АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-7-12

УДК 681.5

І. А. Поліщук[1]
Д. В. Столбов[1]

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНОЇ ТРІСКИ У КОТЛАХ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглянуто недоліки наявних систем керування котлів, які працюють на деревних тріски. Важливим фактором є вміст вологи у деревній трісці, який суттєво впливає на ефективність процесу згоряння, продуктивність котла та рівень шкідливих викидів, зокрема, викидів чадного газу.

Виконано детальний аналіз наявних методів оптимізації процесу горіння у котлах, які працюють на деревній трісці, а саме зазначено, що класичні системи керування не завжди здатні враховувати зміни у властивостях палива в реальному часі, що обмежує їхню ефективність. Заначено необхідність використання цифрових двійників та алгоритмів машинного навчання для прогнозування зміни вмісту вологи у деревній трісці і забезпечення оптимального співвідношення паливо-повітря, що дозволяє підвищити ефективність використання палива і зменшити шкідливі викиди.

Запропоновано створення цифрового двійника для оптимізації процесу спалювання у котлі на базі хмарних сервісів, який інтегрується з наявними системами автоматизації котла. Вказано, що хмарні сервіси надають переваги масштабованої та гнучкої архітектури для побудови цифрового двійника. Виконано порівняльний аналіз хмарних сервісів Microsoft Azure і Amazon Web Services та вибрано найвигідніше рішення для реалізації функцій цифрового двійника. Розроблена архітектура цифрового двійника, яка передбачає застосування протоколу OPC UA для забезпечення надійної передачі даних. Передбачено застосування функції автоматичного визначення моделі цифрового двійника з урахуванням вхідних даних, що спрощує процес його створення.

Подано результати дослідження зміни вологості деревної тріски, проведеного на базі Корюківської ТЕС. Враховуючи отримані результати, запропоновано впровадження додаткової системи регулювання вмісту вологи у трісці шляхом зрошування водою. Ця система дозволяє підтримувати вміст вологи на заданому рівні у рекомендованому діапазоні 20…30 %, за умови надмірно сухої сировини. Для реалізації системи та забезпечення точнішого вимірювання вмісту вологи і вирішення проблем з неоднорідністю сировини застосовано додатковий датчик, встановлений над стрічкою конвеєра подачі палива у бункер котла.

Ключові слова: котел, деревна тріска, вміст вологи, цифровий двійник, машинне навчання, хмарні сервіси, оптимізація спалювання.

Вступ

Тенденції розвитку сучасної енергетики свідчать про зростання ролі відновлювальних джерел енергії. Це насамперед пов’язано з підвищенням екологічних норм, зменшенням викидів парникових газів та обмеженістю традиційних енергоресурсів. Використання сонячних та вітрових електростанцій на заміну тепловим, які спалюють природний газ або кам’яне вугілля, є найтиповішим підходом і впроваджується у багатьох країнах світу, зокрема і в Україні. Але варто зазначити, що енергія сонця та вітру має свої обмеження, пов’язані з особливостями клімату, що не дає можливості її використання безперервно. Тому потрібні джерела генерації, які будуть забезпечувати електроенергію під час зниження продуктивності сонячних та вітрових електростанцій. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок використання електростанцій, які працюють на біома-

© І. А. Поліщук, Д. В. Столбов, 2024

сі, що є відновлювальним джерелом енергії, а також дають можливість забезпечувати необхідні екологічні норми.

В Україні одним з доступних видів палива є деревна тріска, яку, до прикладу, можна отримати з відходів деревообробного виробництва. Доступність палива, можливість отримання так званого «зеленого» тарифу за вироблену електроенергію, а також знищення об'єктів теплової енергетики внаслідок агресії сусідньої терористичної країни, спричинили зростання зацікавленості інвесторів у будівництві електростанцій, які спалюють деревину для виробництва електроенергії. Такі порівняно невеликі електростанції, з електричною потужністю 3…5 МВт, до того ж дають можливість диверсифікації та розподілення енергопостачання, що особливо важливо у військовий час. Котли для спалювання деревної тріски мало чим відрізняються від котлів, які спалюють вугілля чи газ. Але такі котли мають іншу систему подачі палива. Склад деревної тріски може сильно відрізнятися в залежності від джерела сировини. Найбільше на продуктивність котла впливає вміст вологи у трісці [1]. Зі збільшенням вмісту вологи у трісці знижується продуктивність котла, збільшуються викиди чадного газу CO [2]. В свою чергу за низьких значень вмісту вологи у деревній трісці виникають складнощі з регулюванням навантаження через занадто швидке і неконтрольоване згоряння. До того ж, зміна вмісту вологи у трісці впливає на регулювання викидів продуктів згоряння та кількість золи, що дуже важливо для дотримання екологічних норм [3], [4]. Тому виникає необхідність у створенні сучасних цифрових систем автоматизації, які дозволяють оптимізувати процес спалювання тріски для ефективного використання палива та зменшення шкідливих викидів.

Аналіз досліджень і публікацій

Оптимізація процесу горіння у котлах, які працюють на деревній трісці, потребує глибокого аналізу різних факторів. В [5] розглянуто питання зниження викидів CO в котлах, що працюють на деревній трісці, шляхом оптимізації процесу згоряння. В дослідженні проаналізовано вплив характеристик пального, а саме вмісту вологи та розміру тріски. Також проведено експерименти за різних навантажень на котел для дослідження впливу коефіцієнта надлишкового повітря та розподілу первинного та вторинного повітря. Визначено, що найважливішим фактором, що впливає на викиди CO, є вологість тріски. Запропоновано оптимізацію системи управління котлом для зменшення викидів CO шляхом регулювання коефіцієнта надлишкового повітря, співвідношення первинного і вторинного повітря в залежності від потужності.

У статті [6] описано алгоритм оптимізації процесу горіння для котлів на деревній трісці для досягнення економії палива. Цей алгоритм регулює подачу палива та повітря на основі концентрації кисню в димових газах, а також дозволяє адаптувати роботу котла до змінного навантаження, зменшуючи ризик утворення небезпечних сумішей димових газів.

Оскільки вміст вологи у деревній трісці є ключовим фактором, що суттєво впливає на викиди та продуктивність котла, то його вимірювання відіграє важливу роль, але є складним завданням. В [7] детально проаналізовано різноманітні методи визначення вологості у деревній трісці, виконано порівняння традиційних методів з сучасними, такими як інфрачервона спектроскопія, ємнісний метод та томографія. На основі проведеного аналізу визначено проблеми з неоднорідністю матеріалу, які впливають на точність вимірювання. Також акцентовано увагу на необхідності проведення вимірювань у реальному часі з високою точністю і впровадження сучасних технологій машинного навчання для аналізу даних та створення точніших моделей прогнозування вологості.

Одним із сучасних підходів для оптимізації роботи різних систем є використання цифрових двійників. В [8] досліджується інтеграція концепцій інтернету речей та цифрових двійників у кіберфізичних системах, запропоновано модель, яка дозволяє з'єднувати фізичні об'єкти з цифровими представленнями, що є важливим для моніторингу та управління розумними фабриками. Також акцентовано увагу на важливості розробки програмного інтерфейсу для доступу до функціональності цифрових двійників, що дозволяє зовнішнім додаткам взаємодіяти з ними, з системами зберігання даних, зокрема з системами управління подіями, людино-машинного інтерфейсу, аналізу даних та прогнозування на основі моделей.

Проведений аналіз наявних методів та підходів до оптимізації процесів горіння та зменшення витрати палива у котлах, які спалюють деревну тріску, вказує на необхідність вдосконалення систем автоматизації з використанням сучасних технологій, зокрема застосування цифрових двійників для аналізу, моделювання та прогнозування їхньої роботи.

Метою роботи є розробка цифрового двійника для оптимізації спалювання деревної тріски у котлах з використанням хмарних сервісів.

Розробка цифрового двійника для оптимізації спалювання деревної тріски у котлах

Процес створення цифрового двійника можна розділити на окремі етапи, зокрема можна виділити етапи збору, зберігання та оброблення даних, аналізу даних та машинного навчання. Оскільки цифровий двійник передбачає двосторонню комунікацію фізичного об'єкта або процесу з його цифровою копією, то необхідно забезпечити надійні і безпечні канали зв'язку. Також цифровий двійник потребує накопичення великої кількісті історичних даних для обробки і побудови моделі. Враховуючи ці вимоги, розгортання цифрового двійника для інтеграції з реальним об'єктом може бути доволі складною задачею, оскільки необхідно створити інфраструктуру з відповідним потужним серверним обладнанням. Більше того, заздалегідь складно визначити необхідні характеристики серверів, оскільки об'єми зберігання даних та необхідна обчислювальна потужність важко прогнозовані та залежать від типу моделі цифрового двійника. Тому для побудови цифрового двійника запропоновано використовувати хмарні сервіси, які забезпечують масштабованість, гнучкість, високу надійність та безпеку. Це дозволить легко збільшувати або зменшувати ресурси відповідно до потреб, з можливістю оплати за фактичне використання, не купуючи фізичне обладнання і не витрачаючи кошти на його обслуговування та оновлення.

Для вибору провайдера хмарних сервісів для побудови цифрових двійників необхідно враховувати можливість інтеграції обладнання, наявність необхідних сервісів та вартість послуг. Дослідження виконано для котла Корюківской ТЕС, потужністю 4 МВт. Наявна система автоматизації котла виконана на базі обладнання компанії Siemens, з центральним програмованим логічним контролером (ПЛК) котла S7-1500, який є основним джерелом даних. ПЛК котла має інтерфейс Ethernet та має можливість передавати дані за протоколами Profinet, Modbus TCP, SNMP OPC UA та іншими. Враховуючи можливості інтеграції ПЛК котла, проаналізовано сервіси різних хмарних провайдерів, які також пропонують сервіси для побудови цифрових двійників. Для порівняння вибрано хмарні сервіси Microsoft Azure та Amazon Web Services (AWS), які мають найбільшу клієнтську базу та пропонують широкі можливості. До того ж, вибираючи провайдера хмарних сервісів, важливо враховувати відстань до дата центрів, щоб забезпечити необхідну швидкість передачі інформації. Обидва провайдери пропонують велику кількість моделей для машинного навчання, включно з функцією автоматичного підбору необхідної моделі. На вартість користування хмарними сервісами для побудови цифрових двійників в основному впливає обсяг даних, які передаються і зберігаються. Тому для порівняння оцінено вартість передачі та зберігання однієї змінної з інтервалом в 1 секунду протягом одного календарного місяця. Для Microsoft Azure вибрано регіон розташування дата центру у північній Європі (North Europe), а для AWS — Франкфурт, Німеччина. Сервіс Digital Twin від Microsoft Azure передбачає інтегровану функцію збору і зберігання даних, тоді як у AWS для цієї задачі відокремлений сервіс IoT SiteWise. Отримані дані подано у табл. 1.

З отриманих даних можна зробити висновок, що AWS пропонує нижчу вартість реалізації функцій цифрового двійника для клієнтів з України. Варто зазначити, що значення є орієнтовними і можуть змінюватись в залежності від категорії клієнта, системи знижок і часу заключення контракту. Враховуючи вартість послуг, а також можливості хмарних провайдерів, подальшу розробку цифрового двійника вирішено виконувати із застосуванням AWS.

Таблиця 1

Орієнтовна вартість обробки і зберігання однієї змінної на місяць

Сервіс	Microsoft Azure Digital Twin	AWS IoT SiteWise
Ввід даних	3,6	0,07
Обробка даних	6,0	3,15
Запити до бази даних	1,8	7,3
Загальна вартість, $ США	11,4	10,52

Для побудови цифрового двійника на базі хмарних сервісів AWS застосовується шлюз обміну даними AWS IoT SiteWise Edge, який встановлюється на локальному сервері підприємства. Цей шлюз забезпечує захищену передачу даних від ПЛК котла по протоколу OPC UA до дата центру. Отримані дані від AWS IoT SiteWise Edge обробляються і зберігаються в часовій базі даних AWS IoT SiteWise. Зі свого боку AWS IoT SiteWise передає дані для Amazon SageMaker для машинного навчання і побудови моделі. Отримана модель в Amazon SageMaker передається через AWS IoT SiteWise в AWS IoT TwinMaker для побудови цифрового двійника. Для візуалізації даних цифрового двійника використовується Amazon Grafana. Загальна архітектура показана на рис. 1.

Як зазначено вище, одним з ключових параметрів, які впливають на процес спалювання деревної

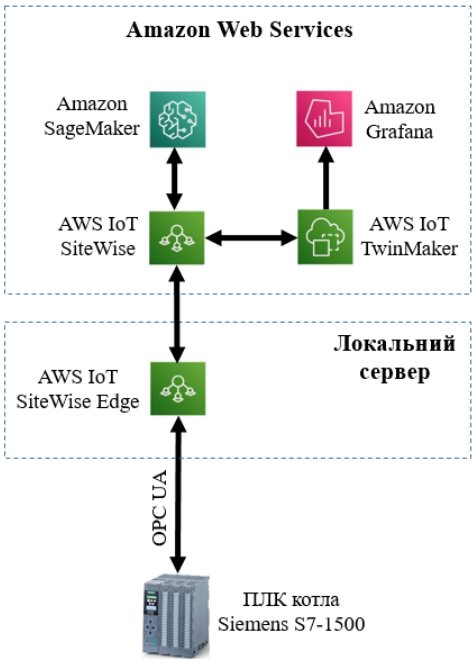

Рис. 1. Архітектура програмно-технічного комплексу для побудови цифрового двійника

тріски, є вміст вологи.

Тому, щоб отримати переваги застосування цифрового двійника, модель повинна отримувати дані про вміст вологи у тріски. На Корюківській ТЕС вимірювання вмісту вологи у деревній тріски відбувається методом лабораторного аналізу один раз на добу. Такий спосіб не дає можливості швидко враховувати неоднорідність вмісту вологи у деревній тріски і змінювати налаштування автоматизованої системи співвідношення паливо-повітря для оптимізації спалювання та зменшення викидів шкідливих речовин. Більше того, особливістю Корюківської ТЕС є те, що частина сировини для палива надходить від місцевої меблевої фабрики. Ця сировина має значно нижчий вміст вологи у тріски, ніж сировина, отримана від лісгоспів. На рис. 2 показані значення вмісту вологи у тріски у червні 2024 року, отримані лабораторним методом вимірювання.

Як видно з отриманих результатів, значення вмісту вологи у деревній тріски відхиляється від рекомендованого діапазону 20…30 % [3]. Тому виникає необхідність в регулюванні вмісту вологи у тріски. Це регулювання можливе шляхом змішування різних порцій з різним вмістом вологи, але застосовувати такий підхід на практиці складно і економічно недоцільно.

Рис. 2. Зміна вмісту вологи у деревній тріски протягом 30 днів

Також, як видно з графіка, вміст вологи здебільшого перевищує рекомендований діапазон. За таких умов потрібно осушення тріски, але використання будь-яких додаткових систем осушення потребує значних додаткових витрат на енергоресурси, що теж є економічно не вигідним. В періоди, коли вміст вологи низький, запропоновано застосовувати зрошення тріски водою через клапан вприскування з сигналом керування 4…20 мА, що не потребує великих капіталовкладень. Для регулювання вмісту вологи, до ПЛК котла підключається датчик вмісту вологи MoistTech IR-3000 з вихідним сигналом 4…20 мА, який встановлюється над стрічкою конвеєра подачі палива у бункер палива котла. На рис. 3 показана структурна схема контролю і регулювання вмісту вологи у тріски.

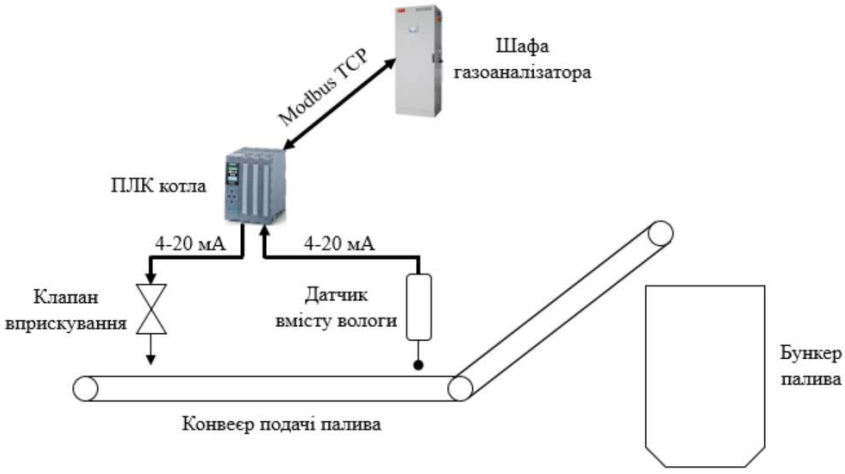

Рис. 3. Структурна схема контролю та регулювання вмісту вологи у деревній тріски

Крім можливості регулювання вмісту вологи у тріски за від-

повідних умов запропонована система, яка дає можливість вимірювання вмісту вологи у реальному часі, безпосередньо перед спалюванням у котлі. Це дозволяє вирішити проблему з неоднорідністю палива та використовувати виміряне значення вмісту вологості для навчання моделі цифрового двійника. Також до ПЛК котла через інтерфейс Ethernet за протоколом Modbus TCP підключена шафа газоаналізатора ABB AO2000, яка передає виміряні показники вмісту CO, CO_2, NO, NO_2, O_2 у димових газах.

Таким чином, розроблена додаткова система регулювання вмісту вологи у трісці і режими її роботи використовуються для навчання моделі цифрового двійника. Також для навчання моделі використовуються виміряні значення з газоаналізатора та параметри роботи системи керування співвідношення паливо-повітря.

Загальний перелік параметрів для навчання моделі, які використовує цифровий двійник, має такий вигляд:

– вміст вологи у деревній трісці;
– положення клапана вприскування;
– задане значення регулятора вмісту вологи у деревній трісці;
– потужність котла;
– швидкість обертання вентилятора первинного повітря;
– швидкість обертання вентилятора вторинного повітря;
– вміст CO у димових газах;
– вміст CO_2 у димових газах;
– вміст NO у димових газах;
– вміст NO_2 у димових газах;
– вміст O_2 у димових газах.

Для початкового навчання моделі цифрового двійника використовувалися накопичені історичні дані за період в один місяць (червень 2024 року) з інтервалом в одну хвилину. Ці дані отримані шляхом експорту з системи моніторингу і дистанційного керування котлом Корюківської ТЕС, розробленої на базі SCADA системи Siemens WinCC. Експортовані дані у форматі JSON завантажувалися в IoT SiteWise за допомогою консолі AWS. Для подальшого уточнення моделі використовуються поточні дані з ПЛК котла і цей процес є безперервним.

Результати прогнозування моделі цифрового двійника дають можливість змінювати задане значення концентрації кисню в димових газах. Для цього сервіс AWS IoT TwinMaker передає це задане значення через AWS IoT SiteWise у ПЛК котла. Водночас в залежності від нового заданого значення концентрації кисню в димових газах, система керування співвідношення паливо-повітря змінює швидкість обертання вентилятора вторинного повітря для оптимізації спалювання деревної тріски та зменшення викидів шкідливих газів у атмосферу. Після навчання протягом 30 днів, оцінено точність моделі цифрового двійника за допомогою середньоквадратичної похибки для концентрації кисню в димових газах, яке обчислюється автоматично у Amazon SageMaker. Ця похибка становила 0,63 %, що свідчить про високий показник точності моделі.

Висновки

Запропоновано вдосконалення наявної системи автоматизації котла Корюківської ТЕС з використанням цифрового двійника, який дозволяє оптимізувати спалювання деревної тріски у котлі та зменшити викиди шкідливих речовин у атмосферу. Цифровий двійник побудований на базі хмарних сервісів Amazon Web Services з використанням функції автоматичного визначення моделі для машинного навчання у Amazon SageMaker. Для навчання моделі цифрового двійника використовуються виміряні значення вмісту вологи у деревній трісці, значення з газоаналізатора димових газів та параметри роботи системи керування співвідношенням паливо-повітря.

Розроблено додаткову систему керування для збільшення вмісту вологи у деревній трісці і підтримання на заданому рівні у рекомендованому діапазоні 20…30 %, за умови низького вмісту вологи у сировині.

Запропоновані вдосконалення системи автоматизації котла для спалювання деревної тріски з використанням цифрового двійника можуть бути корисними для будь-яких енергетичних котлів, які працюють на біомасі, вугіллі чи природному газі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] L. Dzurenda, and A. Banski, “Influence of moisture content of combusted wood on the thermal efficiency of a boiler,” *Archives of Thermodynamics*, vol. 38, no. 1, pp. 63-74, January. 2017. https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0004 .

[2] M. Bošnjaković, C. Soldan, and N. Veljić, “Influence of moisture content in wood chips on the boiler operation,” in *7th International Conference. Vallis Aurea*, Požega, Croatia, 2020, pp. 91-101.

[3] C. Schön, D. Kuptz, R. Mack, V. Zelinski, A. Loewen, and H. Hartmann, “Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers,” *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 9, no. 1, pp. 71-82, March. 2019. https://doi.org/10.1007/s13399-017-0249-7 .

[4] C. Schön, P. Roßmann, G. Schmoeckel, and H. Hartmann, “Monitoring of NOx Emission depending on wood chip quality in a medium sized biomass combustion plant,” in *27th European Biomass Conference and Exhibition*, Lisbon, Portugal, 2019.

[5] A. Quintero-Marquez, C. Bernard, A. Zoulalian, and Y. Rogaume, “Improving the Operation of an Automatic Wood Chip Boiler by Optimizing CO Emissions,” *Energy & Fuels*, vol. 28, no. 3, pp. 2152-2159, February. 2014. https://doi.org/10.1021/ef402021c.

[6] A. Steinbergs, and I. Uteshevs, “Research of Woodchip Automation System Modernization Boiler Using O2 Concentration Optimization Options in the Flue Gas,” *International Journal of Engineering and Science*, vol. 6, no. 6, pp. 56-61, July. 2016.

[7] A. Rahman, et al., “A comprehensive review on wood chip moisture content assessment and prediction,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, no. 1, January. 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113843 .

[8] C. Steinmetz, A. Rettberg, and F. Ribeiro, “Internet of Things Ontology for Digital Twin in Cyber Physical Systems,” in *VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering*, Salvador, Brazil, 2020. https://doi.org/10.1109/SBESC.2018.00030.

Рекомендована кафедрою комп’ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.10.2024

Поліщук Ігор Анатолійович — старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів навчально-наукового Інституту атомної та теплової енергетики, e-mail: polishchuk.ihor@lll.kpi.ua ;

Столбов Денис Валерійович — студент навчально-наукового Інституту атомної та теплової енергетики, e-mail: denisstolbov87@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

I. A. Polishchuk[1]
D. V. Stolbov[1]

Application of Digital Twin and Machine Learning for Optimization of Wood Chips Combustion in Boilers

[1]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The article examines the shortcomings of existing control systems for boilers operating on wood chips. A key factor is the moisture content in wood chips, which significantly affects the combustion process efficiency, boiler performance, and the level of harmful emissions, particularly carbon monoxide.

A detailed analysis of current methods for optimizing the combustion process in wood chip boilers has been carried out. It is noted that traditional control systems are often unable to account for real-time changes in fuel properties, limiting their effectiveness. The need for using digital twins and machine learning algorithms to predict changes in moisture content in wood chips and ensure optimal fuel-to-air ratios has been highlighted, as this allows for improved fuel efficiency and reduced emissions.

The article proposes the development of a digital twin to optimize the combustion process in the boiler, based on cloud services integrated with existing boiler automation systems. It is noted that cloud services provide the advantages of scalable and flexible architecture for building the digital twin. A comparative analysis of Microsoft Azure and Amazon Web Services cloud platforms was conducted, with the most suitable solution selected for implementing the digital twin functions. The architecture of the digital twin has been developed, which includes the use of the OPC UA protocol to ensure reliable data transmission. The implementation of an automatic digital twin model definition based on input data is also proposed, simplifying the process of its creation.

The results of moisture content analysis in wood chips at the Koriukivka power station are presented. Based on the findings, an additional system for regulating moisture content in wood chips via water spraying has been proposed. This system allows maintaining the moisture content at the target level within the recommended 20…30 % range, in cases of excessively dry fuel. To implement the system and ensure more accurate moisture measurements, as well as to address the issue of fuel heterogeneity, an additional sensor is installed above the fuel feed conveyor belt leading to the boiler hopper.

Keywords: boiler, wood chips, moisture content, digital twin, machine learning, cloud services, combustion optimization.

Polishchuk Ihor A. — Senior Lecturer of the Chair of Energy Process Automation of the Educational and Research Institute of Nuclear and Thermal Energy, e-mail: polishchuk.ihor@lll.kpi.ua ;

Stolbov Denys V. — Student of the Educational and Research Institute of Nuclear and Thermal Energy, e-mail: denisstolbov87@gmail.com