I. I., Kostyshyn V. S., Kostyshyn A. V. Rozrakhunok pokaznykiv enerhoefektyvnosti rezhymiv roboty naftoperekachuvalnoi stantsii, obladnanoi vidtsentrovymy nasosamy zi synkhronnym elektroprivodom. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. 2017. No 27(3). P. 166–170. [in Ukrainian]
13. Akberdin A.M., Sazonov A.Z., Eronen V.I., Rahimov A.S. K opredeleniyu rashoda elektroenergii na ob'ektah magistralnykh nefteprovodov. *Neftegazovoe delo*. 2006. Iss. 6. P. 133 - 141. [in Russian]