

ТЕХНОЛОГІЇ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 631.363

**В.С. Федорейко, д-р техн. наук, проф.,
М.І. Рутило, канд. техн. наук,
І.С. Іскерський**

Тернопільський національний педагогічний університет
ім. В. Гнатюка, м. Тернопіль, Україна, e-mail:
kaf_mki@tnpu.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА

**V.S. Fedoreiko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
M.I. Rutylo, Cand. Sci. (Tech.),
I.S. Iskerskyi**

V. Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University, Ternopil,
Ukraine, e-mail: kaf_mki@tnpu.edu.ua

IMPROVEMENT OF ENERGY PERFORMANCE OF THE ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEX FOR PRODUCTION OF SOLID BIOFUELS USING NEURAL CONTROLLER

Мета. Обґрунтування методів і засобів забезпечення раціонального керування швидкісними режимами електропривода електротехнологічного комплексу з виробництва двокомпонентного твердого біопалива для зменшення питомих витрат електроенергії та підвищення якості кінцевого продукту.

Методика. У статті подано узагальнене використання інструментарію імітаційного моделювання основних структур технологічного обладнання та регульованого асинхронного електропривода в середовищі MATLAB, що базуються на результатах експериментальних досліджень технології брикетування двокомпонентного твердого біопалива.

Результати. Розроблена структура автоматизованої потокової технологічної лінії виробництва двокомпонентного твердого біопалива та створена її імітаційна модель з використанням нейрорегулятора на базі системи типу Сугено. Шляхом імітаційного моделювання режимів роботи електропривода дозаторів та пресувального обладнання потокової лінії у процесі зв'язного дозування компонентів твердого біопалива отримані дисперсії величин вологості суміші та електромеханічні характеристики електропривода шнека-екструдера без корекції та з корекцією швидкостей робочих органів дозаторів. Отримана залежність питомих витрат електроенергії під час виробництва твердого біопалива від продуктивності технологічної лінії та вологості сировини.

Наукова новизна. Встановлені ефективні пропорції компонентів біопалива та отримані аналітичні залежності для організації зв'язного дозування сировини шляхом використання регульованого електропривода, що обумовило можливість значно розширити вологісний діапазон базового компонента та знизити енерговитрати на технологічний процес.

Практична значимість. Обґрунтований та запропонований новий спосіб приготування двокомпонентного твердого біопалива, що дозволяє зменшити затрати енергії на виробництво одиниці продукції та покращити її якісні показники.

Ключові слова: дозатор, тверде біопаливо, продуктивність, вологість, дисперсія, імітаційна модель, нейроконтролер, електропривод, частотний перетворювач

Вступ. Динаміка розвитку світової теплоелектроенергетики засвідчує впевнене зростання частки біоресурсних джерел у загальному балансі генерованої енергії. У секторі використання нетрадиційних джерел енергії Євросоюз розпочав роботи, націлені на використання біоенергетичних матеріалів тільки з рі-

чним циклом відновлення (солома, відходи насінних та елеваторних виробництв).

Директивні рішення уряду України засвідчують початок широкого спектру робіт, спрямованих на використання біопалива. Так до 2015 року за рахунок використання біоенергетичних установок планується заміщення більше 3 млрд м³ природного газу в рік [1].

За розрахунками НААН України використання соломи, що щорічно технологічно втрачається (бли-

дения горных работ. Это объясняется тем, что динамика метановыделения кроме добычи угля зависит и от ряда других влияющих факторов. К ним относятся: развитие очистных работ, процессы сдвижения подрабатываемых пород и десорбция газа из источников во времени. Степень влияния указанных факторов существенно изменяется на протяжении всего периода эксплуатации выемочного участка и после его остановки, что также невозможно учесть, рассматривая только среднее газовыделение.

Например, на период демонтажа оборудования из очистного забоя уровень газовыделения в пределах остановленного выемочного участка принимается 50% от метановыделения при эксплуатации действующего выемочного участка. Предполагается, что после демонтажа оборудования газовыделение полностью прекращается, и оно не принимается к учету при определении газового баланса угольных шахт. Такой упрощенный подход к прогнозу для всего многообразия горнотехнических и горно-геологических условий Донбасса не учитывает факторы, определяющие уровень газовыделения как в период эксплуатации выемочного участка, так и изменение их влияния после прекращения очистных работ.

Выделение нерешенных ранее частей проблемы. Практика ведения горных работ показывает, что остаются нерешенными ряд вопросов, связанных с обоснованием длительности проветривания горных выработок и дегазации источников метановыделения после остановки очистных забоев. Нормативными документами не предусматривается также возможное увеличение газовыделения под воздействием активизации сдвижения пород при отработке смежных лав или ведении горных работ на сближенных пластах. Такая ситуация свидетельствует о трудностях, возникающих при разработке мероприятий по обеспечению безопасных условий в горных выработках по газовому фактору, и указывает на актуальность рассматриваемого вопроса.

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими задачами. Идея состоит в рассмотрении факторов, определявших уровень и длительность газовыделения при эксплуатации выемочного участка и изменения их влияния на метановыделение из источников, которые формируют газовый баланс выемочного участка.

Целью настоящей работы является разработка общих научно-обоснованных положений методики прогноза динамики газовыделения при эксплуатации выемочного участка и после остановки очистного забоя. Методикой исследования предусматривалось наблюдение в шахтных условиях за изменением метановыделения в выработки и дегазационные скважины на стадиях развития очистных работ, стабильной эксплуатации выемочных участков, снижения добычи угля перед остановкой забоя и после полного прекращения очистных работ. Характерные изменения кривой динамики газовыделения увязывались с положением очистного забоя по отношению к разрезной печи, параметрами сдвижения подрабатываемых

пород, расположением сближенных пластов по отношению к разрабатываемому, процессами десорбции газа из источников во времени. Экспериментальная часть наблюдений проведена при отработке газоносного антрацитового пласта l_2^6 шахтой „Им. газеты Известия“ ГП „Донбассантрацит“ в засбросовом крыле шахтного поля. Дополнительно использовали известные сведения о динамике газовыделения при отработке пласта m_3 шахтой „Им. А.Ф. Засядько“ на всех стадиях эксплуатации выемочного участка 16-й восточной лавы [1].

Изложение основного материала. Для достижения поставленной цели использовали современные представления о динамике газовыделения из имеющих источников на выемочных участках. Источниками метановыделения при отработке газоносных угольных пластов являются отбитый уголь, обнаженная поверхность разрабатываемого пласта, под- и надрабатываемые сближенные угольные пласты и вмещающие породы.

Газовыделение начинает проявляться как только угольный пласт попадает в зону влияния горных работ, нарушается равновесие системы „газ – уголь (порода)“ и создаются условия, способствующие десорбции газа из угля (породы). В общем случае, независимо от источника, изменение газовыделения во времени после нарушения равновесного состояния (отбойка угля, подработка или надработка угольных пластов и пород и т. д.) можно представить в виде кривой (рис. 1).

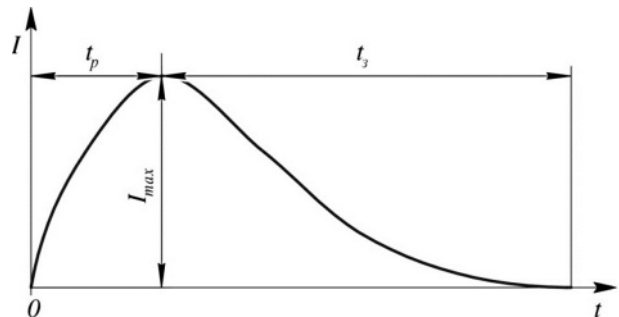


Рис. 1. Характерная кривая газовыделения (I) во времени (t) после нарушения природного равновесного состояния системы „газ – уголь (порода)“: t_p – время роста газовыделения из источника; t_3 – время затухания газовыделения; I_{max} – максимальное газовыделение

Эта кривая состоит из двух частей. После воздействия на равновесие системы „газ – уголь“ вначале, в течение времени (t_p), наблюдается рост газовыделения до некоторой величины (I_{max}), а затем, при отсутствии активного воздействия на равновесие системы, – отмечается затухание интенсивности газовыделения во времени (t_3). Увеличение газовыделе-

Для забезпечення сталого об'єму заповнення бункера-змішувача та постійної щільності брикетів згідно з вимогами сумарна масова продуктивність двох завантажувальних бункерів-дозаторів з продуктивностями Q_1 , Q_2 повинна дорівнювати продуктивності вивантажувального шнека-дозатора Q_3 і, у свою чергу, має визначатися продуктивністю технологічної лінії Q_n , тобто залежати від продуктивностей підприємств завантажувального шнека та преса

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 = Q_n. \quad (1)$$

Об'ємна продуктивність шнекового дозатора через його геометричні параметри визначається

$$Q_v = 0,25\pi((D + 2\delta)^2 - d^2)nt\gamma, \quad (2)$$

де D – діаметр шнека, м; δ – зазор між корпусом та шнеком, м; d – діаметр вала шнека, м; n – частота обертання шнека, об/хв; t – крок навівки шнека, м; γ – коефіцієнт заповнення шнека.

Виразивши об'ємні продуктивності дозаторів та преса через щільності компонентів, отримаємо баланс масової продуктивності технологічної лінії

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S_1 v \rho_{1i} \Delta t_i + \sum_{i=1}^n S_2 k_i v \rho_{2i} \Delta t_i = \\ = \sum_{i=1}^n S_3 \alpha (v + k_i v) \rho_3 \Delta t_i = S_4 \beta (v + k_i v) \rho_4 T, \end{aligned} \quad (3)$$

де S_1, S_2, S_3, S_4 – площі поперечних перерізів технологічних отворів дозаторів та преса відповідно; $v, k_i v$ – швидкості руху компонентів сировини; α, β – коефіцієнти швидкості, що залежать від параметрів вивантажувального шнека та щільності пресування; $\rho_{1i}, \rho_{2i}, \rho_3, \rho_4$ – насипні щільності компонентів сировини та їх середня щільність відповідно; ρ_4 – щільність після пресування.

Основними завданнями системи керування є забезпечення необхідної вологості суміші на виході змішувача при змінах вологості її вхідних компонентів та балансу продуктивності технологічної лінії шляхом регулювання швидкісних режимів дозаторів безперервної дії.

Задана вологість суміші, що надходить до пресу, досягається у процесі змішування двох вхідних компонентів – подрібнених качанів кукурудзи та соломи в необхідних співвідношеннях, що регулюються зміною продуктивності дозаторів, відповідно, Q_1, Q_2 при підтримці сталої продуктивності Q_3 на виході змішувача відповідно до рівняння (1).

У сталому режимі значення вологостей w_1, w_2, w_3 і продуктивності дозаторів Q_1, Q_2, Q_3 зв'язані наступними залежностями

$$Q_1(w_3 - w_1) + Q_2(w_3 - w_2) = 0; \quad (4)$$

$$w_3 = (Q_1 w_1 + Q_2 w_2) / Q_3. \quad (5)$$

Для заданої вологості w_3 і продуктивності Q_3 на виході змішувача необхідні продуктивності дозаторів качанів кукурудзи Q_1 та соломи Q_2 обчислюються згідно із залежностями

$$Q_1 = \frac{Q_3(w_3 - w_2)}{w_1 - w_2}; \quad Q_2 = \frac{Q_3(w_1 - w_3)}{w_1 - w_2}. \quad (6)$$

Дослідження процесу брикетування біопалива довели, що його основні вхідні параметри, такі як вологість компонентів (подрібнених кукурудзяних качанів та соломи) та відповідна продуктивність дозаторів, є нелінійні та нестационарні величини, взаємозв'язки між якими встановити традиційними аналітичними методами неможливо. Тому для моделі регулятора використано апарат гібридних мереж, що в системі MATLAB [4] реалізується редактором Anfis.

Для створення нечіткого регулятора використано дві вхідні лінгвістичні змінні:

- вологість кукурудзи, w_k – містить 5 термів, межі визначення змінних – [10 14];

- вологість соломи, w_s – містить 3 терми, межі визначення змінних – [14 35].

Вихідним термом є коефіцієнт пропорційності k , що задається діапазоном значень [0,5 5]. За таких умов доцільнішим є використання системи типу Сугено.

Моделювання здійснено на основі скомплектованих трьох блоків даних: для навчання (Training data – w_k, w_s, k, d, dat), контрольний (Testing data – $test, k, dat$) і перевіряльний (Checking data – $check, k, d, dat$).

Для навчання експертної системи встановлено 100 епох й отримано середньоквадратичну похибку 0,2248. Після перевірки системи контрольною вибіркою проведено оптимізацію структури мережі шляхом підбору необхідної кількості нейронів. На цьому кроці середньоквадратична похибка становила 0,19978.

Отримані залежності є нелінійними (рис. 2). Порівняння результатів моделювання з використанням класичних імітаційних схем та зі створеною гібридною мережею довели адекватність отриманих результатів.

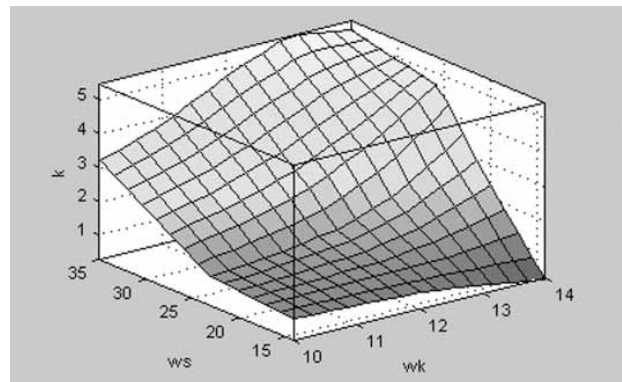


Рис. 2. Поверхня, що відтворюється навченою гібридною мережею

Вхідними параметрами нейроконтролера є поточні величини вологості компонентів w_1 , w_2 , задана вологість суміші w_3 , продуктивність дозатора Q_1 та величина струму статора I_s асинхронного двигуна (АД) підпресовувального шнека.

За величинами вологостей w_1 , w_2 та заданої вологості суміші w_3 розраховується коефіцієнт масового співвідношення компонентів суміші k , у результаті чого формуються сигнали керування частотно-регульованими електроприводами дозаторів, що визначають діапазон регулювання їх продуктивностей.

Продуктивності шнекових дозаторів при сталій швидкості обертання робочих органів мають характер випадкових функцій з нормальним законом розподілу величин. Для згладжування дисперсії їх продуктивностей в існуючих технологіях застосовують бункери-змішувачі великого об'єму (2 м^3), що виконують роль інтеграторів. Процес змішування в них забезпечується АД потужністю 3 кВт. Величина об'єму бункера-змішувача та, відповідно, потужність АД вибрані із розрахунку забезпечення необхідних вимог щодо якісних показників сировини, що надходить до пресу, урахуваючи невідповідність швидкісних режимів вхідних і вихідних дозаторів та дисперсію їх продуктивностей.

Застосування інтелектуальної системи керування процесом виробництва двокомпонентного твердого біопалива на базі нейротехнологій дає змогу забезпе-

чити синхронну роботу всіх машин шляхом корекції їх швидкісних режимів з урахуванням дисперсій продуктивностей та скоротити час інтегрування в бункері-змішувачі до мінімально необхідного (20 с), виходячи із заданої величини нерівномірності змішування компонентів сировини. Це дає змогу суттєво зменшити його об'єм (до $0,05 \text{ м}^3$) та потужність привідного АД до 0,25 кВт.

Вказаний час інтегрування вибраний з умови фільтрування високочастотних складових дисперсії продуктивностей дозаторів та з урахуванням часу змішування.

Коефіцієнти варіації продуктивностей дозаторів у випадку використання подрібнених качанів кукурудзи й соломи становлять, відповідно, 5 та 15%.

Тому, виходячи із цього, необхідно контролювати тільки низькочастотні складові дисперсії поточної продуктивності дозатора одного з компонентів суміші з більшою варіацією (Q_1) та підтримувати необхідну величину продуктивності з метою отримання заданої величини вологості суміші, що подається до пресу, яка не повинна перевищувати 16%.

На основі поданих вище результатів досліджень нами в середовищі MATLAB розроблена імітаційна модель установки для виробництва двокомпонентного твердого біопалива з використанням нейроконтролера для здійснення керування технологічним процесом (рис. 3).

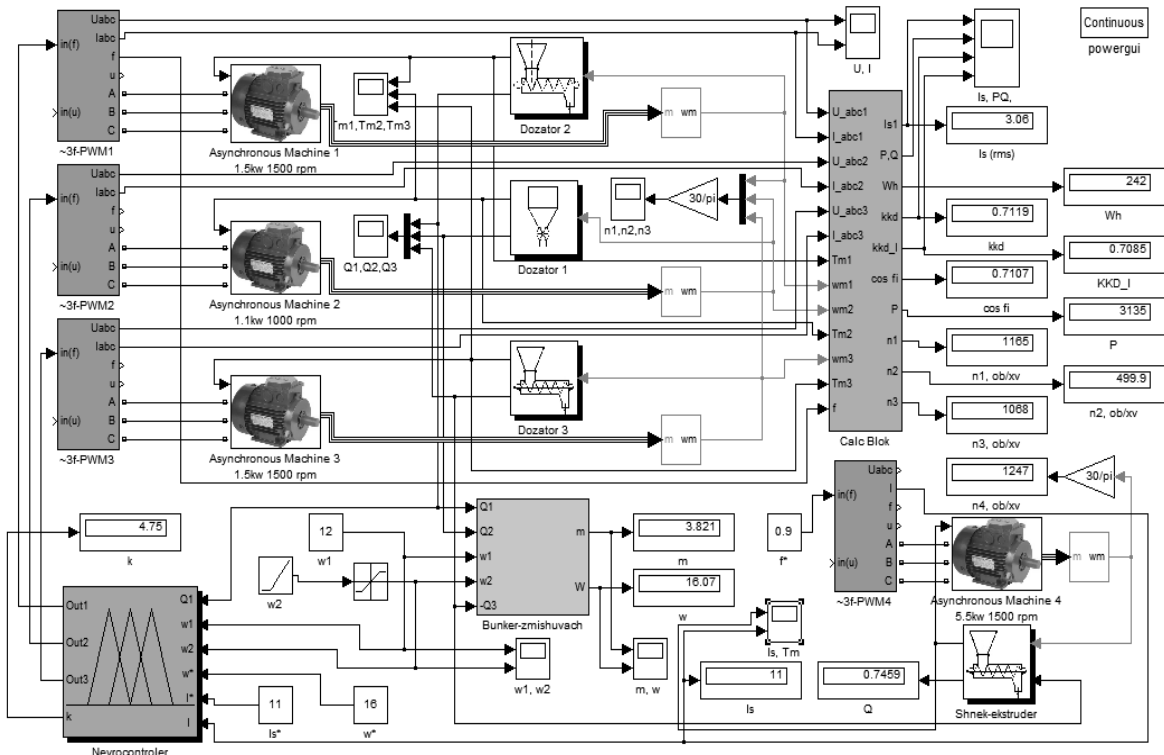


Рис. 3. Імітаційна модель установки для виробництва двокомпонентного твердого біопалива

На рис. 4 представлені результати моделювання, що відображають дисперсії величини вологості суміші w у процесі регулювання швидкості робочих органів у визначеному діапазоні зміни k при фіксованій волого-

сті подрібнених качанів кукурудзи $w_1 = 12\%$ та зміні вологості подрібненої соломи w_2 у межах 14–35% без корекції та з корекцією швидкості робочих органів дозаторів за продуктивністю Q_1 .

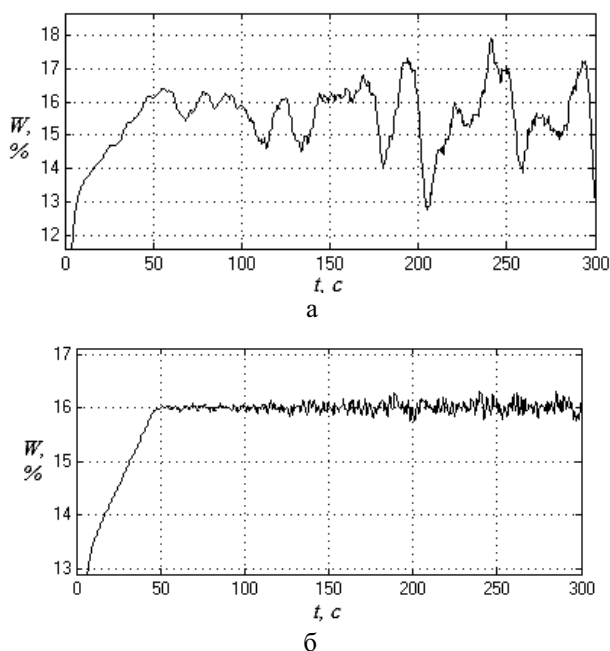


Рис. 4. Дисперсії величини вологості суміші w : а – без корекції; б – з корекцією швидкостей робочих органів дозаторів

У даний час у технологічному процесі виробництва твердого біопалива брикети отримують методом шнекового або шнеково-ударного пресування (екструзії), у процесі якого відбувається формування виробів необмеженої довжини продавлюванням аморфного матеріалу через форму-головку (філь'єру) з каналом необхідного профілю.

Аморфність подрібненого матеріалу досягається підвищенням температури пресування до 250–300 °С за рахунок внутрішнього та зовнішнього або тільки внутрішнього (у технології із використанням додаткового преса ударного типу) нагрівання. Внутрішнє нагрівання відбувається в результаті виникнення сил тертя між шнеком і матеріалом при високому робочому тиску.

Таке технологічне обладнання витрачає значну кількість електроенергії, раціональність використання якої суттєво залежить від режимів його роботи, зокрема частоти обертання шнека, продуктивності завантажувального транспортера, щільності пресування, виду сировини та її вологості.

Величина питомих витрат електроенергії під час виробництва твердого біопалива суттєво залежить від перерахованих вище чинників.

З метою аналізу енергоспоживання в галузі виробництва твердого біопалива нами проведено дослідження технологічної лінії брикетування соломи сиріої на одному з підприємств регіону (м. Скалат Тернопільської обл.)

У процесі досліджень з'ясувались електромеханічні характеристики асинхронного електропривода технологічного обладнання, зокрема шнекових дозаторів, змішувача та пресувальних машин (підпресувального шнека-екструдера, преса ударного типу), а також швидкісні режими їх роботи.

На підставі аналізу [5] та результатів проведених експериментальних досліджень енергетики процесу брикетування біопалива, що включає етапи дозування та змішування компонентів сировини, а також їх кінцеве пресування, отримана залежність питомого енергоспоживання технології від продуктивності технологічної лінії та вологості сировини, що представлена графічно у вигляді поверхні (рис. 5).

Тенденція до зростання питомих витрат електроенергії W при зниженні продуктивності технологічної лінії Q пояснюється особливостями механічних характеристик робочих органів шнекових машин, а також збільшенням втрат у регульованому електроприводі на низьких частотах обертання АД.

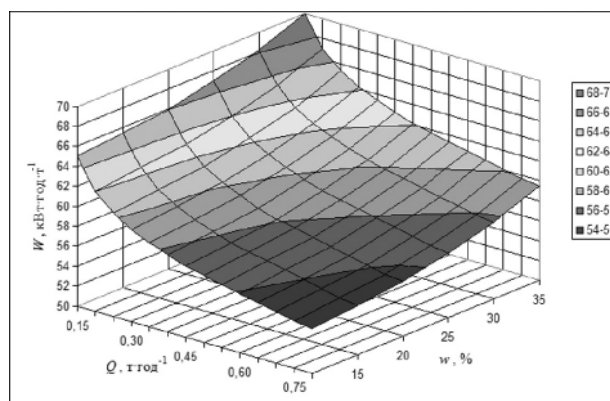


Рис. 5. Залежність питомих витрат електроенергії під час виробництва твердого біопалива від продуктивності технологічної лінії та вологості сировини

Підвищена вологість сировини спричиняє збільшення опору в'язкого тертя, що виникає під час її переміщення у процесі дозування компонентів твердого біопалива, а також змішування і, особливо, під час пресування. Величина струму статора I_s АД підпресувального шнека найбільш суттєво залежить від щільності пресування брикетів біопалива, що визначається його власною продуктивністю Q , а також продуктивностями преса та шнека-дозатора Q_3 (рис. 1), тому необхідно забезпечити синхронну роботу вхідних та вихідних дозуючих пристроїв з урахуванням нерівномірності їх поточних продуктивностей.

За даними експериментальних досліджень встановлено, що потужність, яка споживається приводом підпресувального шнека, становить близько 40% від загальної потужності вказаної технології. Вона витрачається на подолання сил тертя під час руху матеріалу в зоні завантаження, створення циркуляційного потоку між витками та ущільнення сировини до необхідної для подальшого пресування величини, і для шнека зі змінною глибиною гвинтової канавки визначається [3]

$$N_1 = \frac{\pi^3(t-e)l_0J\mu n^2}{t} + \alpha n\Delta P, \quad (7)$$

де J – коефіцієнт, що залежить від геометричних параметрів шнека; t – крок навивки гвинтової лінії шнека, м; e – товщина гребеня, м; l_0 – довжина навивки, м; n – частота обертання, об/хв; μ – коефіцієнт в'язкого тертя при переміщенні та ущільненні сировини, Па·с; a – стала прямого потоку, м³; ΔP – перепад тиску за довжиною шнека, Па.

Оскільки для визначеного типу шнека змінні J , t , e , l_0 є константами, тому механічна потужність, що витрачається, залежить від коефіцієнта в'язкого тертя μ , частоти обертання n у другій степені та щільності пресування, вираженої через перепад тиску ΔP .

Щільність пресування у вказаній технології становить близько 1:10 і задається співвідношенням об'ємних продуктивностей підпресовувального шнека та ударного преса, а також регулюванням величини зусилля на виході технологічного отвору під час проходження брикетів біопалива.

Регулювання продуктивностей технологічних машин у даний час здійснюють засобами частотно-регульованого електропривода в ручному режимі, що не забезпечує синхронної їх роботи та призводить до невиконання умови, згідно з рівнянням (1). Це призводить до перевитрат електроенергії АД підпресовувального шнека внаслідок значного зростання його механічного навантаження та до зниження якісних показників продукції. Це підтверджується експериментальними дослідженнями, проведеними у виробничих умовах, де встановлено значне перевищення струму статора АД підпресовувального шнека (до 15 А, при номінальному для даного АД – 11 А), а в деяких випадках пікове навантаження спричиняло зупинку АД із-за невідповідності його швидкісного режиму та режиму роботи завантажувального шнека при підвищеній вологості сировини.

Тому, з точки зору забезпечення енергоефективності технологічного процесу, є доцільним підтримувати продуктивності вказаних машин у визначених швидкісних режимах, що забезпечують номінальну для встановленого двигуна величину струму статора.

Ця задача нами вирішувалася шляхом регулювання продуктивності дозатора Q_3 за допомогою частотно-регульованого асинхронного електропривода, виходячи з величини струму АД підпресовувального шнека.

У розробленій імітаційній моделі установки для брикетування твердого біопалива (рис. 3) структури шнекових дозаторів та підпресовувального шнека-екструдера базуються на створених нами за рівняннями (2), (3), (7) математичних моделях і відтворюють процес функціонування вказаних технологічних машин з урахуванням дисперсій їх продуктивностей.

За результатами моделювання отримані залежності величини механічного навантаження АД підпресовувального шнека-екструдера M від продуктивності завантажувального шнека-дозатора Q_3 і струму статора цього двигуна в режимах ручного та автоматичного (за величиною струму I_s) керування (рис. 6).

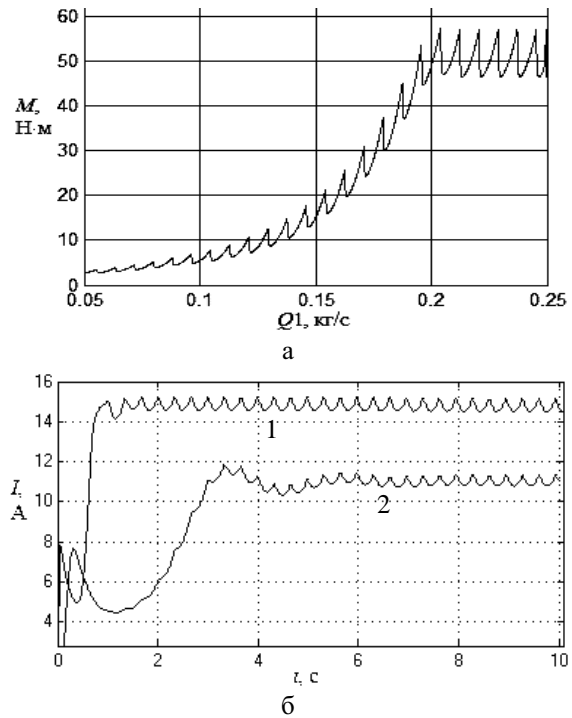


Рис. 6. Результати моделювання режимів роботи підпресовувального шнека-екструдера: а – залежність моменту навантаження АД шнека-екструдера з максимальною продуктивністю ($0,2 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$) від продуктивності завантажувального шнека; б – зміна споживаного струму АД шнека-екструдера у часі: 1 – у ручному режимі керування; 2 – із застосуванням системи керування

У запропонованій структурі імітаційної моделі інтелектуальної системи керування (рис. 3) продуктивність шнека-дозатора Q_3 задається, виходячи з величини струму статора АД підпресовувального шнека i , у свою чергу, визначає сумарну продуктивність дозаторів Q_1 , Q_2 , що встановлюється рівною продуктивності Q_3 .

Висновки.

1. Розроблений новий спосіб приготування двокомпонентного твердого біопалива, що базується на дозуванні масових часток сухих компонентів суміші у співвідношенні в межах 1:1–1:5 (подрібнені солома та кукурудзяні качани відповідно) за допомогою регульованого електропривода дозаторів. Це дає змогу використовувати солому з надлишковою вологістю до 35%, та заощаджувати енергоресурси, що витрачаються на її сушіння.

2. За результатами математичного моделювання визначений мінімально необхідний об'єм бункера-змішувача із суттєвим зниженням потужності приводного двигуна (з 3 до 0,25 кВт). Запропоновано здійснювати регулювання продуктивності завантажувального шнека-дозатора за величиною номінального струму статора АД підпресовувального шнека-екструдера, що дозволяє зменшити загальне енергоспоживання в середньому на 20%.

3. Розроблена інтелектуальна система керування процесом зв'язного дозування компонентів біопалива у визначених швидкісних діапазонах робочих органів дозаторів ($0,2 \dots 1 n_{ном}$) у залежності від величин вологості компонентів суміші, середньоквадратична похибка функціонування якої не перевищує 0,2%.

Список літератури / References

1. Гелетука Г.Г. Анализ основных положений „Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года“ / Г.Г. Гелетука, Т.А. Железная // Промышленная теплоэнергетика. – 2006. – Т. 2. – № 5. – С. 82–92.

Geletukha, G.G. and Zheleznaia, T.A. (2006), “Analysis of the main provisions of “Energy Strategy of Ukraine till 2030”, *Promyshlennaya teploenergetika*, no. 5, pp. 82–92.

2. Федорейко В.С. Дослідження характеристик багатоконпонентного твердого біопалива / В.С. Федорейко, І.С. Іскерський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 24. – Т. 4. – С. 80–88.

Fedoreiko, V.S. and Iskerskyi, I.S. (2011), “Investigation of the characteristics of multicomponent solid biofuels”, *Pratsi Tavriyskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, Vol. 4, no. 24, pp. 80–88.

3. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография / [Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В. и др.] – М.: „Издательство Машиностроение“, 2004. – 248 с.

Sokolov, M.V., Klinkov, A.S., Yefremov, O.V., Belyaiev, P.S. and Odnolko, V.G. (2004), *Avtomatizirovannoye proektirovaniye i raschet shnekovykh mashyn* [Automated Design and Calculation of Screw Machines], Monograph, Izdatelstvo Mashynostroeniye, Moscow, Russia.

4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / Герман-Галкин С.Г. – СПб. : КОРОНА-принт, 2001. – 320 с.

German-Galkin, S.G. (2001), *Kompyuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh system v MATLAB 6.0* [Computer Simulation of Semiconductor Systems in MATLAB 6.0], Korona-print, St. Petersburg, Russia.

5. Бешта О.С. Використання регульованого електропривода в задачах підвищення енергоефективності технологічних процесів / О.С. Бешта. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2012. – № 4. – С. 98–107.

Beshta, O.S. (2012), “Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 4, pp. 98–107.

Цель. Обоснование методов и средств обеспечения рационального управления скоростными режимами электропривода электротехнологического комплекса по производству двухкомпонентного твердого биотоплива для уменьшения удельных расходов электроэнергии и повышения качества конечного продукта.

Методика. В статье представлено обобщенное использование инструментария имитационного моделирования основных структур технологического оборудования и регулируемого асинхронного электропривода в среде MATLAB, основанные на результатах экспериментальных исследований технологии брикетирования двухкомпонентного твердого биотоплива.

Результаты. Разработана структура автоматизированной поточной технологической линии производства двухкомпонентного твердого биотоплива и создана ее имитационная модель с использованием нейрорегулятора на базе системы типа Сугено. Путем имитационного моделирования режимов работы электропривода дозаторов и прессующего оборудования поточной линии в процессе связного дозирования компонентов твердого биотоплива получены дисперсии величин влажности смеси и электромеханические характеристики электропривода шнека-экструдера без коррекции и с коррекцией скоростей рабочих органов дозаторов. Получена зависимость удельных затрат электроэнергии при производстве твердого биотоплива от производительности технологической линии и влажности сырья.

Научная новизна. Установлены эффективные пропорции компонентов биотоплива и получены аналитические зависимости для организации связного дозирования сырья путем использования регулируемого электропривода, что обусловило возможность значительно расширить влажностный диапазон базового компонента и снизить энергозатраты на технологический процесс.

Практическая значимость. Обоснован и предложен новый способ приготовления двухкомпонентного твердого биотоплива, который позволяет уменьшить затраты энергии на производство единицы продукции и улучшить ее качественные показатели.

Ключевые слова: дозатор, твердое биотопливо, производительность, влажность, дисперсия, имитационная модель, нейроконтроллер, электропривод, частотный преобразователь

Purpose. To justify the methods and means ensuring the rational management of speed rate of drive of electrotechnological complex producing two-component solid biofuels and reducing the electricity specific consumption and improving the quality of the final product.

Methodology. We present the generalized idea of the MATLAB simulation tools utilization for simulation of basic structures of technological equipment and controlled asynchronous motor. It is based on the results of the experimental studies on two-component solid biofuels briquetting.

Findings. By means of the neural controller based systems such as Sugeno, we have developed the structure of the automated flow line for binary solid biofuel production and its simulation model. Due to the simulation of the operation modes of the electric drives of metering and pressing equipment of the production line during connected dispensing of solid biofuel components

we have obtained the variance of the mixture and moisture characteristics of the electromechanical actuator-screw extruder with and without correction of the speed rates of the dispenser's driven elements. We have obtained the dependence of the electricity specific consumption during the production of solid fuel on the performance of the production line and raw material moisture.

Originality. The effective proportions of the biofuel's components have been found out. The analytical dependence has been received in order to provide connected dosing through the utilization of adjustable electric drives. This lets us to extend the

range of humidity of the base component and to reduce the energy consumption.

Practical value. We have suggested and described the new method of the two-component solid biofuels preparation. It also lets us to reduce the energy costs for technological process and to improve its quality indicators.

Keywords: *dispenser, solid biofuel, efficiency, humidity, variance, simulation model, neural controller, electric drive, inverter*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук П.С. Євтухом. Дата надходження рукопису 07.03.13.

УДК 519.642.2: 621.3.011.713

С.М. Тиховод¹, канд. техн. наук, доц.,
Н.А. Костин², д-р техн. наук, проф.

1 – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина, e-mail: stikhovod@gmail.com

2 – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск, Украина

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И ЕГО СХЕМНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

S.M. Tikhovod¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
N.A. Kostin², Dr. Sci. (Tech.), Professor

1 – Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: stikhovod@gmail.com

2 – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipropetrovsk, Ukraine

NUMERICAL CALCULATIN AND CIRCUIT INTERPRETATION OF TRANSIENTS IN ELECTRIC CIRCUITS

Цель. Разработка универсального программного комплекса Colo-IDU для повышения быстродействия расчета переходных процессов в сложных электрических цепях.

Методика. Использована полиномиальная аппроксимация функции зависимости решения от времени и математический аппарат матричной алгебры. Интегро-дифференциальные уравнения динамики электрических процессов записываются в матричной форме с помощью полиномиального представления функции решения, производной и интеграла функции решения в ряде дискретных точек времени расчета.

Результаты. Проведенные расчеты переходных процессов в моделируемой цепи показали, что при одинаковой достигнутой точности процессорное время расчета переходного процесса предложенным методом более чем в четыре раза меньше, чем при использовании многошагового метода Гира. Выполненное сравнение численного решения с точным решением, полученным аналитически, подтверждает адекватность предложенного метода и разработанного на его основе программного комплекса.

Научная новизна. Модификация численного метода расчета интегро-дифференциальных уравнений, известного как ФДН (формулы дифференцирования назад), и разработка на его основе схемной модели численного метода расчета переходных процессов в электрических цепях. Схемная модель позволяет перейти от электрической цепи, в которой процессы описываются интегро-дифференциальными уравнениями, к схеме замещения с изображениями токов в виде векторов. Векторы-изображения содержат коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимостей токов от времени. Показано, что для изображений токов справедливы законы Кирхгофа, приводящие к алгебраическим уравнениям.

Практическая значимость. Разработанный метод открывает возможность использования всего многообразного аппарата теории цепей для работы с изображениями токов, на основании чего разработан универсальный программный комплекс Colo-IDU для расчета переходных процессов в сложных электрических цепях.

Ключевые слова: *переходный процесс, численные методы, схемная модель, полиномиальная аппроксимация*

Постановка задачи. Переходные электромагнитные процессы в электротехнических системах,

приводящие к броскам тока при коммутациях, представляют значительную опасность для оборудования, а также влияют на надежность релейной защиты, поэтому исследование этих процессов актуаль-