

УДК 681.516.75: 632.08

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНТОМОФАГІВ

В. П. Лисенко, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: lysenko@nubip.edu.ua

І. С. Чернова, інженер

Інженерно-технологічний інститут «Біотехніка» НААН України

E-mail: bioischernova@ukr.net

Анотація. Стаття присвячена розробленню інтелектуальної системи керування електротехнічним комплексом для лабораторного виробництва млинової вогнівки (*Ephestia kuehniella*), комахи-хазяїна ентомофага бракон (*Habrobracon hebetor*), який є ектопаразитом у біологічному захисті від шкідників томатів, кукурудзи, соняшника та інших культур.

Метою досліджень є розроблення системи керування електротехнічним комплексом, здатної забезпечити високу точність підтримання температурного режиму в боксі для лабораторного розведення млинової вогнівки за умов збурень та неповної інформації про стани біологічної складової об'єкта.

Методи досліджень - структурний синтез, експериментальний аналіз, нейро-нечіткий висновок.

Розроблено комп'ютерно-інтегровану нейро-фаззі SCADA-систему керування електротехнічним комплексом для лабораторного виробництва млинової вогнівки, здатну суттєво підвищити точність підтримання температурного режиму в боксі у порівнянні з традиційною системою керування на основі двопозиційного регулятора. Нейро-фаззі регулятор реалізований в Simulink MATLAB на базі ANFIS - редактора і Fuzzy Logic Toolbox MATLAB.

За результатами експериментальних досліджень проаналізовано роботу системи керування температурою повітря боксу на основі двопозиційного регулятора. Запропоновано систему керування електротехнічним комплексом із використанням інтелектуального алгоритму обробки інформації, зокрема, гібридної нейронної мережі прямого поширення сигналу. Проведено моделювання гібридної системи керування і тестування нейро-фаззі регулятора.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, система керування, виробництво ентомофагів, збурення, нейро-фаззі регулятор, точність

Актуальність. На сьогодні біологічний метод захисту рослин є одним з пріоритетних напрямів біологізації землеробства в Україні. Виробництво ентомофагів, як біотехнологічний об'єкт, уявляє собою складну динамічну систему, що потребує керування. Важливими особливостями виробництва є значні сумарні енергетичні витрати в зоні вирощування комах на підтримання заданої температури повітря та невизначеність біологічного об'єкту, яка проявляється у його різній поведінці за дією сукупності факторів впливу. При цьому якість ентомологічної продукції, що оцінюється за біологічними показниками (плодючістю самок, проценту відродження імаго, статевим індексом та ін.) суттєво залежить від точності підтримання температури в зоні розвитку ентомокультур.

Складність управління виробництвом ентомофагів полягає в: наявності значної кількості ділянок (підсистем), що зв'язані між собою структурно та функціонально, – процеси розведення комах-хазяїна, комах-паразита, контроль якості ентомологічної продукції, зберігання комах-паразита; необхідності урахування різних критеріїв оптимізації при роботі підсистем [1]; стохастичності (неоднозначній поведінці біологічного об'єкту); дії збурень (різкому змінненні температури та відносної вологості зовнішнього середовища, припиненні електропостачання, частковій втраті працездатності обладнання, його зношуванні, перемішуванні повітря боксу для розведення ентомокультур з повітрям зовнішнього приміщення) та присутності слабо-структурованих процесів (вплив виду поживного середовища комах-хазяїна, віку яєць комах-хазяїв, підживлення поживного середовища біодобавками та ін. на якість ентомологічної продукції) [2].

Інтенсифікацію процесу виробництва ентомофагів може бути досягнуто за рахунок підвищення точності регулювання температури повітря в боксі для розведення ентомокультур. Для цього необхідно вдосконалити існуючу

локальну систему керування із двопозиційним регулятором шляхом використання сучасних інтелектуальних алгоритмів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні використання інтелектуальних алгоритмів обробки інформації є важливим напрямом розвитку сучасних технологій, у тому числі за умов використання SCADA-систем. Особливо це стосується умов невизначеності, коли обмежені обсяги інформації про об'єкт керування. Центральним питанням при цьому є проектування бази знань щодо предметної області [3].

Так, для розробки інтелектуальних систем керування електротехнічними комплексами в промислових пташниках [4], теплицях [5], при вирощуванні сільськогосподарських рослин [6] використано бази знань на основі теорії ігор і статистичних рішень, штучних нейронних мереж.

Основними напрямками використання інформаційних технологій у системі біологічного захисту рослин від шкідників є автоматизація біотехнологічних процесів, їх моделювання, створення баз даних і баз знань [2, 7, 8].

Мета дослідження – розроблення системи керування електротехнічним комплексом, здатної забезпечити високу точність підтримання температурного режиму в боксі для лабораторного розведення млинової вогнівки за умов збурень та неповної інформації про стани біологічної складової об'єкта.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктом дослідження є процес керування температурою повітря у боксі для лабораторного вирощування млинової вогнівки. Предметом дослідження є співвідношення між режимами функціонування електротехнічних комплексів та точністю підтримання температурного режиму при виробництві ентомофагів. Для каналу регулювання «температура в боксі – потужність теплообмінного пристрою» об'єкт представлено передатною функцією у вигляді аперіодичної (інерційної) ланки першого порядку з експериментально визначеними постійною часу 775 с, коефіцієнтом підсилення $0,0064 \text{ } ^\circ \text{C} / \text{Вт}$ та ланки чистого запізнювання із

запізненням у 180 с. У роботі були використані результати експериментальних досліджень, проведених в Інженерно-технологічному інституті «Біотехніка» при виконанні науково-дослідної роботи № 10.00.01.04П «Розробити автоматизовану систему контролю якості ентомологічних засобів захисту рослин при їх масовому розведенні». Методи досліджень – структурний синтез, експериментальний аналіз, нейро-нечіткий висновок. Методика досліджень містить: формування вибірки для навчання нейро-фаззі регулятора за результатами роботи локальної системи керування із врахуванням збурень, її завантаження в ANFIS – редактор, завдання функцій приналежності, визначення структури гібридної мережі, навчання мережі, визначення помилки мережі від кількості циклів навчання, тестування мережі, перегляд автоматично сформованих правил, випробування гібридної системи керування, тестування нейро-фаззі регулятора, визначення середньої похибки апроксимації (відповідності керуючої дії нейро-фаззі регулятора керуючій дії у навчальній вибірці).

Результати досліджень та їх обговорення. Розроблено інтелектуальну систему керування електротехнічним комплексом для лабораторного виробництва млинової вогнівки у вигляді комп'ютерно-інтегрованої нейро-фаззі SCADA-системи (КІНФС) на базі локальної системи керування (ЛСК) температурою повітря (θ_1) в боксі для вирощування ентомокультур, SCADA OWEN PROCESS MANAGER (OPM) v.1.2 і нейро-фаззі регулятора (НФР) температури повітря боксу. Структурна схема системи представлена на рис. 1.

На рис. 1 позначено: ЛАКП - локальний автоматичний керуючий пристрій - вимірник-регулятор ТРМ 202 ОВЕН; АПІ - автоматичний перетворювач інтерфейсу USB/RS-485 АС4 ОВЕН; ВП - нагрівач «ТЕРМОЛЮКС»; ПК персональний комп'ютер; БО - біотехнологічний об'єкт – бокс з ентомокультурами і датчиком температури повітря (ТСМ-2-10к-100М); БД – база даних; БЗ – база знань; θ'' – уставка температури повітря боксу; e - помилка

регулювання температури повітря боксу локальною системою керування; u - керуюча дія регулятора ТРМ 202 ОВЕН; u^k - керуюча дія нейро-фаззи регулятора; Z - збурення.

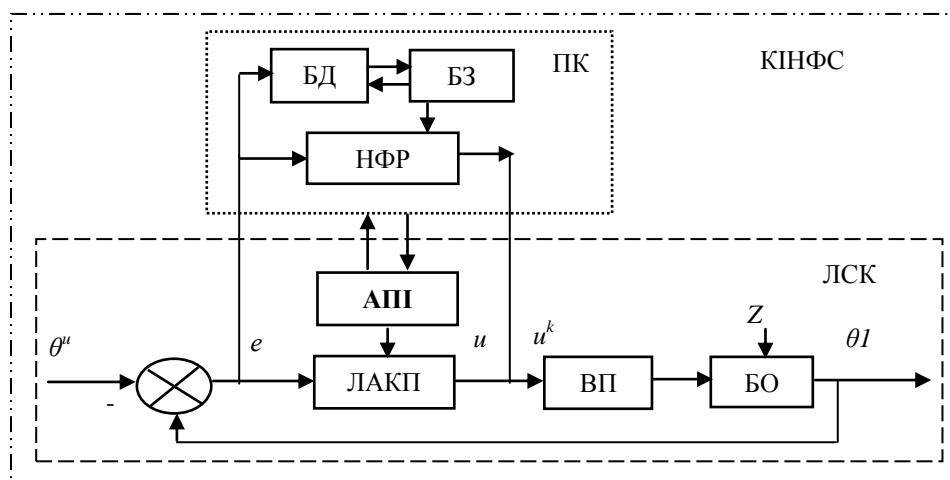


Рис. 1. Структурна схема комп'ютерно-інтегрованої нейро-фаззи SCADA системи

Для побудови нейро-фаззи регулятора температури повітря боксу та перевірки його працездатності використано комп'ютерні моделі в середовищі MATLAB / Simulink із використанням ANFIS - редактора і Fuzzy Logic Toolbox. SCADA OPM дозволяє контролювати, відображати та зберігати в автоматичному режимі температуру повітря боксу впродовж технологічного циклу розвитку ентомокультур.

Проведено експериментальні дослідження локальної системи керування при $\theta^u = 26$ ° С, зоні нечутливості регулятора $\pm 0,5$ ° С, середньодобовій температурі навколишнього середовища $\theta^n = 21$ ° С, середньодобовій відносній вологості навколишнього середовища $\varphi^n = 62$ %, середньодобовій відносній вологості боксу $\varphi^s = 61$ % і температурі зовнішнього приміщення $\theta^z = 22$ ° С (температура боксу $\theta 1^1$ у першому експерименті); $\theta^n = -1,5$ ° С, $\varphi^n = 99,4$ %, $\varphi^s = 45$ % і $\theta^z = 20$ ° С (температура боксу $\theta 1^2$ у другому експерименті); $\theta^n = -1,5$ ° С, $\varphi^n = 85,3$ %, $\varphi^s = 42$ % і $\theta^z = 19$ ° С (температура боксу $\theta 1^3$ у третьому

експерименті). Температура в боксі у процесі функціонування системи змінювалась в діапазоні від 24,5 °С до 28,3 °С з періодом коливань 2240 с – 2808 с. Результати експериментальних досліджень представлено на рис. 2.

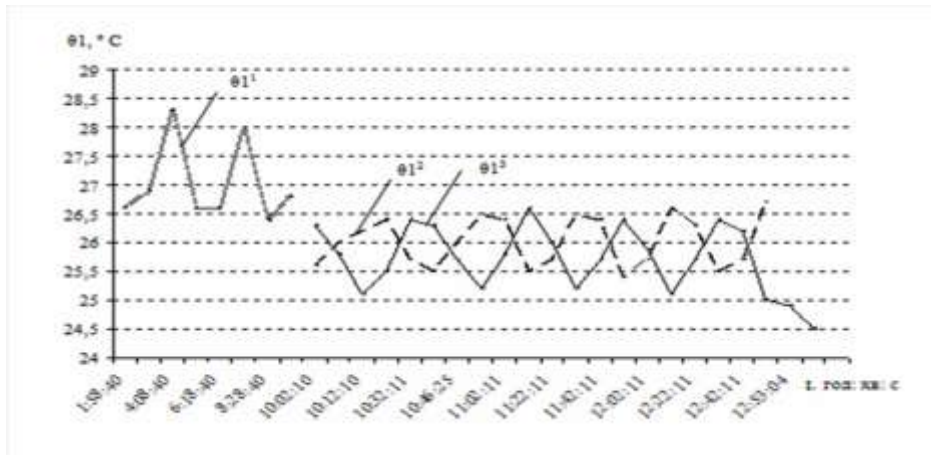


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень локальної системи керування

Таким чином, результати експериментальних досліджень свідчать про високу коливальність регульованого параметру, що призводить до втрат якості ентомофагів та перевитрат електроенергії. Тому виникло завдання вдосконалення існуючої локальної системи шляхом використання інтелектуальних алгоритмів керування.

Побудовано нейро-фаззі регулятор температури повітря боксу. Навчальну вибірку, що наведена в таблиці, сформовано за умовою:

$$\begin{aligned} u^v &= 0, \text{ якщо } -1,6 \leq e^v \leq -0,5; \\ u^v &= 1, \text{ якщо } -0,5 < e^v \leq 1,6; \end{aligned} \quad (1)$$

де u^v - керуюча дія в навчальній вибірці, e^v - помилка регулювання температури повітря боксу в навчальній вибірці, °С.

Навчальна вибірка

$e^v, \text{ } ^\circ C$	u^v	$e^v, \text{ } ^\circ C$	u^v	$e^v, \text{ } ^\circ C$	u^v
1,6	1	0,5	1	-0,6	0
1,5	1	0,4	1	-0,7	0
1,4	1	0,3	1	-0,8	0
1,3	1	0,2	1	-0,9	0
1,2	1	0,1	1	-1	0
1,1	1	0	1	-1,1	0
1	1	-0,1	1	-1,2	0
0,9	1	-0,2	1	-1,3	0
0,8	1	-0,3	1	-1,4	0
0,7	1	-0,4	1	-1,5	0
0,6	1	-0,5	0	-1,6	0

Гібридна мережа, структура якої наведена на рис. 3, згенерована у вигляді п'ятишарової нейронної мережі прямого поширення сигналу.

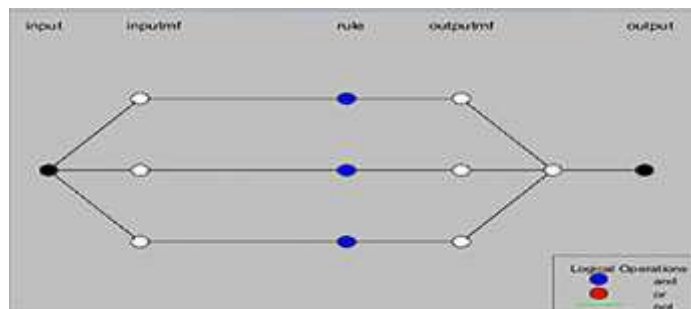


Рис. 3. Згенерована гібридна мережа

Вхідною змінною (input1) мережі є помилка регулювання температури, вихідною (output) – керуюча дія регулятора (0 – вимкнути нагрівач, 1 – ввімкнути нагрівач). Термами вхідної змінної є in1mf1, in1mf2, in1mf3 з трикутними функціями приналежності термів - in1mf1:trimf [-2.8; -0.4971; -0.4035], in1mf2:trimf [-2.797; 0.401; 1.602] та in1mf3:trimf [-0.009; 1.598; 3.2]. Термами вихідної змінної є out1mf1:constant [-0.719], out1mf2:constant [0.9999], out1mf3:constant [0.9999]. Значення термів вихідної змінної визначались шляхом навчання мережі за гібридним методом. Навчання закінчилось через 110 епох; помилка становила 0,00011259. Середня помилка тестування навчальної вибірки склала 0,000075145.

Автоматично згенеровані продукційні правила (база знань) нейро-нечіткої системи висновку за Сугено мають вигляд:

П1: якщо input1 є «in1mf1», то output є «out1mf1»;

П2: якщо input1 є «in1mf2», то output є «out1mf2»;

П3: якщо input1 є «in1mf3», то output є «out1mf3».

Етапами нейро-нечіткого висновку є: And method – prod (реалізація логічної кон'юнкції за методом алгебраїчного добутку), Or method – probor (реалізація логічної диз'юнкції за методом алгебраїчної суми), Defuzzification (Метод дефаззифікації) – wtaver (метод зваженого середнього).

На рис. 4 в MATLAB/ Simulink представлено структурну схему гібридної системи керування, де помилка регулювання температури повітря локальної системою керування безпосередньо подається на нейро-фаззі регулятор. При цьому уставка температури повітря була 26°C , початкова температура боксу $25,4^{\circ}\text{C}$, зона нечутливості регулятора $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Для аналізу руху локальної системи керування застосовано метод припасування.

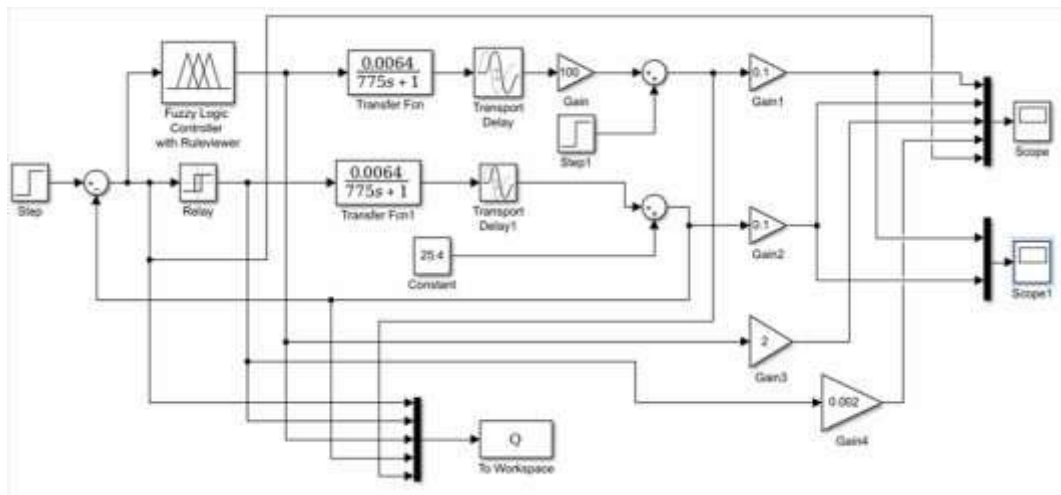


Рис. 4. Структурна схема гібридної системи керування

Аналіз результатів моделювання гібридної системи свідчить про адекватність експериментальним дослідженням (рис. 2) та підвищення точності керування температурою повітря боксу нейро-фаззі регулятором - поточне

значення температури становило $26,00^{\circ}\text{C}$ - $26,006^{\circ}\text{C}$ (для порівняння поточне значення температури при керуванні двопозиційним регулятором було $25,4^{\circ}\text{C}$ - $27,6^{\circ}\text{C}$). На рис. 5 зображено перехідні процеси в цій системі (Score рис. 4). Для зручності їх візуального оцінювання додатково застосовано блоки Gain, Gain 1, Gain 2, Gain 3 і Gain 4.

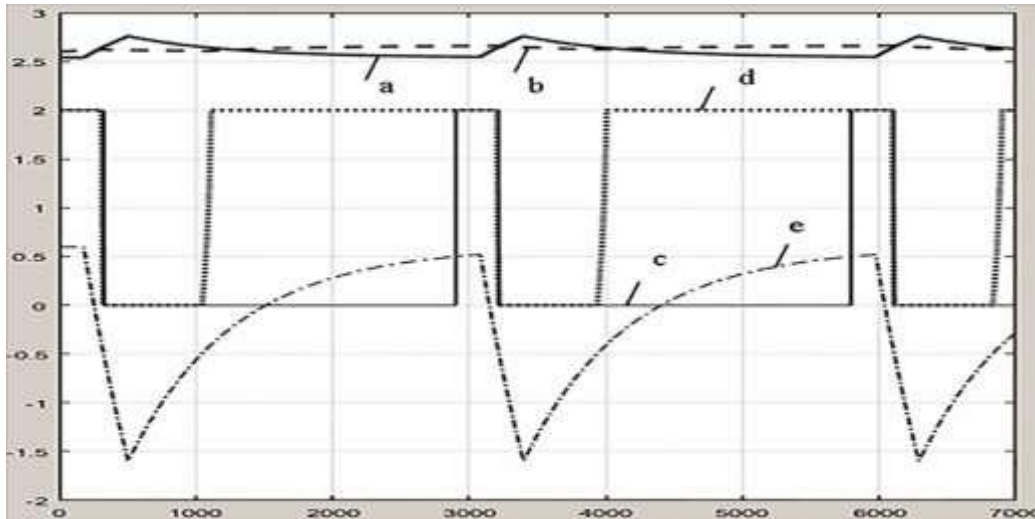


Рис. 5. Перехідні процеси в гібридній системі:

- a, b - керування температурою повітря локальною системою і нейро-фаззі регулятором;
- c, d - керуюча дія локальної системи і нейро-фаззі регулятора;
- e – помилка регулювання температури повітря локальною системою

Проведено тестування нейро-фаззі регулятора шляхом подавання на вхід системи керування, структурна схема якої наведена на рис. 6, збурення у вигляді періодичного пилкоподібного сигналу, що за формою та параметрами (періодом 2800 с і амплітудою $\pm 1,6^{\circ}\text{C}$ відносно уставки 26°C) подібний результатам досліджень локальної системи керування (рис. 2). На рис. 7 зображено перехідний процес за температурою повітря (Score на рис. 6).

За результатами тестування значення поточної температури повітря боксу становить $26,00^{\circ}\text{C}$ - $26,0059^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, перевірка працездатності нейро-фаззі регулятора шляхом його комп'ютерного тестування пилкоподібним сигналом, що імітує результати

безпосередніх досліджень об'єкта керування, підтверджує відповідність навчальній вибірці із середньою похибкою апроксимації 0,01.

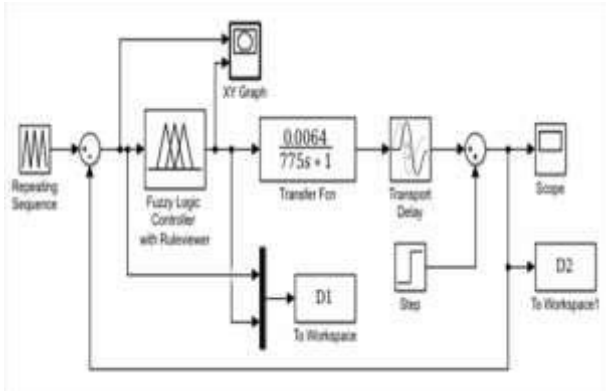


Рис. 6. Структурна схема системи керування на основі нейро-фаззі регулятора

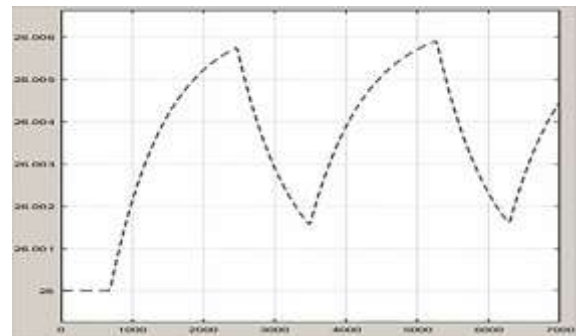


Рис. 7. Перехідний процес за температурою повітря в результаті тестування нейро-фаззі регулятора

Висновки і перспективи подальших досліджень. Традиційні системи керування виробництвом ентомофагів за умов збурень не забезпечують високу точність підтримання температурного режиму, що, враховуючи на складність біологічної складової об'єкта керування та неповну інформацію про її стани, породжує невизначеність та впливає на якість продукції. Пропонується для використання система керування електротехнічним комплексом на основі нейро-фаззі регулятора, котра суттєво підвищує точність підтримання технологічних вимог виробництва в умовах збурень.

Список літератури

1. Ладанюк А. П. Автоматизовані технологічні комплекси – основа комп'ютерно-інтегрованого виробництва / А. П. Ладанюк // Матер. ХІХ Міжнар. конф. з автоматичного управління «АВТОМАТИКА-2012», Київ, 26-28 вересня 2012 р.: тези конференції, 2012. – С. 27-28.
2. Лисенко В. П. Нечітка когнітивна карта для контролю якості ентомологічної продукції / В. П. Лисенко, І. С. Чернова // Матер. ХХІV Міжнар. конф. з автоматичного управління «АВТОМАТИКА-2017», Київ, 13-15 вересня 2017 р.: тези конференції, 2017. – С. 81-83.
3. Игнатъев В. В. Адаптивные гибридные интеллектуальные системы управления / В. В. Игнатъев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. - № 12 (113) Тематический выпуск. – С. 89-94.

4. Горобець В. Г. Розробка нейро інформаційної системи керування електротехнічним комплексом пташника / В. Г. Горобець, В. І. Троханяк, Є. О. Антипов, Ю. О. Богдан // Енергетика і автоматика. - № 1. – 2017. - С. 1-15.

5. Azaza Maher . Echaieb Kamel . Fabrizio Enrico . Iqbal Atif . Mami Abdelkader An intelligent system for the climate control and energy savings in agricultural greenhouses Energy Efficiency (2016) 9: 1241–1255.

6. Лисенко В. П. Програмно-апаратне забезпечення підсистеми моніторингу зовнішніх температури і вологості повітря при енергоефективному керуванні мікрокліматом у теплиці / В. П. Лисенко, В. М. Решетюк, В. М. Штепа, А. А. Руденський, В. М. Пуха, Т. І. Лендел, А. О. Дудник // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. Київ. - № 194 (2014). – С. 1-8.

7. Доровських В. І. Енергозберігаючий автоматизований комплекс розведення маточної культури зернової молі / В. І. Доровських // Механізація та електрифікація сільського господарства. - Глеваха, 2010. - Вип. 94. - С. 538 -543.

8. Таргоня В. С. Експертна система багатofакторного аналізу вибору конструкцій обладнання для використання біотехнологічних альтернатив в сільськогосподарському виробництві / В. С. Таргоня, В. М. Бельченко // Матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції. Інформ. бюлетень СПРС МОББ 49, Одеса, 2016. – С. 236-251.

References

1. Ladanjuk, A. P. (2012). Avtomatyzovani tehnologichni kompleksy – osnova komp'juterno-integrovanogo vyrobnyctva. [Automated technological complexes - the basis of computer-integrated production]: Mater. XIX International conf. with automatic control, Kyi'v, 27-28.

2. Lysenko, V. P., Chernova, I. S. (2017). Nechitka kognityvna karta dlja kontrolju yakosti entomologichnoi' produkci'. [Fuzzy cognitive maps for quality control of entomological products]: Mater. XXIV International conf. with automatic control, Kyi'v, 81-83.

3. Ignat'ev, V. V. (2010). Adaptivnye gibridnye intellektual'nye sistemy upravlenija. [Adaptive hybrid intelligent control systems]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki, 12 (113), Tematicheskij vypusk, 89-94.

4. Gorobec', V. G., Trohanjak, V. I., Antypov, Je. O., Bogdan, Ju. O. (2017). Rozrobka nejro informacijnoi' systemy keruvannja elektrotehničnym kompleksom ptashnyka. [Development of a neuro information system for control of the electrical engineering complex of the poultry house]. Energetyka i avtomatyka, 1, 1-15.

5. Azaza Maher, Echaieb Kamel, Fabrizio Enrico,. Iqbal Atif, Mami Abdelkader. (2016). An intelligent system for the climate control and energy savings in agricultural greenhouses Energy Efficiency 9: 1241–1255.

6. Lysenko, V. P., Reshetjuk, V. M., Shtepa, V. M., Rudens'kyj, A. A., Puha, V. M., Lendjel, T. I., Dudnyk, A. O. (2014). Programno-апаратне zabezpechennja pidsystemy monitoryngu zovnishnih temperatury i vologosti povitryja pry energoefektyvnomu keruvanni mikroklіmatom u teplyci. [Software and hardware of

the monitoring subsystem of external temperature and humidity during energy-efficient control of the microclimate in the greenhouse]. *Naukovyj visnyk NUBiP Ukrai'ny. Serija: Tehnika ta energetyka APK, Kyi'v*, 194, 1-8.

7. Dorovs'kyh, V. I. (2010). *Energozberigajuchyj avtomatyzovanyj kompleks rozvedennja matochnoi' kul'tury zernovoi' moli*. [Energy-saving automated complex for breeding the culture of the grain moth]. *Mehanizacija ta elektryfikacija sil'skogo gospodarstva, Glevaha*, 94, 538–543.

8. Targonja, V. S., Bel'chenko, V. M. (2016). *Ekspertna systema bagatofaktornogo analizu vyboru konstrukcij obladnannja dlja vykorystannja biotehnologichnyh al'ternatyv v sil'skogospodars'komu vyrobnyctvi*. [Expert system of multifactorial analysis of the choice of equipment designs for the use of biotechnological alternatives in agricultural production]. *Mater. Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii', Inform. bjulleten' SPRS MOBB 49. Odesa*, 236-251.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНТОМОФАГОВ

В.Ф. Лысенко, И. С. Чернова

Аннотация. Статья посвящена разработке интеллектуальной системы управления электротехническим комплексом для лабораторного производства мельничной огневки (*Ephestia kuehniella*), насекомого-хозяина энтомофага бракон (*Habrobracon hebetor*), который является эктопаразитом в биологической защите от вредителей томата, кукурузы, подсолнечника и других культур.

Целью исследований является разработка системы управления электротехническим комплексом, способной обеспечить высокую точность поддержания температурного режима в боксе для лабораторного разведения мельничной огневки при условиях возмущений и неполной информации о состоянии биологической составляющей объекта.

Методы исследований – структурный синтез, экспериментальный анализ, нейро-нечеткий вывод.

Разработана компьютерно-интегрированная нейро-фаззи SCADA-система управления электротехническим комплексом для лабораторного производства мельничной огневки, способная существенно повысить точность поддержания температурного режима в боксе по сравнению с традиционной системой управления на основе двухпозиционного регулятора. Нейро-фаззи регулятор реализованный в Simulink MATLAB на базе ANFIS - редактора и Fuzzy Logic Toolbox MATLAB. По результатам экспериментальных исследований проанализирована работа системы управления температурой воздуха бокса на основе двухпозиционного регулятора. Предложена система управления электротехническим комплексом с использованием интеллектуального

алгоритма обработки информации, в частности, гибридной нейронной сети прямого распространения сигнала. Проведено моделирование гибридной системы управления и тестирование нейро-фаззи регулятора.

Ключевые слова: *электротехнический комплекс, система управления, производство энтомофагов, возмущения, нейро-фаззи регулятор, точность*

ELECTROTECHNICAL COMPLEX CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF ENTOMOPHAGES

V. Lysenko, I. Chernova

Abstract. The article is devoted to the development of an intelligent control system for the electrotechnical complex for the laboratory production of *Ephestia kuehniella*, insect host of the entomophage *Habrobracon hebetor*, which is a caterpillar ectoparasitoid in biological protection against pests of tomato, corn, sunflower and other crops.

The purpose of the work is development of a control system of electrotechnical complex capable of ensuring high accuracy of maintaining the temperature regime in the box for laboratory breeding of *Ephestia kuehniella* in conditions of perturbations and incomplete information about the state of the biological component of the object.

Methods of research - structural synthesis, experimental analysis, neuro-fuzzy inference.

A developed a computer-integrated neuro-fuzzy SCADA-system control the electrotechnical complex for laboratory production of *Ephestia kuehniella*, a which is capable of significantly improving the accuracy of maintaining the temperature in the box compared with the traditional control system on the basis of a two-position regulator. The neuro-fuzzy regulator is implemented in Simulink MATLAB based on the ANFIS editor and the Fuzzy Logic Toolbox MATLAB. According to the results of experimental research, the operation of the air temperature control system on the basis of a two-position regulator analyzed. The control system of the electrotechnical complex is proposed with the use of intelligent information processing algorithm, in particular, a hybrid neural network of direct propagation of a signal. The hybrid control system was simulated and the neuro-fuzzy regulator was tested.

Key words: *electrotechnical complex, control system, production of entomophages, perturbations, neuro-fuzzy regulator, accuracy*