



Чайковська Є. Є.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДТРИМКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ У СКЛАДІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

В роботі на основі запропонованої когенераційної системи розроблено метод підтримки функціонування сушильної установки на рівні прийняття рішень щодо виробництва пелетного палива. Прогнозування зміни вологовмісту повітря в сушильній камері при вимірюванні температури повітря на вході в теплообмінник підігріву повітря дозволяє підтримувати температурний та аеродинамічний режими сушки на основі зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора з використанням теплоносія, що гріє, у складі когенераційної системи.

Ключові слова: пелетне паливо, когенераційна система, сушильна установка.

1. Вступ

Паливні гранули — пелети, що можуть бути виготовлені з будь-яких відходів деревообробної та сільськогосподарської промисловості, надають можливість частково замінити традиційне паливо та скоротити викиди парникових газів [1, 2]. Основними технічними характеристиками пелет є: діаметр, насипна щільність, довжина, зольність, а вміст вологи не повинен перевищувати 10–12 %. Сира ж деревина, наприклад, може містити близько 50 % води. Підтримка температурного та аеродинамічного режимів сушки деревини відбувається на основі вимірювання температури та вологості повітря як сушильного агенту, вологості деревини, що має не завжди достовірне використання у зв'язку із складністю вимірів та унеможливує упереджений вплив на зміну параметрів сушки для забезпечення безперервного виробництва пелетного палива. При витратах на сушку матеріалу, що складають до 25 % від загальних витрат, 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. Цим обґрунтовується актуальність даної роботи.

2. Постановка проблеми на основі літературних джерел

Існують різні типи сушильного агенту щодо сушки матеріалу при виробництві пелетного палива та засоби їх підготовки. У якості сушильного агенту зазвичай використовують повітря, димові гази, їх поєднання. Але найбільш безпечним та економічним є використання повітря, що може бути підігріте водою в порівнянні з коштовним електричним підігрівом. Існують різні засоби удосконалення сушильних технологій деревини, що базуються як на інтенсифікації процесів теплообміну в сушильній камері, так і на удосконаленні систем управління процесом сушки. Так, наприклад, в роботі [2] перевага віддається

сушильним установкам з механічною активацією матеріалу, що дозволяє збільшити питому напругу сушки за випарюваною вологістю, але за рахунок додаткових витрат на електричну енергію. В роботі [3] на основі перевірки адекватності розроблених математичних моделей сушки деревини експериментальним дослідженням встановлено вплив конструктивних параметрів сушильної камери на якість сушки, але при вимірюванні параметрів сушки в сушильній камері. В роботі [4] визначено вплив режимних параметрів сушки на якість сушки за рахунок зміни тиску в сушильній камері та терміну сушки, але без можливості узгодження температурного та аеродинамічного режимів сушіння матеріалу. В роботі [5] визначено вплив співвідношення повітря до матеріалу та градієнта температури в теплообміннику для підігріву повітря на витрати енергії на сушку матеріалу, видані рекомендації щодо інтенсифікації теплообміну в сушильній камері, але без можливості їх використання в реальних умовах функціонування сушильної установки.

Найважливішим показником сушки сировини при виробництві пелетного палива є потужність сушки, що відтворює кількісне відношення вологості сировини до її рівноважної вологості. Рівноважна вологість деревини — середнє значення між сорбцією та десорбцією деревини, а при використанні сировини щодо виробництва пелетного палива практично дорівнює його стійкої вологості, яка залежить від температури повітря та його відносної вологості. Потужність сушки має бути більшою за одиницю [6]. Для підтримки потужності сушки деревини використовують коштовні експертні діагностичні системи, що базуються на вимірюванні температури повітря та його вологості в сушильній камері при вимірюванні вологості деревини. Складність вимірів при неможливості використання у взаємній єдності може привести до зворотного процесу накопичення вологи сушильним матеріалом чи припинення процесу сушки сировини [7, 8]. Для уникнення негативних явищ сушки необхідно прогнозувати зміну вологості повітря в узгодженій взаємодії із зміною температури повітря на виході із сушильної камери, що надходить в теплообмінник підігріву, щодо зміни рівня потужності сушки.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — сушильні системи щодо виробництва пелетного палива.

Мета роботи — розробка методу підтримки функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи.

Поставлена мета може бути досягнена при виконанні таких задач:

- обґрунтувати необхідність підтримки функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи;
- запропонувати архітектуру когенераційної системи, що має у своєму складі основу — динамічну підсистему, яка включає когенераційну установку, сушильну камеру, повітряний вентилятор та блоки заряду, розряду та оцінки функціональної ефективності, що знаходяться в узгодженій взаємодії з динамічною підсистемою;
- виконати комплексне математичне моделювання динаміки інтегрованої динамічної підсистеми з ціллю підтримки функціонування сушильної установки на рівні прийняття рішень;
- розробити комплексні системи контролю працездатності та ідентифікації стану сушильної установки на основі логічного моделювання у складі когенераційної системи;
- оцінити практичну значущість здобутих результатів.

4. Метод підтримки функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи

На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [9, 10] запропонована архітектура когенераційної системи, основою якої є інтегрована динамічна підсистема (когенераційна установка, сушильна камера, повітряний вентилятор) та блоки розряду, заряду, оцінки функціональної ефективності, що знаходяться в узгодженій взаємодії з динамічною підсистемою (рис. 1).

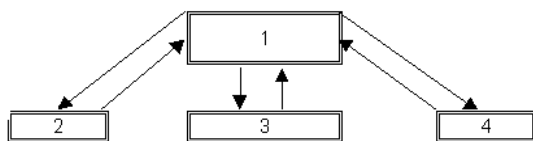


Рис. 1. Архітектура когенераційної системи: 1 — динамічна підсистема (когенераційна установка, сушильна камера, повітряний вентилятор); 2 — блок заряду; 3 — блок розряду; 4 — блок оцінки функціональної ефективності

Математичне обґрунтування архітектури когенераційної системи:

$$CS = ((D(P(\tau)(x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau)), R(\tau), P(\tau))), R(\tau), (P_i(\tau)(x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau))),$$

де CS — когенераційна система; D — динамічна підсистема (когенераційна установка, сушильна камера, повітряний вентилятор); P — властивості елементів когенераційної системи; x — впливи; f — параметри, що

діагностуються; K — коефіцієнти математичного опису; y — вихідні параметри; d — динамічні параметри; R — логічні відносини в CS ; t — час, с. Індеси: i — число елементів когенераційної системи; 0, 1, 2 — початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Система диференціальних рівнянь, що описує зміну вологовмісту повітря як у часі, так і вздовж просторової координати осі теплообмінника для підігріву повітря, включає рівняння стану щодо фізичної моделі теплообмінника, рівняння енергії передавального середовища — теплоносія, що гріє, від когенераційної установки, рівняння енергії сприймаючого середовища — повітря та рівняння теплового балансу для стінки теплообмінника. В результаті реалізації системи нелінійних диференціальних рівнянь отримана передатна функція за каналом: «вологівміст повітря — витрата повітря» для підтримки функціонування сушильної установки:

$$W_{w-G_{v1}} = \frac{K_b(\beta-1)}{L_b K_w \beta \gamma} (1 - e^{-\gamma \xi}), \quad (1)$$

де:

$$K_b = \frac{m(\theta_0 - \sigma_0)}{G_{b0}}; \beta = T_m S + \varepsilon^* + 1; T_m = \frac{g_m C_m}{\alpha_{b0} h_{b0}}; \varepsilon^* = \varepsilon(1 - L_3^*);$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{30} h_{30}}{\alpha_{b0} h_{b0}}; L_3^* = \frac{1}{L_3 + 1}; L_3 = \frac{G_3 C_3}{\alpha_{30} h_{30}}; \gamma_1 = T_b S; T_b = \frac{g_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}};$$

$$\xi = \frac{z}{L_b}; L_b = \frac{G_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; K_w = \frac{\partial i}{\partial \omega} / \frac{\partial i}{\partial t}; \gamma = \frac{T_b S}{L_b},$$

де t, σ, θ — температура повітря, температура теплоносія, що гріє, температура стінки теплообмінника, K , відповідно; G — витрата речовини, кг/с; C — питома теплоємність, кДж/(кг · К); i — ентальпія робочого тіла, кДж/кг; w — вологовміст повітря; α — коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м² · К); 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; $S = \omega j$; ω — частота, 1/с. Індеси: v — внутрішній потік — повітря; m — металева стінка; z — зовнішній потік — теплоносії, 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, $O(\omega)$, що має такий вид:

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

Температура поділяючої стінки θ , що входить до складу коефіцієнта K_b :

$$\theta = (\alpha_b(\sigma_1 + \sigma_2) / 2) + (A(t_1 + t_2) / 2) / (\alpha_b + A),$$

де σ_1, σ_2 — температура теплоносія, що гріє, на вході, та на виході з теплообмінника, К, відповідно, де $A=1/(\delta_m/\lambda_m+1/\alpha_3)$, де δ — товщина стінки теплообмінника, м; α — коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м² · К); λ — теплопровідність металу стінки теплообмінника, кВт/(м · К); t_1, t_2 — температура повітря на виході з сушильної камери та на вході в сушильну камеру, К, відповідно. Індекси: в — внутрішній потік — повітря; з — зовнішній потік — теплоносіє, що гріє; w — вологовміст повітря.

Для одержання коефіцієнтів у складі дійсної частини $O(\omega)$ здобуто такі вирази:

$$A_1 = \epsilon^* - T_B T_M \omega^2; \quad A_2 = -T_B T_M \omega^2; \quad B_1 = T_M \omega;$$

$$B_2 = T_B \omega (\epsilon + 1);$$

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

$$L_1 = 1 - \cos(-\xi T_B \omega);$$

$$M_1 = 1 - \sin(-\xi T_B \omega).$$

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:

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

де τ — час, с.

Так, наприклад, для сушильної установки, продуктивністю 680 кг/добу сировини в межах зміни температури теплоносія, що гріє на вході в теплообмінник та на виході із теплообмінника 90–60 °С встановлені наступні рівні функціонування щодо зміни температури повітря на вході в теплообмінник після сушильної камери та на виході з теплообмінника щодо входу в сушильну камеру: 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 %. Результати комплексного математичного моделювання динаміки сушильної установки щодо підтримки зміни вологовмісту повітря в сушильній камері представлені в табл. 1, 2.

З використанням комплексного математичного моделювання інтегрованої динамічної підсистеми: когенераційна установка, сушильна камера, повітряний вентилятор на основі передатної функції (1), що оцінює зміну вологовмісту повітря при зміні витрати повітря, встановлені допуски на граничну працездатність когенераційної системи для встановлених рівнів функціонування (рис. 2).

Таблиця 1

Параметри теплообміну в теплообміннику щодо оцінки зміни вологовмісту повітря

Рівні функціонування	Параметр		
	α_3 , Вт/(м ² · К)	α_v , 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_3 — коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія, що гріє до стінки теплообмінника, Вт/(м² · К); α_v — 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 теплообмінника щодо оцінки зміни вологовмісту повітря

Рівні функціонування	T_B , с	T_M , с	ϵ	ζ	L_3 , м	L_B , м	L_3^*	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

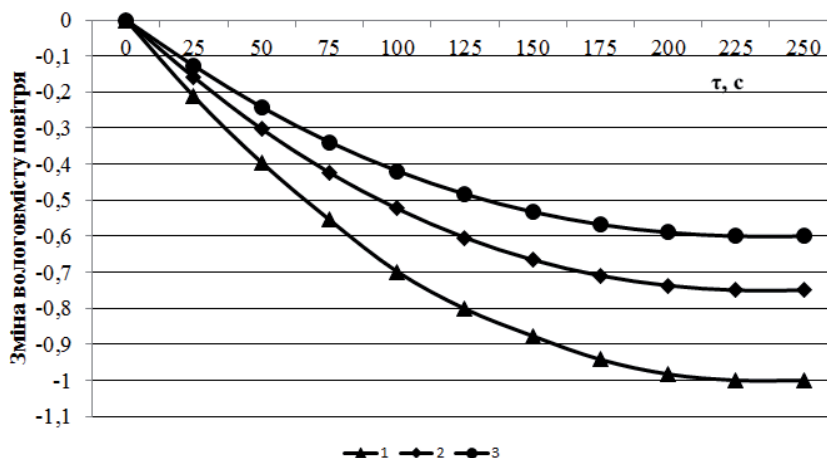


Рис. 2. Допуски на граничну працездатність когенераційної системи; 1 — еталон першого рівня функціонування; 2 — еталон другого рівня функціонування; 3 — еталон третього рівня функціонування

З використанням допусків на граничну працездатність когенераційної системи та метода графа причинно-наслідкових зв'язків [9, 10] можливо отримати підсумкову інформацію щодо зміни потужності сушки матеріалу в сушильній камері при безперервному вимірюванні температури повітря на вході та виході із сушильної камери:

$$\left(CT_c(\tau) \left(\frac{-\Delta w(\tau)}{\Delta w_{ст. розр. верх.}(\tau)} > - \frac{\Delta w_{розр. рів.}(\tau)}{\Delta w_{ст. розр. верх.}(\tau)} \right) < 0 \right).$$

Так, наприклад, при функціонуванні сушильної установки на першому рівні, що відповідає зменшенню

вологості сировини з 40 % до 20 % при рівноважній вологості повітря 20 % зменшення температури повітря на виході з сушильної камери до 52 °С потребує прийняття рішення на встановлення витрати повітря на рівні 1,68 кг/с на основі зменшення частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора щодо входження в допуск другого рівня функціонування за рахунок підтримки температури повітря на вході в сушильну камеру на рівні 80,5 °С (рис. 3).

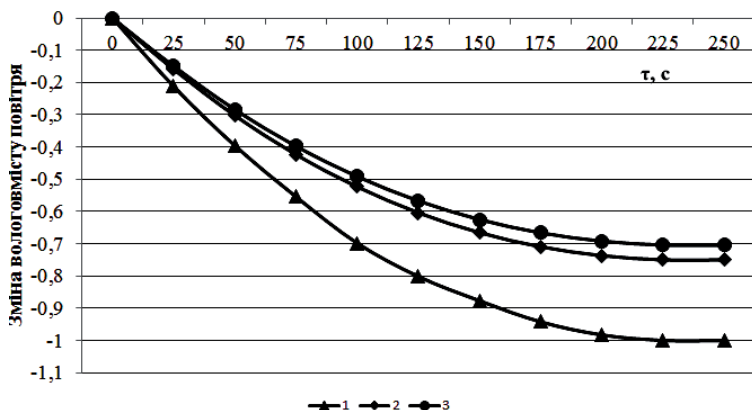


Рис. 3. Зміна вологовмісту повітря в сушильній камері щодо переходу з першого рівня функціонування на другий рівень; 1 — еталон першого рівня функціонування; 2 — еталон другого рівня функціонування; 3 — прийняття рішення та підтвердження нових умов функціонування

Перехід на другий рівень функціонування сушильної установки підтримує зменшення вологовмісту сировини з 20 % до 15 %, де CT — контроль події; P — властивості інтегрованої динамічної підсистеми; ω — вологовміст повітря; τ — час, с. Індеси: c — контроль працездатності; розр. рів. — розрахункове значення вологовмісту повітря рівня функціонування; ст., розр., верх. — стале, розрахункове значення вологовмісту повітря першого рівня функціонування.

Підтримку функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи забезпечує повітряний вентилятор для можливості частотного регулювання зміни витрати повітря щодо встановлення температури повітря на вході в сушильну камеру з ціллю підтримки потужності сушки матеріалу.

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

В результаті проведених досліджень у складі запропонованої когенераційної системи розроблена система підтримки функціонування сушильної установки на рівні прийняття рішень щодо аналітичної оцінки зміни вологовмісту повітря з використанням теплоносія, що гріє, від когенераційної установки. На основі комплексного математичного моделювання динаміки пластинчастого теплообмінника щодо підігріву повітря з використанням теплоносія, що гріє, від когенераційної установки, встановлено рівні підігріву сушильного агента щодо використання взаємодії зміни температури повітря на виході з сушильної камери зі зміною його вологовмісту для можливості встановлення температури повітря на вході в сушильну камеру на основі зміни витрати

повітря. Здобута аналітична оцінка зміни вологовмісту повітря в зв'язку із недостовірним використанням виміру. Запропоновано вимірювання температури повітря на виході з сушильної камери, зміна якої відбувається раніше, ніж зміна його вологовмісту. Це надає можливість приймати упереджені рішення на зміну температури повітря на вході в сушильну камеру з використанням теплоносія, що гріє, параметри якого можливо підтримувати у складі когенераційної установки. Розроблений метод за рахунок енергозбереження щодо частотного регулювання електродвигуна повітряного вентилятора надає можливість здобути грошову економію при виробництві та використанні пелетного палива для опалення та гарячого водопостачання. Представлені дослідження є продовженням роботи в напрямку узгодження виробництва та споживання біопалива [10]. Запланована апробація здобутих результати в умовах когенераційних систем з використанням пелетного виробництва різної потужності.

6. Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено, що:

1. Використання когенераційних технологій дозволяють підтримувати температурний та аеродинамічний режими сушки в узгодженій взаємодії щодо безперервного виробництва пелетного палива.
2. Запропоновано архітектуру когенераційної системи, що має у своєму складі основу — динамічну підсистему, яка включає когенераційну установку, сушильну камеру, повітряний вентилятор та блоки заряду, розряду та оцінки функціональної ефективності для забезпечення безперервного виробництва пелетного палива.
3. Виконано комплексне математичне моделювання інтегрованої динамічної підсистеми: когенераційна установка, сушильна камера, повітряний вентилятор для встановлення допусків на граничну працездатність когенераційної системи.
4. Розроблені системи контролю працездатності та ідентифікації стану сушильної установки для прийняття рішень на зміну частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора щодо зміни потужності сушки.
5. При виробництві, наприклад, 5,8 тис. т пелет з деревини в рік можливо забезпечити 860 квартир площею по 120 м² пелетним паливом, що надає можливість з урахуванням частотного регулювання електродвигуна повітряного вентилятора щодо сушки сировини 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. Кузнецова, А. Виробництво пелет в Україні: прибутковий варіант сталого розвитку [Текст] / А. Кузнецова // Серія консультативних робіт в рамках Німецько-Українського аграрного діалогу. — Київ, 2012. — АРД/РР/02/2012. — 24 с.
2. 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. —

- № 3/8(45). — С. 36–40. — Режим доступа: \www/URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/2874>
3. 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, № 10. — P. 1142–1156. doi:10.1080/07373937.2014.884575
 4. Laurila, J. Compression drying of energy wood [Text] / J. Laurila, M. Havimo, R. Lauhanen // *Fuel Processing Technology*. — 2014. — Vol. 124. — P. 286–289. doi:10.1016/j.fuproc.2014.03.016
 5. 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
 6. Hai- tao Wang. Study of Immune PID Controller for Wood Drying System [Text] / Hai- tao Wang, He- ming Jia // 2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies. — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2013. — P. 827–831. doi:10.1109/csnt.2013.176
 7. Tian Zhongfu. Research on control system of wood drying based on BP Neural Network [Text] / Tian Zhongfu, Li Yuehua // Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC). — Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2013. — P. 35–38. doi:10.1109/mec.2013.6885046
 8. Perré, P. Drying of Wood: Principles and Practices [Text] / P. Perré, R. Keey // *Handbook of Industrial Drying*, Fourth Edition. — Informa UK Limited, 2014. — P. 797–846. doi:10.1201/b17208-44
 9. Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений [Текст] / Е. Е. Чайковская // *Промышленная теплотехника*. — 2013. — Т. 35, № 7. — С. 169–173.
 10. Чайковська, Є. Є. Розробка енергозберігаючої технології функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська // *Східно-Європейський*

журнал передових технологій. — 2015. — № 3/8(75). — С. 44–49. doi:10.15587/1729-4061.2015.44252

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОДДЕРЖКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В СОСТАВЕ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В работе на основе предложенной когенерационной системы разработан метод поддержки функционирования сушильной установки на уровне принятия решений для производства pelletного топлива. Прогнозирование изменения влагосодержания воздуха при измерении температуры воздуха на входе в теплообменник подогрева воздуха позволяет поддерживать температурный и аэродинамический режимы сушки на основе изменения частоты вращения электродвигателя воздушного вентилятора с использованием греющего теплоносителя в составе когенерационной установки.

Ключевые слова: pelletное топливо, когенерационная система, сушильная установка.

Чайковська Євгенія Євстафіївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: eechaikovskaya@gmail.com.

Чайковская Евгения Евстафьевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, кафедра теоретической, общей и нетрадиционной энергетики, Одесский национальный политехнический университет, Украина.

Chaikovskaya Eugene, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: eechaikovskaya@gmail.com