

УДК 621.548

УПРАВЛІННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

ЛОБОВ В.Й.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, *e-mail: lobov-vjcheslav@gmail.com*;

ЛОБОВА К.В.

студентка кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, *e-mail: karinalobova409@gmail.com*;

ДАЦЬ А.В.

студент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, *e-mail: dats1996@yandex.ru*;

Мета роботи. Обґрунтувати питання ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії, що дозволить розробити новий алгоритм управління і створити нове програмне забезпечення до управління газоповітряною енергетичною установкою. Для перевірки на адекватність розроблених алгоритмів управління і програмного забезпечення розробити лабораторну газоповітряну енергетичну установку.

Методи дослідження. Для дослідження розподілу газоповітряних мас у технологічних установках промислового підприємства використаний метод імітаційного моделювання, виконаний в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation. Метод імітаційного моделювання дозволив розробити новий алгоритм управління і створити нове програмне забезпечення з урахуванням основних технічних вимог, що пред'являються до управління газоповітряною енергетичною установкою. Для перевірки працездатності розроблених алгоритмів і програмного забезпечення управління газоповітряною енергетичною установкою використаний метод фізичного моделювання, яке проведено на розробленій лабораторній установці, з'єднаній через інтерфейс USB з ЕОМ, що має віртуальну модель SCADA системи, представлену в середовищі LabVIEW.

Отримані результати. На основі моделювання газоповітряних потоків на розробленій математичній моделі оптимально вибрані співвідношення розмірів трубопроводу, раціонально визначено витрати газоповітряної суміші, необхідної для найбільш ефективної роботи газоповітряної енергетичної установки, тобто у робочій зоні газоповітряного тракту гвинт генератора контактує з найбільш значимими потоками, забезпечуючи максимальний ефект обертання. Розроблені основні технічні вимоги, що пред'являються до управління газоповітряною енергетичною установкою. Розроблено оптимальний алгоритм управління, який дозволив впровадити його в схему управління газоповітряної енергетичної установки з мікропроцесором або спеціалізованим мікроконтролером.

Наукова новизна. Знайдені нові можливості подальшого удосконалення відомих базових математичних моделей кінетики газоповітряних потоків і запропоновані варіанти адаптації в області газодинаміки для оцінки витрат газоповітряних потоків при роботі вентиляторної установки на трубопроводі. Розроблена структурна схема та алгоритми управління газоповітряною енергетичною установкою, до якої входять вентилятор, генератор, трубопровід і блок управління, виконаний на основі використання мікроконтролера Arduino Uno. Розроблено також алгоритм підпрограми для з'єднання газоповітряної енергетичної установки з SCADA системою.

Практична цінність. Запропонований спосіб вироблення електричної енергії газоповітряною енергетичною установкою з мікропроцесорною системою управління, як показали розрахунки, підтверджені експериментальними дослідженнями на лабораторній установці, дозволяє зменшити до 20% кількості витраченої електроенергії технологічною установкою та може бути використаний в промислових умовах. Впровадження газоповітряних енергетичних установок із мікропроцесорною системою і SCADA системою дозволить підвищити енергоефективність роботи технологічних установок.

Ключові слова: технологічна установка; газоповітряні потоки; електрична енергія; управління; мікроконтролер; алгоритми.

1. ВСТУП

Використання потужності вітру для виробленої електроенергії з кожним роком зростає, що не менше як на 7% [1]. За останні кілька років вітроенергетика отримала значну увагу, як один з найбільш перспективних джерел для отримання електричної енергії [2], [3]. Частка у загальному споживанні електроенергії виробленою вітром в європейських країнах, перевищила 9%, в США та Австралії досягла 4%, а в Китаї -

2% [4]. Безперервне збільшення використання енергії вітру призвело до розвитку нових технологій отримання електричної енергії.

Вирішення цієї задачі можливо за рахунок впровадження технічних заходів, спрямованих на стимулювання зниження витрат електроенергії в технологічних установках, якими можуть бути газовий котел, димосос, котлоагрегат, шахтний вентилятор, тощо.

Зниження споживання електроенергії з централі-

зованої мережі може бути досягнуто за рахунок вироблення і споживання альтернативної енергії, яка отримується шляхом використання відпрацьованих газоповітряних потоків промислових установок. Очікуваний ефект від зниження спожитої електричної енергії можливо досягнути за умови використання та впровадження газоповітряної енергетичної установки (ГПЕУ), яка працює одночасно з технологічною установкою, що постійно формують чітко направлений газоповітряний потік з його сталими параметрами, який є відпрацьованим і використовується ГПЕУ.

В основі роботи ГПЕУ вирішується задача використання потоку маси газів/повітря, відпрацьованих, вивільнених або видуваємих технологічною установкою, керованою системою управління, що живиться від електричної мережі, та перетворення кінетичної енергії потоку цих мас у електричну. Сучасні системи управління ГПЕУ потребують проведення дослідження, відповідно з науковими і практичними задачами, та обґрунтування необхідності реалізації на сучасній елементній базі з використанням силових напівпровідникових елементів, мікроконтролерів, мікросхем середньої ступені інтеграції та великих інтегральних схем. Доцільність розробки ГПЕУ з сучасними системами управління відповідає енергетичній стратегії України на період до 2030 року [5] і необхідно для розвитку відповідної області науки та впровадження таких систем у виробництво. Тому тема статті є актуальною і має наукове і практичне значення.

Для ефективного моделювання розподілу газоповітряних потоків у технологічному тракті використовують універсальний модуль SolidWorks Flow Simulation, призначений для аналізу гідрогазодинаміки і теплопередачі, який заснований на методі кінцевих елементів [6]. Програмне середовище SolidWorks Flow Simulation найбільш задовольняє виконанню поставленої задачі, оскільки рух газоповітряного потоку моделюється за допомогою рівняння Нав'є-Стокса, а теплообмін рівнянням Фур'є, які описують у нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу і енергії цього середовища. Крім того, використовуються рівняння стану компонентів потоку, а також емпіричні залежності в'язкості та теплопровідності компонентів середовища від температури. Для моделювання турбулентних течій згадані рівняння Нав'є-Стокса усереднюють по Рейнольдсу, тобто використовується середнє по малому масштабу часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни усереднених по малому масштабі часу складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкостей, температури) враховуються введенням відповідних похідних за часом.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Використання кінетичної енергії вітру в вітроенергетичних установках залежить від швидкості вітрового потоку, так й енергія, яку можна отримати, змінюється протягом доби, так і впродовж місяця і сезону року [7] – [9], тому мають низку ефективність.

Одночасно відмічається розвиток вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності [10] – [11]. Сучасні дослідження направлені на підвищення ефективності [12] – [15] і удосконалення конструкцій та систем управління вітрових енергетичних установок [16] – [18]. Вітроенергетичні установки становлять дуже складну електромеханічну систему, та системи керування ними потребують удосконалення [19] – [21]. Відомий пристрій для автоматичного керування електроспоживанням, який має первинні датчики витрати електроенергії, блок прийому інформації, який підключений до мікроконтролера, та датчиків і блоки прийому інформації від лічильників технічного і комерційного обліку, виходи з яких підключені до мікроконтролера, а вихід з мікроконтролера підключений до блока керування споживачами регуляторами [22]. Недоліком такого пристрою є те, що споживачі-регулятори весь час споживають із мережі електричну енергію, яка не економиться. Існують інші способи і пристрої для автоматичного керування електроспоживанням, який має технологічну установку, що складається із каналу для газового/повітряного потоку, всередині якого встановлений повітряний гвинт, мікроконтролера, комутаторів, датчиків тиску газового/повітряного потоку та перетворювач електродвигуна вентилятора, блока управління технологічною установкою [23] – [25]. Проте, робота газоповітряної енергетичної установки залежить від наявності потрібного стабільного потоку у трубопроводі, що не дає змоги використовувати енергію увесь час.

III. МЕТА РОБОТИ

Обґрунтувати питання ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків при виробленні електричної енергії. Для моделювання розподілу газоповітряних потоків у технологічному тракті розробити математичну модель і дослідження використати універсальний модуль SolidWorks Flow Simulation, який призначений для аналізу гідрогазодинаміки і теплопередачі.

При вирішенні поставленого завдання необхідно виходити з того, що отримані результати дослідження переміщення газоповітряних потоків у технологічному тракті технологічної установки промислового підприємства у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation дозволить визначити шляхи досягнення максимальної енергоефективності газоповітряних потоків, з'ясувати основні технічні вимоги, що пред'являються до управління ГПЕУ і розробити оптимальний алгоритм управління, який повинен впроваджуватися в схему управління ГПЕУ з мікропроцесором або спеціалізованим мікроконтролером і забезпечити зв'язок зі SCADA системою.

Для перевірки результатів моделювання і працездатності, розроблених алгоритмів і програмного забезпечення управління ГПЕУ використати метод фізичного моделювання, для проведення якого розробити і виготовити лабораторну установку, з'єднати її

через інтерфейс USB з ЕОМ, що повинна мати віртуальну модель SCADA системи, представлену в середовищі LabVIEW.

IV. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При роботі виробничої установки через технологічний тракт нагнітається або видувається газоповітряний потік гвинтом дуттьового вентилятора, який працює на трубопроводі або зовні. Вентилятор входить до складу електроприводу, який має електродвигун постійного струму, але може мати електродвигун змінного струму. Зовні трубопроводу в технологічному тракті розташований другий гвинт кінетично пов'язаний з генератором. Кінетична енергія газоповітряного потоку виробничої установки використовується для механічного обертання гвинта, кінематично пов'язаний з генератором, який виробляє електричну енергію. Технологічний тракт і структурна схема системи управління ГПЕУ, представлені на рис. 1. До складу технологічного тракту входять: трубопровід для відводу повітря і газу, електропривід із вентилятором, гвинт із генератором. До схеми системи управління ГПЕУ входять: мікроконтролер, датчики, акумулятор, комутатори, пульт керування і вузол підключення до комп'ютера. Роботою ГПЕУ управляє мікроконтролер за сигналами з датчиків: обертів, струму, напруги, температури електродвигуна вентилятора, обертів і напруги генератора та датчика заряду акумулятора.

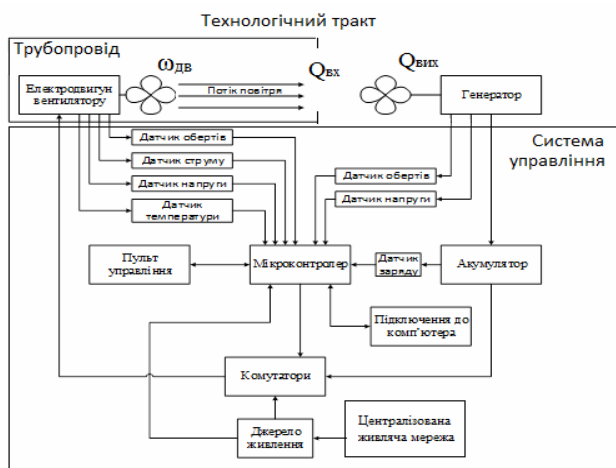


Рисунок 1. Технологічний тракт і структурна схема системи управління ГПЕУ

При наявності газоповітряного потоку генератор постійного струму використовується для зарядки акумулятора. Для управління перемиканням режиму роботи установки, тобто роботи електродвигуна вентилятора від централізованої живлячої мережі або від акумулятора, при достатньому рівні її заряду, використовується комутатор. Мікроконтролер управляє роботою комутатора за сигналами датчика напруги на виводах акумулятора. При цьому переключення не впливають на роботу виробничої установки. При зниженні напруги на акумуляторі нижче заданого рівня

виконуються зворотні дії – живлення електродвигуна постійного струму вентилятора виконується від централізованої живлячої мережі. Мікроконтролер виконує збір інформації про стан роботи електродвигуна вентилятора і генератора за допомогою датчиків обертів, струму, напруги, і передає цю інформацію на ЕОМ. Використання такої взаємодії обумовлене необхідністю керувати ГПЕУ безпосередньо через мікроконтролер із використанням SCADA системи, програма якої знаходиться на ЕОМ та реалізується з використанням програмного забезпечення Labview.

Для ручного управління ГПЕУ використовується пульт управління. Його функціональні можливості менші, порівняно з використанням SCADA системи, але він забезпечує виконання основних функцій типу: старт/стоп, переключення режимів роботи, а також відображає статус роботи ГПЕУ і попереджувальні сигнали.

Для визначення ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії розробимо математичну модель. Для цього виведемо диференціальні рівняння об'єкта, технологічний тракт якого зображений на рис. 1. Позначимо змінні (керуючі величини): швидкість обертання дуттьового вентилятора через ω_{dv} , а швидкість обертання гвинта генератора - ω_{em} , і вихідні змінні (регульовані величини): витрати газоповітряного потоку відповідно до - Q_{ex} і після Q_{vix} гвинта генератора.

Запишемо фізичні рівняння, що характеризують процеси газоповітряного тракту через закон збереження маси:

$$\frac{dm}{dt} = Q_{ex} - Q_{vix} \quad (1)$$

Різниця між речовинами на вході та виході акумулюється в робочому полі розташування гвинта генератора.

Рівняння стану, як відомо з курсів термодинаміки, має вигляд:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (2)$$

де $V = V_m$, а $m = V_m \rho$.

Із рівняння (2) отримаємо співвідношення, що зв'язує масу і тиск в нашому випадку: $m = k_{cn} P$. Підставивши співвідношення в закон збереження маси (1), отримаємо формулу вимірювання тиску:

$$k_{cn} \frac{dp}{dt} = Q_{ex} - Q_{vix}$$

Мінливе розрідження у робочому полі до і після гвинта генератора враховується в системі рівнянь за допомогою балансу тисків. Запишемо баланс тисків [26] у вигляді системи диференціальних рівнянь для ділянки до і після гвинта генератора:

$$\begin{cases} \frac{l_m}{S_m} \frac{dQ_{ex}}{dt} = P_{\delta\epsilon} - P_m - P_{om} \\ \frac{l}{S} \frac{dQ}{dt} = P_{z2} - P_m - P_{om2} \end{cases} \quad (3)$$

Ввівши допущення, що потоки повітря і газу ланіарні, запишемо рівняння гідродинаміки, що встановлюють співвідношення між витратою і втратами тиску на опір:

$$\begin{cases} P_{om} = \xi_{om} Q_{ex} \\ P_{om2} = \xi_{om2} Q_{eux} \end{cases} \quad (4)$$

Перепишемо диференціальні рівняння (3) з урахуванням (4) у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{l_m}{S_m} \frac{dQ_{ex}}{dt} = P_{\delta\epsilon} - P_m - \xi_{om} Q_{ex} \\ \frac{l}{S} \frac{dQ}{dt} = P_{z2} - P_m - \xi_{om2} Q_{eux} \end{cases}$$

Рівняння дуттьового вентилятора і роботи гвинта генератора в припущенні записуються так, що тиск в них залежить лінійно від швидкості обертання двигуна:

$$\begin{cases} P_{\delta\epsilon} = k_{\delta\epsilon} \omega_{\delta\epsilon} \\ P_{z2} = k_{z2} \omega_{z2} \end{cases}$$

Після перетворень отримані диференціальні рівняння об'єднаємо в систему, що характеризує газоповітряний тракт, як об'єкт регулювання [27]:

$$\begin{cases} Q'_{ex} = -\xi_{om} \frac{S_{om}}{l_{om}} Q_{om} + k_{om} \frac{S_{om}}{l_{om}} \omega_{om} + \frac{S_{om}}{l_{om}} P_m \\ Q'_{eux} = -\xi_{om2} \frac{S_{m2}}{l_{m2}} Q_{eux} + k_{m2} \frac{S_{m2}}{l_{m2}} \omega_{z2} + \frac{S_{m2}}{l_{m2}} P_m \\ P'_m = \frac{1}{k_{cn}} Q_{ex} - \frac{1}{k_{cn}} Q_{eux} \end{cases} \quad (5)$$

Для моделювання в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation [28] представимо систему рівнянь збереження маси, імпульсу і енергії нестационарного просторового течії у декартовій системі координат $(x, i = 1, 2, 3)$, і що обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що проходить через її початок:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \\ \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial}{\partial x_i} = S_i \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E - P) u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H \end{cases} \quad (6)$$

У результаті виконання досліджень переміщення

газоповітряних потоків у технологічному тракті виробничої установки промислового підприємства у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation з використанням рівнянь (5, 6) уточнені основні технічні вимоги, що пред'являються до управління ГПЕУ і на їх основі розроблений оптимальний алгоритм управління, який впроваджений в схему управління ГПЕУ з спеціалізованим мікроконтролером, який забезпечує зв'язок зі SCADA системою, програмне забезпечення якої встановлено на комп'ютері. Алгоритм роботи програми мікроконтролера наведено на рис. 2. Вона складається з основної частини (рис. 2а) та програми для взаємодії з SCADA системою, що знаходиться на ЕОМ (рис. 2б). Таке розділення виконано з ціллю поділити основні функції програми.

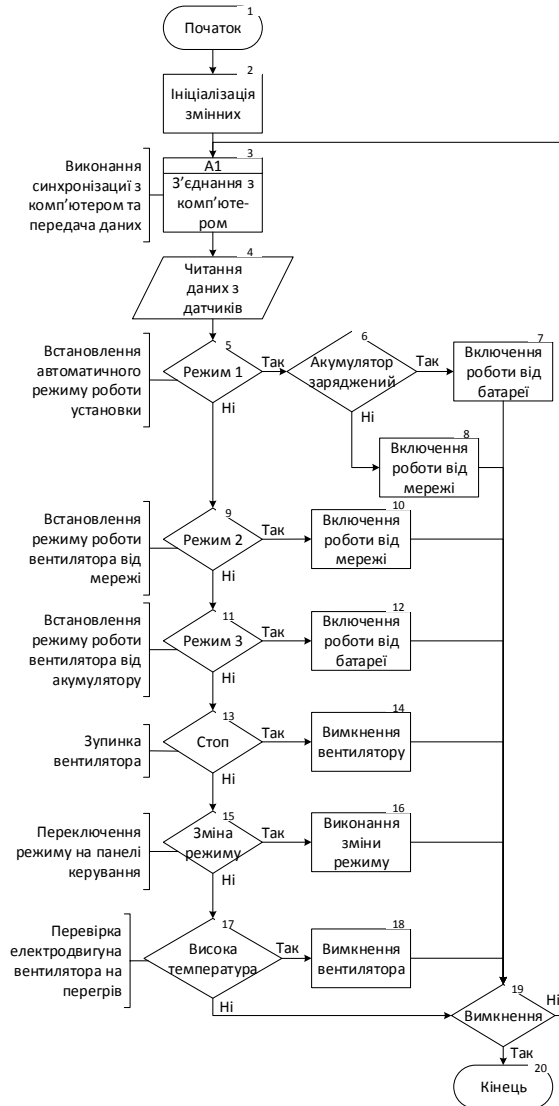
Алгоритми роботи мікроконтролера працюють наступним чином. На початку роботи мікроконтролера у блоці 2 (рис. 2а) виконується ініціалізація усіх змінних, що у подальшому будуть використовуватись, а також встановлюються початкові умови роботи системи, а саме установка не повинна працювати без надання відповідної команди. Ініціалізація виконується лише один раз при ввімкненні установки у мережу. При з'єднанні системи з ЕОМ та включенні SCADA системи, виконується синхронізація з ЕОМ і передаються дані за допомогою блоку 3 підпрограми А1 (рис. 2, б).

У мікроконтролері, після завершення роботи підпрограми А1, відбувається зчитування даних із датчиків та запис їх у відповідні змінні (блок 4). Дані отримуються від датчиків температури, напруги, струму, обертів електродвигуна вентилятора, напруги і обертів генератора, напруги на акумуляторі.

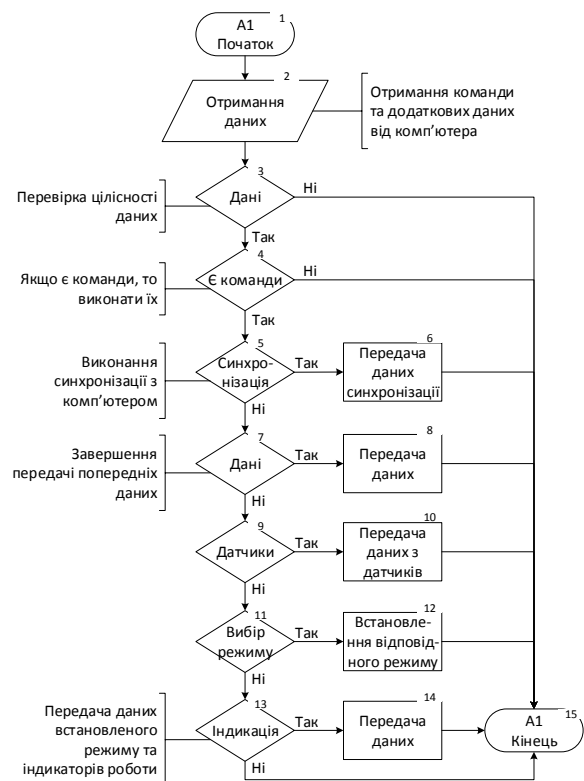
При встановленні будь-якого режиму виконуються особливі дії. Існує три режими роботи ГПЕУ: «Автоматичний» (режим 1) блоки 5-8, «Від мережі» (режим 2) блоки 9-10, «Від акумуляторної батареї» (режим 3) блоки 11-12. Якщо встановлено режим «Автоматичний» (блок 5), то ГПЕУ повинна сама переключати режими роботи від мережі або від акумулятора в залежності від показників заряду акумулятора. Якщо акумулятор досягнув значення заряду, виконується ввімкнення роботи від нього, якщо досягнуто значення розряду – ввімкнення роботи від мережі. При встановленні режиму «Від мережі» (блок 9), то ГПЕУ працюватиме від електричної мережі і постійно заряджатиме акумулятор від генератора, незалежно від заряду акумулятора. Зарядка акумулятора буде зупинена при повному її заряді. У режимі роботи «Від акумуляторної батареї» (блок 11) ГПЕУ працюватиме тільки від акумулятора доки не буде розряджена до заданого для нього рівня напруги. На панелі керування та фронтальній панелі SCADA системи є кнопка вимкнення роботи ГПЕУ без відключення електричної мережі. У цьому режимі електродвигун вентилятора відключається та не встановлюється будь-який режим. У такому стані ГПЕУ знаходиться як при першому підключенні до централізованої живлячої мережі. Далі не допускається натискання будь-якої кнопки на пульті

управління. Якщо була натиснута кнопка, то виконується запис натиснутої кнопки для подальшого виконання дій. На панелі керування встановлені кнопки збільшення та зменшення швидкості обертання ротора двигуна, встановлення режиму роботи установки («Автоматичний», «Від мережі», «Від акумуляторної

батареї») та відключення установки. Також, перевіряється чи не були натиснуті декілька кнопок одночасно, які суперечать одна одній. Неможливо одночасно натискати збільшення та зменшення швидкості обертання ротора вентилятора, або відразу декілька кнопок для встановлення режиму.



а



б

Рисунок 2. Алгоритми роботи мікроконтролера (а) і підпрограми для з'єднання мікроконтролера з SCADA системою (б)

У разі виконання подібних дій, програма буде ігнорувати зміну швидкості вентилятора або встановлення режиму. У блоці 17 виконується перевірка на температурний режим електродвигуна вентилятора. При високій заданій температурі вентилятор вимикається, але не відбувається зміна режиму роботи. При охолодженні двигуна до певної температури установка продовжує працювати у раніше встановлених параметрах. При вимкненні централізованої живлячої мережі зупиняється робота ГПЕУ. Підпрограма A1 (рис. 26) запускається при підключенні установки через COM-порт USB 2.0 до ЕОМ та включеній SCADA системи. Взаємодія з ГПЕУ виконується шляхом надсилання

команд від ЕОМ та відповіді на них мікроконтролером ГПЕУ. При підключенні мікроконтролера зчитує інформацію, яку надсилає ЕОМ. Вона складається з команди та додаткових даних для її виконання. Далі виконується перевірка цілісності даних, що надійшли від ЕОМ для уникнення втрати інформації, передачі неправильної інформації. Якщо дані пошкоджені подальше виконання будь-яких дій з інформацією та зміна параметрів ГПЕУ не відбувається.

У SCADA системі є декілька віртуальних підприладів, що відповідають різним командам. Для кожної команди створена окрема функція. При першому підключенні мікроконтролера до ЕОМ відбувається

синхронізація роботи, тобто встановлення режиму роботи та налаштування ГПЕУ на роботу від SCADA системи. Якщо мікроконтролер отримує дані від ЕОМ, може їх розпізнати та відповідати на запити, встановлюється передача даних. За цей процес відповідає блок 5 «Синхронізація» (рис. 2б). Так як процес роботи мікроконтролера побудований на постійному виконанні дій, а передання даних потребує часу, то попередня передача даних може не встигати завершуватись до того, як підпрограма А1 знову буде виконуватись. З ціллю створення перевірки на завершення передачі попередніх даних і лише потім виконуються наступні команди (блок 7, рис. 2б).

Далі виконуються команди пов'язані з основною роботою ГПЕУ, а саме передача даних інформації з датчиків (блоки 8-14, рис. 2б), встановлення відповідного режиму установки, передача даних щодо поточного встановленого режиму. При виконанні команди для передачі даних із датчиків виконується відправлення значень, що були отримані у блоку 4 рис. 2а. У ці дані входить інформація про швидкість обертання, напругу, струм та температуру на електродвигуні вентилятора, швидкість обертання та напругу генератора і напругу на акумуляторній батареї. Разом із виконанням команди на встановлення режиму (блок 5, рис. 2а) надходить значення режиму, що потрібно встановити в ГПЕУ, а також задати швидкість обертання лопотів вентилятора. Ці дані використовуються при виконанні основної програми для зміни поточних параметрів роботи установки.

При виконанні команди на запит ЕОМ відправляються дані щодо встановленого режиму на мікроконтролері та швидкості лопотів вентилятора. Дана команда потрібна для підтвердження виконання установки певного режиму чи швидкості лопотів вентилятора у SCADA системі. По завершенні виконання підпрограми А1 відбувається повернення до основного алгоритму, у якому будуть виконуватись зміни режиму роботи вентилятора, швидкості вентилятора, тощо.

Використовуючи диференціальні рівняння (6) та систему рівнянь Нав'є – Стокса для дослідження газоповітряних мас, розроблена математична модель, яка дозволила виконати дослідження у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation. Результати досліджень лягли в основу формування технічних вимог на розробку нових алгоритмів, що наведені на рис. 2 і програмного забезпечення для мікропроцесорної системи управління лабораторної ГПЕУ. Для визначення достовірності розробленої математичної моделі та алгоритмів роботи ГПЕУ з мікроконтролером, принципів технічних рішень, програмного забезпечення та отримання порівняних результатів, із перевіркою на адекватність, розроблені інформаційне та програмне забезпечення і схема автоматизації та виготовлена лабораторна ГПЕУ, що з'єднується за допомогою мікроконтролера з ЕОМ, яка оснащена SCADA системою (рис.3).



Рисунок 3. Загальний вигляд лабораторної установки ГПЕУ

Експериментально перевірена робота автоматизованого пристрою керування ГПЕУ електроспоживанням технологічної установки, що отримано на віртуальній моделі в середовищі LabVIEW, з метою виявлення закономірностей електроспоживання та підтвердження технічних показників ГПЕУ. Запропонований спосіб вироблення електричної енергії ГПЕУ з мікропроцесорною системою управління, як показали розрахунки, підтверджені експериментальними дослідженнями. Так, кількість витраченої електроенергії технологічною установкою при швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу від 5,4 до 3,6 м/с зменшується до 20%. Це можливо за рахунок споживання нею виробленої електричної енергії ГПЕУ, шляхом використання кінетичної енергії потоку маси газів/повітря, відпрацьованих, вивільнених або видуваних технологічною установкою. Інші параметри зняті методом фізичного моделювання на лабораторній установці такі, як: значення напруг, струму, швидкості повітряного потоку та швидкості обертання вентилятора, представлені у табл. 1.

Впроваджені алгоритми роботи в мікропроцесорну систему лабораторної ГПЕУ повністю задовольнили технічні вимоги, які пред'являються до керування таким об'єктом. SCADA система розроблена у програмному середовищі LabView, дозволяє отримувати дані про стан роботи ГПЕУ та керувати системою у реальному часі. Як показали експериментальні дослідження, швидкість повітряного потоку на виході трубопроводу при 4300 об/хв по різному змінюється у робочому полі гвинта генератора відповідно середини і краю діаметру трубопроводу розміром 110 мм.

Зміна швидкості повітряного потоку у робочому полі гвинта генератора в різних частинах трубопроводу, наведено на рис. 4.

Результати досліджень, отриманих на математичній моделі, використані для перевірки на адекватність з результатами знятими методом фізичного моделювання за допомогою програмного додатку LabView та анемометру, пристрою для вимірювання швидкості повітряного потоку. Значення швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу, які були змодельовані через програмний додаток SolidWorks

Таблиця 1. Зняті параметри методом фізичного моделювання, яке проведено на лабораторній установці.

Тип установки	Напруга двигуна, В	Швидкість обертання, Об/хв	Напруга генератора, В	Струм двигуна, А	Витрати електричної енергії, Вт*час	Швидкість повітряного потоку на виході труби, м/с	Швидкість повітряного потоку після генератора, м/с
Без ГПЕУ	23,45	4300	4,55	0,406	9,5	5,4	4,5
3 ГПЕУ	23,5	4300	4,35	0,32	7,6	5,4	4,4
Без ГПЕУ	22,08	3507	4,41	0,39	8,69	4,6	3,7
3 ГПЕУ	22,1	3500	4,39	9,31	6,95	4,7	3,8
Без ГПЕУ	20,46	3001	2,12	0,37	7,7	3,6	2,7
3 ГПЕУ	20,45	3008	2,1	0,3	6,16	3,5	2,6
Без ГПЕУ	18,6	2512	0	0,35	6,45	3	2,1
3 ГПЕУ	18,5	2511	0	0,34	6,4	2,98	2,0

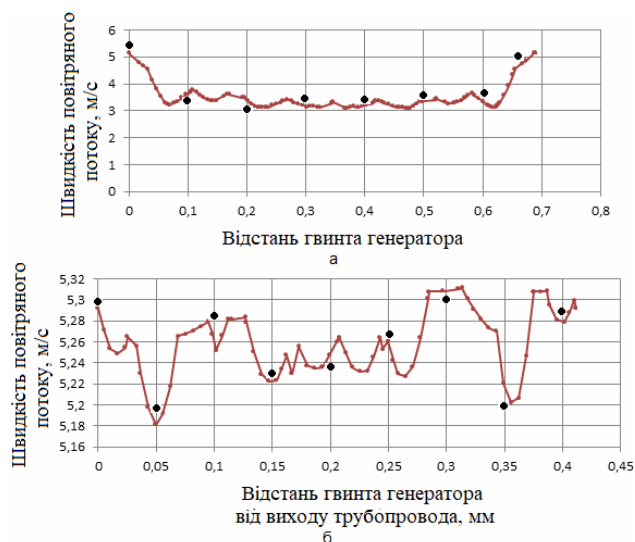


Рисунок 4. Зміна швидкості повітряного потоку у робочому полі гвинта генератора: середин (а) і край (б) діаметру трубопроводу (суцільна лінія – розрахунок, крапки - експеримент).

порівняно із знятими експериментальними даними, отримані на лабораторній установці.

Фронтальна панель SCADA системи представлена на рис. 5.

Окрім того, порівняно швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу до і після гвинта генератора, результати порівняння приведені відповідно на рис. 6а і рис. 6б. Функція зміни швидкості обертання лопотів вентилятора від відстані розташування гвинта генератора на виході трубопроводу, представлені на рис. 6в. Ефективність досліджень у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation візуалізації процесу розподілу газоповітряних потоків при нагнітанні гвинтом вентилятора у трубопровід

підтвердили експериментальні дослідження на лабораторній установці.

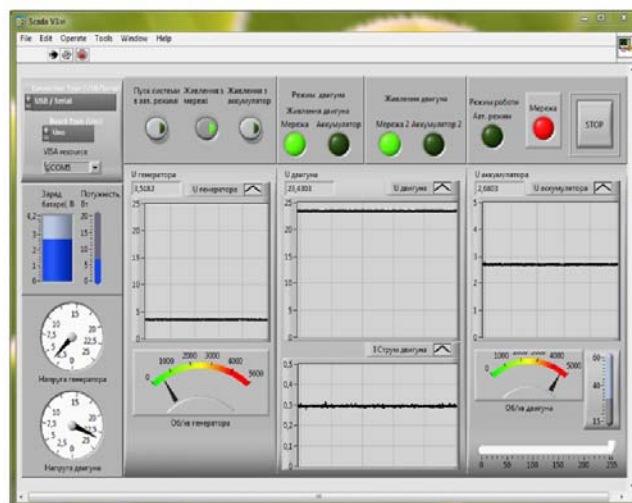


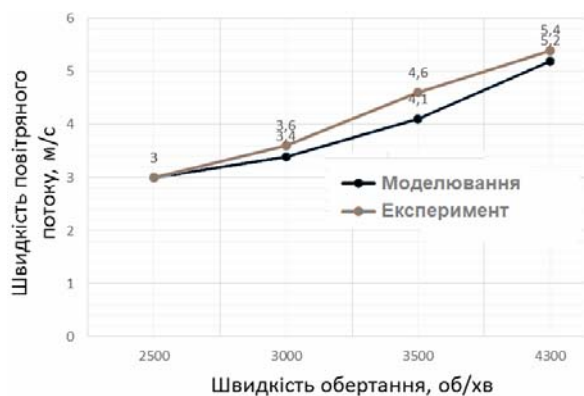
Рисунок 5. Фронтальна панель SCADA системи лабораторної установки

V. ВИСНОВКИ

У роботі обґрунтовано питання ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії, Виконано дослідження працездатності ГПЕУ з розробкою мікропроцесорної системи управління, що використовує новий алгоритм управління і програмне забезпечення до управління газоповітряною енергетичною установкою. Для перевірки на адекватність розроблених алгоритмів управління і програмного забезпечення розроблена лабораторна газоповітряна енергетична установка.

Отримані результати є продовженням раніше проведених досліджень, які відносяться до дослі-

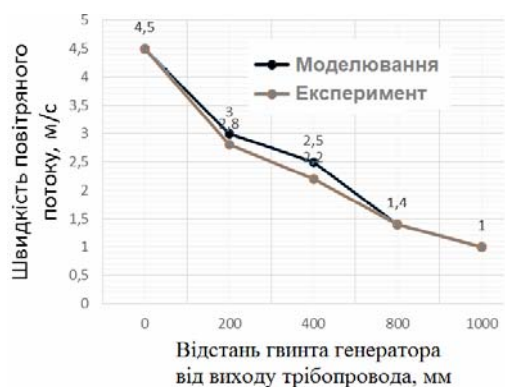
дження процесу вироблення альтернативної електричної енергії в промислових умовах, і направлені на покращення якості вироблення електричної енергії за рахунок розробки новітніх способів і пристроїв для їх реалізації. Це значно покращує енергоефективність ГПЕУ, при використанні сучасної елементної бази для реалізації таких пристроїв.



а)



б)



в)

Рисунок 6. Графіки зміни швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу до (а) і після гвинта, кінематично пов'язаного з ротором генератора (б), у функції зміни швидкості обертання лопатів вентилятора і від відстані гвинта генератора на виході трубопроводу (в)

Результати досліджень будуть корисними в алгоритмах системи автоматичного керування ГПЕУ при модернізації або розробці нових систем управління. У

підсумку виконаних досліджень, зроблені наступні висновки:

1. На основі розробленої математичної моделі та отриманих результатів дослідження газоповітряних технологічних установок промислового підприємства у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation розроблений алгоритм управління ГПЕУ, який забезпечує виконання технічних вимог, що пред'являються до управління ГПЕУ. Використання розподілу газоповітряних потоків будь-якої складності, отриманих на основі дослідження повністю інтегрованого програмного продукту SolidWorks, одержало подальший розвиток в алгоритмах роботи мікропроцесорної системи управління ГПЕУ для промислового використання.

2. Розроблені алгоритми дозволили використати сучасне програмне забезпечення для мікропроцесорної системи управління ГПЕУ. Програмне забезпечення складається з простих і дешевих технічних засобів управління ГПЕУ і дозволило використати найбільш простий мікроконтролер Arduino Uno.

3. Удосконалена структурна схема управління ГПЕУ, роботою якої управляє мікроконтролер за сигналами з датчиків: обертів, струму, напруги, температури електродвигуна вентилятора, обертів і напруги генератора та датчика заряду акумулятора. Це забезпечується раціональним використанням газоповітряних потоків технологічних установок і впливає на отримання максимальної електричної енергії.

4. Уперше на основі виконаних досліджень технологічних процесів на віртуальній моделі в середовищі LabVIEW розроблено програмне забезпечення для зв'язку ГПЕУ зі SCADA системою, яка встановлена на ЕОМ. Через інтерфейс USB-2 ГПЕУ з'єднується з ЕОМ. Це дає можливість дистанційно управляти роботою ГПЕУ і контролювати основні режими її роботи.

Удосконалена мікропроцесорна система управління з розробленими алгоритмами і програмним забезпеченням для роботи газоповітряної енергетичної установки, що використовує кінетичну енергію відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії, може бути використана в промислових умовах. Впровадження газоповітряних енергетичних установок із мікропроцесорною системою і SCADA системою дозволить підвищити енергоефективність роботи технологічних установок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. World Wind Energy Association, "2014 half-year report." [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.
- [2]. Rodrigo, T.P., Silvio, F.R., Edwin, W., Ricardo, S., Pavol, B., Jan, P. (2013). Operation and Power Flow Control of Multi-Terminal DC Networks for Grid In-

- tegration of Offshore Wind Farms Using Genetic Algorithms. *Energies*, 6, 1–26. doi:10.3390/en6010001.
- [3]. Alexander, K., Bruno, U.S., Lueder, V.B. (2016). Curtailment in a Highly Renewable Power System and Its Effect on Capacity Factors. *Energies*, 9, 510. doi: 10.3390/en9070510.
- [4]. Design and operation of power systems with large amounts of wind power [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T268.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.
- [5]. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon1.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.12.17.
- [6]. Инженерный анализ в среде SolidWorks Simulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: sapr.ru/article/19880. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.
- [7]. Івашко О. Як підкорили вітер сучасні Дон Кіхоти : в Миколаїв. обл. запрацювала перша промислова вітроелектростанція // Уряд. кур'єр, 2012. – № 2. – С.8.
- [8]. PSS E Wind and Solar Models [Електронний ресурс]// UWIG/EnerNex/DOE Workshop. – Електрон. дані. – NY, 2011. – Режим доступу: http://www.nyiso.com/public/webdocs/markets_operations/services/planning/Documents_and_Resources/Conferences_and_Workshops/DOE_Wind_Turbine_Plant_Mdlg_wkshop/PSSE_Wind_Solar_Models_Kazachkov.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 07.12.17
- [9]. Мацкевич П. Використання енергії вітру // ЕКОінформ. –2011. – № 5. – С. 36-38.
- [10]. Кузьо І. В. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2010. – № 679. – С. 61-67.
- [11]. Петренко Н. Ветрогенераторы малой мощности // Радиоаматор. – 2013. – № 7. – С. 40-43.
- [12]. Соколовский Ю. Б. Повышение эффективности ветровых энергетических установок / Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский, Л. Г. Лимонов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 9. – С. 28-37.
- [13]. The wind energy fact sheet - Office of Environment and Heritage [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.environment.nsw.gov.au/resources/households/WindEnergyfactsheet.pdf>. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.
- [14]. Алексієвський Д. Г. Визначення робочої області ШППН у складі електромеханічної системи ВЕУ зі змінною швидкістюобертання [Текст] / Д. Г. Алексієвський, П. Д. Андрієнко, К. О. Туришев, О.О. Панкова // Електротехніка та електроенергетика. – 2017 – №1 – С. 79 – 85. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-10
- [15]. Немудрий І. Ю. Підвищення ефективності перетворення електроенергії в вітроелектричних установках з аеродинамічною мультиплікацією [Текст] / І. Ю. Немудрий // Електротехніка та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 79 – 86. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-13
- [16]. Шихайлов М. О. Особенности конструкций и использование ветроэнергетических установок малой мощности / М. О. Шихайлов, Ю. П. Фаворский // Электрик. – 2006. – № 1-2. – С. 29-31.
- [17]. Makarchuk O. The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Shchur // Przeglad Elektrotechniczny (ElectricalReview). – 2015. – R. 91, nr 1. – P. 179-182.
- [18]. Wind turbine control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl_Presentation.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.
- [19]. Скрипник О.І. Математична модель вітрогенератора типу DFIG для аналізу стійкості електричних систем / О. І. Скрипник, В.С. Коновал // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №2 (15) - 2013. – С. 234-239.
- [20]. M. Savaghebi, et al. (2012). Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid, *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 797-807.
- [21]. T. L. Vandoorn, et al. (2012). Analogy Between Conventional Grid Control and Islanded Microgrid Control Based on a Global DC-Link Voltage Droop, *Ieee Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1405-1414.
- [22]. Пат. № 62126 Україна, МПК (2011.01) H02J 13/00. Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням / П. Г. Плешков, І. В. Савеленко, О. І. Сіріков; заявн. Кіровоградський національний технічний університет. - №201101588; заявл. 11.02.2011; опубл. 10.08.2011; Бюл. № 15. – 2 с.
- [23]. Пат. № 109070 Україна, МПК (2016.01) H02J 13/00. Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням / В. Й. Лобов, Є. Л. Єфіменко, М. П. Тиханський, М. С. Чернюк; заявн. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - №201600998; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016; Бюл. № 18. – 7 с.
- [24]. Пат. № 105303 Україна, МПК (2016.01) F03D 1/04, F03D 9/25. Спосіб отримання електроенергії / Лобов В.Й., Лобова К.В.; заявн. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № 201509470; заявл. 01.10.2015; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. – 6 с.

- [25]. Пат. № 119021 Україна. МПК (2006) F03B 13/00/ Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням технологічної установки / Лобов В.Й., Лобова К.В. Даць А.В.; заявл. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № u201701906; заявл. 27.02.2017; опубл. 11. 09. 2017, Бюл. №17. - 7 с.
- [26]. Бойко Е.А. Аэродинамический расчет котельных установок / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.И. Охорзина. - Красноярск: КГТУ, 2006. - 71 с.
- [27]. Ложечников В.Ф. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности / В.Ф. Ложечников, А.А. Стопакевич // Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии / Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр). - Киев-Одесса: ИСЦ. - 1999. - № 1. - Ч.2. - С. 167-176.
- [28]. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике/ А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040с.

Стаття надійшла до редакції 6.12.2017

УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

- ЛОБОВ В.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, *e-mail: lobovvjcheslav@gmail.com*;
- ЛОБОВА К.В. студентка кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, *e-mail: karinalobova409@gmail.com*;
- ДАЦЬ А.В. студент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, *e-mail: dats1996@yandex.ru*;

Цель работы. Обосновать вопрос эффективного использования кинетической энергии отработанных технологической установкой газозвоздушных потоков для выработки электрической энергии, что позволит разработать новый алгоритм управления и создать новое программное обеспечение для управления газозвоздушной энергетической установкой. Для проверки на адекватность разработанных алгоритмов управления и программного обеспечения разработать лабораторную газозвоздушную энергетическую установку.

Методы исследования. Для исследования распределения газозвоздушных масс в технологических установках промышленного предприятия использован метод имитационного моделирования, выполненный в программной среде SolidWorks Flow Simulation. Метод имитационного моделирования позволил разработать новый алгоритм управления и создать новое программное обеспечение с учетом основных технических требований, предъявляемых к управлению газозвоздушной энергетической установкой. Для проверки работоспособности разработанных алгоритмов и программного обеспечения управления газозвоздушной энергетической установкой использован метод физического моделирования, проведенного на разработанной лабораторной установке, соединенной через интерфейс USB с ЭВМ, имеет виртуальную модель SCADA системы, представленную в среде LabVIEW.

Полученные результаты. На основе моделирования газозвоздушных потоков на разработанной математической модели оптимально выбранные соотношения размеров трубопровода, рационально определены расходы газозвоздушной смеси, необходимой для наиболее эффективной работы газозвоздушной энергетической установки, то есть в рабочей зоне газозвоздушного тракта винт генератора контактирует с наиболее значительными потоками, обеспечивая максимальный эффект вращения. Полученные результаты исследования газозвоздушных потоков технологических установок промышленного предприятия в программной среде SolidWorks Flow Simulation и на их основе разработаны основные технические требования, предъявляемые к управлению газозвоздушной энергетической установкой. Разработан оптимальный алгоритм управления, который позволил внедрить его в схему управления газозвоздушной энергетической установки с микропроцессором или специализированным микроконтроллером.

Научная новизна. Найдены новые возможности дальнейшего усовершенствования известных базовых математических моделей кинетики газозвоздушных потоков и предложены варианты адаптации в области газодинамики для оценки расходов газозвоздушных потоков при работе вентиляторной установки на трубопроводе. Разработана структурная схема и алгоритмы управления газозвоздушной энергетической установкой, в которую входят вентилятор, генератор, трубопровод и блок управления, выполненный на основе использования микроконтроллера Arduino Uno. Разработан также алгоритм подпрограммы для соединения газозвоздушной энергетической установки со SCADA системой.

Практическая ценность. Предложенный способ выработки электрической энергии газозвоздушной энергетической установкой с микропроцессорной системой управления, как показали расчеты, подтвержденные экспериментальными исследованиями на лабораторной установке, позволяет уменьшить до 20% количества

затраченной электроэнергии технологической установкой и может быть использован в промышленных условиях. Внедрение газоздушных энергетических установок с микропроцессорной системой и SCADA системой позволит повысить энергоэффективность работы технологических установок.

Ключевые слова: технологическая установка; газоздушные потоки; электрическая энергия; управление; микроконтроллер; алгоритмы.

MANAGEMENT OF GAS-AIR ENERGY INSTALLATION OF INDUSTRIAL ENTERPRISE

- LOBOV V.Y. associate professor, associate professor of the department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: lobov-vjcheslav@gmail.com;
- LOBOVA K.V. student of the department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: karinalobova409@gmail.com;
- DATS A.V. student of the department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: dats1996@yandex.ru;

Purpose. The goal of the work is to substantiate the issue of effective use of kinetic energy of gas-air flows used by the technological installation for generating electric power, which will allow developing a new control algorithm and creating new software for controlling the gas-air power plant. To test the adequacy of the developed control algorithms and software, to develop a laboratory gas-air power plant.

Methodology. To investigate the distribution of air-gas mass in process plants used industrial plant simulation method performed in software SolidWorks Flow Simulation. The method of simulation allowed to develop a new control algorithm and create new software taking into account the basic technical requirements for the management of the gas-air power plant. To test the efficiency of the developed algorithms and control software for the gas-air power plant, a physical modeling method was used on a developed laboratory installation connected via a USB interface with a computer and has a virtual model of the SCADA system presented in the LabVIEW environment.

Findings. Based on the modeling of gas-air flows on the developed mathematical model, the optimal ratios of pipeline sizes are rationally determined, the gas-air mixture costs necessary for the most efficient operation of the gas-air power plant, that is, in the working zone of the gas-air path, the generator screw contacts the most significant flows, providing the maximum effect rotation. The obtained results of research of gas-air flows of technological installations of an industrial enterprise in the software environment of SolidWorks Flow Simulation and on their basis the basic technical requirements for the management of a gas-air power plant are developed. An optimal control algorithm has been developed that enabled it to be introduced into the control scheme of a gas-air power plant with a microprocessor or a specialized microcontroller.

Originality. New possibilities for further improvement of the known basic mathematical models of the kinetics of gas-air flows have been found and variants of adaptation in the field of gas dynamics have been proposed for estimating the expenditure of gas-air flows during the operation of a fan installation on a pipeline. The structural scheme and algorithms for controlling the gas-air power plant are developed, which includes a fan, a generator, a pipeline and a control unit based on the use of the Arduino Uno microcontroller. The algorithm of the subroutine for connecting the gas-air power plant with the SCADA system.

Practical value. The proposed method of generating electric power by a gas-air power plant with a microprocessor control system, as shown by calculations confirmed by experimental studies on a laboratory installation, allows to reduce up to 20% of the amount of spent electricity by a process unit and can be used in industrial conditions. The introduction of gas-air power plants with a microprocessor system and a SCADA system will improve the energy efficiency of process plants.

Keywords: technological installation; gas-air streams; electric energy; control; microcontroller; algorithms.

REFERENCES

- [1]. World Wind Energy Association, "2014 half-year report." [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.
- [2]. Rodrigo, T.P., Silvio, F.R., Edwin, W., Ricardo, S., Pavol, B., Jan, P. (2013). Operation and Power Flow Control of Multi-Terminal DC Networks for Grid Integration of Offshore Wind Farms Using Genetic Algorithms. Energies, 6, 1–26. doi:10.3390/en6010001.
- [3]. Alexander, K., Bruno, U.S., Lueder, V.B. (2016). Curtailment in a Highly Renewable Power System and Its Effect on Capacity Factors. Energies, 9, 510. doi: 10.3390/en9070510.
- [4]. Design and operation of power systems with large amounts of wind power [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T268.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.
- [5]. Enerhetychna stratehiya Ukrainy na period do 2030 roku [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu:

- zakon1.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.12.17.
- [6]. Inzhenernyy analiz v srede SolidWorks Simulation [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: sapr.ru/article/19880. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.
- [7]. Ivashko, O. (2012). Yak pidkoryly viter suchasni Don Kikhoty : v Mykolayiv. obl. zapratsyuvala persha promyslova vitroelektrostantsiya, Uryad. kur'yer, 2, 8.
- [8]. PSS E Wind and Solar Models [Elektronnyy resurs]// UWIG/EnerNex/DOE Workshop. – Elektron. dani. – NY, 2011. – Rezhym dostupu: http://www.nyiso.com/public/webdocs/markets_operations/services/planning/Documents_and_Resources/Conferences_and_Workshops/DOE_Wind_Turbine_Plan_t_Mdlg_wkshop/PSSE_Wind_Solar_Models_Kazachkov.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 07.12.17.
- [9]. Matskevych, P. (2011). Vykorystannya enerhiyi vitru. EKOinform. 5, 36-38.
- [10]. Kuzo, I. V., Korendiy V. M. (2010). Obhruntuvannya rozvytku vitroenergetichnykh ustanovok maloyi ta nadmaloyi potuzhnosti, Visn. Nats. un-tu "Lviv. politehnika". Optymizatsiya vyrobnychkykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol v mashynobuduvanni ta pryadobuduvanni, Lviv, 679, 61-67.
- [11]. Petrenko, N. (2013). Vetroheneratory maloy moshchnosti. Radyoamator, 7, 40-43.
- [12]. Sokolovskiy, YU. B., Sokolovskiy, A. YU., Limonov L. G. (2014). Povysheniye effektivnosti vetrovykh energeticheskikh ustanovok. Energoberezeniye. Energetika. Energoaudit, 9, 28-37.
- [13]. The wind energy fact sheet - Office of Environment and Heritage [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.environment.nsw.gov.au/resources/households/WindEnergyfactsheet.pdf>. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.
- [14]. Alekseyevsky P. D., Andrienko K. O., Turyshev K. O., Pankova O. O. Definition of the working area of the IPPN in the electromechanical system of the VEU with variable speed rotation, Electrical Engineering And Power Engineering, 2017, 1, 79–85. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-10
- [15]. Nemudryi I. Yu. Improving the efficiency of converting electricity into wind turbines with aerodynamic animation, Electrical Engineering And Power Engineering, 2014, 1, 79–86. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-13
- [16]. Shikhaylov, M. O., Favorskiy, YU. P. (2006). Osobennosti konstruksiy i ispol'zovaniye vitroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti. Elektrik, 1-2, 29-31.
- [17]. Makarchuk, O., Rusek, A., Shchur, I., Shchur, V. (2015). The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine. Przegląd Elektrotechniczny, 91, 1, 179-182.
- [18]. Wind turbine control [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl_Presentation.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.
- [19]. Skrypnyk, O. I. Konoval, V. S. (2013). Matematychna model vitroheneratora typu DFIG dlya analizu stiykosti elektrychnykh system, Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotehnika i enerhetyka», 2 (15), 234-239.
- [20]. Savaghebi, M., et al. (2012). Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid, Smart Grid, IEEE Transactions on, 3, 797-807.
- [21]. Vandoorn, T. L., et al. (2012). Analogy Between Conventional Grid Control and Islanded Microgrid Control Based on a Global DC-Link Voltage Droop, Ieee Transactions on Power Delivery, 27, 1405-1414.
- [22]. Pat. № 62126 Ukrayina, MPK (2011.01) H02J 13/00. Prystryi dlya avtomatychnoho keruvannya elektrospozhyvannyam / P. H. Plyeshkov, I. V. Savelenko, O. I. Sirikov; zayavn. Kirovohradskyy natsionalnyy tekhnichnyy universytet. - №201101588; zayavl. 11.02.2011; opubl. 10.08.2011; Byul. № 15. – 2 s.
- [23]. Pat. № 109070 Ukrayina, MPK (2016.01) H02J 13/00. Prystryi dlya avtomatychnoho keruvannya elektrospozhyvannyam / V. Y. Lobov, YE. L. Yefimenko, M. P. Tykhanskyy, M. S. Chernyuk; zayavn. DVNZ «Kryvorizkyy natsionalnyy universytet». - №201600998; zayavl. 08.02.2016; opubl. 26.09.2016; Byul. № 18. – 7 s.
- [24]. Pat. № 105303 Ukrayina, MPK (2016.01) F03D 1/04, F03D 9/25. Sposib otrymannya elektroenerhiyi / V. Y. Lobov, K. V. Lobova; zayavn. DVNZ «Kryvorizkyy natsionalnyy universytet». - № 201509470; zayavl. 01.10.2015; opubl. 10.03.2016, Byul. № 5. – 6 s.
- [25]. Pat. № 119021 Ukrayina, MPK (2006) F03B 13/00/ Prystryi dlya avtomatychnoho keruvanya elektrospozhyvannyam tekhnolohichnoyi ustanovky / Lobov V.Y., Lobova K.V. Dats A.V.; zayavn. DVNZ «Kryvorizkyy natsionalnyy universytet». - № u201701906; zayavl. 27.02.2017; opubl. 11.09.2017, Byul. №17. – 7 s.
- [26]. Boyko, E. A., Derynh, I. S., Okhorzyna, T. I. (2006). Aerodinamicheskyy raschet kotel'nykh ustanovok. Krasnoyarsk: KGTU, 71.
- [27]. Lozhechnikov, V. F., Stopakevich, A. A. (1999). Struktura mnogomernoy matematicheskoy modeli dinamiki barabannogo kotla sredney moshchnosti. Optimizatsiya upravleniya, informatsionnyye sistemy i komp'yuternyye tekhnologii. Trudy Ukrainской akademii ekonomicheskoy kibernetiki (Yuzhnyy nauchnyy tsentr). Kiyev-Odessa: ISTS, 1, 2, 167–176.
- [28]. Alyamovskiy, A. A., Sobachkin, A. A., Odintsov, Ye. V., Kharitonovich, A. I., Ponomarev N. B. (2008). SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike. SPb. BKHV-Peterburg, 1040.