

Максименко С.В. Петров О. А.

### **ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОСТІ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Зважаючи на те, що Україна є енергодефіцитною країною, підвищення енергоефективності технологій, усунення непродуктивних втрат енергоносіїв, зменшення енергоемності продукції і послуг визначені найважливішим стратегічним напрямком енергетичної політики України. Особливо актуальні ці проблеми для підприємств сфери водопостачання та водовідведення, частка енергетичних витрат у собівартості послуг яких досягає 50 %.

Високий рівень енергоемності продукції і послуг вітчизняних водопостачальних підприємств обумовлений нераціональним використанням енергії у виробничих процесах внаслідок значного зношення діючого обладнання, високого рівня втрат води в мережах, а також завідомо високою енергоемністю продукції і послуг, закладеною при проектуванні цих підприємств.

Створення економічної системи водопостачання базується на розв'язку оптимізаційної задачі, основною цільовою функцією якої є зменшення коштів на перекачування необхідних обсягів води споживачу. Значну частку фінансових витрат у зазначеному процесі водопостачання складає оплата за електроенергію, спожиту електроприводами насосних агрегатів.

У напрямку оцінки економічності складних системи (наприклад систем водопостачання) вітчизняними та закордонними науковцями проведено значну кількість досліджень. Проте, ця інформація носить розрізнений характер, і в методологічному відношенні залишається не повністю опрацьованою. Зокрема, недосконала система економічних показників енергоефективності і способів її вимірювання, в значній мірі не систематизовані і не досліджені фактори, що впливають на енергоефективність. Необхідно зазначити, що від правильної оцінки енергетичної ефективності складної системи залежить багато відповідальних рішень - технічних, економічних тощо.

При прогнозуванні споживання електричної енергії насосною станцією користуються різними узагальненими технічними характеристиками. Однією з таких характеристик, яка на сьогодні є досить широко вживаною, є коефіцієнт корисної дії (ККД) системи. Якщо відомі ККД окремих елементів системи, то її загальний коефіцієнт корисної дії можна розрахувати як добуток ККД окремих складових. Інколи цей добуток доповнюється кореляційним коефіцієнтом, який враховує особливості взаємозв'язків між окремими ланками системи. Не заперечуючи щодо такого підходу до розрахунку узагальненої технічної характеристики системи, автори вважають за доцільне для систем водопостачання користуватися не узагальненим ККД, а поняттям енергоефективність системи, що буде розглянуте пізніше.

Обґрунтування застосування узагальненої оцінки економічності роботи складної системи у вигляді критерію енергоефективності системи (на прикладі системи водопостачання).

Розглянемо систему водопостачання, основні елементи якої зображені на рисі. У цій системі: 1 - мережа електроживлення, 2 - електричний привід насосів (синхронні чи асинхронні електричні двигуни), 3 - резервуар (місце забору води), 4 - водоводи системи подачі води на насосну станцію, 5 - запірна арматура зі сторони всмоктування, 6 - насоси насосної станції, 7 - запірна арматура на нагнітанні, 8 - водоводи системи подачі води споживачу, 9 - споживач води. Незаперечно основними елементами системи є насоси насосної станції. Відносно них перший (мережа електроживлення) та другий (електричний привід) елементи у сукупності складають першу вхідну підсистему. Третій, четвертий та п'ятий елементи у сукупності складають другу вхідну підсистему. Сьомий, восьмий та дев'ятий елементи вихідної підсистеми.

Максимальна енергоефективність системи, тобто забезпечення вимог технологічного процесу у споживача води при мінімальному споживанні електричної енергії з мережі електроживлення, можлива лише за умови узгодження роботи усіх елементів системи як в межах кожної підсистеми, так і між підсистемами.

Такий підхід, орієнтований на максимальну економію електроенергії за умови забезпечення вимог технологічного процесу відповідає основній тенденції реструктуризації енергетичного сектора України, при якій у проблемі забезпечення суспільства електричною енергією основною задачею є її раціональне споживання. Від цього залежать обсяги економії електроенергії, що є досить актуальним для держави, враховуючи обмаль власних первинних енергоресурсів (особливо природного газу), обмеженим запасом валютних ресурсів та високим процентом зношеності основних фондів генеруючих підприємств. Економія електроенергії буде більшою за умови керованості процесу її споживання і якщо буде прийнято до уваги конкретний сектор виробництва та характеристика кінцевого споживача.

У системі водопостачання споживачами електроенергії є електричні двигуни, які живляться від мережі електроживлення. Як зазначено вище, у сукупності вони створюють першу вхідну підсистему основної системи.

Немає сумніву, що при реалізації економічної системи водопостачання з метою підвищення її енергоефективності бажано використати електричні двигуни з якомога більшим ККД, або так звані енергоефективні двигуни. Вони мають удосконалену конструкцію охолоджуючих вентиляторів, що зменшує вентиляційні втрати. Для зменшення магнітних втрат їх статори і ротори виготовляються з більш тонких пластин з застосуванням спеціальних сплавів сталі. Фрикційні втрати зменшуються за рахунок шарикових підшипників покращеної конструкції. Обмотки виконуються провідниками більшого перетину, що зменшує активні втрати електроенергії. Такі двигуни мають дещо більшу вартість, ніж стандартні, однак і їх ККД на 3-5% вищий від останніх. Оскільки вартість експлуатації двигуна протягом року перевищує вартість його самого, використання енергоефективних двигунів вважається економічно вигідним заходом. Останнє твердження є справедливим лише за певних умов і високий ККД енергоефективного двигуна ще не є гарантією високої енергоефективності системи в цілому.

Висновок про використання того чи іншого електричного двигуна у системі водопостачання потрібно робити враховуючи, що розглядувана підсистема також складається з окремих компонентів: джерела енергії, самого електродвигуна, пристрою керування ним та механічної

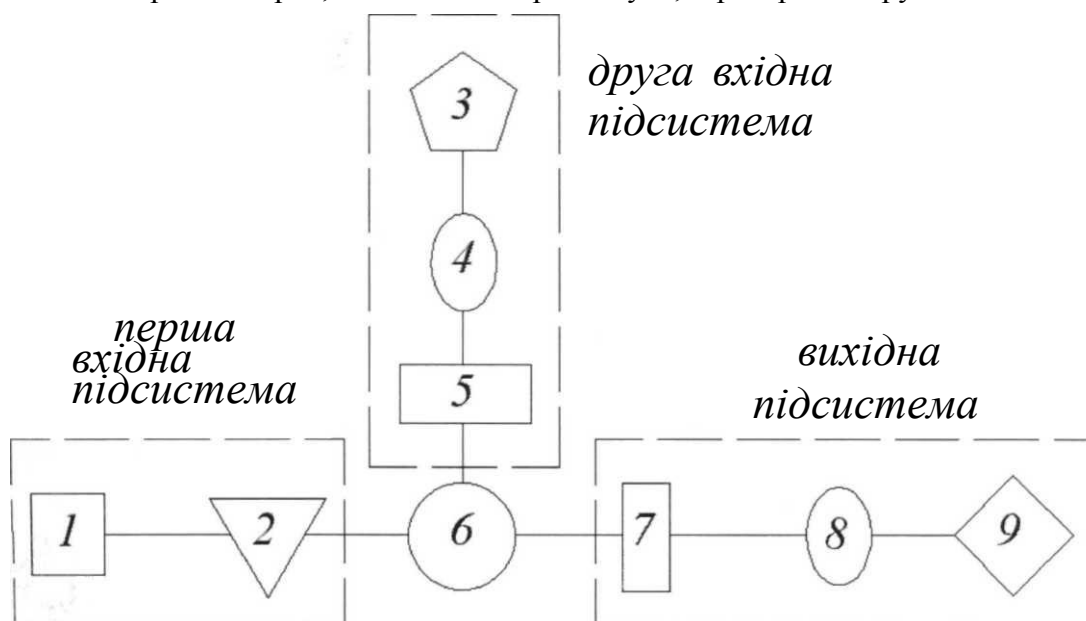


Рис. 1 Система водопостачання системи передачі від двигуна до насоса. Контроль кожного з компонентів підсистеми на предмет

можливості зменшення втрат енергії є економічно ефективним методом. Вимога жорсткого контролю обґрунтовується тим, що головна причина підвищених втрат енергії полягає у неоптимальному розподілі її всередині системи чи підсистеми. З цього приводу серед американських енергоменеджерів досить поширеним є такий вислів: "Не мотори втрачають електроенергію, а люди". Ось чому прийняттю остаточного рішення про парк електродвигунів насосної станції мають передувати: аналіз мережі електроживлення, обґрунтований вибір типів двигунів, їх потужності та числа обертів, визначення робочого циклу, умов навколишнього середовища, способу підключення двигунів до навантаження, застосування механічної арматури та варіантів кріплення.

Розглянемо перший із зазначених факторів - аналіз мережі електроживлення. Тут мова має йти про показники якості електричної енергії: несиметрію та незрівноваженість трифазної напруги, відхилення напруги, рівень несинусоїдності кривих струмів та напруг, величину відхилення напруги і частоти.

Основною причиною несиметрії та незрівноваженості трифазної напруги є специфічні умови роботи генераторів електричної енергії та (чи) наявність в енергетичній системі потужних однофазних споживачів.

З курсу теоретичної електротехніки відомо, що будь-яку несиметричну систему ЕРС, напруг та струмів можна подати сукупністю трьох симетричних систем: прямого, зворотного та нульового чергування фаз. При цьому коефіцієнтом несиметрії ( $\epsilon_2$ ) є припустимий коефіцієнт зворотного чергування фаз напруги, який розраховується як відношення напруги зворотного чергування фаз основної частоти до номінальної лінійної напруги. Коефіцієнтом незрівноваженості ( $\epsilon_0$ ) є припустимий коефіцієнт нульового чергування фаз напруги, який розраховується як відношення напруги нульового чергування фаз основної частоти до номінальної фазної напруги

Несиметрія та незрівноваженість трифазної напруги негативно впливають на роботу більшості елементів електричної системи, викликаючи підвищення втрат електроенергії та зниження надійності роботи електротехнічного обладнання.

Стосовно асинхронних електродвигунів механізм цього негативного процесу пояснюється так. Їх опір у робочому режимі ( $X_s$ ) залежить від ковзання ( $S$ ) ротора відносно магнітного поля статора. В умовах нормальної експлуатації ковзання має невелике значення і  $X_s$  мало відрізняється від  $X_d$  - опору двигуна при синхронній швидкості. Якщо двигун загальмувати ( $S=1$ ), то його опір  $X_k$  буде значно меншим. Співвідношення між  $X_s$  та  $X_k$  визначає кратність пускового моменту і для більшості асинхронних електродвигунів знаходиться в межах  $k_n = (4 - 7)$ .

Опір двигуна у режимах, що створюються напругами зворотного чергування фаз, можна розраховувати як і для режимів з напругами прямого чергування, вважаючи  $S=2$ . При цьому для струмів зворотного чергування фаз опір двигуна зменшується в  $k_n$  разів, порівняно з прямим. Відповідно невеликі напруги зворотного чергування фаз здатні створювати помітні струми. Наприклад, якщо напруга зворотного чергування фаз  $U_2 = 3\%$ , а  $k_n = 6$ , то струм зворотного чергування фаз буде складати близько 18% від струму прямого чергування. Накладання струмів прямого та зворотного чергування фаз призводить до перегріву двигуна, в результаті чого зменшується його фактична потужність, спостерігається інтенсивне старіння ізоляції.

У синхронних двигунах мають місце подібні процеси додаткових втрат електроенергії, перегріву статора і ротора, які можуть супроводжуватися виникненням небезпечних вібрацій за рахунок знакозмінних обертових моментів та тангенціальних сил, пульсуючих з подвоєною частотою мережі електроживлення. Можливе часткове зменшення обертового моменту на валу синхронного двигуна.

Якщо досягти симетрії трифазної напруги неможливо, необхідно зменшувати навантаження електричного двигуна.

Наведена вище тільки частина аналізу першої вхідної підсистеми загальної системи водопостачання рис. 1 показує, що її узагальненою характеристикою більш доцільно вважати енергоефективність, а не спільний ККД. З одного боку для мережі електроживлення таке поняття як коефіцієнт корисної дії і не застосовується. З іншого - паспортний ККД електричного двигуна

практично не характеризує режим його роботи з погляду на можливі втрати електроенергії, оскільки їх рівень значною мірою залежить від якісних показників мережі електроживлення.

Звернімо також увагу на те, що у першій вхідній підсистемі має місце перетворення електричної енергії на механічну, яка передається у основні елементи системи - насоси.

Тепер розглянемо другу вхідну підсистему. Виходячи з її складу: резервуар, водоводи системи подачі води на насосну станцію та запірні арматури зі сторони всмоктування, вона також є підсистемою передачі у основні елементи системи - насоси, але не механічної енергії, а води. Однак цей процес також не позбавлений вагою енергетичної складової, яка може серйозно вплинути на загальну енергоефективність системи. Мова йде про використання потенціальної енергії води, що знаходиться у резервуарах. Цей термін у статті є певною мірою умовним. Під резервуаром ми розуміємо місце, з якого вода подається на насосну станцію.

Якщо розглядати систему стосовно гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК), на якому насосна станція перекачує освітлену технічну воду на фабрику збагачення, то резервуаром буде ставок-освітлювач, який має досить великі обсяги води, геодезичний рівень якої на декілька метрів (інколи десятків метрів) перевищує геодезичну відмітку осі насосних агрегатів.

Зрозуміло, що жоден з елементів другої вхідної підсистеми не має такої технічної характеристики як ККД. Разом з тим від узгодження характеристик складових цієї підсистеми за оптимальним діаметром водоводів, їх формою, технічним станом, розмірами запірної арматури, величиною перепаду тиску на засувках і т. ін. значною мірою залежить яка частина потенціальної енергії води буде використана корисно, а яка буде просто втраченою.

Розглянемо основний елемент системи -насос, який призначений для перетворення механічної енергії приводу (електродвигуна) в гідравлічну енергію рідини. Приріст гідравлічної енергії рідини виникає у обертаючомуся робочому колесі насоса. У відповідних каналах корпусу насоса кінетична енергія рідини перетворюється в енергію тиску. Запас енергії, що отримана рідиною в насосі, витрачається на подолання опору і протитиску в системі. Сучасний насос складається зі складних елементів (робоче колесо, відвідні та підвідні пристрої, вузол гідравлічного врівноваження осьових зусиль, ущільнення робочих коліс, кінцеві ущільнення вала, розвантажувальні пристрої тощо), які розраховані та узгоджені між собою при проектуванні насосу на заздалегідь визначені параметри, які називаються робочими (оптимальними) параметрами насоса і зазначаються в його паспорті. Але в залежності від сфери застосування насосу його робочі параметри в експлуатаційних режимах можуть змінюватися в широкому діапазоні. Цей діапазон, в основному, складає від 0,3 - 1,25  $Q_{ном}$  насосу. При зміні характеристик мережі, насос починає працювати на режимах, які відрізняються від оптимального. При цьому ефективність його роботи знижується. Крім того, при роботі на режимах, більше оптимального, насос не створює в системі необхідного тиску, а при роботі в режимах менше оптимального, надлишковий тиск необхідно дроселювати, що призводить до додаткових втрат. Також, робота насосу в режимах 0,3 - 0,5  $Q_{ном}$  призводить до ряду проблем, пов'язаних з підвищенням вібрації насосу, виникнення нестационарних осьових і радіальних сил, що може привести до виходу з ладу опорних та ущільнюючих вузлів. Отже оптимальною робочою зоною експлуатації насосу вважається зона, що лежить в межах від 0,7 ÷ 1,2 від оптимальної подачі.

Розглянемо вихідну підсистему, до якої входить запірні арматура на нагнітанні, водоводи системи подачі води споживачу, споживач води. Останній визначає вимоги до режиму роботи всієї системи водопостачання. Споживач може працювати в наступних режимах:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = const, H = const \\ Q = const, H = var \\ Q = var, H = const \\ Q = var, H = var \end{array} \right.$$

Якщо перший режим роботи (наприклад в закритих живильних системах оборотної води на ТЕЦ) є простим і прогнозованим та потребує лише коректного розрахунку і оптимального підбору

елементів системи, то інші - характеризуються складнішими взаємозв'язками між основними режимними характеристиками і їх прогнозування потребує принципово інших підходів.

Незважаючи на велику кількість досліджень і публікацій на тему економічності систем, чіткого визначення терміну енергоефективність дотепер не існує, тим більше стосовно насосних агрегатів та систем водопостачання. Під енергоефективністю розуміють раціональність використання енергії в тій чи іншій системі.

Для оцінки енергоефективності системи можна застосувати класичний підхід:

$$\eta_c = A_{\text{кор}} / A_{\text{зат}}$$

Але поняття фізичного ККД як відношення корисної енергії до затраченої в даному випадку застосовувати недоцільно, оскільки не можна вважати корисною роботою роботу по подоланню сил гідравлічного опору трубопровідної мережі. Корисним в даному випадку є сам факт доставки продукції в пункт кінцевого призначення, а не робота, яка при цьому витрачена, і котру, вочевидь, необхідно зменшувати.

Для оцінки енергоефективності систем водопостачання авторами пропонується наступне: так як  $Q = f(A_{\text{кор}})$  і  $P = f(A_{\text{зат}})$ , то  $EE = Q/P$ .

Отже енергоефективність ( $EE$ ) є відношенням кількості перекачаної води насосами ( $Q$ ) до затраченої енергії електродвигуна ( $N$ ).

Потужність, що споживає насосний агрегат визначається за формулою [4]:

$$P = N / (\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пр}}),$$

де  $N$  - потужність насоса,  $\text{kBm}$ ;

$\eta_{\text{дв}}$  - ККД електродвигуна;

$\eta_{\text{пр}}$  - ККД перетворюючого пристрою (частотного перетворювача, гідромуфти тощо).

В свою чергу потужність насоса визначається за формулою:

$$N = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot H) / (1000 \cdot \eta_n),$$

де  $\rho$  - густина рідини, що перекачується,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  - прискорення вільного падіння,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$Q$  - подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$H$  - напір насоса,  $\text{м}$ .

Тоді,

$$EE = 1000 \cdot Q \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пр}} / \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Отже  $EE = f(N, \eta_{na})$ , тобто зменшити енергоефективність можна двома шляхами: підвищенням ККД насосного агрегату та зменшенням напору. Формулюючи другий шлях автори користувалися наступними міркуваннями: напір, який створюється робочими насосними агрегатами, складається з напору, який необхідний для виконання певного технологічного процесу у споживача, та напору, який необхідний для подолання сил гідравлічного опору трубопровідної мережі, яка з'єднує насосну станцію і споживача. Безумовно, напір, який необхідний для виконання технологічного процесу, зменшити не можна, але напір необхідний для подолання сил гідравлічного опору трубопровідної мережі можна зменшити за рахунок оптимізації потокорозподілення (ліквідації зайвих місцевих опорів, збільшення діаметрів водоводу тощо).

Виходячи з викладеного автори вважають досить обґрунтованим застосування узагальненої оцінки економічності системи водопостачання у вигляді критерію енергоефективність системи. З одного боку не всі елементи системи водопостачання можуть характеризуватися коефіцієнтом корисної дії, а з іншого - він не завжди є об'єктивним показником, збільшення якого мінімізує споживання електроенергії. Це свідчить про те, що визначання економічних показників системи з великою кількістю елементів через її узагальнюючий ККД є складним (а інколи і неможливим), у той час як енергоефективність системи є інтегральним показником її економічності.