

Рис. 4. Механічні характеристики ВІД

У більшості джерел, наприклад [4], представлено схему ввімкнення фаз індукторного двигуна, за якої фази з'єднуються з джерелом живлення одночасно, тобто полярність обмоток усіх фаз однакова.

Аналізуючи вплив взаємоіндукції на характеристики двигуна, можна зробити висновок, що така схема являється менш ефективною, ніж різнофазне з'єднання фаз, при якому потужність на валу двигуна збільшується на 4-5 %.

Висновки. У даній роботі розроблено математичну модель вентильного індукторного двигуна з урахуванням взаємної індуктивності фаз. За допомогою імітаційного моделювання доведено ефективність різнофазного вмикання до джерела живлення суміжних фаз з точки зору врахування явища взаємоіндукції.

Список літератури

1. Власенко В.А. Дослідження взаємоіндукції фаз вентильно-індукторного двигуна // Вісник НТУ ХП. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів, 2010 – №55, с. 3-8.
2. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. - СПб.: ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электроприбор», 2003. - 148 с. 150
3. Krishnan Ramu. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. - Boca Raton London New York Washington, D.C., 2001. – 416 p.
4. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. - М.: Издательство МЭИ, 2003. - 70 с.

Рукопис подано до редакції 18.03.14

5

10

15

20

УДК 658.011.56

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, канд. техн. наук, проф., О.М. СЕРБУЛ, канд. техн. наук, доц.
Кіровоградський національний технічний університет

СТОХАСТИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СПІВВІДНОШЕННЯМ ТВЕРДЕ/РІДКЕ ПРИ ПОДРІБНЕННІ РУДИ З ЦИРКУЛЮЮЧИМИ ПІСКАМИ

Розглянуто умови забезпечення необхідної точності ідентифікації співвідношення тверде/рідке у стохастичній системі автоматичного керування цим параметром.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Україна належить до розвинутих країн по виробництву залізорудної сировини для металургійної промисловості.

Особливістю залізних руд є низький вміст корисного компоненту, що передбачає їх збагачення. Одним з енерго- і матеріалоємних процесів при цьому є подрібнення руд, на яке приходить до 50 % всіх енергетичних витрат. Найвища ефективність подрібнення руди в кульових млинах досягається лише при підтриманні певного значення співвідношення тверде/рідке.

З розгляду вирішення даної задачі видно, що вона залишається до кінця не розв'язаною. Тому не виконуються умови напряму “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі”, передбаченого Законом України “Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки”.

Зважаючи на це в Кіровоградському національному технічному університеті була започаткована наукова тема “Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням” (0105U008334), матеріали виконання якої покладені в цю публікацію.

Оскільки дану статтю спрямовано на розв'язання поставлених задач, її тема є актуальною.

Аналіз досліджень та публікацій. Для автоматичного підтримання заданого співвідношення тверде/рідке в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі з механічним спіральним класифікатором, розроблялось ряд пристроїв, однак за різними причинами їх реалізувати не можливо. Для розв'язання даної задачі запропонована стохастична система автоматичного регулювання розрідження пульпи, однак умови її роботи не досліджувались.

Постановка завдання. Метою даної роботи є встановлення умов забезпечення необхідної точності ідентифікації співвідношення тверде/рідке в стохастичній системі автоматичного керування даним параметром.

Викладення матеріалу та результати. Функціональну схему запропонованої стохастичної системи автоматичного керування (САК) співвідношенням тверде/рідке у кульовому млині показано на рис. 1.



Рис. 1. Функціональна схема стохастичної системи автоматичного керування співвідношенням тверде/рідке у кульовому млині

Тут узагальненим регульованим об'єктом (УРО) виступає магістраль подачі води (МПВ) в млин з датчиком витрати води ДВ та регульовальним органом РО. В якості інформаційного

засобу прийнятий блок ідентифікації співвідношення тверде/рідке БІС, на вхід якого надходить інформація про вміст вологи в пісках K_n , густину твердого δ_p , витрату води в пісковий жолоб $Q_{вж}$, витрату пульпи Q_n в ньому, витрату руди Q_p , витрату води в млин Q_e та враховується густина води δ_e . На базі цих даних в БІС за алгоритмом

$$K_{(m/p)\phi} = \frac{A(K_n, \delta_p) \cdot (Q_n - Q_{вж}) + Q_p}{\delta_e \cdot (Q_e + Q_{вж}) + K_n [A(K_n, \delta_p) \cdot (Q_n - Q_{вж})]}, \quad (1)$$

формується сигнал про фактичне значення співвідношення тверде/рідке $K_{(m/p)\phi}$ на вході в кульовий млин. Воно порівнюється з заданим значенням $K_{(m/p)\phi}$ і сигнал неузгодження $\Delta K_{m/p}$ діє на вхід автоматичного регулятора АР, який шляхом зміни витрати води Q_e забезпечує необхідне розрідження пульпи в технологічному агрегаті.

У результаті дії внутрішніх і зовнішніх перешкод змінні Q_p, Q_n і Q_e є випадковими процесами. Оскільки перешкоди накладаються на корисні сигнали, то вихідна величина даної системи також буде випадковим процесом [1]. Випадковим процесом буде і керуюче діяння $\Delta K_{m/p}$. Зважаючи на те, що САК співвідношення тверде/рідке знаходиться під впливом випадкових діянь, її слід досліджувати статистичними методами. В таких системах критерієм якості є середньоквадратична похибка [2].

Враховуючи те, що випадковий процес формується в інформаційній частині системи, дослідимо блок ідентифікації співвідношення тверде/рідке (БІС). Він має шість входів і один вихід. На три входи подаються незмінні сигнали - $Q_{вж}, K_n, \delta_p$. Інші три величини мають перешкоди і змінюються як випадкові функції часу - це Q_e, Q_p, Q_n . Таким чином, БІС являє собою багатоканальну динамічну систему, яка в загальному випадку має кілька вхідних функцій, по яким необхідно отримати кілька функцій на виході [3]. Рахуючи БІС лінійною системою, вихідні функції $Y_j(t)$ можна визначити через вхідні функції $X_i(t)$ у вигляді співвідношення [3]

$$Y_j(t) = \sum_{i=0}^n \int_0^t l_{ji}(t_1 t_1) X_i(t_1) dt_1, \quad (2)$$

де t - верхня границя інтегрування, що відповідає умовам, коли надходження реалізацій випадкових функцій $X_i(t)$ розпочинається одночасно з ввімкненням системи; n - число вхідних величин; $l_{ji}(t_1 t_1)$ - вагові функції, які у випадку стаціонарних систем дорівнюють $l_{ji}(t-t_1)$. Формула (2) показує, що для кожного виходу системи необхідно визначити n вагових функцій $l_{ji}(t_1 t_1)$, а вся їх сукупність для багатоканальної системи такого виду з m виходами складає nm .

У конкретному випадку маємо багатоканальну систему, коли різні вхідні величини використовують для отримання з найбільшою точністю однієї вихідної величини. Тоді залежність (2) стане більш простішою. В цілому для БІС необхідно враховувати і той факт, що серед вхідних сигналів є як випадкові функції часу, так і незмінні в часі константи. Тому розглянемо проход-

ження через *BIC* будь-яких сигналів. Оскільки *BIC* є лінійною системою і здійснює лінійні перетворення над кожною з вхідних величин, для нього справедливий принцип суперпозиції.

Відповідно з принципом суперпозиції лінійному поєднанню будь-яких вхідних сигналів відповідає та ж лінійна комбінація відповідних вихідних сигналів. Це дозволяє розглядати окремо ефект впливу на вихідну величину *BIC* випадкових функцій часу і констант, які в часі не змінюються.

Для визначення впливу випадкових функцій часу на вихідну величину *BIC* перетворимо залежність (2) у відповідності з однією вихідною величиною. Вона прийме вигляд

$$K_{(m/p)BB\Sigma} = \int_0^t l_p(t_1 t_1) Q_p(t) dt + \int_0^t l_n(t_1 t_1) Q_n(t) dt + \int_0^t l_e(t_1 t_1) Q_e(t) dt, \quad (3)$$

де $l_p(t_1 t_1), l_n(t_1 t_1), l_e(t_1 t_1)$ - відповідно вагові функції по витраті руди, пульпи у пісковому жолобі та води у кульовий млин.

Враховуючи, що вагова функція дорівнює зворотному лапласівському зображенню передавальної функції динамічної системи, знайдемо їх для *BIC* по кожній вхідній величині. *BIC* реалізує алгоритм ідентифікації, який полягає у виконанні арифметичних операцій. Якщо він реалізований на аналогових безінерційних елементах, то являє собою підсилювальну ланку, яка характеризується передавальним коефіцієнтом по кожній вхідній величині - $K_{Q_p}, K_{Q_n}, K_{Q_e}$. Оскільки для підсилювальних ланок передавальні коефіцієнти дорівнюють передавальним функціям, а їх зворотні лапласівські зображення - передавальним коефіцієнтам, вагові функції у (3) відповідно будуть дорівнювати - $K_{Q_p}, K_{Q_n}, K_{Q_e}$. Зважаючи на те, що передавальні коефіцієнти лінійних елементів є величинами незмінними і що сталі можна виносити за знак інтеграла, рівняння (3) подамо у вигляді

$$K_{(m/p)BB\Sigma} = K_{Q_p} \int_0^t Q_p(t) dt + K_{Q_n} \int_0^t Q_n(t) dt + K_{Q_e} \int_0^t Q_e(t) dt. \quad (4)$$

Оскільки інтегрування та множення на сталу є лінійними операціями, в (5) праворуч будемо мати три нові випадкові функції, які однозначно характеризуються вхідними випадковими процесами.

Виходячи з принципу суперпозиції та його умови про те, що сумі будь-яких кількох вхідних збурень відповідає сума відповідного числа вихідних змінних [4], можна визначити результуючий вплив вхідних змінних констант на вихідний сигнал *BIC*. Він буде дорівнювати

$$K_{(m/p)BK\Sigma} = K_{Q_{вж}} Q_{вж} + K_{K_n} K_n + K_{\delta_p} \delta_p, \quad (5)$$

де $K_{Q_{вж}}, K_{K_n}, K_{\delta_p}$ - відповідно передавальні коефіцієнти по витраті води в пісковий жолоб класифікатора, вмісту вологи в пісках класифікатора, густині руди.

Отже, можна стверджувати, що вихідний сигнал *BIC* містить постійну складову, яка характеризує вплив витрати води в пісковий жолоб, вмісту вологи в пісках класифікатора та густини руди, і три випадкових процеси, еквівалентні дії випадкових функцій часу на вході - зміни витрати руди $Q_p(t)$, пульпи $Q_n(t)$ та води $Q_e(t)$.

Випадкові процеси на вході *BIC* формуються незалежно один від одного, вони фізично ніяк не зв'язані один з одним, тому є незалежними. Враховуючи, що математичне сподівання інтеграла від випадкової функції дорівнює інтегралу від її математичного сподівання [5], відповідно для випадкових функцій (4) можливо по математичним сподіванням вхідних сигналів $Q_p(t), Q_n(t), Q_e(t)$ знайти їх математичні сподівання $m_p(t), m_n(t), m_e(t)$. Оскільки при додаванні до випадкової функції не випадкового доданка до її математичного сподівання додається та ж не випадкова величина [5], усталене значення вихідного сигналу на виході *BIC* можна подати як суму

$$K_{(m/p)\phi} = K_{(m/p)BK\Sigma} + m_p(t) + m_n(t) + m_e(t). \quad (6)$$

Ця не випадкова величина $K_{(m/p)\phi}$ характеризує сигнал на виході *BIC* і може бути знайденою за відповідними передавальними коефіцієнтами, незмінними в часі сигналами на вході та математичними сподіваннями випадкових функцій $Q_p(t), Q_n(t), Q_e(t)$.

Дисперсія сигналу $K_{(m/p)\phi}$ (6) характеризує похибку ідентифікації співвідношення тверде/рідке, вона в основному викликана випадковими процесами на вході БІС. Дисперсії складових вихідного сигналу БІС можна отримати по їх кореляційним функціям. Кореляційна функція суми некорельованих випадкових функцій дорівнює сумі кореляційних функцій складових [6].

Оскільки випадкові процеси на виході БІС являють собою інтеграли від відповідних вхідних випадкових функцій (4), то кореляційні функції складових вихідного сигналу можна отримати шляхом подвійного інтегрування кореляційної функції вхідних випадкових функцій [5]. Тоді результуюча кореляційна функція вихідного сигналу БІС буде дорівнювати

$$K_{K_{(m/p)}}(t_1 t^1) = K_p(t_1 t^1) + K_n(t_1 t^1) + K_e(t_1 t^1), \quad (7)$$

де $K_p(t_1 t^1)$, $K_n(t_1 t^1)$, $K_e(t_1 t^1)$ - відповідно кореляційні функції складових вихідного сигналу БІС.

Поклавши у виразі (7) $t=t^1$, отримаємо дисперсію вихідного сигналу БІС. Складові дисперсії залежать не лише від дисперсій вхідних випадкових процесів, а і від параметрів їх кореляційних функцій.

Таким чином, знаючи кореляційні функції вхідних випадкових процесів, можливо оцінити дисперсію вихідного сигналу БІС, яка характеризує точність ідентифікації співвідношення тверде/рідке на вході у кульовий млин.

Модель БІС отримана при допущенні, що система ідентифікації співвідношення тверде/рідке є лінійною. Зважаючи на це, необхідно перевірити її на лінійність.

Оцінка степені нелінійності достатньо складна і значно ускладнюється для багатовимірних систем, а строга перевірка гіпотези лінійності відпрацьована практично лише для систем з однією вхідною і вихідною величинами і, як правило, вимагає проведення експерименту [1].

Зважаючи на це, здійснимо перевірку на лінійність безпосередньо по виду статичних характеристик БІС.

Визначимо статичні характеристики БІС відповідно алгоритму ідентифікації (1).

Статичні характеристики БІС отримувалися в процесі комп'ютерного моделювання технологічного процесу подрібнення в кульовому млині МШЦ. Моделювання здійснювалося стосовно робочої точки на характеристиках, яка відповідає показникам: $Q_p=66,7$ кг/с; $K_{p/\phi}$ 4,3; $K_n=0,12$; $\delta_p=3300$ кг/м³; $Q_{\text{вжс}}=6,8$ кг/с; $Q_{\text{ци}}=125\%$ Q_p ; $\delta_e=1000$ кг/м³; $Q_e=18,1 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Залежності співвідношення тверде/рідке на вході кульового млина від масової витрати руди в усталеному режимі при різних значеннях циркулюючого навантаження, якому надавалися рівні - 50; 100; 150 % номінального навантаження млина $Q_p = 66,7$ кг/с, наведено на рис. 2.

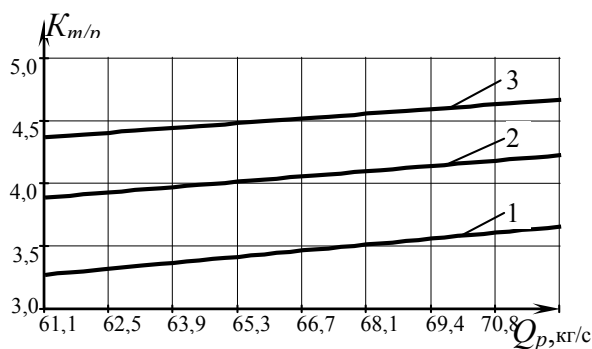


Рис. 2. Залежність співвідношення тверде/рідке $K_{m/p}$ від масової витрати руди Q_p в кульовий млин в усталеному режимі роботи при різних значеннях циркулюючих навантажень: 1 - 50 %; 2 - 100 %; 3 - 150 %

З рис. 2 видно, що при всіх циркулюючих навантаженнях співвідношення тверде/рідке зростає лінійно при збільшенні витрати руди в млин.

Із залежностей, зображених на рис. 3, витікає, що співвідношення тверде/рідке лінійно змінюється від витрати води в пісковий жолоб

класифікатора і густини руди при будь-яких значеннях циркулюючого навантаження.

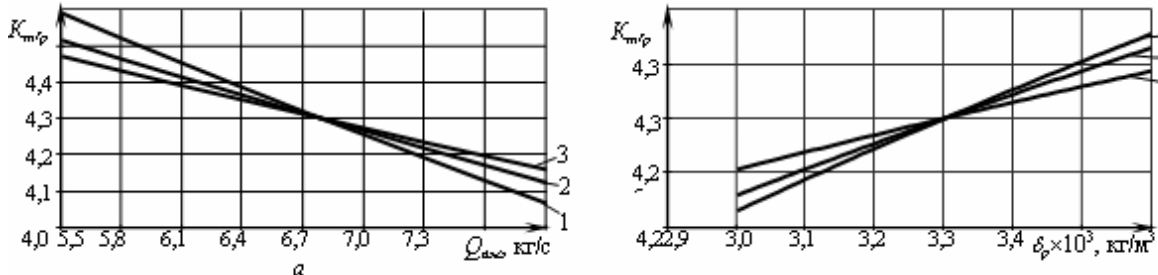


Рис. 3. Залежність співвідношення тверде/рідке $K_{m/p}$ від витрати води в пісковий жолоб $Q_{\text{вжс}}$ (а) і густини твердого δ_p (б) в усталеному режимі роботи при різних циркулюючих навантаженнях: 1 - 50 %; 2 - 100 %; 3 - 150 %

Статичні характеристики *BIC* по зміні об'ємної витрати пульпи в піщовому жолобі класифікатора та води в кульовий млин при різній масовій витраті вихідної руди показані на рис. 4.

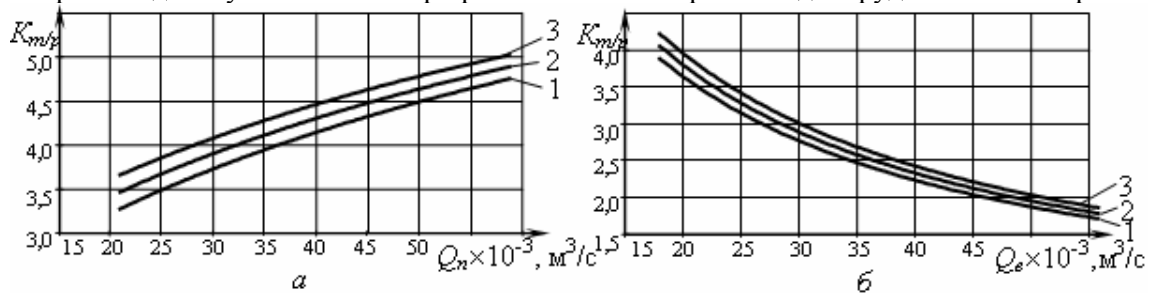


Рис. 4. Залежність співвідношення тверде/рідке $K_{m/p}$ від об'ємної витрати пульпи Q_n в піщовому жолобі класифікатора (а) і об'ємної витрати води Q_e в кульовий млин (б) в усталеному режимі роботи при різній масовій витраті вихідної руди: 1 - 61,1 кг/с; 2 - 66,7 кг/с; 3 - 72,2 кг/с

З даних графіків видно, що вихідна величина *BIC* під впливом цих параметрів змінюється нелінійно. Отже, блок ідентифікації співвідношення тверде/рідке в цілому є не строго лінійною системою.

Не чітко лінійні системи в певних межах допускають лінеаризацію.

Прийом наближеної лінеаризації диференціальних рівнянь широко використовують в теорії похибок динамічних систем.

Якщо випадкові функції на вході системи достатньо малі, то практично будь-яка система може розглядатися в межах цих малих відхилень як наближено лінійна [5].

Зважаючи на значні відхилення випадкових процесів, особливо $Q_n(t)$, від математичного сподівання, *BIC* не можливо визнати лінійною системою з наступною оцінкою дисперсії вихідного сигналу по отриманим залежностям.

Тому *BIC* необхідно розглядати як нелінійну систему перетворення інформації.

Дослідження нелінійних динамічних систем є значно більш складною задачею порівняно з дослідженням лінійних систем.

Здебільшого відпрацьовані підходи дослідження так званих “зведених нелінійних систем” і “незведених нелінійних систем”, однак *BIC* не може бути приведеним до таких систем, оскільки в ньому не можливо вичленувати лінійну і нелінійну частини [3].

Одна з можливостей ідентифікації нелінійних систем полягає у використанні дисперсійних методів, які оперують математичними сподіваннями, кореляційними і дисперсійними функціями [1].

Дані методи базуються на стаціонарності випадкових функцій, причому поняття стаціонарності в широкому розумінні недостатньо при ідентифікації нелінійних систем, додатково висуваються вимоги стаціонарності в дисперсійному розумінні [1].

Оскільки вихідний сигнал *BIC* містить інтеграли від вхідних випадкових функцій, а інтеграл від стаціонарної функції властивістю стаціонарності не володіє [3], в досліджуваній інформаційній системі умова стаціонарності не виконується і описати її з певним наближенням як нелінійну систему немає можливості.

Ще більш важливішою є задача забезпечення мінімуму середньої квадратичної помилки вихідного сигналу *BIC*. Такі задачі добре відпрацьовані в теорії лінійних систем автоматичного регулювання, що знаходяться під випадковими впливами [2].

Їх також реалізують в інформаційній техніці при кількох вхідних випадкових функціях [3].

У даному випадку забезпечити мінімум середньої квадратичної помилки вихідного сигналу *BIC* неможливо не стільки внаслідок нелінійності, скільки зважаючи на неможливість змінювати структуру і параметри *BIC*, які реалізують розроблений алгоритм ідентифікації співвідношення тверде/рідке.

Тому єдиним підходом підвищення точності визначення співвідношення тверде/рідке на вході у кульовий млин є вплив на характеристики випадкових процесів - фільтрація випадкових сигналів перед подачею на вхід *BIC*.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Отже, забезпечити необхідну точність визначення співвідношення тверде/рідке на вході у кульовий млин можливо лише впливом на

характеристики випадкових процесів, тобто, фільтрацією випадкових сигналів перед подачею на вхід блока ідентифікації співвідношення.

Особливо це стосується сигналу витратоміра пульпи у піщовому жолобі та витратоміра вихідної руди.

Отримані результати досліджень відкривають перспективу розробки заходів фільтрації сигналів, що є випадковими процесами в даній системі, з метою забезпечення необхідної точності ідентифікації співвідношення тверде/рідке в кульовому млині, який працює у замкнутому циклі з механічним спіральним класифікатором.

Список літератури

1. Бессонов А.А. Методы статистического анализа погрешностей устройств автоматики / А.А. Бессонов, Л.З. Свердлов. - Л.: Энергия, 1974. – 144 с.
2. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления: [підруч. для студентів вищ. навч. закл.] / Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Брицький О.І.; за ред. . – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций / Свешников А.А. – М.: Наука, 1968. – 464 с.
4. Певзнер Л.Д. Теория систем управления [учебн. пособие для студ. вузов] / Певзнер Л.Д. – М.: Изд-во МГТУ, 2002. – 470 с. (Высшее горное образование).
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей / Пугачев В.С. – М.: Наука, 1968. – 368 с.

Рукопис подано до редакції 17.03.14

УДК 621.316

Ю.Б. ФІЛІПП, М.М. МАКСИМОВ, кандидаты техн. наук, доц.,
О.В. КОВАЛЬ, магістрант, Криворізький національний університет

РЕЖИМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ СУБАБОНЕНТІВ НА ПІДСТАНЦІЯХ ПАТ «КРИВБАСЗАЛІЗРУДКОМ»

Розглянуто режими енергоспоживання активної та реактивної електроенергії на підстанціях ПАТ «Кривбасзалізрудком», які отримані за допомогою автоматизованої системи комерційного енергообліку, проаналізовані режими роботи насосних станцій субабонента ВАТ «Кривбасводоканал». Рекомендовано використовувати пристрої плавного пуску та перетворювачі частоти для насосних установок.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Від підстанцій виробничих підприємств міста живляться як самі підприємства, так різні субабоненти. Субабонентами зі значним споживанням електроенергії є такі, як електротранспорт, міські електромережі, міські водопровідні та каналізаційні насосні станції.

Підвищення вартості електроенергії ставить задачу оптимізації енергоспоживання не тільки перед підприємствами-власниками автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії, але й перед їхніми субабонентами.

Якщо виробничі підприємства активно використовують місячні і добові графіки активної, реактивної електроенергії та зведення, то субабоненти не завжди в змозі отримати таку інформацію. Це не дозволяє оперативно зреагувати на погіршення енергетичних і економічних показників.

Аналіз досліджень та публікацій. Для вирішення проблеми енергозбереження необхідно здійснювати пошук організаційних і технічних заходів переважно у централізованих вузлах мережі живлення без чіткого врахування особливостей формування кількісних і якісних показників енергоспоживання окремими енергоємними установками, тобто на технологічних рівнях. Субабоненти при модернізації електрообладнання починають використовувати регульований електропривод на основі тиристорних (транзисторних) перетворювачів малої та середньої потужності для насосних станцій, які дозволяють оптимізувати технологічні і енергетичні режими.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз особливостей режимів споживання активної і реактивної електроенергії на підстанціях, які живлять споживачів субабонентів, визначення