

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАФТОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ, ОБЛАДНАНОЇ ВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ ЗІ СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

За результатами досліджень сформовано структурно-функціональну схему насосного агрегата нафтоперекачувальної станції, яка відображає енергетичні входи-виходи його складників. Виявлено, що підвід енергії в електродвигун та насос здійснюється двоканально та встановлено енергетичні вхідні та вихідні параметри синхронного двигуна та відцентрового насоса. З'ясовано, що ефективність роботи насосного агрегата нафтоперекачувальної станції прямо залежить від витратного режиму роботи станції та методів його регулювання, тому вихідними показниками для оцінювання цих критеріїв є коефіцієнт корисної дії синхронного двигуна та відцентрового насоса, які є функціями зазначених вище енергетичних параметрів. Скалярну модель відцентрового насоса представлено у вигляді еквівалентної електричної схеми заміщення. Розраховано режимні показники енергоефективності синхронного двигуна та відцентрового насоса залежно від витратного навантаження нафтоперекачувальної станції. Під час проведення розрахунків визначено, що для потужних насосних агрегатів зміна витрати незначно впливає на коефіцієнт корисної дії приводних синхронних двигунів. Встановлено, що екстремальні значення коефіцієнтів корисної дії синхронного двигуна та відцентрового насоса досягаються за різних значень витратного навантаження, що потребує залучення методів багатокритеріальної оптимізації для вибору режиму роботи насосного агрегата.

Ключові слова: насосний агрегат; енергетичні параметри; коефіцієнт корисної дії; витратне навантаження.

Вступ. Нафтоперекачувальні станції (НПС) магістральних нафтопроводів, які обладнані насосними агрегатами (НА), є складними енергоємними об'єктами, що складаються зазвичай із відцентрового насоса (ВН) із приводом від синхронного двигуна (СД). На цей час НА НПС часто працюють у недовантажених режимах, що спричинило зниження ефективності їх роботи. Тому особливо актуальною є задача розрахунку енергоефективності режимів роботи ВН із синхронним електроприводом залежно від витратного навантаження НПС, що дасть змогу адекватно відобразити складні взаємозв'язки між підсистемами НПС різної фізичної природи.

Мета дослідження – формалізувати залежності ККД СД і ВН НПС залежно від витратного навантаження станції на основі математичної моделі їхньої енергоефективності, сформованої на засадах системного підходу.

Матеріали та методика дослідження. СД приводу ВН зазвичай вибирають так, щоб його номінальні параметри відповідали оптимальним параметрам насоса (Kostyshyn, Sorokhetei, 2009). Отже, неоптимальний режим ВН зумовлює також зниження ефективності приводного СД – погіршення його ККД і появу додаткових втрат в елементах електромережі. Однак у літературі відсутні математичні моделі, які встановлювали б аналітичний зв'язок ККД СД з витратою робочої рідини.

Результати дослідження. Режим магістрального трубопроводу залежить від об'єму нафти, який потрібно транспортувати. Тому ККД СД і ВН НПС потрібно вміти визначати залежно від заданого значення витрати нафти. У межах досліджуваної технологічної ділянки НПС зазвичай використовують послідовне сполучення

трьох ВН (система перекачування із "насоса в насос"), що визначає їх однакове витратне навантаження.

Структурно-функціональну схему окремого НА, яка відображає енергетичні входи-виходи його складників – ВН та СД, представлено на рис. 1. Тут підвід електричної енергії в електродвигун здійснюється двоканально:

- в обмотки статора СД (потужність N_{OC}). Енергетичними параметрами є діючі значення фазної напруги U_{OC} та змінного струму I_{OC} ;
- в обмотки ротора (потужність N_{OP}). Тут енергетичними параметрами є напруга U_{OP} та постійний струм збудження I_{OP} .

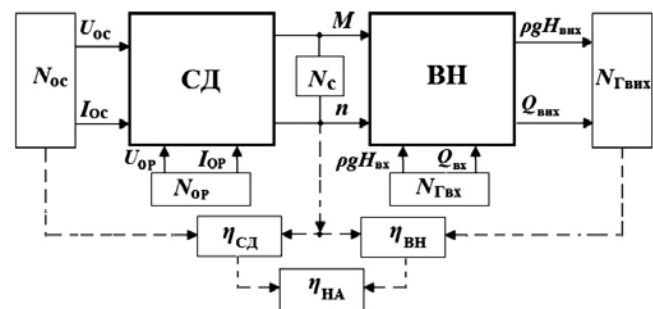


Рис. 1. Структура загальної інформаційно-енергетичної моделі насосного агрегата

Вихід механічної енергії з СД N_C відбувається через вал НА і одночасно є входом у ВН із енергетичними параметрами – обертовим моментом M і кутовою частотою обертання n . Для ВН теж характерний двоканальний підвід енергії, оскільки, окрім зазначеної вище механічної енергії, в насос підводиться через вхідний пат-

Цитування за ДСТУ: Яремак І. І. Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом / І. І. Яремак, В. С. Костишин, А. В. Костишин // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27(3). – С. 166–170

Citation APA: Yaremak, I. I., Kostyshyn, V. S., & Kostyshyn, A. V. (2017). The Calculation of Energy Efficiency Parameters of Modes of Oil Pumping Station Equipped with Centrifugal Pumps Driven by the Synchronous Electric Motors. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(3), 166–170. Retrieved from: <http://nv.ntlu.edu.ua/index.php/journal/article/view/291>

рубков рідина, гідравлічна потужність $N_{Гвх}$ якої характеризується параметрами – підпірним напором $H_{вх}$ та об'ємною витратою $Q_{вх}$. Очевидно, що через напірний патрубков ВН отримують корисну гідравлічну потужність $N_{Гвнх}$ з енергетичними параметрами – вихідним напором $H_{внх}$ і витратою $Q_{внх}$. Добуток кожної пари енергетичних параметрів, які носять відповідно силовий (U_{OC} , U_{OP} , M , $H_{вх}$, $H_{внх}$) та швидкісний (I_{OC} , I_{OP} , n , $Q_{вх}$, $Q_{внх}$) характер, відображає потужність енергетичного потоку N .

Для спрощення аналізу прирівнюємо вхідну гідравлічну енергію до нуля $N_{Гвх} = 0$. У цьому випадку перепад напорів $H_{д}$ буде дорівнювати абсолютному значенню напору на виході насоса $H_{д} = H_{внх} - H_{вх}$, а витратне навантаження ВН $Q_{д}$ – вихідному значенню витрати $Q_{внх}$. Аналогічно знехтуємо потужністю обмотки збудження СД N_{OP} , відповідно збільшивши на її значення внутрішні енергетичні втрати в СД.

Ефективність роботи НА НПС прямо залежить від витратного режиму роботи станції $Q_{д}$ та методів його регулювання, тому вихідними показниками для оцінювання цих критеріїв є згідно з (Shabanov & Bondarenko, 2012) ККД (η_{CD} , $\eta_{ВН}$), які є функціями зазначених вище енергетичних параметрів.

Дослідження виконано на прикладі НА, що складається з пари СД-ВН "СТД-2500-2 і НМ-3600-230", параметри яких наведено в табл. 1 та 2.

Табл. 1. Каталогні номінальні параметри синхронного двигуна СТД-2500-2

$N_{НОМ}$, кВт	$\cos \phi_{НОМ}$	$U_{НОМ}$, В	$n_{НОМ}$, об/хв	$I_{НОМ}$, А	$\eta_{НОМ}$, %	x_d , %
2500	0,9	6000	3000	276	97,4	154,5

Табл. 2. Каталогні номінальні параметри магістрального насоса НМ-3600-230

$H_{Д}^{НОМ}$, м	$Q_{Д}^{НОМ}$, м ³ /год	$N_{С}^{НОМ}$, кВт	$n_{НОМ}$, об/хв	$\eta_{НОМ}$	$\eta_{Мех}^{НОМ}$	n_s
230	3600	2593	3000	0,87	0,968	131

Як відомо, системним показником ефективності НА загалом є його ККД, який визначають за формулою

$$\eta_{НА} = \eta_{CD} \eta_{ВН}, \quad (1)$$

де η_{CD} та $\eta_{ВН}$ – відповідно ККД СД та ВН, для визначення яких потрібно застосувати такі математичні моделі, які дадуть змогу встановити пряму залежність цих показників від витратного режиму роботи станції $Q_{д}$.

На цей час у моделюванні гідравлічних машин застосовують нові підходи, які ґрунтуються на теорії кіл Кірхгофа, що є основою теорії електричних машин. Зокрема в (Kostyshyn, 2000), на основі методу електрогідравлічної аналогії розроблено скалярну модель ВН у вигляді еквівалентної електричної схеми заміщення (рис. 2), яка враховує конструкційні особливості гідромашини. Для цього використано поняття активних і пасивних лінійних параметрів ВН, уведених на основі загальноприйнятої аналогії напруга – тиск і струм – об'ємна витрата.

Тут $\rho g H_{д}$, $\rho g H_{д}^{HX}$ – відповідно тиск на виході робочого колеса ВН у режимі відкритої та закритої засувки (неробочого режиму); $R_{ВН}$, $R_{Мех}$ – відповідно гідрав-

лічні опори, які відображають внутрішні (гідравлічні та об'ємні) та зовнішні (механічні) втрати енергії; $R_{Нав}$ – гідроопір напірного трубопроводу.

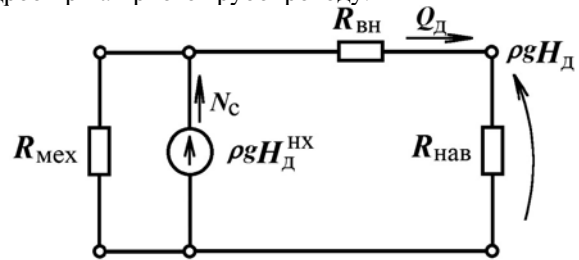


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення ВН

Схема заміщення дає змогу записати рівняння Кірхгофа балансу витрат і тисків та розрахувати споживану з боку приводного СД потужність на валу ВН N_{*C} залежно від витрати $Q_{д}$. Приклад такого розрахунку наведено у (Kostyshyn, 2000). Однак пасивні параметри ВН мають складну нелінійну залежність від витрати, а тому в практичних розрахунках зазвичай приймають допущення про лінійну залежність споживаної потужності насоса N_{*C} від витрати $Q_{д}$. Скалярна модель дала змогу синтезувати робочу формулу (у вигляді рівняння прямої) з використанням основного конструкційного параметра ВН – номінального значення розрахункового кута навантаження насоса $\gamma_p^{НОМ}$, введеного за аналогією до кута навантаження синхронної машини (Kostyshyn, 2000)

$$N_{*C} = N_{*C}^{HX} + \left(\frac{1}{\eta_{ВН}^{НОМ}} - N_{*C}^{HX} \right) Q_{*Д}. \quad (2)$$

Розрахунок виконуємо у системі відносних одиниць (з індексом " * "), де базовими прийнято номінальні параметри ВН:

$$H_{баз} = H_{Д}^{НОМ}, \quad Q_{баз} = Q_{Д}^{НОМ}. \quad (3)$$

У формулі (3) N_{*C}^{HX} – відносне значення споживаної потужності ВН у режимі неробочого ходу

$$N_{*C}^{HX} = \left(1 - \gamma_p^{НОМ} \text{ctg} \gamma_p^{НОМ} \right) \frac{1}{\eta_{ВН}^{НОМ}}, \quad (4)$$

де $\gamma_p^{НОМ}$ – номінальне значення кута навантаження ВН, яке у першому наближенні зв'язане з коефіцієнтом швидкохідності ВН n_s виразом (Kostyshyn, 2000)

$$\gamma_p^{НОМ} \approx 0.475 \left(1 + \frac{n_s}{100} \right). \quad (5)$$

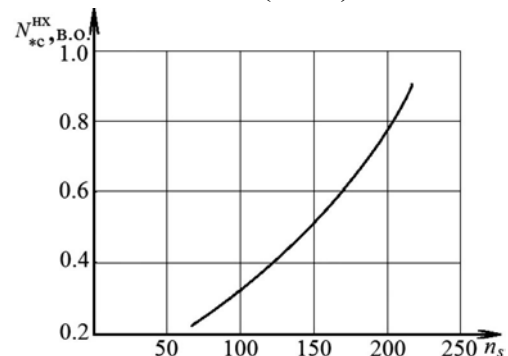


Рис. 3. Залежність відносного значення споживаної потужності ВН у режимі неробочого ходу N_{*C}^{HX} від коефіцієнта швидкохідності n_s

На рис. 3 наведено залежність відносного значення споживаної потужності ВН у режимі неробочого ходу від коефіцієнта швидкохідності. Очевидно, що навіть при закритій засувці на виході ВН маємо значне споживання потужності з валу приводного СД, яке зростає майже пропорційно збільшенню n_s .

Тоді відносне значення повного ККД ВН (у частках від номінального) становить

$$\eta_{*ВН} = \frac{\eta}{\eta^{ном}} = \frac{N_{*Д} Q_{*Д}}{N_{*С}^{HX} + \left(\frac{1}{\eta_{ВН}^{ном}} - N_{*С}^{HX} \right) Q_{*Д}} \quad (6)$$

Аналітичну залежність $\eta_{*ВН}$ від $Q_{*Д}$ для різних значень коефіцієнта швидкохідності ВН n_s проілюстровано на рис. 4, а рис. 5 демонструє добрий збіг цієї характеристики, розрахованої для насоса НМ-3600-230, з його заводською характеристикою (Kostyshyn & Kurlyak, 2015).

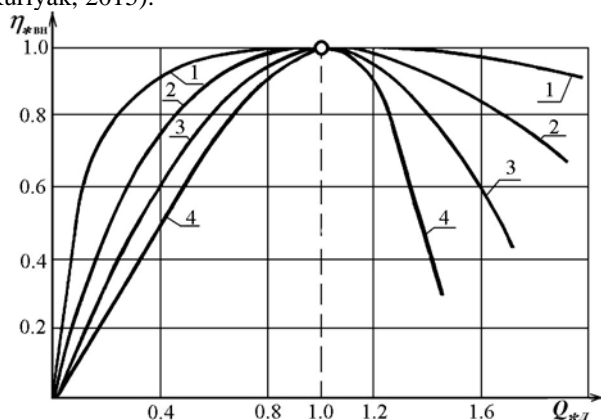


Рис. 4. Характеристики ККД ВН у системі відносних одиниць: 1 – $n_s = 10$; 2 – $n_s = 120$; 3 – $n_s = 230$; 4 – $n_s = 240$



Рис. 5. Порівняння залежностей ККД $\eta_{ВН}$ від витратного навантаження $Q_{Д}$ магістрального насоса НМ 3600-230: 1 – розрахованої за допомогою моделі; 2 – отриманої експериментально (крива 2) (Kostyshyn & Kurlyak, 2015)

Одним із основних показників ефективності енергоперетворення в СД є його ККД $\eta_{СД}$. На відміну від ВН, у літературі відсутня паспортна характеристика ККД СД. За умови відсутності даних заводу-виробника про значення ККД системи електроприводу згідно з ДСТУ 3886-99 (DSTU 3886-99, 2000) потрібно застосовувати усереднену залежність ККД електродвигуна від коефіцієнта навантаження k_3 (рис. 6, крива 2), адаптовану до електродвигуна СТД-2500-2 шляхом домноження на номінальне значення його ККД.

Коефіцієнт навантаження електродвигуна – це відношення фактичної потужності, яку розвиває електродви-

гун (потужності на валу електродвигуна), до його номінальної потужності. Для електродвигуна СТД-2500-2 k_3 можна визначити згідно з формулою

$$k_3 = \frac{N_{СД}}{N_{СД}^{ном}} \quad (7)$$

де $N_{СД}$, $N_{СД}^{ном}$ – відповідно поточне та номінальне значення потужності на валу СД. Очевидно, що відносне значення споживаної потужності ВН $N_{*С}$ одночасно є коефіцієнтом навантаження k_3 приводного СД (якщо номінальні потужності машин є однаковими). У загальному випадку

$$k_3 = N_{*С} \left(\frac{N_{С}^{ном}}{N_{СД}^{ном}} \right) \quad (8)$$

З іншого боку, ККД СД можна визначити через втрати активної потужності ΔN , алгоритм розрахунку яких наведено в (Syromjatnikov, 1963)

$$\eta_{СД} = \frac{N_{СД}}{N_{СД} + \Delta N} \quad (9)$$

Однак $N_{СД}$ залежить від витратного навантаження $Q_{Д}$ ВН

$$N_{СД} = N_{С} = \frac{\rho g Q_{Д} H_{Д}}{\eta_{ВН}} \quad (10)$$

Згідно із (Syromjatnikov, 1963), ΔN є функцією коефіцієнта навантаження СД β ,

$$\Delta N = a_0 + a_1 \beta + a_2 \beta^2 \quad (11)$$

який, на відміну від коефіцієнта навантаження СД k_3 , визначають за співвідношенням потужностей, які отримують з електричної мережі

$$\beta = \frac{N_{ІСД}}{N_{ІСД}^{ном}} \quad (12)$$

де: $N_{ІСД}$, $N_{ІСД}^{ном}$ – відповідно поточне та номінальне значення споживаної з електричної мережі потужності СД; a_i – коефіцієнти апроксимації залежності втрат активної потужності у СД від коефіцієнта навантаження, які для СТД-2500-2 становлять: $a_0=109,7$, $a_1=1,2$, $a_2=7,5$. З урахуванням (1), можна показати, що

$$\beta = \frac{N_{*С} \eta_{НА}^{ном}}{\eta_{СД}} \quad (13)$$

Спільний розгляд формул (1)-(13) дає змогу визначити ККД СД залежно від витратного навантаження

$$\eta_{СД} = \left[1 + \frac{a_0 + a_1 \left(\frac{N_{*С} \eta_{НА}^{ном}}{\eta_{СД}} \right) + a_2 \left(\frac{N_{*С} \eta_{НА}^{ном}}{\eta_{СД}} \right)^2}{N_{*С}} \right]^{-1} \quad (14)$$

На рис. 6 проілюстровано добрий збіг розрахованої за допомогою (14) (з використанням методу послідовних наближень) й отриманої згідно з (DSTU 3886-99, 2000) сумішених характеристик ККД електродвигуна СТД-2500-2.

Запропонована математична модель енергоефективності НА дала змогу також побудувати сумішені характеристики ККД насоса та приводного електродвигуна залежно від витратного навантаження $Q_{Д}$ – основного режимного параметра НА (рис. 7). Очевидно, що енергооптимальні режими СД і ВН не збігаються, що вимагає прийняття компромісного рішення на основі методоло-

гії багатокритеріальної оптимізації. Також встановлено факт малої чутливості ККД приводного СД до зміни режиму швидкохідних ($n_s \geq 150$) ВН.

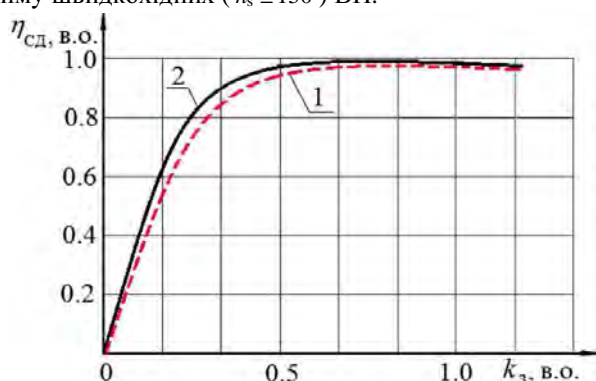


Рис. 6. Суміщені характеристики ККД $\eta_{сд}$ від коефіцієнта завантаження k_3 електродвигуна СТД-2500-2: 1 – розрахованої за допомогою моделі (14), 2 – отриманої згідно з (DSTU 3886–99, 2000)

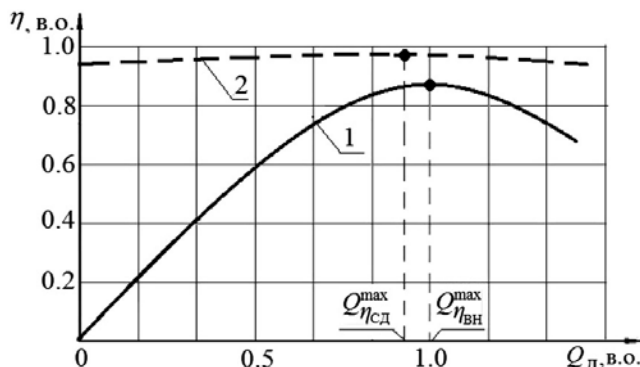


Рис. 7. Суміщені характеристики енергоефективності НА: 1 – ККД електродвигуна СТД-2500-2; 2 – ККД насоса НМ 3600-230 від витратного навантаження Q_d агрегата

Висновки:

1. Формалізовано математичні моделі енергоефективності СД і ВН залежно від витратного навантаження та розраховано їхні кількісні значення для агрегата "СТД-2500-2 та НМ-3600-230".
2. Екстремальні значення показників ефективності досягаються за різних значень витрати, що потребує залучення методів багатоцільової оптимізації для визначення глобального оптимуму.
3. Для потужних ВН з коефіцієнтами швидкохідності $n_s \geq 150$ зміна витрати незначно впливає на ККД приводних СД, коефіцієнт завантаження яких залишається високим ($k_3 > 0,75$) навіть під час неробочого режиму насосів.

Перелік використаних джерел

DSTU 3886–99. (2000). Enerhozberezhennia. Systemy elektroprivvodu. Metod analizu ta vyboru. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 55 p. [in Ukrainian].
 Kostyshyn, V. S. (2000). Modeliuvannia rezhymiv roboty vidtsentroykhn nasosiv na osnovi elektrohidravlichnoi analohii. Ivano-Frankivsk: Fakel, 163 p. [in Ukrainian].
 Kostyshyn, V. S., & Kurlyak, P. O. (2015). Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 2(1), 24–31.
 Kostyshyn, V. S., & Sorokhitei, I. I. (2009). Analiz enerhoefektyvnosti naftoperekachivalnogo nasosnoho ahrehatu. *Naftohazova enerhetyka: vseukr. nauk.-tekh. zhurnal IFNTUNH*, 2(11), 76–79. [in Ukrainian].
 Shabanov, V. A., & Bondarenko, O. V. (2012). Celevye funktsii i kriterii optimizatsii perekachki nefiti po nefteprovodam pri chastotno-reguliruemom jelektroprivode magistralnykh nasosov. *JElektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo"*, 4, 10–17. Retrieved from: URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_12.pdf. [in Russian].
 Syromjatnikov, I. A. (1963). Rezhimy roboty asinhronnykh i sinhronnykh jelektrodvigatel'ej. Moscow–Leningrad: Gosjenergoizdat, 528 p. [in Russian].

И. И. Яремак, В. С. Костышин, А. В. Костышин

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ, ОБОРУДОВАННОЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

По результатам исследований сформирована структурно-функциональная схема насосного агрегата нефтеперекачивающей станции, которая отражает энергетические входы-выходы его составляющих. Выявлено, что подвод энергии в электродвигатель и насос осуществляется двухканально и установлены энергетические входные и выходные параметры синхронного двигателя и центробежного насоса. Установлено, что эффективность работы насосного агрегата нефтеперекачивающей станции напрямую зависит от режима станции и методов его регулирования, поэтому исходными показателями при оценке данных критериев являются коэффициенты полезного действия синхронного двигателя и центробежного насоса, которые есть функциями вышеупомянутых энергетических параметров. Скалярная модель центробежного насоса представлена в виде эквивалентной электрической схемы замещения. Рассчитаны режимные показатели энергоэффективности синхронного двигателя и центробежного насоса в зависимости от нагрузки нефтеперекачивающей станции. При проведении расчетов определено, что для мощных насосных агрегатов изменение расхода незначительно влияет на коэффициент полезного действия приводных синхронных двигателей. Установлено, что экстремальные значения коэффициентов полезного действия синхронного двигателя и центробежного насоса достигаются при разных значениях нагрузки станции, что требует привлечения методов многокритериальной оптимизации для выбора режима насосного агрегата.

Ключевые слова: насосный агрегат; энергетические параметры; коэффициент полезного действия; подача.

I. I. Yaremak, V. S. Kostyshyn, A. V. Kostyshyn

THE CALCULATION OF ENERGY EFFICIENCY PARAMETERS OF MODES OF OIL PUMPING STATION EQUIPPED WITH CENTRIFUGAL PUMPS DRIVEN BY THE SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

Currently, oil pumping units of pumping stations often operate in underloaded mode, which resulted in reducing of their efficiency. Estimation of efficiency parameters of centrifugal pumps with synchronous electric drive depending on flow rate duty of pumping station

allows representing correctly the complex interconnection between the subsystems of oil pumping station of different physical nature. The study tested pumping unit which consists of synchronous motor and centrifugal pump "СТД-2500-2" and "НМ-3600-230". In the course of the research, the structural and functional scheme of pumping unit, which represents the energy inputs and outputs of its components, centrifugal pump and synchronous motor, was formed. As both electric motor and the pump are energy supplied by dual channels, input and output energy parameters were estimated as well. The authors have found that the efficiency of the pumping unit directly relies on the flow rate mode of station and on methods of its regulation. Moreover, parameters which assess these criteria are coefficients of efficiency of the synchronous motor and a centrifugal pump, which are functions of the aforementioned energy parameters. The scalar model of centrifugal pump is represented as an equivalent electric circuit. For this purpose we use the concept of active and passive linear parameters of centrifugal pump, which are imposed on the basis of conventional similarity "voltage – pressure" and "current – flow rate". The scalar model allows synthesizing working equation for estimation of the analytical dependence of coefficient of efficiency of centrifugal pump on flow rate. The impact of flow rate duty of oil pumping station on performance parameters of a synchronous motor and centrifugal pump was estimated as well. To conclude, changes of flow rate do not significantly affect the efficiency of the synchronous motors of powerful pumping units. The authors have found that the extreme values of coefficient of efficiency of a synchronous motor and centrifugal pump are achieved at different flow rate duties, which require the use of multi-objective optimization studies to select operating mode of the pumping unit.

Keywords: pump unit; energy parameters; coefficient of efficiency; flow rate.

Інформація про авторів:

Яремак Ірина Ігорівна, асистент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна. **Email:** yaremak_iryna@ukr.net

Костишин Володимир Степанович, д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна. **Email:** dean520@i.ua

Костишин Андрій Володимирович, студент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна. **Email:** kostyshynandrew@gmail.com