

УДК 669.013:681.5

Рубінський В. А., Койфман О. О., Федоренко Д. Ю.

## ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДУ ПРИ УПРАВЛІННІ ВИТРАТОЮ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ НА ВИПАРНУ УСТАНОВКУ ТЕПЛОСИЛОВОГО ЦЕХУ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ

*Розглянуто контур управління подачею живильної води насосним агрегатом на випарну установку. подача води здійснюється за двома колекторам, з яких по паралельній схемі розподіляється на випарювачі. Регулювання витрати відбувається безпосередньо на випарювачах. На підставі вивчених матеріалів, була поставлена задача удосконалити існуючу систему завдяки застосуванню сучасного енергозберігаючого обладнання - частотно-регульованого приводу.*

*Зроблені експериментальні дослідження для отримання даних про потужності двигуна при дроселюванні і при використанні частотного перетворювача. Продемонстровано нераціональну перевитрату споживаної потужності. Наводиться розрахунок енергоефективності існуючої і пропонованої систем.*

*На основі отриманих даних про споживану кількість води випарною установкою наведено графік завантаження насосного агрегату. Спираючись на результати дослідження зроблено розрахунок сумарної економічної ефективності.*

*Для використання частотно-регульованого приводу в управлінні витратою живильної води розроблена схема каскадно-регульованого управління всіма насосними агрегатами, що демонструє по чергове управління насосними агрегатами, використовуючи всього лише один частотний перетворювач. За основу сигналу неузгодженості приймається параметр сумарної витрати живильної води на кожен випарник. Для реалізації ПД-регулювання частотно-регульованого приводу розроблена блок-схема, що описує залежність регульованої величини від вироблення випарника. Даний алгоритм може функціонувати для оптимізації існуючого контуру регулювання витрати води в випарнику. Використання запропонованої системи дозволить на практиці економічно і ефективно управляти насосними агрегатами, а також уникнути проблем регулювання запірною арматурою.*

**Ключові слова:** *Частотно-регульований привід, випарна установка, каскадне регулювання, частотний перетворювач, живильна вода, насос, двигун, система управління.*

### Постановка проблеми

В сучасних економічних умовах металургійне промислове підприємство не має можливості працювати на повну потужність, зазвичай забезпечується близько 40-70 % проектних потужностей. Як наслідок робота обладнання на граничних навантаженнях. Більше 60 % всієї виробленої електроенергії в світі, споживається електричними двигунами, які широко використовуються в комплексній роботі з багатоступінчастими випарними установками [1]. В умовах що склалися, єдино правильним рішенням, є впровадження енергозберігаючих технологій.

Однією з найважливіших задач при управлінні технологічним процесом випарної установки є регулювання робочого рівня живильної води (рис. 1). подача води здійснюється насосним агрегатом (Д1-Н1 - Д4-Н4) за двома колекторам, з яких по паралельній схемі розподіляється на шість випарювачів. Під час роботи установки рівень живильної води в

корпусі підтримується вище верхньої трубної дошки на 150 ÷ 200 мм. Цей рівень має важливе значення для забезпечення безперервної та надійної роботи, від якого залежить продуктивність вироблення конденсату, і цілісність конструкційних матеріалів установки [2]. Для забезпечення подачі деаерованої хімічно очищеної води (ЖВХ) в випарну установку використовуються електродвигуни ЦНСг60-165 (Д1 – Д4) потужністю 55 кВт в кількості 12 штук (рис. 1).

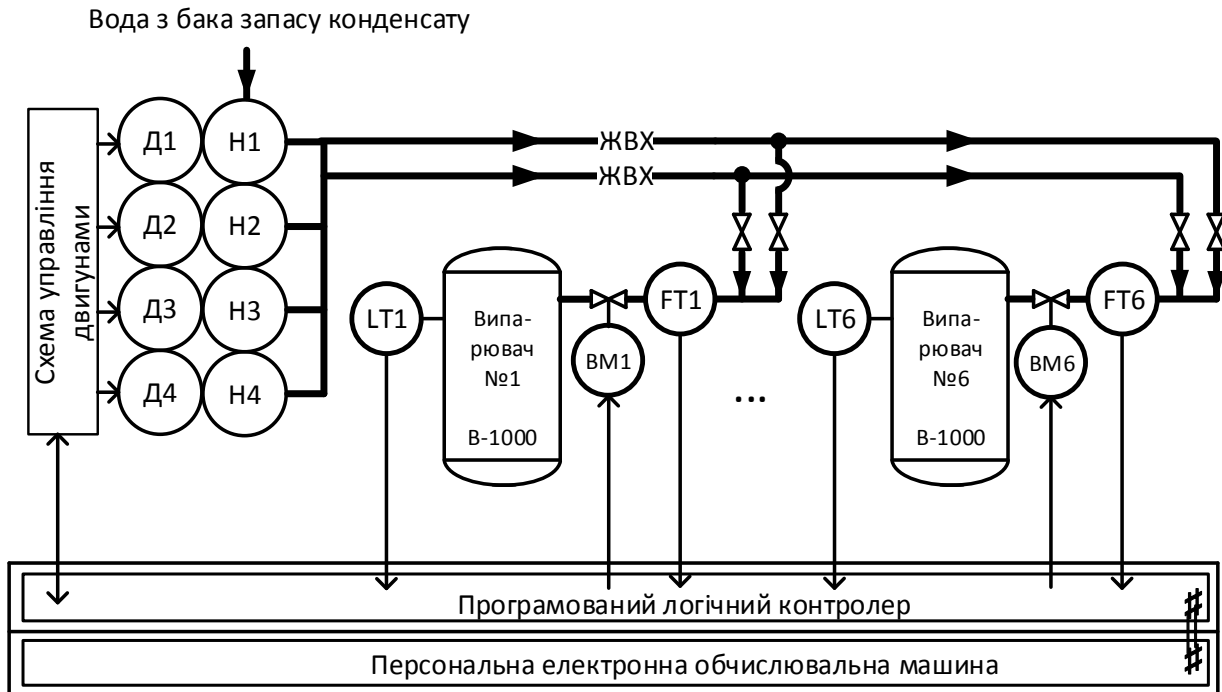


Рисунок 1 – Схема подачі живильної води на випарну установку:

Д1 - Д4 – двигуни насосів Н1 - Н4, LT1 - LT6 – датчики поточного рівня живильної води в випарювачах, FT1 - FT6 – датчики поточної витрати живильної води в випарювачах, ВМ1 - ВМ6 – виконавчі механізми запірної арматури, ЖВХ – живильна хімічно очищена вода

У штатному режимі в роботі знаходиться лише 4 двигуна (Д1-Д4), ще 4 - в резервному запасі і 4 - на ремонті. У даній системі електродвигуни постійно працюють на гранично допустимій потужності, створюючи надмірний тиск в живильних колекторах. Витрата води же в даній системі регулюється запірною арматурою (ВМ1 – ВМ6).

### Мета дослідження

Розробка методу регулювання витрати живильної води випарної установки за допомогою частотно-регульованого електроприводу. Обґрунтування енергоефективності використання даної системи.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автор [3] розглянув ефективність застосування енергозберігаючої системи водопостачання тепличного відділення і поливу за допомогою застосування каскадного і частотного регулювання роботи насосів. Причини неефективного використання насосів ґрунтуються на установці параметрів подачі і напору більшими, ніж потрібні для забезпечення роботи насосної станції, так як на стадії проектування закладається коефіцієнт

запасу, який може досягати 50 %, як наслідок фактична невідповідність вимогам системи. Наведено порівняльні графіки роботи насосної станції в режимі каскадного регулювання при роботі на мережу з переважно статичної складової.

У даній проектній роботі [4] розроблена і досліджена насосна установка з застосуванням перетворювачів частоти на базі каскадної схеми управління. У статті проведений розрахунок енергозбереження експлуатованої установки, підрахунок витрат на обслуговування і ремонт насосної станції. Так само розрахунок всіх елементів електроприводу, що входять до складу установки.

Авторами розглянуто питання енергозбереження та енергоефективності застосування каскадно-частотного електроприводу для турбомеханізмів в нафтогазовій галузі [5]. Шляхом формування законів управління здійснюється оптимізація енергоспоживання. Представлені експериментальні механічні характеристики розімкнутої і замкнутої систем регулювання швидкості, при однакових значеннях частоти і зниженням швидкості. Застосування даної системи призводить до зниження споживання реактивної потужності на 25 – 30 % при роботі близькою до номінальних значень, і підвищує коефіцієнт потужності електроприводу на 20 %.

У статті [6] розглянуто впровадження частотного приводу на асинхронних електричних двигунах насосної групи в умовах нафтопереробки. Приведені переваги частотних перетворювачів, зменшено надмірне споживання електроенергії.

Наведено спосіб регулювання подачі води, при підключенні двох насосів по каскадній системі з перемиканням між ними перетворювачем частоти в залежності від зміни рівня води в приймачі [7]. Викладено автоматизацію насосної станції відповідно до ПІД-інструкції регульованого параметра.

У статті [8] розглянуто алгоритм групового керування насосними агрегатами. Проведено аналіз режимів роботи, з подальшою їх модернізацією. На основі розглянутих алгоритмів виведені проблеми і недоліки управління даними агрегатами. Розглянуто проблематику при частотно-каскадному регулюванні, вчасно формування системою сигналу невідповідності і підключення другого двигуна, в напірному колекторі виникає сплеск, який може досягати значних величин, і триває до 1 хвилини.

### Основний матеріал дослідження

Для порівняння енергоефективність існуючої системи подачі живильної води при дроселюванні та використання частотно-регульованого електроприводу необхідно розрахувати споживання потужностей електродвигунів.

Номінальна величина струму двигуна насоса ЦНСг60-165 дорівнює 100 А [9]. Шляхом прямих вимірювань отримано величину максимального току при повністю відкритій дросельній заслінки  $I_{\max} = 95$  А, та величину мінімального току при повністю закритій дросельній заслінки  $I_{\min} = 21$  А. Двигун працює на частоті 50 Гц при номінальній напрузі  $U = 380$  В. При повністю відкритій дросельній заслінці максимальна потужність двигуна складає  $P_{\max} = 36100$  Вт, а при повністю закритій -  $P_{\min} = 7980$  Вт.

Потужність насоса при використанні дроселювання  $P_{\text{дрос}}$  розраховуються наступним чином

$$P_{\text{дрос}} = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot (Q/Q_{\max}) \quad (1)$$

де  $P_{\min}$  – потужність при повністю закритій заслінці, кВт;

$P_{\max}$  – потужність при повністю відкритій заслінки, кВт;  
 $Q_{\max}$  – витрата насоса при повністю відкритій заслінці, м<sup>3</sup>/год;  
 $Q$  – доля від витрати.

Потужність насоса при частотному регулюванні  $P_{\text{чрп}}$  розраховуються наступним чином

$$P_{\text{чрп}} = P_{\max} \cdot (Q/Q_{\max})^3 \quad (2)$$

В табл. 1 наведені розрахункові данні споживаної потужності насосів при різних типах регулювання витрати живильної води

Таблиця 1 – Розрахункові данні споживаної потужності

Доля витрати $Q/Q_{\max}$	0	0,25	0,5	0,75	1
Споживана потужність при дроселюванні, $P_{\text{дрос}}$ , кВт	7,98	15,01	22,04	29,07	36,1
Споживана потужність, при частотному регулюванні, $P_{\text{чрп}}$ , кВт	0	0,56	4,51	15,22	36,1

Залежність споживаної потужності при дроселюванні  $P_{\text{дрос}}$  від відносного витрати  $Q/Q_{\max}$  відображена прямою лінією з'єднанням точок  $P_{\max}$  і  $P_{\min}$  (рис. 2) [10]. Тоді як, у разі застосування частотно-регульованого приводу, потужність пропорційна кубу швидкості обертів валу двигуна.

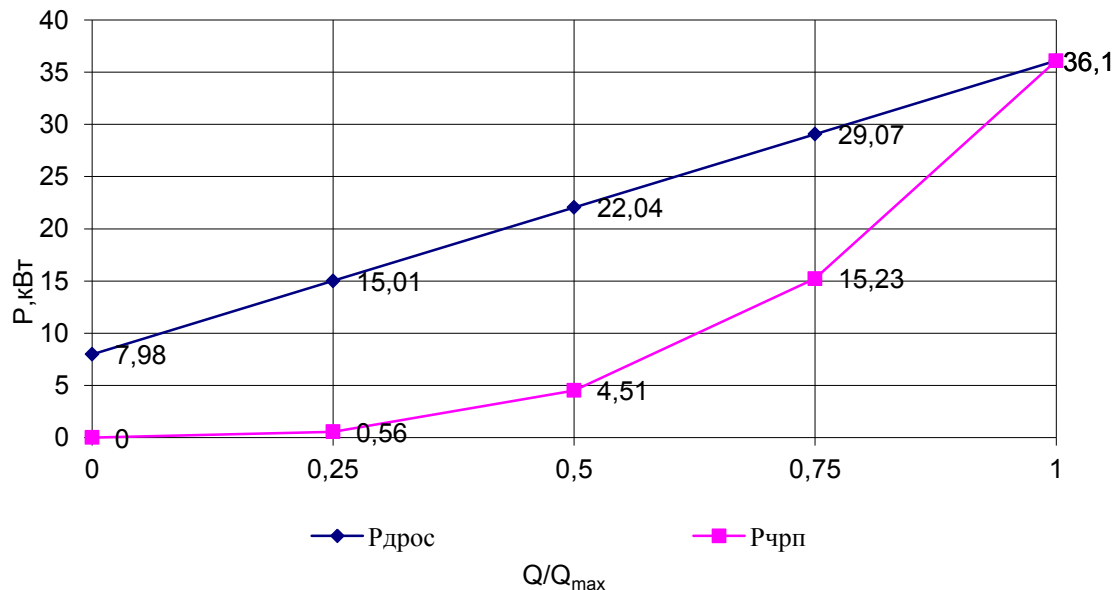


Рисунок 2 – Графік залежності споживаної потужності від відносної витрат

Для визначення завантаження насоса за періодами протягом 3 днів було використано дані технологічних трендів добової витрати води (табл. 2). Витрата насоса при повністю відкритій заслінці,  $Q_{\max}=60$  м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 2 – Добова витрата води з інтервалом у часі

День вимірювань	Період часу, год.	0~4	4~8	8~12	12~16	16~20	20~24
Перший	Витрата $Q_1$ , м <sup>3</sup> /год	39	41	43	44	42	44
Другий	Витрата, $Q_2$ , м <sup>3</sup> /год	41	46	44	43	40	43
Третій	Витрата, $Q_3$ , м <sup>3</sup> /год	42	43	41	44	46	45

Середня добова витрати води наведена на рис. 3.

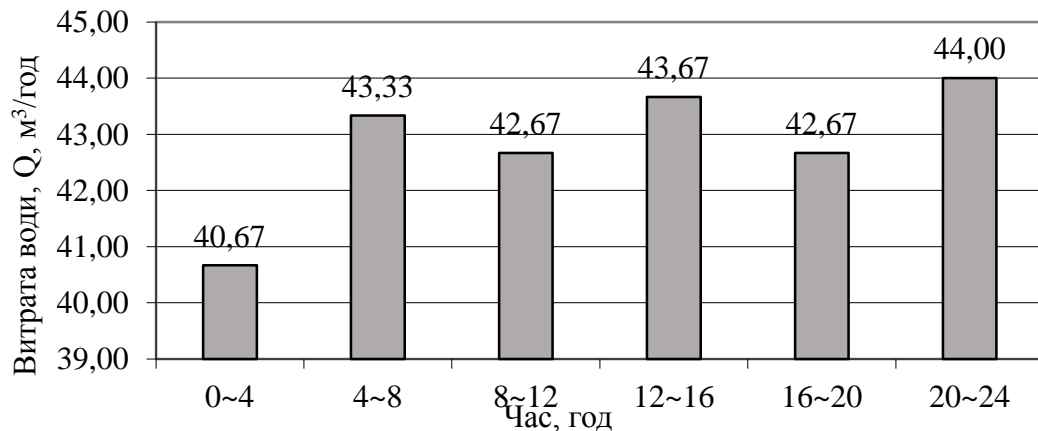


Рисунок 3 – Графік добової витрати води

Розрахунок заснований на визначенні різниці між величинами споживання електроенергії при регулюванні напору насоса шляхом дроселювання напірної засувкою і при регулюванні за допомогою частотно-регульованого електроприводу.

Розрахунок споживаної потужності насоса при використанні дроселювання  $P_{\text{дрос}}$ , та при частотному регулюванні  $P_{\text{чрп}}$ , відносно прямих вимірювань витрати наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Споживана потужність насосу відносно витрати живильної води

Витрата, м <sup>3</sup> /год	40,67	43,33	42,67	43,67	42,67	44
Споживана потужність при дроселюванні $P_{\text{дрос}}$ , кВт	19,41	20,16	19,97	20,25	19,97	20,35
Споживана потужність, при частотному регулюванні $P_{\text{чрп}}$ , кВт	2,43	2,94	2,8	3,01	2,8	3,08

Сумарна економія за рік при використанні частотно-регульованого приводу буде становити:

1. Сумарна економія потужності за добу,  $D_{P_i}$ , кВт:

## *Інформаційні технології*

$$D_{Pi} = \sum P_{дросі} - \sum P_{чрпі} = 103,09 \text{ кВт} \quad (3)$$

2. Економія електроенергії за добу,  $D_i$ , кВт/ч:

$$D_i = D_{Pi} \cdot t = 412,38 \text{ кВт/ч} \quad (4)$$

де  $t$  – тривалість періоду в годинах.

3. Економія електроенергії за рік,  $D_{Pi}$ , кВт/год

$$D_{Pi} = D_i \cdot 365 = 150517,55 \text{ кВт/рік} \quad (5)$$

де 365 – число робочих діб за рік

4. Сумарна економію за рік, грн.

$$D_e = D_{Pi} \cdot k = 272436,76 \text{ грн/(кВт/рік)} \quad (6)$$

де  $k=1,81$  грн/(кВт/год)– тариф на електроенергію, грн/

Як бачимо з розрахунку при застосуванні частотно-регульованого приводу з'явилася суттєва економія електроенергії в 150517,55 кВт/рік. При застосуванні лише одного частотного перетворювача на одному з живильних насосів випарної установки. Ще одним суттєвим аспектом енергоефективності впровадження даної системи є застосування каскадного регулювання при використанні частотно-регульованих електроприводів.

Реалізуючи метод каскадно-частотного регулювання (рис. 4), забезпечимо ще більшу кількість зекономленої енергії вдосконалюючи вище описаний спосіб регулювання. В нашому випадку частотний перетворювач буде управляти відповідно до каскадної схеми по черзі, всіма насосами і тим самим забезпечить великий діапазон значень витрати необхідного для роботи випарної установки. Принцип даного регулювання здійснений за допомогою застосування контакторів. При нижньому пороговому значенні завдання, через дискретний модуль програмованого логічного контролеру (ПЛК), замикається контактор КМ11, який приводить в дію частотний перетворювач (ЧП). Далі ЧП запускає насос Д1 виходячи на необхідне число обертів вихідного валу, це є перший каскад регулювання. При виході насоса на максимальну частоту оборотів, тобто при його максимальній продуктивності ЧП через контактор КМ12 підключає живильний насос на пряму до мережі напруги. У свою чергу контактор КМ11 синхронно розмикається відключаючи ЧП від насоса Д2. ЧП скидає частоту і перемикається в режим очікування. Якщо після цього поточну витрату виявиться недостатнім то на основі сигналу неузгодженості буде підключений наступний каскад управління другим насосом Д2. Для цього через контактор КМ21, ЧП підключається до другого насосу Д2 і регулює його частоту аналогічно першому каскаду.

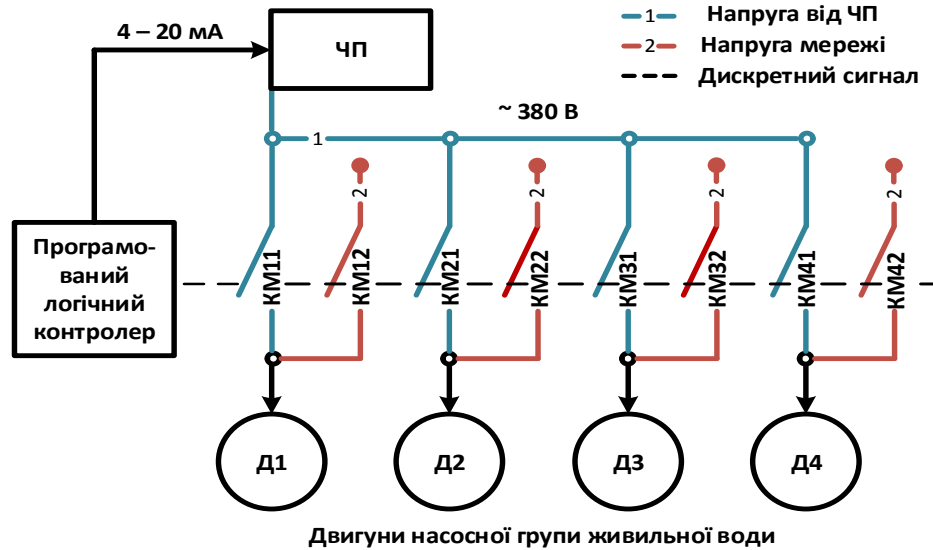


Рисунок 4 – Схема касадно-частотного регулювання

Метод касадно-частотного регулювання реалізований в програмно-логічному контролері, і здійснюється на основі ПІД-інструкції. Алгоритм цієї програми наведено в блок-схемі (рис. 5).

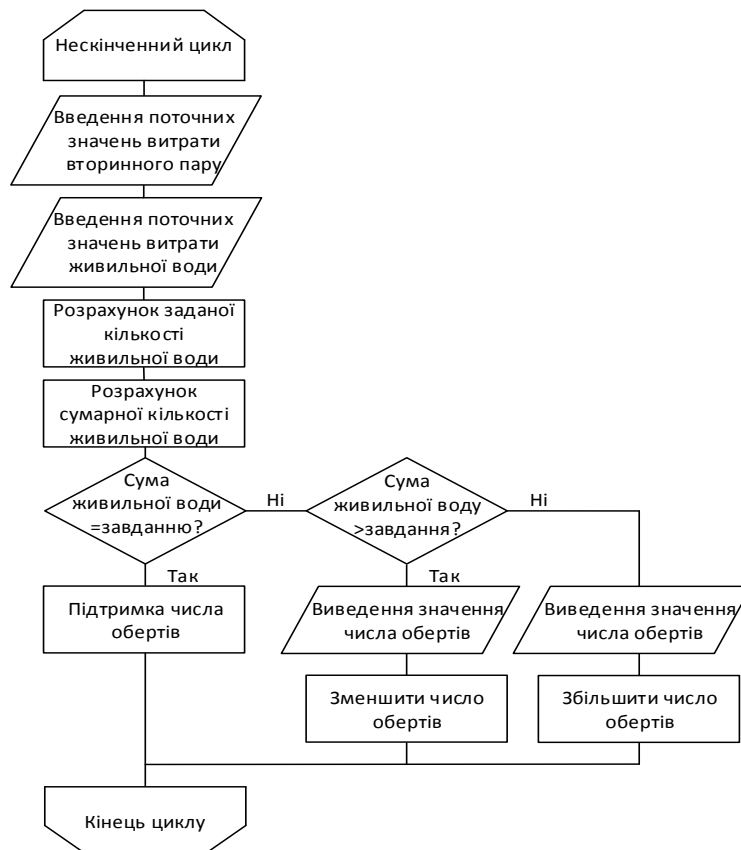


Рисунок 5 – Блок схема касадно-частотного регулювання

Управляючий сигнал визначається завдяки розрахунку сумарної кількості живильної води на випарну установку. Цикл програми є нескінченним оскільки поточні данні динамічної системи управління випарної установки порівнюються з заданими значеннями

На початок алгоритму відбувається введення поточних значень. Кількість витрати вторинного пару з випарної установки служить показником продуктивності установки (вихідна величина). Значення витрати живильної води на випарну установку є показником споживання води установкою (вхідна величина). На основі вхідної й вихідної величини, розраховується задана кількість води на випарник. Підсумуємо загальну кількість необхідної витрати живильної води на всі випарювачі установку. Перша умова «сума живильної води у діапазоні?», при виконанні даної умови «Так» - число обертів валу двигуна залишаться поточним. Якщо умова «Ні» не виконана - друга умова «сума живильної води вище діапазону?». При виконанні умови «Так» виведемо необхідне число обертів валу двигуна, в свою чергу зменшимо число обертів. Якщо умова «Ні» не виконана, виведемо необхідне число обертів валу двигуна, в свою чергу збільшимо число обертів.

## ВИСНОВКИ

У статті було досліджено впровадження частотно-регульованого управління в контурі витрати води. Використання частотного перетворювача на випарній установці є доцільним та енергоефективним рішенням, що дозволяє суттєво знизити витрати на електроенергію.

Застосування схеми каскадно-частотного управління дозволить вдосконалити впроваджувальну систему: при використанні лише одного частотного перетворювача, можливо забезпечення всього необхідного діапазону витрати живильної води, для нормальної роботи випарної установки.

ПД-інструкція до керування частотним перетворювачем розробляється завдяки розрахунку сумарної кількості живильної води на випарну установку за наведеним алгоритмом програми.

### *Перелік використаних джерел:*

1. Теорія електроприводу / Н. Г. Попович [та ін.]. – К. : Вища школа, 1993. – 494 с.
2. РД 34.40.506-85 Методические указания по эксплуатации испарительных установок поверхностного типа тепловых электростанций (МУ 34-70-107-85). С изменением №1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=73141](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73141)
3. Эффективность применения энергосберегающей системы водоснабжения и полива тепличного отделения с помощью частотного и каскадного регулирования работы насосов / М. Т. Березова, А. А. Садарова, С. Дулаев, З. Н. Цопанова // Студенческая наука - агропромышленному комплексу: научные труды студентов Горского государственного аграрного университета. – Владикавказ, 2019. – Вып. 56, ч. 2. – С. 69–72.
4. Фарукишин, Д. Р. Применение каскадной схемы управления в ЧРП насосной установки / Д. Р. Фарукишин, Т. Х. Мухаметгалеев // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. материалов III Поволжской научно-практ. конф. (Казань, 07–08 декабря 2017 г.) : в 2 т. / Казанский государственный энергетический университет. – Казань, 2017. – Т. 2. – С. 165–166.



5. *Мещераков, В. Н.* Энергосберегающий каскадно-частотный электропривод для турбомеханизмов нефтегазовой отрасли / *В. Н. Мещераков, Д. И. Шишин, Д. В. Ласточкин* // Булатовские чтения. – 2018. – Т. 6. – С. 218–220.

6. *Федоренко, Д. Ю.* Частотне регулювання в нафтопереробці / *Д. Ю. Федоренко, О. О. Койфман* // Світ автоматизації. – 2011. – № 3. – С. 81–83.

7. *Ошейчик, Н. И.* Автоматическое регулирование уровня воды двумя насосами с переключаемым преобразователем частоты / *Н. И. Ошейчик, Н. М. Матвейчук* // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК : сб, науч. статей Междунар. научно-техн. конф. (Минск. 23–24 ноября 2017 г.) / Белорусский гос. аграрный техн. ун-т. – Минск, 2017. – С. 346–352.

8. *Гордейчик, А. В.* Проблемы группового управления насосными агрегатами [Электронный ресурс] / *А. В. Гордейчик, А. В. Попов, А. П. Усачов* // Сибирь-мехатроника. – Новосибирск, 2018. – С. 1–10. – Режим доступа: [https://sibmech.ru/netcat\\_files/userfiles/doc/articles/2018\\_Ekvatek\\_Problemy\\_gruppovogo\\_upravleniya.pdf](https://sibmech.ru/netcat_files/userfiles/doc/articles/2018_Ekvatek_Problemy_gruppovogo_upravleniya.pdf)

9. ООО «ТОРГОВЫЙ ДОМ «УКРНАСОС СЕРВИС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ukrnasos.com.ua/ru>

10. *Кузин, С. Ю.* Применение регулируемого электропривода / *С. Ю. Кузин* // Электро. – 2009. – № 6. – С. 49–50.

**Рубинский В. А., Койфман А. А., Федоренко Д. Ю.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ПРИ УПРАВЛЕНИИ РАСХОДОМ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ИСПАРИТЕЛЬНУЮ УСТАНОВКУ ТЕПЛОСИЛОВОГО ЦЕХА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА**

*Рассмотрен контур управления подачей питательной воды насосным агрегатом на испарительную установку. Подача воды осуществляется по двум коллекторам, из которых по параллельной схеме распределяется на испарители. Регулирование расхода происходит непосредственно на испарителях. На основании изученных материалов, была поставлена задача усовершенствовать существующую систему благодаря применению современного энергосберегающего оборудования - частотно-регулируемого привода.*

*Произведены экспериментальные исследования для получения данных о мощности двигателя при дросселировании и при использовании частотного преобразователя. Продемонстрировано не рациональный перерасход потребляемой мощности. Приводится расчет энергоэффективности существующей и предлагаемой систем.*

*На основе полученных данных о потребляемом количестве воды испарительной установки приведен график загрузки насосного агрегата. Опираясь на произведенные исследования произведен расчет суммарной экономической эффективности.*

*Для использования частотно-регулируемого привода в управлении расходом питательной воды разработана схема каскадно-регулируемого управления всеми насосными агрегатами, демонстрирующая поочередное управление насосными агрегатами, используя всего лишь один частотный преобразователь. За основу сигнала рассогласования принимается параметр суммарного расхода питательной воды на каждый испаритель. Для реализации ПИД регулирования частотно-регулируемого привода разработана блок-схема, описывающая зависимость регулируемой величины от выработки испарителя. Данный*

*алгоритм может функционировать для оптимизации существующего контура регулирования расхода воды в испарителе. Использование предложенной системы позволит на практике экономично и эффективно управлять насосными агрегатами, а также избежать проблем регулирования запорной арматурой.*

**Ключевые слова:** *частотно-регулируемый привод, испарительная установка, каскадное регулирование, частотный преобразователь, питательная вода, насос, двигатель, система управления.*

**Rubinskyi V. A., Koifman O. O., Fedorenko D. Yu.**

## **APPLICATION OF VARIABLE FREQUENCY DRIVE IN CONTROL OF FEED WATER CONSUMPTION PER EVAPORATOR OF A HEAT AND POWER DEPARTMENT OF AN IRON AND STEEL PLANT**

*A control loop for the feed water supply with a pumping unit to an evaporator is considered. Water is supplied through two collectors, from which it is distributed in parallel circuit to the evaporators. The flow control takes place directly at the evaporators. Based on the materials studied, the task was set to improve the existing system through the application of modern energy-saving equipment - a variable frequency drive.*

*Experimental studies have been carried out to obtain data on engine power while throttling and while using a frequency converter. The non-rational overconsumption of intake power has been demonstrated. The calculation of the energy efficiency of the existing and proposed systems has been given.*

*On the basis of the obtained data on the consumed amount of water of the evaporator, the graph of the workload of the pumping unit is shown. Based on the research carried out, the total economic efficiency was calculated.*

*To use a variable frequency drive in the control of the feed water flow, a cascade-regulated control scheme for all pumping units has been developed, it demonstrates the alternate control of pumping units using only one frequency converter. The error signal is based on the parameter of the total feed water consumption for each evaporator. To implement the PID control of a variable frequency drive, a block diagram has been developed that describes the dependence of the controlled variable on the evaporator output. This algorithm can function to optimize an existing loop for controlling the water consumption in the evaporator. The use of the proposed system will make it possible in practice to control pumping units economically and efficiently, as well as to avoid the problems of regulating the isolation valves.*

**Keywords:** *variable frequency drive, evaporator, cascade control, frequency converter, feed water, pump, e-motor, control system*

Рецензент: доц., канд. техн. наук, Кравченко В. П.  
Стаття надійшла 06.12.2020 р.