

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 631.363

В.С. Федорейко, д-р техн. наук, проф.,
І.Б. Луцик, канд. техн. наук,
І.С. Іскерський, канд. техн. наук,
Р.І. Загородній

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

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БІОТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛЬНОГО ДОЗУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ГОРІННЯ

V.S. Fedoreiko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
I.B. Lutsyk, Cand. Sci. (Tech.),
I.S. Iskerskyi, Cand. Sci. (Tech.),
R.I. Zagorodnii

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

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF HEAT GENERATOR THROUGH BATCHING COMPONENTS OF BURNING

Мета. Обґрунтування можливості підвищення енергоефективності твердопаливних теплогенераторів шляхом застосування регульованих режимів дозування повітря та палива.

Методика. Дослідження процесу горіння твердого палива базується на законах збереження маси, енергії та кількості руху, що є наслідками першого й другого законів термодинаміки. Планування заходів з метою підвищення енергоефективності ґрунтується на основі принципів енергетичного менеджменту з використанням даних, отриманих на основі методів імітаційного та фізичного моделювання.

Результати. Проаналізовані фактори, що впливають на ефективне спалювання твердого біопалива в теплогенераторах. Запропонований спосіб дозування компонентів твердого палива та повітря на основі аналізу складу димових газів. Створена імітаційна модель електротехнологічного комплексу теплогенератора з системою керування електроприводом вентилятора та шнека на базі використання адаптивних нейронечітких систем.

Наукова новизна. Обґрунтована ефективність реалізації раціонального дозування компонентів горіння з використанням регульованих режимів роботи шнека подачі палива та вентилятора на основі аналізу складу димових газів, що дало змогу підвищити енергоефективність твердопаливних теплогенераторів, зменшити шкідливі викиди до атмосфери, забезпечити безпечну подачу палива до камери горіння, що унеможливило загорання палива в бункері при аварійній зупинці.

Практична значимість. Запропонований спосіб подачі енергоефективної паливної суміші у твердопаливних котлах пройшов випробування на виробничих потужностях ТОВ „Українські технологічні системи“ в Тернопільській обл. В якості компонентів біопалива використовувалися подрібнена солома вологістю 25–37% та тирса деревини вологістю 12–15%. У ході експериментальних випробувань система керування продемонструвала задовільну роботу на технологічному обладнанні підприємства. Отримані результати довели, що застосування запропонованої нами технології дозволяє зменшити затрати електроенергії в середньому на 17%. Даний спосіб може використовуватися на переробних підприємствах великої та малої потужності, що націлені на використання альтернативних видів палива.

Ключові слова: *тверде біопаливо, режими дозування, електропривод, теплогенератор, енергоефективність, паливна суміш*

Вступ. Основою розвитку базових галузей промисловості, що визначають прогрес суспільного виробництва, є енергетика. Раціональне, економне ви-

користання енергетичних ресурсів країни – важливе народногосподарське завдання. Найбільша доля енергетичних затрат припадає на системи та установки опалення, тому є актуальним удосконалення вказаних технологій з точки зору енергоефективності та врахування факторів екологічної безпеки.

Енергоощадність технології спалювання в котлах значною мірою залежить від виду палива, що використовується. Перспективним напрямом в усьому світі є використання біопалива, що обумовлює актуальність дослідження процесу спалювання вказаного виду ресурсу з метою визначення шляхів забезпечення його ефективності.

Слід зазначити, що біомаса має певні особливості, які відрізняють її від традиційних енергоресурсів, а саме:

- безпосереднє спалювання рослинної біомаси ускладнюється внаслідок її низької щільності та високої вологості;

- без спеціальної обробки біомаса багатьох рослин схильна до гниття, що знижує її енергетичну й технологічну цінність;

- деякі з характеристик твердого біопалива, такі як, наприклад, щільність, розміри часток, вологість, за допомогою подрібнення та ущільнення можуть бути змінені. Паливні гранули з рослинної біомаси мають високу енергію згорання при незначному обсязі.

Наприклад, при спалюванні 1 тонни паливних гранул соломи, що еквівалентно 0,5 тонн умовного палива, виділяється 16,5 ГДж енергії – стільки ж, як при спалюванні 0,53 тонн ум.п. дизельного пального (460 л) або 0,56 тонн ум.п. природного газу (490 м³).

Тому у процесі експлуатації теплогенераторів, з метою підвищення енергоефективності горіння твердого біопалива, потрібно враховувати вказані характеристики.

Також для ефективного горіння твердого палива необхідно забезпечити узгоджене керування окремими модулями електротехнологічного комплексу біотеплогенератора, зокрема вирішення задачі регулювання частотою обертання електроприводів вентилятора та шнека, що визначають об'єми дозування компонентів горіння.

Тому актуальним завданням є забезпечення енергоефективності теплогенератора шляхом визначення регульованих режимів дозування компонентів горіння на основі аналізу відсоткового складу кисню в димових газах.

Мета дослідження – обґрунтування можливості підвищення енергоефективності твердопаливних теплогенераторів шляхом застосування регульованих режимів дозування повітря та біопалива.

Матеріали та методика досліджень процесу горіння твердого палива базуються на законах збереження маси, енергії та кількості руху, що є наслідками першого й другого законів термодинаміки. Планування заходів з підвищення енергоефективності ґрунтується на основі принципів енергетичного менеджменту з використанням даних, отриманих на основі методів імітаційного та фізичного моделювання

Виклад основного матеріалу. З метою раціоналізації процесу дозування компонентів твердого біопалива необхідно провести аналіз характеристик технології спалювання. У ході моделювання слід врахо-

увати взаємозв'язок фізико-хімічних та електрофізичних властивостей процесу горіння:

- рух компонентів паливної суміші в камері горіння;

- наявність турбулентної та молекулярної дифузії вихідних речовин і продуктів реакції;

- теплообмін у газових потоках продуктів згорання та димових газів;

- конвективний теплообмін горючих часток з газовим середовищем;

- процеси нагріву частинок, сублімації летючих, перенесення й горіння їх у газовому об'ємі.

Створення комплексної математичної моделі, що враховувала би вказані аеродинамічні й фізико-хімічні процеси, будується на ряді припущень, а саме:

- горіння летючих речовин і догорання продуктів неповного згорання відбувається в газовому середовищі;

- реагування протікає на поверхні вуглецевих частинок сферичної форми однакових розмірів;

- нехтування конвективним переносом теплоти із системи та дифузною теплопровідністю.

Таким чином, загальна система рівнянь законів збереження маси для компонентів палива, що описує процеси горіння, має вигляд

$$\frac{d(\rho_j)}{dt} = -\text{div}(\rho_j \cdot v_j) + m_j ; \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho_j \cdot e_j)}{dt} = -\text{div}J_e ; \quad (2)$$

$$\frac{d(\rho_j \cdot v_j)}{dt} = -\text{div}(\rho_j \cdot v_j \cdot v_j + P) ; \quad (3)$$

де ρ_j – щільність потоку маси j-го компонента, що переноситься в елементарному об'ємі; v_j – швидкість центру мас елементарного об'єму, м/с; e – повна енергія на одиницю маси j-го компонента, Дж/кг; J_e – повний питомо-масовий потік енергії, Вт/м²; P – тензор тисків на елементарний об'єм, Па; m_j – питома потужність зміни маси j-го компонента, (кг/с)/м³.

Аналіз наведеної системи рівнянь, що описує процес горіння твердого біопалива, дозволяє стверджувати про необхідність подальших досліджень щодо раціоналізації дозування компонентів для підвищення енергоефективності теплогенератора. Тому доцільним є проведення експериментальних досліджень на фізичній та імітаційній моделях твердопаливного котла. Для цього необхідним є розгляд теплового балансу газодинаміки паливного простору.

Паливний простір умовно можна розділити на три частини, середовище яких є гомогенне: I – область змішування компонентів; II – зона горіння; III – зона теплообміну. Тоді матеріальний баланс областей можна представити системою рівнянь [1]

$$\begin{cases} \frac{dm_I}{dt} = F_{нал} + F_{нов} - v_I S \rho_I \\ \frac{dm_{II}}{dt} = v_I S \rho_I - v_{II} S \rho_{II} \\ \frac{dm_{III}}{dt} = v_{II} S \rho_{II} - F_{дим} \end{cases}, \quad (4)$$

де m_I, m_{II}, m_{III} – маси компонентів горіння; v_I, v_{II}, v_{III} – швидкості потоків; c_I, c_{II} – щільність газів у відповідних областях; S – площа поперечного перерізу камери горіння; $F_{нал}, F_{нов}$ – потоки паливного газу та повітря.

Тепловий баланс областей

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(c_I m_I T_I) = c_{нал} F_{нал} T_0^{нал} + c_{нов} F_{нов} T_0^{нов} - c_I F_I T_I \\ \frac{d}{dt}(c_{II} m_{II} T_{II}) = c_I F_I T_I + q F_I - c_{II} F_{II} T_{II} \\ \frac{d}{dt}(c_{III} m_{III} T_{III}) = c_{II} F_{II} T_{II} - Q - c_{дим} F_{дим} T_{III} \end{cases}, \quad (5)$$

де $c_I, c_{II}, c_{III}, T_I, T_{II}, T_{III}$ – теплоємності та температури газів у відповідних областях; $c_{нал}, c_{нов}$ – теплоємності паливного газу та повітря; $T_0^{нал}, T_0^{нов}$ – початкова температура паливного газу й повітря; $F_{дим}$ – потік димових газів; F_I, F_{II} – потік суміші газів із першої та другої області відповідно; q – питома теплота згорання паливного газу; Q – теплота нагріву, що чисельно дорівнює тепловому потоку, який поступає від згорання палива.

Для визначення раціональних режимів дозування компонентів паливної суміші проведено експериментальні дослідження на основі теплогенератора Д-150А (рис. 1). Також розроблена система керування швидкісними режимами шнека та вентилятора.



Рис. 1. Твердопаливний теплогенератор : 1 – автоматична система керування; 2 – камера згорання палива; 3 – теплообмінник; 4 – регульований двигун подачі біопалива; 5 – регульований двигун подачі паливної суміші; 6 – паливний бункер; 7 – вентилятор нагнітання теплоносія; 8 – вихідний повітропровід; 9 – димар

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що підвищення ефективності роботи теплогенераторів можливе за рахунок інтенсифікації процесу спалювання в них твердого біопалива. При цьому слід унеможливити потрапляння вогню чи іскри до паливного бункера з камери горіння. Адже у випадку прямої подачі палива шнеком до камери згорання існує небезпека потрапляння полум'я через шнек у бункер. Залежно від типу палива, можливе забивання шнека, що не дозволяє залишати такий котел в автоматичному режимі без нагляду.

Частковим вирішенням цієї проблеми є використання ступінчастої подачі палива. За такого підходу паливо шнеком подається на певну відстань, а тоді під дією сили земного тяжіння надходить до камери згорання.

Ще один ефективний, на наш погляд, спосіб – паливо з певною кількістю повітря вентилятор задуває до камери згорання. Цей спосіб виконує дві функції: 1 – подача палива; 2 – подача повітря для горіння.

Таким чином, вирішення задачі підвищення енергоефективності теплогенератора можливе за рахунок використання регульованих режимів дозування повітря та палива за допомогою, відповідно, вентилятора та шнекового механізму до камери згорання атмосферного котла на основі аналізу відсоткового складу кисню в димових газах.

Для диференціювання швидкісних режимів доцільним є використання частотно-регульованого електропривода, що забезпечить значне зниження моменту навантаження при зниженні швидкості обертання приводного двигуна [2].

Спосіб безпечної подачі енергоефективної паливної суміші (рис. 2) до твердопаливного котла здійснюється наступним чином.

Технологічна біомаса (паливо) засипається до бункера й за допомогою зворушувача та шнека подається на вентилятор. Вентилятор задуває паливо разом з повітрям до камери згорання котла, де відбувається спалювання завантаженої біомаси.

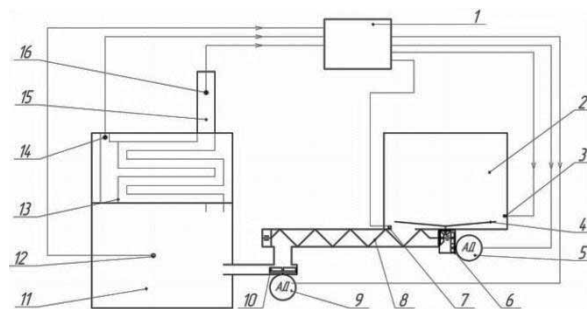


Рис. 2. Структурна схема подачі палива до теплогенератора: 1 – автоматична система керування; 2 – паливний бункер; 3 – датчик рівня палива; 4 – зворушувач; 5 – двигун; 6 – редуктор; 7 – датчик вологості палива; 8 – шнек; 9 – регульований електродвигун; 10 – вентилятор; 11 – камера згорання палива; 12 – датчик температури; 13 – теплообмінник; 14 – датчик температури; 15 – димовивідна труба; 16 – кисневий λ-зонд

Контроль необхідної кількості нагнітаючого повітря вентилятором здійснюється автоматичною системою керування шляхом визначення швидкісних режимів двигуна на основі даних кисневого λ -зонду, що знаходиться у димовивідній трубі.

Одночасно системою контролюється ефективність нагрівання теплообмінника шляхом обробки даних від датчика температури для забезпечення раціонального дозування палива, що подається шнеком до камери згорання.

З цією ж метою у паливному бункері датчиком рівня палива відслідковується наявність його достатньої кількості із врахуванням його вологості та щільності.

Для визначення ефективності використання енергетичних ресурсів, згідно із запропонованим способом, виникає необхідність енергетичних обстежень згідно з принципами енергетичного менеджменту з використанням даних, отриманих за допомогою методів імітаційного та фізичного моделювання.

У даному випадку доцільним є визначення трьох показників, а саме:

питоми витрати палива, кг/(кВт × год)

$$q = \frac{Q}{P \times \eta} ; \quad (6)$$

питома маса, кг/кВт

$$m = \frac{M}{P \times \eta} ; \quad (7)$$

питома вартість, грн./кВт

$$c = \frac{C}{P \times \eta} , \quad (8)$$

де P – паливна потужність котлів, кВт; Q – витрата палива, кг/год; C – вартість, грн.; η – коефіцієнт корисної дії.

З метою перевірки ефективності розробленого нами способу створена імітаційна модель (рис. 3), що дозволяє відтворювати динаміку змін основних параметрів системи (продуктивності котла, вентилятора та шнека-дозатора, а також їх ККД) і зовнішнього середовища (температури та вологості повітря). Це є особливо важливим у ході аналізу функціонування технологічних процесів, де відбувається взаємозв'язок біологічних та технічних параметрів [3].

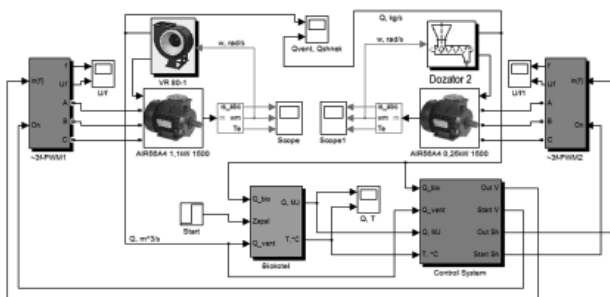


Рис. 3. Імітаційна модель твердопаливного котла

Оскільки основні процеси, що відбуваються в теплогенераторі, є недетермінованими та нечітко визначеними, для реалізації певних модулів імітаційної моделі доцільним є використання апарату гібридних мереж.

Зокрема, у системі керування, для визначення швидкісних режимів роботи електропривода шнека, однією з підсистем є модуль розрахунку рівноважної вологості палива на основі даних щодо температури та вологості повітря та із урахуванням виду палива.

Для реалізації модуля розрахунку рівноважної вологості палива застосовано апарат адаптивних нейронечітких систем виводу. Згідно з методикою створення ANFIS-моделей, на основі табличних даних сформовані матриці з конкретними вибірками, що використані для генерації та навчання нечітких систем. Подальша перевірка довела адекватність розроблених нечітких систем: похибка відтворення становила 0,22–0,35%.

Проведені нами дослідження дозволили визначити теплову ефективність запропонованого способу, зокрема встановлено залежності коефіцієнта корисної дії теплогенератора від коефіцієнта надлишку повітря α та питомої теплової напруги об'єму камери горіння (відношення швидкості тепловиділення в камері згорання Q до обсягу теплообмінника) – рис. 4.

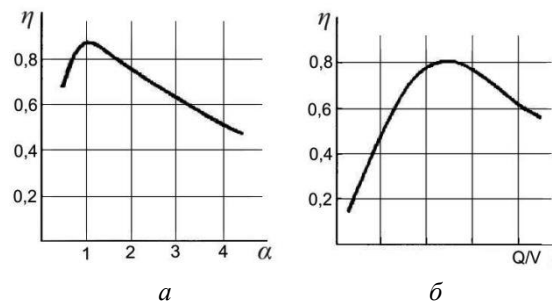


Рис. 4. Залежності коефіцієнта корисної дії теплогенератора від конструктивних і режимних параметрів: а – від коефіцієнта надлишку повітря α ; б – від питомої теплової напруги об'єму камери горіння

Запропонований спосіб подачі енергоефективної паливної суміші в атмосферних котлах, у порівнянні з аналогами, забезпечує зменшення загальної витрати палива, підвищує коефіцієнт корисної дії твердопаливних котлів та забезпечує безпечну подачу палива до камери горіння.

Висновки.

1. Доведено, що вирішення завдання підвищення енергоефективності твердопаливних теплогенераторів можливе шляхом реалізації раціонального дозування компонентів горіння з використанням регульованих режимів роботи шнека подачі палива та вентилятора на основі аналізу складу димових газів.

2. Розроблена імітаційна модель теплогенератора згідно із запропонованим способом, дослідження якої дозволило визначити, що одним із шляхів для покращення якості регулювання системи, її енергоефек-

тивності є застосування адаптивних способів керування, а також методів нечіткої логіки для аналізу змін параметрів системи.

3. Запропонований спосіб подачі енергоефективної паливної суміші у твердопаливних котлах, у порівнянні з аналогами, забезпечує зменшення загальної витрати палива, підвищує коефіцієнт корисної дії твердопаливних котлів та забезпечує безпечну подачу палива до камери горіння.

Список літератури / References

1. Компьютерная симуляция теплогенерирующих установок / Р.А. Садыков, Д.Н. Антропов, Д.В. Крайнов, Ю.Л. Линючкин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 1 (11). – С. 196–200.

Sadykov, R.A. and Antropov, D.N., Krainov, D.V. and Linyuchkin, Yu.L. (2009), “Computer-based simulation of heat-generating plants”, *Izvestia of Kazan State University of Architecture and Engineering*, no. 1 (11), pp. 196–200.

2. 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.

3. Імітаційне моделювання раціональних швидкісних режимів технологічних процесів / В.С. Федорейко, І.Б. Луцик, І.С. Іскерський, М.І. Рутило // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2013. – Вип. 184. – С. 54–60.

Fedoreiko, V.S. and Lutsyk, I.B. and Iskerskyu, I.S. and Rutylo, M.I. (2013), “Simulation modeling of rational the speed modes of technological processes”, *Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, no. 184, pp. 54–60.

Цель. Обоснование возможности повышения энергоэффективности твердопаливних теплогенераторов путем применения регулируемых режимов дозирования воздуха и топлива.

Методика. Исследование процесса горения твердого топлива базируется на законах сохранения массы, энергии и количества движения, которые являются следствием первого и второго законов термодинамики. Планирование мероприятий для повышения энергоэффективности основывается на принципах энергетического менеджмента с использованием данных, полученных на основе методов имитационного и физического моделирования.

Результаты. Проанализированы факторы, влияющие на эффективное сжигание твердого биотоплива в теплогенераторах. Предложен способ дозирования компонентов твердого топлива и воздуха на основе анализа состава дымовых газов. Создана имитацион-

ная модель электротехнологического комплекса теплогенератора с системой управления электроприводов вентилятора и шнека на базе использования адаптивных нейронечетких систем.

Научная новизна. Обоснована эффективность реализации рационального дозирования компонентов горения с использованием регулируемых режимов работы шнека подачи топлива и вентилятора на основе анализа состава дымовых газов, что позволило повысить энергоэффективность твердопаливних теплогенераторов, уменьшить вредные выбросы в атмосферу, обеспечить безопасную подачу топлива в камеру горения, что делает невозможным возгорание топлива в бункере при аварийной остановке.

Практическая значимость. Предлагаемый способ подачи энергоэффективной топливной смеси в твердопаливних котлах прошел испытание на производственных мощностях ООО „Украинские технологические системы“ в Тернопольской обл. В качестве компонентов биотоплива использовались измельченная солома влажностью 25–37% и опилки древесины влажностью 12–15%. В ходе экспериментальных испытаний система управления продемонстрировала удовлетворительную работу на технологическом оборудовании предприятия. Полученные результаты доказали, что применение предложенной нами технологии позволяет уменьшить затраты электроэнергии в среднем на 17%. Данный способ может использоваться на перерабатывающих предприятиях большой и малой мощности, которые нацелены на использование альтернативных видов топлива.

Ключевые слова: твердое биотопливо, режимы дозирования, электропривод, теплогенератор, энергоэффективность, топливная смесь

Purpose. Justification possibilities of increasing of energy efficiency of heat generators by means regulating modes dosing of air and fuel.

Methodology. Investigation of combustion process solid fuel is based on the laws of conservation of mass, energy and momentum. Planning activities for energy efficiency is based on the principles of energy management using data derived with methods of simulation and physical modeling.

Findings. The factors affecting the efficient combustion of solid biofuels analyzed. A method for dosing the components of a solid fuel and air on the basis of analysis the composition of the flue gases was suggested. A simulation model of electro complex heat source with a fan motor control system based on the use of adaptive neuro-fuzzy systems was created.

Originality. Substantiated efficiency of realization of rational dosage of components of burning is with the use of the regulated modes of operations of auger for serves of fuel and ventilator on the basis of analysis of composition of smoke gases. It allowed to increase energy efficiency of heat generator; decrease harmful emissions in an atmosphere; to provide the secure fuel supply at the chamber of burning, that does impossible ignition of fuel in a bunker in case of emergency stopping.

Practical value. The proposed method of supplying energy-efficient fuel mixture in the solid fuel boilers was tested for production facilities “Ukrainian technological systems” in the Ternopil region. As components of bio-fuels used chopped straw (humidity 25–37%) and sawdust (humidity 12–15%). During the experiment test system of control demonstrated satisfactory performance on the process equipment company. The results obtained proved that the use of technology allows us to reduce en-

ergy costs by an average of 17%. This method can be used in enterprises, which focusing on the use of alternative fuels.

Keywords: *solid biofuel, dosing regimens, electric, heat generator, energy efficiency, fuel mixture*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук П.С. Євтухом. Дата надходження рукопису 14.09.13.

УДК 007:681.516.4

**А.О. Лозинський, д-р техн. наук, проф.,
Л.І. Демків, канд. фіз.-мат. наук**

Національний університет “Львівська політехніка”, м.Львів, Україна, email: lozynsky@polynet.lviv.ua; demkivl@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАСКАДНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

**A.O. Lozynskyi, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
L.I. Demkiv, Cand. Sci. (Math.)**

National university “Lviv Polytechnic”, Lviv, Ukraine, email: lozynsky@polynet.lviv.ua, demkivl@gmail.com

STUDY OF THE INFLUENCE OF FUZZY CASCADE CONTROLLER ON CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ARC FURNACE’S ELECTRODE MOVEMENT

Мета. Покращити динамічні характеристики системи автоматичного керування переміщенням електрода дугової сталеплавильної печі при допустимих перерегулюваннях проміжних координат.

Методика. Застосовано апарат нечітких множин для синтезу керуючих впливів в окремих точках простору станів. Для того, щоб значення проміжних координат залишались у допустимих межах, застосовано каскадний регулятор, перший каскад якого активує потрібну підсистему з відповідним ваговим коефіцієнтом, а другий обмежує вихідний сигнал регулятора у випадку перевищення проміжними координатами допустимих меж. Крім того, для спрощення синтезу нечіткого регулятора суттєво обмежено кількість термів кожної нечіткої змінної.

Результати. Проведене порівняння пропонованого підходу та підходів на основі принципу модального керування до синтезу регулятора системи автоматичного керування переміщенням електрода. Визначені кількісні та якісні переваги пропонованого підходу до синтезу нечіткого каскадного регулятора досліджуваної системи. Крім того, проведений аналіз поведінки системи із пропонованим нечітким регулятором та нечіткими регуляторами з фазифікацією однієї та двох змінних. Одержані результати свідчать про доцільність застосування каскадного регулятора в системі автоматичного керування переміщенням електрода дугової сталеплавильної печі.

Наукова новизна. У роботі запропонований метод синтезу, що забезпечує як бажаний перехідний процес за вихідною координатою, так і обмеження проміжних координат системи.

Практична значимість. Запропонований підхід дозволяє покращити адаптацію системи автоматичного керування переміщенням електрода дугової сталеплавильної печі до різних режимів роботи.

Ключові слова: *нечітка логіка, нечіткий регулятор, модальний регулятор, каскадний нечіткий регулятор, фазифікація, двомасова динамічна система, ступені свободи*

Постановка проблеми. На сьогоднішній день існуючі методи синтезу регуляторів електромеханічних систем не завжди дають змогу забезпечити техніко-економічні вимоги до їх функціонування. Адже спрощена, лінеаризована модель системи не враховує присутніх у системі нелінійностей та обмежень, що

накладено на коефіцієнти. А синтезована, з використанням такої моделі система, забезпечує оптимальне функціонування тільки в околі окремої точки.

Дана робота присвячена синтезу регулятора системи автоматичного керування (САК) переміщенням електродів дугової сталеплавильної печі (ДСП) при обмеженні на її проміжні координати, що впливають з фізичних властивостей складових ДСП.