

На основі математичного та логічного моделювання у складі когенераційної системи розроблена технологія функціонування сушильної установки на рівні прийняття рішень щодо виробництва пелетного палива. Запропонована інтегрована система оцінки зміни вологовмісту повітря в сушильній камері, що дозволяє виконувати зміну витрати повітря, що подається на підігрів, на основі зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора, при вимірюванні температури повітря на виході із сушильної камери

Ключові слова: технологія, сушильна установка, вологовміст повітря, математичне та логічне моделювання, когенераційна система

На основе математического и логического моделирования в составе когенерационной системы разработана технология функционирования сушильной установки на уровне принятия решений для производства пеллетного топлива. Представлена интегрированная система оценки изменения влагосодержания воздуха в сушильной камере, которая позволяет изменять расход воздуха, подаваемого на подогрев, на основе изменения частоты вращения электродвигателя воздушного вентилятора, при измерении температуры воздуха на выходе из сушильной камеры

Ключевые слова: технология, сушильная установка, влагосодержание воздуха, математическое и логическое моделирование, когенерационная система

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ У СКЛАДІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Є. Є. Чайковська

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник, доцент
Кафедра теоретичної, загальної
та нетрадиційної енергетики

Одеський національний політехнічний університет
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: eechaikovskaya@gmail.com

1. Вступ

Завдяки можливості реалізації виробленої енергії за “зеленим тарифом” використання біопалива як відновлюваного джерела енергії є стимулюючим фактором для виробництва як електричної енергії, так і теплоти від одного джерела енергії [1, 2]. При виробництві пелетного палива витрати на сушку деревини складають до 25 % від загальних витрат. Вміст вологи не повинен перевищувати 10–12 %, а сира деревина, наприклад, може містити близько 50 % води. З метою енергозбереження підтримка температурного та аеродинамічного режимів сушки повинна відбуватись в узгодженій взаємодії, що можливо здобути з використанням когенераційних технологій, які мають у своєму складі первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління. Більш того, вимірювання температури та вологості повітря як сушильного агента в сушильній камері, вологості деревини, що висушується, мають не завжди достовірне використання щодо підтримки сушки деревини у зв'язку із складністю вимірів, що унеможливує використання вимірів у взаємній єдності щодо упередженого впливу на зміну параметрів сушки для забезпечення безперервного виробництва пелетного палива. Цим обґрунтовується актуальність даної роботи.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Засоби удосконалення сушильних технологій деревини базуються як на інтенсифікації процесів теплообміну в сушильній камері, так і на удосконаленні систем управління процесом сушки. В роботі [3], наприклад, визначено перевагу механічної активації матеріалу, що висушується, але за рахунок додаткових витрат на електричну енергію. В роботі [4] визначено, що на якість сушки впливають конструктивні параметри сушильної камери, але оцінка проведена при вимірюванні параметрів сушки в сушильній камері. В роботі [5] без узгодження температурного та аеродинамічного режимів сушіння матеріалу визначено вплив режимних параметрів сушки на якість сушки. В роботі [6] видані рекомендації щодо інтенсифікації теплообміну в сушильній камері, але без можливості їх використання в реальних умовах функціонування сушильної установки. Найбільш важливим показником сушки сировини є потужність сушки, що має бути більшою за одиницю та відтворює кількісне відношення вологості сировини до її рівноважної вологості. Рівноважна вологість деревини практично дорівнює стійкої вологості, яка залежить від температури повітря та його відносної вологості [7]. Для підтримки потужності сушки деревини використовують експертні системи, що базуються на вимірюванні температури повітря та його вологості в сушильній камері при вимі-

рюванні вологості деревини. Складність вимірів та неможливість використання у єдності може привести до процесу накопичення води деревиною чи припинення процесу сушки [8, 9]. Для підтримки якості сушки необхідно узгодити температурний та аеродинамічний режими сушки деревини на основі прогнозування зміни вологовмісту повітря в сушильній камері, вимірюючи температуру повітря на виході із сушильної камери щодо зміни витрати повітря, що подається, на підігрів, на основі зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – розробити енергозберігаючу технологію функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи.

Поставлена мета може бути досягнена при виконанні таких задач:

- розробити структурну схему комплексного математичного моделювання динаміки сушильної установки для здобуття еталонної оцінки зміни вологовмісту повітря;

- розробити структурні схеми логічного моделювання щодо здобуття функціональної інформації для прийняття рішень на підтримку функціонування та ідентифікацію стану сушильної установки у складі когенераційної системи;

- запропонувати інтегровану систему оцінки зміни вологовмісту повітря в сушильній камері щодо енергозберігаючої технології функціонування сушильної установки;

- оцінити практичну значущість здобутих результатів.

4. Енергозберігаюча технологія функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи

На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [10] розроблена архітектура когенераційної системи, що базується на динамічній основі – інтегрованій динамічній підсистемі, яка має у своєму складі когенераційну та сушильну установки (рис. 1). До складу сушильної установки запропоновано включити сушильну камеру, теплообмінник підігріву повітря з використанням теплоносія, що гріє, від когенераційної установки та повітряний вентилятор. Іншими блоками у складі когенераційної системи є блоки зменшення та збільшення частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора, відвантаження висушеної деревини та завантаження свіжого матеріалу, оцінки функціональної ефективності (рис. 1).

З використанням формули (1) описано математичне обґрунтування архітектури когенераційної системи:

$$CS = \left\{ \left[D(P(\delta) \langle x_0(\delta), x(\delta), f(\delta), K(\delta), y(\delta), d(\delta) \rangle, R(\delta), P(\delta)) \right], \right. \\ \left. Z(\delta), (P_i(\delta) \langle x_i(\delta), f_i(\delta), K_i(\delta), y_i(\delta) \rangle) \right\}, \quad (1)$$

де CS – когенераційна система; D – динамічна підсистема (когенераційна та сушильна установки); P – вла-

стивості елементів когенераційної системи; t – час, с; x – впливи; f – параметри, що діагностуються; K – коефіцієнти математичного опису; y – вихідні параметри; d – динамічні параметри; R, Z – логічні відносини в D, CS, відповідно. Індеси: i – число елементів когенераційної системи; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

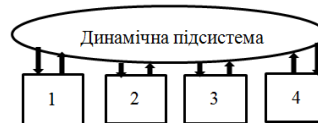


Рис. 1. Архітектура когенераційної системи: 1 – блок зменшення частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора; 2 – блок збільшення частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора; 3 – блок відвантаження висушеної деревини та завантаження свіжого матеріалу; 4 – блок оцінки функціональної ефективності

Основою для підтримки температурного та аеродинамічного режимів сушки деревини щодо здобуття як еталонної, так і функціональної інформації є математична модель динаміки сушильної установки. Система нелінійних диференціальних рівнянь включає рівняння стану як фізичну модель теплообмінника, рівняння енергії передавального середовища – теплоносія, що гріє, від когенераційної установки, рівняння енергії сприймаючого середовища – повітря, в якому зміна вологовмісту повітря оцінена як у часі, так і вздовж просторової координати осі теплообмінника для підігріву повітря, що співпадає з напрямком потоку руху середовища, та рівняння теплового балансу для стінки теплообмінника. В результаті реалізації математичної моделі отримана передатна функція за каналом: «вологовміст повітря – витрата повітря»:

$$W_{w-G_{s1}} = \frac{K_b(\beta-1)}{L_b K_w \beta \gamma} (1 - e^{-\gamma t \xi}), \quad (2)$$

де

$$K_b = \frac{m(\theta_0 - \sigma_0)}{G_{b0}}; \beta = T_m S + \epsilon^* + 1; T_m = \frac{g_m C_m}{\alpha_{b0} h_{b0}}; \\ \epsilon^* = \epsilon(1 - L_3^*); \epsilon = \frac{\alpha_{30} h_{30}}{\alpha_{b0} h_{b0}}; L_3^* = \frac{1}{L_3 + 1}; L_3 = \frac{G_3 C_3}{\alpha_{30} h_{30}}; \\ \gamma_1 = T_b S; T_b = \frac{g_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; \xi = \frac{z}{L_b}; \\ L_b = \frac{G_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; K_w = \frac{\partial i}{\partial w} / \frac{\partial i}{\partial t}; \gamma = \frac{T_b S}{L_b},$$

де t, s, q – температура повітря, температура теплоносія, що гріє, температура стінки теплообмінника, K, відповідно; G – витрата речовини, кг/с; C – питома теплоємність, кДж/(кг·K); i – ентальпія робочого тіла, кДж/кг; w – вологовміст повітря; a – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·K); h – питома поверхня, м²/м; g – питома маса речовини, кг/м; z – координата довжини теплообмінника, м; T_b, T_m – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність повітря, метала, с, відповідно; m – показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати; S – параметр перетворення Лапласа; S = ωj; ω – частота, 1/с. Індеси: в – внутрішній потік – повітря;

м – металева стінка; з – зовнішній потік – теплоносій, що гріє; w – вологовміст повітря; 0, 1 – початкові умови, вхід в теплообмінник, відповідно.

Для використання передатної функції у складі комплексного математичного моделювання динаміки сушильної установки, виділено дійсну частину, O(ω), що має такий вид:

$$O(\omega) = (C_1 L_1 - D_1 M_1) (K_b / K_w). \quad (3)$$

Для одержання коефіцієнтів у складі дійсної частини O(ω) здобуто такі вирази:

$$C_1 = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}, \quad D_1 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2},$$

$$L_1 = 1 - \cos(-\xi T_b \omega); \quad M_1 = 1 - \sin(-\xi T_b \omega), \quad (4)$$

де $A_1 = \epsilon * -T_b T_m \omega^2$; $A_2 = -T_b T_m \omega^2$; $B_1 = T_m \omega$; $B_2 = T_b \omega (\epsilon + 1)$.
Температура поділяючої стінки θ , що входить до складу коефіцієнта K_b :

$$\theta = \left(\frac{\alpha_b (\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + \frac{A(t_1 + t_2)}{2} \right) / (\alpha_b + A), \quad (5)$$

де σ_1, σ_2 – температура теплоносія, що гріє, на вході, та на виході з теплообмінника, К, відповідно; t_1, t_2 – температура повітря на виході з сушильної камери та на вході в сушильну камеру, К, відповідно; α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); індекс: в – внутрішній потік – повітря.

$$A = \frac{1}{\frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_a}}, \quad (6)$$

де δ – товщина стінки теплообмінника, м; α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); λ – теплопровідність металу стінки теплообмінника, кВт/(м·К). Індекс: з – зовнішній потік – теплоносій, що гріє.

З використанням інтеграла переходу з частотної області до області часу зміна вологовмісту повітря як за часом, так і вздовж просторової координати осі теплообмінника для підігріву повітря визначена так:

$$w(\tau, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} O(\omega) \sin(\tau\omega / \omega) d\omega, \quad (7)$$

де τ – час, с.

Для комплексного математичного моделювання динаміки сушильної установки розроблено структурну схему, що представлена, наприклад, для вихідних даних пелетної установки продуктивністю 680 кг/добу деревини (рис. 2).

Згідно запропонованій структурній схемі (рис. 2) в межах визначеної циклічної структури встановлено наступні рівні функціонування сушильної установки згідно зміні температури повітря на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника: перший рівень: 55–85 °С; другий рівень: 52,6–80,8 °С; третій рівень: 51,3–77 °С, що відповідають зміні рівноважної вологості повітря 20 %, 15 %, 12 % та витраті повітря 1,8 кг/с, 1,68 кг/с, 1,65 кг/с, відповідно для зменшення вологості сировини з 40 % до 12 %. В табл. 1, 2 представлені результати комплексного математичного моделювання динаміки сушильної установки щодо підтримки зміни вологовмісту повітря в сушильній камері.

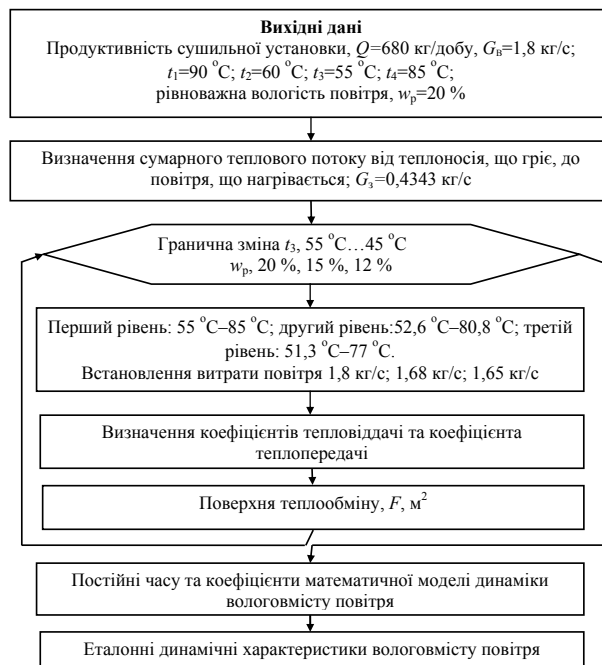


Рис. 2. Структурна схема комплексного математичного моделювання сушильної установки: G_z, G_b – витрата теплоносія, що гріє, повітря, кг/с, відповідно; t_1, t_2 – температура теплоносія, що гріє на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника, К, відповідно; t_3, t_4 – температура повітря на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника, К, відповідно

Таблиця 1
Параметри теплообміну в теплообміннику підігріву повітря

Рівні функціонування	Параметр		
	α_z , Вт/(м ² ·К)	α_b , Вт/(м ² ·К)	k, Вт/(м ² ·К)
Перший рівень	3050,67	254,33	233,05
Другий рівень	2912,86	242,84	222,59
Третій рівень	2877,91	239,92	219,94

Примітка: α_z – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія, що гріє до стінки теплообмінника, Вт/(м²·К); α_b – коефіцієнт тепловіддачі від стінки теплообмінника до повітря, Вт/(м²·К); k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К)

Таблиця 2
Значення постійних часу та коефіцієнтів математичної моделі динаміки сушильної установки

Рівні функціонування	T_b , с	T_m , с	ϵ	ζ	L_z , м	L_b , м	L_z^*	K_w
Перший рівень	0,0048	0,6149	14,547	0,146	33,26	483,89	0,029	-0,9646
Другий рівень	0,0050	0,6440	14,547	0,136	32,51	472,99	0,030	-1,2848
Третій рівень	0,0051	0,6518	14,547	0,134	32,32	470,19	0,030	-1,6060

Представлена структурна схема дозволяє, здобувши постійні часу та коефіцієнти математичної моделі динаміки вологовмісту повітря, визначити гранично припустиму зміну вологовмісту повітря для встановлених рівнів функціонування [10]. Для отримання підсумкової інформації (1)–(4) (рис. 3) щодо прийняття рішень на підтримку функціонування сушильної установки розроблено логічну модель контролю

працездатності сушильної установки на основі метода графа причинно-наслідкових зв'язків [2].

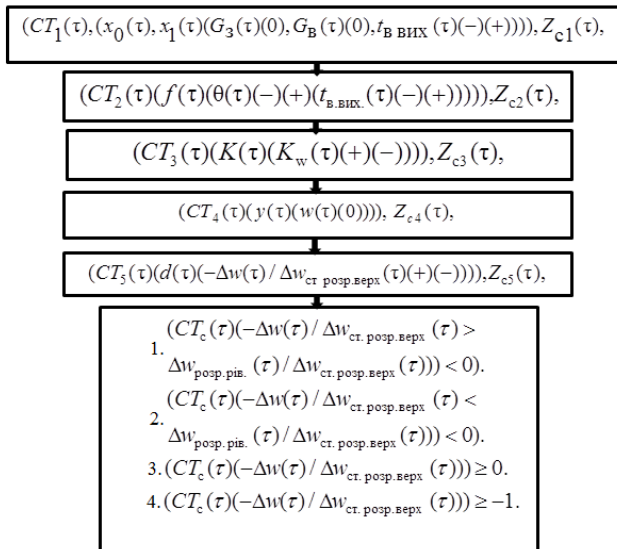


Рис. 3. Структурна схема контролю працездатності сушильної установки: СТ – контроль події;

Z – логічні відносини; d – динамічні параметри;

w – вологовміст повітря; t – температура повітря, К;

θ – температура стінки теплообмінника, К; x – впливи;

f – параметри, що діагностуються; y – вихідні параметри;

K – коефіцієнти математичного опису;

$K_w = \frac{\partial i}{\partial w} / \frac{\partial i}{\partial t}$ – коефіцієнт математичної моделі динаміки

сушильної установки, де i – ентальпія робочого

тіла, кДж/кг; w – вологовміст повітря; G – витрата

теплоносіїв, кг/с; індекси: с – контроль працездатності;

вих. – вихід повітря із сушильної камери; верх. – перший

рівень функціонування; в – повітря; з – теплоносій, що

гріє; ст. розр. – стале розрахункове значення параметра;

0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішні,

внутрішні параметри; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки;

4 – суттєві параметри, що діагностуються;

5 – динамічні параметри

Запропоновано підтримувати функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи при безперервному вимірюванні температури повітря на виході із сушильної камери, що порівнюється з еталонним значенням рівня функціонування. Так, використання логічної структури в межах циклу дозволяє приймати рішення на основі інформаційної оцінки (1), (2) на збільшення чи зменшення витрати повітря, що подається в теплообмінник підігріву, з використанням зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора, відповідно. Здобуття ж підсумкової інформації (3) свідчить про завершення сушки деревини та потребує прийняття рішення на відвантаження висушеної деревини для подальшого використання в технологічному процесі виробництва пелетного палива. Здобуття інформації (3) відповідає досягненню температури повітря на виході з сушильної камери гранично низького рівня – 44 °С. Подача ж свіжої сировини відбувається на основі інформаційної оцінки (4) при прийнятті

рішення на встановлення температури повітря на вході в сушильну камеру на рівні – 85 °С щодо входження в допуск верхнього рівня функціонування сушильної установки, що відповідає витраті повітря 1,8 кг/с (рис. 4).

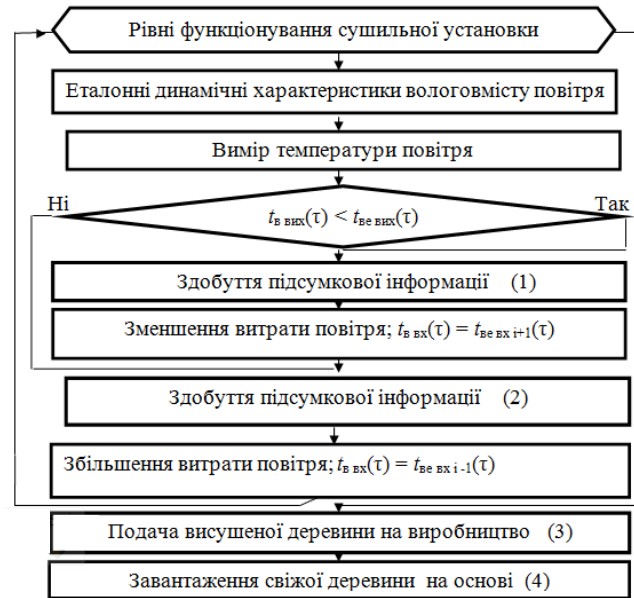


Рис. 4. Структурна схема підтримки процесу сушки

деревини на рівні прийняття рішень, де $t_{\text{в вих}}$, $t_{\text{be вих}}$, $t_{\text{в вих}}$,

$t_{\text{be вих}}$ – функціональна та еталонна температура повітря на

вході сушильну камеру та на виході із сушильної камери,

відповідно, К; i – число рівнів функціонування; τ – час, с

Підтвердження правильності прийнятих рішень виконано на основі запропонованої структурної схеми ідентифікації стану сушильної установки у складі когенераційної системи (рис. 5), що розроблена на основі ідентифікаційної частини графа причинно-наслідкових зв'язків [2].

На основі запропонованої архітектури когенераційної системи (рис. 1) та розроблених структурних схем (рис. 2–5), що апробовані для підтримки функціонування сушильної установки для фіксованого інтервалу часу [10], розроблено інтегровану систему підтримки функціонування сушильної установки (табл. 3), що надає можливість приймати рішення на зміну потужності сушки деревини при безперервному вимірюванні температури повітря на виході із сушильної установки.

Вологовміст повітря в сушильній камері у визначений термін часу визначено так:

$$w_{i+1}(\tau) = w_i + ((\Delta w_{i+1}(\tau) / \Delta w_{\text{ст. розр. верх}}(\tau) - \Delta w_i(\tau) / \Delta w_{\text{ст. розр. верх}}(\tau))(w_2 - w_1)), \quad (8)$$

де w – вологовміст повітря в сушильній камері, %; w_1, w_2 – вологовміст повітря на вході в теплообмінник підігріву повітря та на виході з теплообмінника, %, відповідно; i – число рівнів сушки деревини; τ – час, с. Індекс: ст. розр. верх. – стале, розрахункове значення параметра першого рівня функціонування.

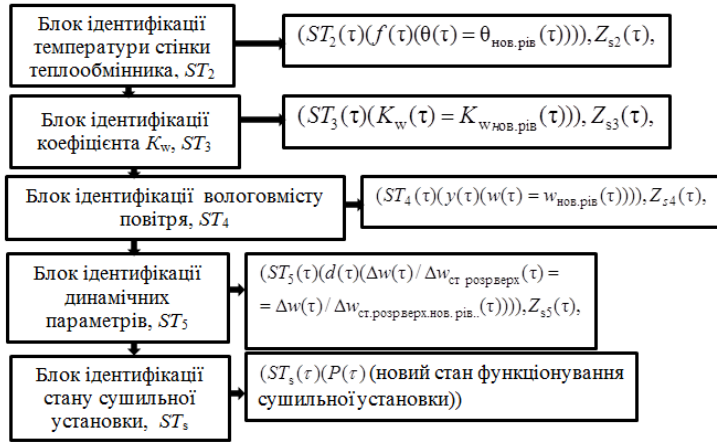


Рис. 5. Структурна схема логічного моделювання ідентифікації стану сушильної установки: ST – ідентифікація стану;

P – властивості сушильної установки; Z – логічні відносини; d – динамічні параметри; f – параметри, що діагностуються; y – вихідні параметри; K – коефіцієнти математичного опису; $K_w = \frac{\partial i}{\partial w} / \frac{\partial i}{\partial t}$ – коефіцієнт математичної моделі динаміки сушильної установки, де i – ентальпія робочого тіла, кДж/кг; w – вологовміст повітря; t – температура повітря, К; індекси: s – стан; нов. рів. – новий рівень функціонування; ст. розр., верх. – стале, розрахункове значення параметра першого рівня функціонування; 2 – внутрішні параметри, що діагностуються; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – суттєві параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри

Так, наприклад, через 4400 с після подачі свіжої деревини до сушильної камери встановлено, що аеродинамічний режим сушильної камери щодо подачі 1,8 кг/с повітря в теплообмінник підігріву не вдовольняє зменшенню температури повітря на виході із сушильної камери до рівня 52 °С та потребує прийняття рішення на зміну витрати повітря до рівня 1,68 кг/с щодо узгодження аеродинамічного та температурного режимів сушки деревини. Абсолютне значення вологості повітря в сушильній камері в цей термін часу встановлено наступним чином:

$$18,87 \% = 17,46 \% + ((0,8048 - 0,7544)(40 \% - 12 \%)).$$

Для подальшої сушки деревини необхідно, зменшивши потужність повітряного вентилятора щодо подачі 1,68 кг/с повітря, контролювати температуру повітря на виході із сушильної камери, що в термін часу, наприклад, 6600 с становить 51 °С, та виконувати подальшу сушку деревини до вологості повітря у сушильній камері, наприклад, 24,07 %, що розрахована так:

$$24,07 \% = 18,87 \% + ((0,7532 - 0,5674)(40 \% - 12 \%)).$$

А якщо ж температура повітря на виході із сушильної камери зменшилась до 44 °С, що відповідає збільшенню вологості повітря в сушильній камері до 40 %, необхідно вивантажити висушену деревину до пелетної установки та завантажити свіжу сировину, забезпечивши встановлення температурних та аеродинамічних параметрів сушильної установки першого рівня функціонування.

Таблиця 3

Інтегрована система підтримки функціонування сушильної установки

Час, τ , 100 с	Зміна вологовмісту повітря в сушильній камері	$\Delta w(\tau) / \Delta w_{\text{ст.розр.верх.}}(\tau)$	$w(\tau)$, %
11	Завантаження свіжої деревини. Прийняття рішення на подачу 1,8 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих.}}=55\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=85\text{ }^\circ\text{C}$	-1	12
22	Подача 1,8 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих.}}=54\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=84\text{ }^\circ\text{C}$	-0,9107	14,5
33	Подача 1,8 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих.}}=53\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=82\text{ }^\circ\text{C}$	-0,8048	17,46
44	Прийняття рішення на подачу 1,68 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих.}}=52\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=80,5\text{ }^\circ\text{C}$	-0,7544	18,87
55	Ідентифікація нових умов функціонування: подача 1,68 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих.}}=52\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=80,5\text{ }^\circ\text{C}$	-0,7532	18,87
66	Подача 1,68 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих.}}=51\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=76,6\text{ }^\circ\text{C}$	-0,5674	24,07
77	Прийняття рішення на подачу 1,65 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих.}}=51\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=76,6\text{ }^\circ\text{C}$	-0,5778	24,36
88	Ідентифікація нових умов функціонування: подача 1,65 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих.}}=51\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=76,6\text{ }^\circ\text{C}$	-0,5778	24,36
99	Подача 1,65 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих.}}=50\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=76\text{ }^\circ\text{C}$	-0,4801	27,10
110	Подача 1,65 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих.}}=48\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=75\text{ }^\circ\text{C}$	-0,3021	32,08
121	Подача 1,65 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих.}}=45\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=75\text{ }^\circ\text{C}$	-0,1277	36,96
132	Вивантаження висушеної деревини на виробництво пелетного палива: $t_{\text{в.вих.}}=44\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в.вх.}}=74\text{ }^\circ\text{C}$	-0,0190	40

Примітка: $t_{\text{в.вих.}}$, $t_{\text{в.вх.}}$ – температура повітря на виході із сушильної камери та на вході в сушильну камеру, відповідно, °С; w – вологовміст повітря в сушильній камері, %; індекс: ст. розр. верх. – стале, розрахункове значення параметра першого рівня функціонування

5. Обговорення результатів дослідження щодо енергозберігаючої технології підтримки функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи

В результаті проведених досліджень розроблена інтегрована система зміни вологовмісту повітря в сушильній камері, що дозволяє підтримувати потужність сушки деревини на основі зміни витрати повітря, що поступає в теплообмінник підігріву, з використанням зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора. Здобута аналітична оцінка зміни

вологвмісту повітря в сушильній камері в зв'язку із недостовірним використанням вимірів із-за складності отримання результатів вимірів у взаємній єдності. Запропоновано вимірювання температури повітря на виході із сушильної камери для прийняття упереджених рішень на зміну витрати повітря щодо підігріву повітря для підтримки потужності сушки. Це надає можливість упереджено забезпечити зміну вологості повітря в сушильній камері та не допустити зворотного процесу накопичення вологи сировиною. Визначено точний термін подачі висушеної деревини до пелетної установки та подачі свіжої сировини до сушильної установки. Забезпечено безперервне функціонування когенераційної системи для можливості додаткового вироблення енергії, що з урахуванням частотного регулювання електродвигуна повітряного вентилятора щодо сушки сировини дозволяє знизити собівартість виробництва електричної енергії та теплоти. Представлені результати дослідження є продовженням роботи в напрямку узгодження виробництва та споживання біопалива [2]. Запланована апробація результатів дослідження в умовах використання пелетних установок різної потужності в складі когенераційних систем.

6. Висновки

1. Виробництво пелетного палива потребує використання інтегрованої системи оцінки зміни вологвмісту повітря в сушильній камері щодо узгодження температурного та аеродинамічного режимів сушки деревини з використанням когенераційних технологій щодо підтримки потужності сушки.

2. Запропоновано структурну схему комплексного математичного моделювання динаміки сушильної установки, що надає можливість визначати допуски на зміну вологвмісту повітря в сушильній камері для встановлених рівнів функціонування, що відповідають зміні температури повітря на вході в теплообмінник підігріву повітря на виході із теплообмінника згідно зміні рівноважної вологості повітря в сушильній камері та зміні витрати повітря.

3. Запропоновано структурну схему логічного моделювання щодо контролю працездатності сушильної

установки для здобуття підсумкової функціональної оцінки зміни вологвмісту повітря в сушильній камері. Така схема, що функціонує за принципом причинно-наслідкових зв'язків, включає наступні блоки: оцінки зміни температури повітря на виході з сушильної камери, що вимірюється, зміни температури стінки теплообмінника для підігріву повітря, коефіцієнта математичної моделі динаміки вологвмісту повітря, K_w , вологвмісту повітря, динамічних параметрів зміни вологвмісту повітря, контролю працездатності.

4. Запропоновано структурну схему підтримки сушки деревини на рівні прийняття рішень. Особливістю цієї схеми є порівняння температури повітря на виході із сушильної камери, що вимірюється, з еталонним значенням та визначення підсумкової інформації щодо прийняття рішень на зміну частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора чи зміну висушеної та свіжої деревини.

5. Запропоновано структурну схему логічного моделювання щодо ідентифікації стану сушильної установки для підтвердження прийнятих рішень. Вона включає наступні блоки: зміни температури стінки теплообмінника для підігріву повітря, коефіцієнта математичної моделі динаміки вологвмісту повітря, K_w , вологвмісту повітря, динамічних параметрів зміни вологвмісту повітря, ідентифікації стану сушильної установки та дозволяє встановити новий стан функціонування сушильної установки.

6. Запропоновано інтегровану систему зміни вологвмісту повітря, що дозволяє підтримувати потужність сушки деревини на основі зміни витрати повітря щодо зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора при вимірюванні температури повітря на виході із сушильної камери та виконувати своєчасну подачу висушеної деревини на виробництво пелетного палива та завантаження свіжої деревини.

7. Узгодження температурного та аеродинамічного режимів сушки деревини надає можливість, наприклад, при виробництві 5,8 тис. т пелет з деревини в рік знизити собівартість виробництва електричної енергії та теплоти в межах 20–30 % та здобути грошову економію при використанні пелетного палива для опалення та гарячого водопостачання до 40 %.

Література

1. Гелетуха, Г. Г. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 2 [Текст] / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная, П. П. Кучерук, Е. Н. Олейник, А. В. Трибой // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 3. – С. 65–73.
2. Чайковська, Є. Є. Розробка енергозберігаючої технології підтримки функціонування біодизельної установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – Т. 1, № 8 (79). – С. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59479
3. Трошин, А. Г. Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомассы [Текст] / А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев, И. А. Тельнов, С. И. Завинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 8, № 45 (3). – С. 36–40. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2874/2677>
4. Bhattarai, S. Simulation Study for Pneumatic Conveying Drying of Sawdust for Pellet Production [Text] / S. Bhattarai, J.-H. Oh, S.-H. Euh, D. H. Kim, L. Yu // Drying Technology. – 2014. – Vol. 32, Issue 10. – P. 1142–1156. doi: 10.1080/07373937.2014.884575
5. Laurila, J. Compression drying of energy wood [Text] / J. Laurila, H. Mikko, L. Risto // Fuel Processing Technology. – 2014. – Vol. 124. – P. 286–289. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.03.016

6. Liu, Y. Application of the self-heat recuperation technology for energy saving in biomass drying system [Text] / Y. Liu, M. Aziz, Y. Kansha, S. Bhattacharya, A. Tsutsumi // Fuel Processing Technology. – 2014. – Vol. 117. – P. 66–74. doi: 10.1016/j.fuproc.2013.02.007
7. Wang, H.-t. Study of Immune PID Controller for Wood Drying System [Text] / H.-t. Wang, H.-m. Jia // 2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2013. – P. 827–831. doi: 10.1109/csnt.2013.176
8. Zhongfu, T. Research on control system of wood drying based on BP Neural Network [Text] / T. Zhongfu, L. Yuehua // Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), 2013. – P. 36–38. doi: 10.1109/mec.2013.6885046
9. Perre, P. Drying of Wood: Principles and Practices [Text] / P. Perre, R. Keey. – Handbook of Industrial Drying, 2014. – P. 797–846. doi: 10.1201/b17208-44
10. Чайковська, Є. Є. Розробка методу підтримки сушильної установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – Т. 5, № 7 (25). – С. 62–66. doi: 10.15587/2312-8372.2015.51520

