

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

На правах рукопису

Кулаковський Леонід Ярославович

УДК 662.641.047:504.062.2

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО
КОМПЛЕКСУ СУШННЯ НА ТОРФОБРИКЕТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Спеціальність 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук,
професор
Розен Віктор Петрович

Київ 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТВЕРДИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН НА ПРИКЛАДІ ТОРФУ З ПАРОВИМИ ТРУБЧАСТИМИ СУШАРКАМИ.....	15
1.1 Сушіння твердих корисних копалин енерготехнологічним комплексом з використанням парових трубчастих сушарок як один з основних енергоємних етапів у виробництві паливних брикетів та підсушування вугілля на ТЕС.....	15
1.2 Торфобрикетти як перспективне паливо для комунально-побутового споживання.....	19
1.3 Аналіз стану та перспектив розвитку паливної промисловості в областях з великою заторфованістю.....	23
1.4 Структура та характеристика енерготехнологічного комплексу процесу сушіння торфу.....	32
1.5 Аналіз математичних моделей оптимізації енергоспоживання енерготехнологічного комплексу сушіння торфу.....	38
1.6 Постановка задачі дослідження.....	51
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	53
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ФАКТОРНОГО ПОЛЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТОРФУ.....	54
2.1 Визначення факторів, що впливають на процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі з паровою трубчастою сушаркою	54
2.2 Планування виробничого експерименту процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі з паровою трубчастою сушаркою	67
2.3 Проведення активних виробничих експериментів на сушарці Цемаг. Статистичний аналіз результатів дослідження.....	70

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	80
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТОРФУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПИТОМОГО СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ.....	81
3.1 Розробка математичних моделей енерготехнологічного процесу сушіння торфу за допомогою МГУА	81
3.2 Розробка математичних моделей енерготехнологічного процесу сушіння торфу із застосуванням методу еволюції груп адаптивних моделей	87
3.3. Оптимізація значень цільових функцій споживання теплової та електричної енергії енерготехнологічним комплексом сушіння торфу.....	108
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	114
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДУ РЕГУЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТОРФУ В ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМАХ	116
4.1. Визначення статистичного ансамблю даних необхідних для навчання нейромережі знаходження енергоефективних керуючих параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння.....	116
4.2. Проведення навчання нейронної мережі знаходження енергоефективних керуючих параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою.....	121
4.3. Розробка методу розпізнавання і класифікація виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою за допомогою дискримантного аналізу...	133
4.4 Формування процедури здійснення регулювання процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах.....	144
4.5 Аналіз структури системи автоматичного управління процесом сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах	149

4.6 Апаратна реалізація методу регулювання роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу в енергоефективних режимах.....	153
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	160
ВИСНОВКИ	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	163
ДОДАТОК А.....	183
ДОДАТОК Б.....	187
ДОДАТОК В.....	189
ДОДАТОК Г.....	190
ДОДАТОК Д.....	191
ДОДАТОК Е.....	195
ДОДАТОК Ж.....	198
ДОДАТОК И.....	200
ДОДАТОК К.....	211
ДОДАТОК Л.....	234
ДОДАТОК М.....	247
ДОДАТОК Н.....	255
ДОДАТОК О.....	257
ДОДАТОК П.....	259
ДОДАТОК Р.....	261
ДОДАТОК С.....	262

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- БІА – багатошаровий ітераційний алгоритм;
- ГА – гібридний алгоритм;
- ДСТУ – державний стандарт України;
- ДЧЕ – дробний чинниковий експеримент;
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
- ЄС – Європейський Союз;
- ІГП – індуктивне генетичне програмування;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- МГУА – метод групового урахування аргументів;
- МРЧ – метод рою часток;
- ПЕР – паливно-енергетичний ресурс;
- ПЗП – процесори загального призначення;
- ПІД – пропорціонально-інтегрально-диференціальний;
- ПК – персональний комп'ютер;
- ПЛІС – програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA);
- ПЛК – програмований логічний контролер;
- ПЧЕ – повночинниковий експеримент;
- САР – система автоматичного регулювання;
- ТЕС – теплова електрична станція;
- ЦКП – центральний композиційний план;
- ШНМ – штучна нейронна мережа;
- DSP – digital signal processor (цифровий сигнальний процесор)
- GAME – Group of adaptive model evolution (еволюція груп адаптивних моделей);
- MLP – multilayer perceptron (багатошаровий перцептрон);
- RAM – Random Access Memory (Оперативна пам'ять);
- RBF – radial basic function (радіальна базисна функція);
- RMS – root means square (середньоквадратична похибка).

ВСТУП

Проблема енергозбереження як діяльність, спрямована на раціональне використання енергії та природних енергетичних ресурсів стала особливо гострою і актуальною після здобуття Україною незалежності [1]. За даними "Енергетичної стратегії Україна до 2030 р." [2], у 2005 р. промисловість споживала 54,5% імпортом енергоресурсів, а в 2030 р. Україна повинна бути забезпечена власними енергоресурсами на 88,3%, а саме споживання вирости із 200,6 млн. т.у.п. у 2005 р. до 302,7 млн. т.у.п. у 2030 р. Згідно з [2] основним чинником підвищення рівня ефективності функціонування паливно-енергетичного комплексу України повинно бути зменшення енерговикористання шляхом реалізації заходів з енергозбереження. За даними Інституту загальної енергетики НАН України [3, 4] потенціал енергозбереження становить 42-48%. Ресурсо- та енергозбереження це дві сторони єдиного процесу досягнення економічної збалансованості у функціонуванні національної економіки [5, 6], тому збільшення видобутку, перероблення власних ресурсів і зменшення витрат енергії та енергоресурсів на дані процеси є одними із важливих завдань України для досягнення енергетичної незалежності.

Україна є учасником «Партнерства країн Східної Європи з енергоефективності та охорони навколишнього середовища». Згідно із «Резолюцією про виклики, потенційній і новій участі у співпраці з питань енергетичної ефективності та поновлюваних джерел енергії в «Східному партнерстві»» [7] парламентської асамблеї «ЄВРОНЕСТ» від 17.03.2015 країни «Східного партнерства» повинні стимулювати ефективне енергоспоживання і проводити інвестиції в охорону навколишнього середовища.

Україна знаходиться на стадії імплементації «Директиви з енергетичної ефективності (2012/27/EU)» [8]. Директива описує загальний комплекс заходів щодо збільшення енергетичної ефективності, необхідних до застосування

країнами-членами ЄС. Зокрема в рамках Директиви планується виконання наступних цілей:

- збільшення ефективності енергетичної системи. Енергетичні компанії, які підпадають під дію Директиви, повинні досягти певного рівня енергетичної ефективності процесу виробництва і транспортування енергії. Одним із заходів є вимога щодо щорічного зниження загального енергоспоживання на 1,5% з 2014 по 2020 рік щодо рівня 2009 року.

- загальноєвропейські і національні цілі. Директива визначає загальну мету щодо зниження енергоспоживання в ЄС на 20% до 2020 року. Кожна з країн має встановити власні цілі щодо збільшення енергетичної ефективності та актуалізувати стратегію кожні три роки – в 2014, 2017 і 2020 роках.

Питаннями підвищення ефективності використання ПЕР, розробкою ресурсозберігаючих технологій в Україні займалися та проводять дослідження багато вчених, зокрема В.А. Жовтянський, Ю.Ф. Снежкін, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк, В.І. Дешко, М.М. Кулик, А.К. Шидловський, А.В. Новосельцев, Б.С. Стогній, Г.Г. Півняк, А.В. Праховник, О.В. Садовой, О.М. Сінчук, Д.М. Корінчук, В.П. Розен, Є.М. Іншеков, В.Ф. Находов.

Прийнята «Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки» [9] пропонує протягом п'яти років знизити на 20% споживання російського газу, замінивши його поновлюваними джерелами енергії, зокрема паливними брикетами. Одним із найбільш енергоємних комплексів у виробництві брикетів, що визначають її якість, є енерготехнологічний комплекс процесу сушіння. Згідно із [10] комплекс – це сукупність апаратів, машин і т. ін., які діють в єдиній системі або сукупність предметів, явищ, дій, властивостей, що становлять одне ціле. Енерготехнологічний процес – це фізико-хімічний процес, що супроводжується перетворенням речовини, енергії та імпульсу [11]. «Єдиною системою» можна вважати систему, що забезпечує перетворення вологих горючих твердих

корисних копалин (торф, буре, кам'яне вугілля) в сушенку, тобто сукупність апаратів та механізмів, що використовуються в процесі отримання сушенки необхідної якості. Ця сушенка в подальшому може бути направлена в пресове відділення для виробництва брикетів або безпосередньо для спалювання в котельне відділення ТЕС та ТЕЦ. Математичним описом, моделюванням та оптимізацією виробництва брикетів і процесу сушіння займалися такі вчені як В.О. Гнеушев, Б.А. Богатов, М.А. Гатих, Р.Я. Вебер, В.М. Наумович, Я.С. Опман, Д.П. Зверєв, І.І. Ліштван. Моделюванням та управлінням процесом сушіння в трубчастих сушарках займаються закордонні вчені як Карл Йохан Анстрьом, Ліна Ілімієні, Бьорн Віттенмарк, Торе Хьогланд, Кріс Форсман, та інші.

Застосування ручного регулювання параметрів сушіння твердих корисних копалин та суб'єктивність у визначенні необхідних режимів роботи призводять до високих витрат енергоносіїв, низької продуктивності процесу, його пожежонебезпеки [12]. Відсутність адекватного математичного опису технології сушіння кускового органічного палива в енерготехнологічному комплексі сушіння з парової трубчастою сушаркою, адекватних описів факторного поля та окремих факторів, не досконале ручне регулювання витрат палива і повітря на сушіння, невраховування всіх важливих збурюючих впливів на процес призводять також і до відхилень якісних характеристик сушенки, а в подальшому і отримання брикетів незадовільної якості, збільшення собівартості сушіння та аварійних ситуацій. Широке застосування парових трубчастих сушарок в енергетичному секторі та високі енергозатрати на процес сушіння викопного органічного палива зумовило проблему пошуку енергоефективних режимів роботи сушарної установки даного типу.

Отже, формування методів підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння твердих паливних корисних копалин за рахунок оптимального використання теплової та електричної енергії, необхідної для отримання сушенки регламентованої якості,

є важливою **науковою задачею**, вирішення якої дозволить підвищити ефективність функціонування брикетних заводів.

З метою розроблення методів підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння і для формування енергоефективного регулювання даним процесом проведено експериментальні дослідження, математичне моделювання та оптимізацію значень керуючих параметрів торфобрикетного виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації та управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-IV від 09.10.2010р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», Комплексній програмі НТУУ «КПІ» «Енергетика сталого розвитку». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання НДР кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами «Розробка методів та засобів діагностування ефективності стаціонарних установок для створення системи енергоменеджменту гірничодобувних підприємств» ДР №0115U002333.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи – зниження енерговитрат енерготехнологічним комплексом сушіння торфу з використанням парової трубчастої сушарки шляхом регулювання режимних параметрів процесу сушіння за критерієм енергетичної ефективності з дотриманням якісних характеристик сушенки та вимог пожежобезпеки.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Сформулювати та провести аналіз факторного поля енерготехнологічного процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці, який впливає на режим роботи та її енергоефективність;

2. Здійснити планування і проведення активних виробничих експериментів на об'єкті моніторингу та їх статистичний і кореляційний аналіз;

3. Знайти цільові функції енерготехнологічного процесу сушіння торфу, що описують факторне поле цього процесу;

4. Побудувати багатомірну модель споживання енергії, що дозволяє здійснити знаходження енергоефективних режимів сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою за фактичними фізико-механічними властивостями торфу, з дотриманням вимог щодо якості сушенки;

5. Розробити нейронну мережу знаходження енергоефективних керуючих параметрів процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою;

6. Провести класифікацію та розпізнавання виробничих ситуацій енерготехнологічного процесу сушіння торфу та сформувати алгоритм проведення регулювання цього процесу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах в межах відповідного класу, що дозволить здійснити оптимізацію енерготехнологічного процесу сушіння як однієї із систем виробництва торфобрикетів.

Об'єкт дослідження: енерготехнологічний процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою.

Предмет дослідження: режимні параметри енерготехнологічного процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою.

Методи дослідження. Науково-методичну основу виконаних досліджень склали:

- методи планування активних експериментів для проведення експериментальних досліджень режимів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з необхідною оптимальною кількістю серій дослідів;

- метод експертних оцінок для визначення факторів та параметрів енерготехнологічного процесу сушіння вологого твердого палива, що мають вплив на технічні та енергоекономічні показники процесу сушіння;

- метод групового урахування аргументів (МГУА) з використанням комбінаторного та багатошарового ітераційного алгоритму генерування моделей та метод еволюції груп адаптивних моделей для побудови математичних моделей режиму роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу з паровою трубчастою сушаркою;

- симплексний метод для знаходження оптимальних значень керуючих впливів, що забезпечують мінімальне споживання теплової та електричної енергії для кожного із серії виробничих експериментів;

- метод Монте-Карло для генерації даних необхідних для навчання нейромережі знаходження значень енергоефективних керуючих параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою;

- метод дискримінантного аналізу для розпізнавання виробничих ситуацій енерготехнологічного процесу сушіння торфу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено математичну модель оптимізації енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках за критерієм енергоефективності, яка відрізняється тим, що в якості вихідних параметрів окрім параметрів якості сушенки та пожежобезпеки в модель включено показники електроспоживання та теплоспоживання.

2. Вперше запроваджено та використано поняття оцінки невходження параметрів процесу сушіння торфу в математичну модель цільової функції, визначення якого за запропонованим у роботі алгоритмом дозволило вибрати оптимальний метод навчання моделі роботи енерготехнологічного комплексу сушіння, отриманої методом еволюції груп адаптивних моделей, який дозволив отримати функції цілей процесу сушіння торфу з параметрами, що спричиняють найбільший вплив на кожну з визначених цільових функцій.

3. Вперше для енерготехнологічного процесу сушіння кускового органічного палива, на прикладі торфу, розроблено метод вибору режимних параметрів сушіння торфу фактичних фізико-механічних властивостей торфу за необхідної продуктивності сушарної установки, які забезпечують отримання якісної сушенки з мінімальними витратами енергії.

4. Вперше для енерготехнологічного процесу сушіння кускового органічного палива, на прикладі торфу, запропоновано виконувати класифікацію, розпізнавання виробничих ситуацій та здійснювати керування процесом за режимними параметрами, які відповідають необхідним класам ситуацій, що дозволяє управляти процесом з урахуванням його інерційності та зменшує ймовірність отримання неякісної сушенки.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що проведені в роботі дослідження дозволили отримати нове вирішення актуальної задачі енергоефективного сушіння кускового органічного палива, на прикладі торфу, енерготехнологічним комплексом сушіння з використанням парової трубчастої сушарки. Розроблені методи і алгоритми використано для ефективного керування енерготехнологічним комплексом сушіння торфу в умовах зміни фізико-механічних властивостей сировини, що надходить в сушарну установку. На основі результатів наукових досліджень оптимізовано параметри енерготехнологічного процесу сушіння торфу, що забезпечують мінімальне споживання енергії та отримання якісної сушенки за існуючих технологічних обмежень регулювання процесу, та здійснено апаратну реалізацію методу знаходження цих параметрів на програмованих логічних інтегральних схемах.

Математичні моделі процесу сушіння та процедура здійснення управління процесом в енергоефективних режимах були враховані у плані робіт з оптимізації споживання енергії на торфобрикетному заводі «Сойне». Процедура пошуку режимів роботи сушарного комплексу за мінімальних витрат енергії та процедура здійснення регулювання процесом сушіння матеріалу в енергоефективних режимах застосовуються ТОВ «НВП

«Горизонт»» для формування заходів з енергозбереження та оптимального управління енергоспоживанням підприємств, що використовують енерготехнологічний комплекс сушіння з паровими трубчастими сушарками в технологічній стадії виробництва.

Особистий внесок здобувача. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: побудовано факторне поле процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою [13]; побудовано факторне поле процесу сушіння піску в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою [14]; запропоновано метод керування процесом сушіння торфу за допомогою класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій, що дозволяє отримати сушенку необхідної якості за мінімальних витрат електричної енергії [15]; здійснено аналіз факторів, що впливають на процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою [16]; розроблено план активних виробничих експериментів процесу сушіння торфу за умов функціонування сушарної установки [17]; запропоновано метод визначення факторів, що впливають на процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою, що включає відбір факторів за допомогою експертного оцінювання анкет фахівців торф'яної галузі та з використанням нейронних мереж [18]; побудовано цільові функції моделі процесу сушіння торфу за допомогою комбінаторного та багат шарового ітераційного алгоритму методу МГУА [19]; розроблено процедуру вибору адекватної математичної моделі, знайденої за різними алгоритмами навчання методу еволюції груп адаптивних моделей [20], запропоновано метод вирішення багатомірної задачі оптимізації споживання енергії енерготехнологічним комплексом сушіння за допомогою методу уступок [21]; запропоновано структуру нейронних мереж, що дозволяє здійснити знаходження оптимальних керуючих впливів за фактичних збурюючих параметрів енерготехнологічного процесу сушіння торфу [22].

Апробація результатів наукових досліджень. Основні результати роботи доповідались на: XIX науково-технічній конференції “Енергетика: Эффективность, надежность, безопасность”, м. Томськ, Російська Федерація, 2013 р.; III Міжнародній науковій конференції молодих вчених “Енергетика та системи керування: ERECS-2013”, м. Львів, 2013 р.; II Міжнародній науково-практичній конференції “Енергетична безпека навколишнього середовища”, м. Луцьк, 2013 р.; Міжнародній науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об’єктів”, м. Донецьк, 2013 р.; науково-технічному семінарі – «1st TMCC Winter Workshop-2015» in Telemark University, м. Порсгрун, Норвегія, 2015р., на 56-ій конференції по Симуляції та Моделюванню (56th Conference on Simulation and Modelling – «Modelling, Simulation and Optimization»), м. Лінчюпінг, Швеція, 2015 р.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 11 наукових працях, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях України, з них 2 внесені до міжнародних наукометричних баз даних, одній закордонній статті та чотири тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список літератури та 14 додатків. Робота містить 162 сторінки основного друкованого тексту, 21 рисунок, 17 таблиць, список літератури із 178 найменувань та додатки на сторінці. Загальний обсяг дисертації – 262 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТВЕРДИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН НА ПРИКЛАДІ ТОРФУ З ПАРОВИМИ ТРУБЧАСТИМИ СУШАРКАМИ

1.2 Сушіння твердих корисних копалин енерготехнологічним комплексом з використанням парових трубчастих сушарок як один з основних та енергоємних етапів у виробництві паливних брикетів та підсушування вугілля на ТЕС

Обтяжлива залежність української економіки від зовнішніх джерел енергопостачання стала проблемою національної безпеки, а енергозбереження – пріоритетним напрямом державної політики. Змістом цього терміну є скорочення витрат енергії як в натуральному так і у вартісному показниках [1]. Це передбачає заміну дорогих палив дешевшими, бажано – вітчизняними, до числа яких можна віднести й торфобрикету, брикету з бурого вугілля тощо.

Технологічна схема брикетування вугільних шматків складається з процесів подрібнення вугілля, сушіння його до певної вологості, змішування з шихтою, пресування і температурної обробки. Технологічна схема брикетування торфу і бурого вугілля із високим вмістом вологи включає процес сушіння з метою зниження вологості палива з 40-60% до 10-15% [23]. Сушіння вугілля проводиться в спеціальних сушарках з використанням топкових або димогарних газів (в суміші з повітрям), а також нагрітого повітря, окремо або в поєднанні з парою, і парою. Завдяки цьому різко підвищується теплота згоряння палива, його транспортабельність і зручність застосування. Однак при цьому значно зростає вартість палива внаслідок витрати теплоти на сушіння і збільшення експлуатаційних витрат [24].

На відміну від рідкого і газоподібного палива, вугілля та торф мають високу зольність і вологість. Для їх підготовки до спалювання потрібні додаткові витрати, пов'язані з сушінням і подрібненням.

Сушіння торфу, так само як і інших енергетичних ресурсів, є теплофізичним процесом, у якому видалення вологи відбувається в результаті термічної дії. Крім теплофізичного характеру, сушіння вологих матеріалів є так само технологічним процесом, при якому змінюються структурно-механічні та теплові властивості. Так при сушінні паливного торфу підвищується його теплота згоряння і температура горіння, сушіння торф'яних субстратних плит супроводжується зміцненням структури і зниженням теплопровідності. Основними завданнями технології сушіння є вибір найбільш ефективного сушильного комплексу для даного матеріалу і знаходження оптимального режиму [25]. Правильно вибраний режим сушіння повинен забезпечити високу інтенсивність процесу за мінімальних енергетичних витрат і отримання матеріалу оптимальних технологічних властивостей.

Основні витрати енергії (до 80%) у виробництві паливних брикетів пов'язані зі штучним сушінням у заводських умовах. Аналіз статистичних даних показав, що зі збільшенням середньої вологості на 1%, продуктивність заводу знижується на 3,5...5,0%, а витрата електроенергії на 1 т брикетів зростає на 3,5...4,5%. Коливання вологості в часі на брикетних заводах сягає 15%. Зі збільшенням дисперсії вологості сировини з 1% до 12% виробництво брикетів знижується в середньому на 15...20%, а питома витрата енергії при цьому зростає на 15...30%. На виготовлення 1 т буровугільних брикетів вологістю 18% з нижчою теплотою згоряння близько 4000 ккал / кг витрачається: 2,15 т бурого вугілля, 1,7 т пари, 40 кВт·год електроенергії. Тому одним з актуальних завдань вдосконалення брикетного виробництва є розроблення раціональних режимів сушильного процесу. Як показує аналіз основних виробничих витрат [26, 27], вартість сировини змінюються від 34,2 до 47,8% повної собівартості брикетів, і, відповідно, витрати на паливо складають $9,7 \div 12,5\%$, а на електроенергію – від 4 до 10%.

Для спрощення порівняння економічної ефективності роботи торфобрикетних заводів використовується також основна частина собівартості – "граничні заводські витрати", які дорівнюють повній собівартості за винятком

загальнозаводських, інших та позавиробничих витрат. З [28] відомо, що половина граничних заводських витрат припадає на процес сушіння, одна третина – на пресування, інші – на підготовчі і допоміжні процеси.

Сушінню піддаються всі види вугілля, що підлягають розмелюванню, однак цей процес зазвичай поєднується з помелом в пиловугільних млинах. Лише для палив, зовнішня вологість яких перевищує 15-20%, передбачається попереднє їх підсушування до млинів у спеціальних трубах-сушарках, парових трубчастих сушарках або вогневих сушарках.

Як показує практика експлуатації теплових електричних станцій (ТЕС) на погіршеному паливі збільшується його витрата, зростає навантаження на обладнання паливоподачі, системи пилеприготування і транспортування вугільного пилу в пальники котлів. Перераховані наслідки призводять не тільки до обмеження потужності енергоблоків, але й до зростання тривалості простоїв обладнання в ремонті [29].

Зниження розмелювальної продуктивності млинів за збільшенням вологості палива пояснюється тим, що розмелювання вологого палива здійснюється за наявності великої кількості пластичних деформацій, які утруднюють отримання готового вугільного пилу. За даними ВТІ (Всесоюзного технічного інституту) встановлено, що чим більше вологість розмеленого палива відрізняється від величини гігроскопічної вологості, тим більше знижується розмелювальна продуктивність млинів. Попереднє підсушування палива зі зняттям частини зовнішньої вологи всього на 3-5% різко покращує його сипучі властивості, усуває труднощі транспортування вугілля на трактах паливоподачі і його рух в бункери [30]. Тому попереднє підсушування вугілля є складовою частиною його збагачення і вирішення питань підвищення надійності роботи обладнання паливоподачі, пилесистем і в кінцевому підсумку всієї котельної установки.

Підсушування палива є однією з основних енергоємних операцій зі збагачення вугілля. Операція підсушування вугілля в парових сушарках, з використанням прихованої теплоти пароутворення пари є економічно вигідною

в тепловому циклі електростанцій, поліпшує теплотехнічні властивості енергоресурсу та показники роботи котла в цілому. Економія підсушеного твердого палива, пов'язана з витратами електроенергії на тягу і дуття, складає 1,0-1,5% при цьому забезпечувалися низькі значення механічних втрат (q_4) – $q_4=0,4-0,5\%$, а витрати теплоти на сушіння вугілля, з урахуванням коефіцієнта цінності теплоти пари – 0,5-0,6 склали 2090-2500 кДж/кг. Електростанції з замкнутими системами пилеприготування мали $q_4=1,0-1,5\%$ [31].

Існує досить велика різноманітність конструкцій сушильних установок, проте найбільшого поширення для сушіння бурого вугілля, торфу і підсушування кам'яних вугілля отримали барабанні сушарки, що працюють з безпосереднім контактом матеріалу з теплоносієм. На ТЕС для попереднього сушіння палива до надходження його в млин, зазвичай використовують парові обертові з малою частотою обертання ($0,1 - 0,2 \text{ c}^{-1}$) барабанні сушарки, що живляться парою з відбору турбін. Трубчасті парові сушарки набули широкого застосування на електростанціях для сушіння донецького вугілля. На торфобрикетних заводах України використовуються пневмогазові сушильні установки, здебільшого з шахтним млином та парові трубчасті сушарки. Для сушіння бурого вугілля в процесі брикетування також застосовують головним чином сушарки з паровим обігрівом (барабанні, трубчасті, тарілчасті тощо). Устаткування брикетного заводу складається в основному з дробарок, тарілчастих сушарок з паровим обігрівом або трубчастих сушарок і штемпельних або кільцевих пресів. З сушарки вугілля транспортує шнеком подається в охолоджувальну установку, де з вугілля випаровується залишкова волога. Охолоджене вугілля подається ковшовим ланцюговим транспортером на преси.

Трубчасті сушарки застосовуються у випадках, коли оброблювані матеріали не можуть бути висушені в прямому контакті з гарячим повітрям, і температура матеріалу повинна бути нижча 100°C . Вони використовуються для сушіння органічних речовин, кристалічних матеріалів, пластмас, крохмалю тощо [32].

Широке застосування парових трубчастих сушарок в енергетичному секторі та високі енерговитрати на процес сушіння викопного органічного палива, зумовило проблему пошуку енергоефективних режимів роботи сушарного комплексу з використанням даного агрегату.

1.2 Торфобрикети як перспективне паливо для комунально-побутового споживання

Коефіцієнт корисної дії (ККД) котлів при спалюванні вугільних брикетів для побутових потреб, в порівнянні з використанням кам'яного вугілля, підвищується на 25-35%, викиди сірчистого газу і кількість недопалених горючих компонентів знижуються на 15-20%. За рахунок зниження фізичної та хімічної неповноти згоряння палива знижується його витрата [33].

Недоліками бурого вугілля є значний вміст сірки, що призводить до посиленої корозії сталевих частин котлів, а також здатність до самозаймання під час тривалого зберігання. В час коли населення України змушене економити на споживанні газу, використання твердопаливних котлів для опалення приміщень, що можуть ефективно спалювати і торфобрикети на сьогодні є перспективним напрямком забезпечення енергетичної безпеки для населення, в той час як буре вугілля рекомендується спалювати в топках потужних котлів.

В Україні встановлено чіткі вимоги до торфобрикетів (ДСТУ 2042), вугілля, антрациту для побутових потреб (ДСТУ 7146), для пиловидного спалювання на ТЕС (ДСТУ 4083), проте немає затверджених ДСТУ вимог щодо якості буровугільних брикетів. Органи стандартизації вимагають від виробника чіткого дотримання і контролю значень кожного показника якості торфобрикетів. Контроль у цьому разі не є самоціллю, а здійснюється з метою оперативного впливу на режими технологічного процесу у випадку відхилення будь-якого з показників якості від нормативних значень. Тому кожний показник якості торфобрикетів, регламентований стандартом, має бути керованим в перебігу виробничого процесу [34]. Саме тому, на відміну від

сушіння бурого вугілля, для сушіння торфу висувається ряд вимог щодо характеру сушіння та якості отриманої сушенки.

Торфобрикети за своїми властивостями мають більшу теплоту спалювання, ніж дрова. Вони можуть використовуватись у селищних котельнях, дитячих закладах та індивідуальних будинках. Торфобрикети і кусковий торф є найбільш дешевим, висококалорійним місцевим паливом, що користується сталим попитом у населення та підприємств комунальної теплоенергетики [35]. Сьогодні в Україні виготовляються і гранульовані пелети із домішок торфу, деревини та іншої біомаси [36].

Використання торфу як палива при його спалюванні більш екологічно безпечно ніж вугілля, мазуту і сланцю. Наприклад, у разі заміни вугілля, сланців і мазуту на торф зниження забруднення атмосферного повітря викидами оксидів сірки зменшується в 4-24 рази в порівнянні з вугіллям (в залежності від зольності і вугільного басейну), сланцем – в 9 разів, мазутом – в 6 разів, а викид твердих зважених частинок в 2-19 разів у порівнянні з вугіллям і в 36 разів у порівнянні зі сланцем. Маючи вміст сірки до 0,3%, торфові палива після спалювання утворюють золу, яка може використовуватись як меліорант, розкислювач ґрунту і джерело мікроелементів [37]. Тому зола добре утилізується як добриво.

Розрахункова вартість 1 ГДж нижчої теплоти згоряння різних видів палива за 2014 рік показує помітну перевагу торфових палив (рис. 1.1). Використання торфу як палива дешевше не лише в розрахунку на одиницю її маси, а і за вартість одиниці теплової енергії, що міститься в ньому. Це пояснюється відносно невисокою собівартістю робіт з підготовки торфових родовищ до розробки і з видобуванням цієї корисної копалини.

Вартість теплової енергії, що отримується від спалювання 1 т торф'яного брикету, в 2,3÷2,4 рази дешевша від використання 1 т дров, вугілля, газу або мазуту. Торф'яний брикет та кусковий торф є найбільш збагаченими видами торф'яного палива, нижча теплота згоряння якого, відповідно, становить 16-18 та 11 МДж/кг. За розрахунками фахівців Українського концерну торф'яної

промисловості «Укрторф» за діючими цінами на торф'яне паливо та вугілля, економія місцевих бюджетів торфовидобувних областей України при заміні кам'яного вугілля на торф'яні брикети та середньорічному виробництві 200 тис. т становить щорічно близько 40,0 млн грн. У домашніх печах торфобрикети, в порівнянні з кам'яним вугіллям, спалюються з більш високим коефіцієнтом корисної дії [38].

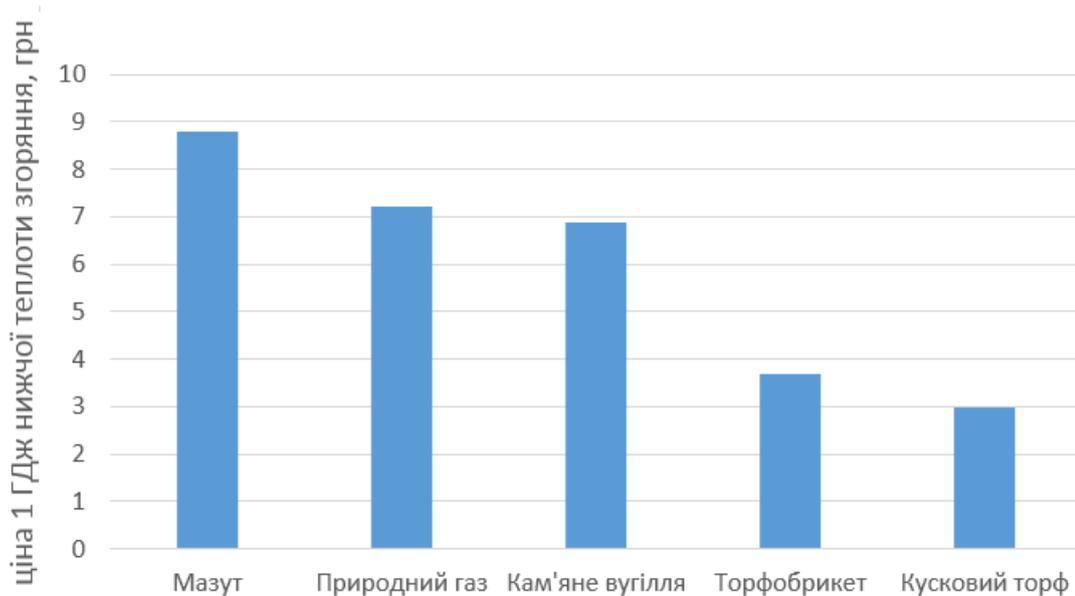


Рисунок 1.1 – Діаграма цін 1 ГДж нижчої теплоти згоряння різних палив

Таким чином, торфобрикети та кусковий торф у порівнянні з іншими видами твердого палива є найбільш оптимальними для побутових потреб.

Реалії сьогодення не дають підстав прогнозувати зменшення ролі торфових палив у задоволенні паливних потреб населення та об'єктів малої енергетики. Це знайшло своє відображення у Концепції розвитку торф'яної промисловості України до 2030 року [39].

У рішенні Міжнародної конференції «Торф у розв'язанні проблем енергетики, сільського господарства та екології» (Мінськ, 2006 р.) визнано доцільним „для багатьох країн збільшення обсягів видобутку торфу для енергетики, комунально-побутових цілей, позитивно оцінюються перспективи розвитку торфової галузі в Україні, Росії, Білорусі та інших країнах” [40].

З 1991 р. до 2001 р. згідно [41], в торф'яній промисловості мало місце значне падіння обсягів видобутку торфу та виробництва торф'яних брикетів. Розширення у 2002-2005 рр. виробничих потужностей для видобування торфу та виробництва торфобрикетів і впровадження нової техніки сприяло, розпочинаючи з 2002 р., нарощуванню обсягів видобутку торфу, які у 2001 р. становили всього 294,0 тис. т, а у 2005 р. – 608,3 тис. т. У порівнянні з 2001 р. стали зростати також обсяги виробництва торфобрикетів (2001 р. – 130,4 тис. т, 2002 р. – 210,2 тис. т, 2003 р. – 238,1 тис. т, 2004 р. – 212,4 тис. т, 2005 р. – 203,2 тис. т.). Виходячи з наявних запасів торфу в Україні, та з урахуванням їх раціонального використання, в 2020 р. планується збільшення обсягів видобутку торфу до 3,5 млн т на рік та виробництва торф'яних брикетів до 0,7 млн т на рік. У 2030 р. обсяг видобутку торфу в цілому повинен зрости до 4,5 млн т на рік, а виробництво торфобрикетів – до 1,0 млн т на рік. Прогнозується, що в загальному балансі торфовидобутку більшу питому вагу буде складати також паливний торф – 2,5 млн т, в тому числі: фрезерний для виробництва торфобрикетів – 2,0 млн т на рік, торф кусковий – 0,5 млн т на рік (рис. 1.2). Згідно прогнозу розвитку торф'яної галузі частка торф'яних складатиме близько 0,45 % загальнодержавного річного споживання палива.

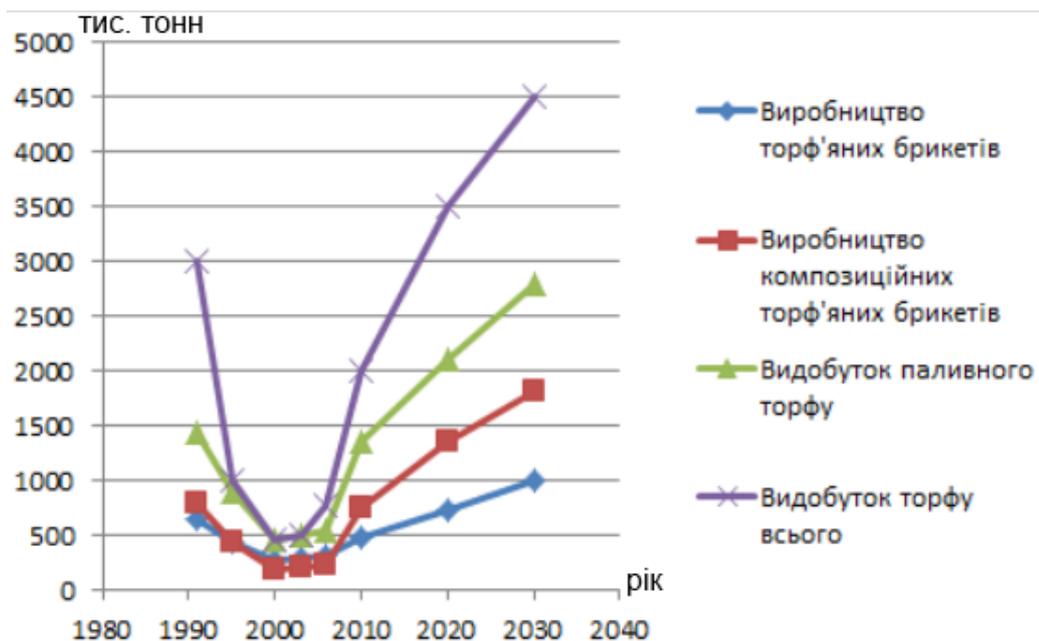


Рисунок 1.2 – Виробничо-економічні показники з видобутку та виробництва торфопалива

Видобуток торфу для палива та добрив при запланованому у 2020 році обсязі 4-5 млн т на рік може тривати ще протягом століття без суттєвого порушення екологічної рівноваги, маючи на увазі, що значна частина вироблених торфовищ буде рекультивовуватись і передаватись в народногосподарське використання.

Отже, торфобрикети та кусковий торф є найбільш дешевим, екологічно чистим висококалорійним місцевим видом палива, що має суттєвий потенціал заміщення частини газу, вугілля, мазуту і дров для комунально-побутового споживання.

1.3 Аналіз стану та перспектив розвитку паливної промисловості в областях з великою заторфованістю

В «Концепції енергетичної стратегії України на період до 2035 року» від 10.12.2015 року вказано, що «прогнозується суттєве зростання частки відновлюваних джерел енергії у сфері теплозабезпечення. Використання біомаси для потреб енергозабезпечення здійснюватиметься швидкими темпами, передусім у середньостроковому періоді, виходячи з необхідності підвищення рівня енергетичної безпеки України. Перевага віддаватиметься найбільш енергоефективним рішенням, зокрема одночасному виробництву теплової та електричної енергії, виробництву біопалива другого покоління, розвитку виробництва та споживання біометану. Більш широкого використання біомаси в якості палива слід очікувати на місцевому рівні в рамках децентралізації системи енергопостачання. Враховуючи економічну привабливість децентралізації тепlopостачання, проведення політико-адміністративних та міжбюджетних реформ в країні, зростатимуть роль та відповідальність місцевих органів влади за ефективність систем забезпечення життєдіяльності громад. Місцеві органи влади отримають більше прав та можливостей щодо залучення інвестицій у комунальну енергетику.» Тобто Україна взяла курс на підвищення енергобезпеки України. Одним із шляхів досягнення цього є збільшення частки використання відновлювальної та альтернативної

енергетики. Для цього місцеві органи влади отримують більшу свободу у проведенні політики по забезпеченню населення та підприємств енергоносіями та реалізують програми розвитку альтернативних енергетики з врахуванням специфіки регіону та наявними запасами альтернативного палива.

На виконання Закону України «Про енергозбереження», постанов Кабінету Міністрів України від 01.10.2014 р. № 491, від 12.08.2015 р. № 614 «Про внесення змін до Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для здійснення заходів щодо ефективного використання енергетичних ресурсів та енергозбереження», в 2015 році обласні ради приймали рішення про внесення змін до «Стратегії розвитку регіонів на період до 2020 року», що направлені на прискорення процесів заміщення природного газу альтернативними видами енергії, підвищення енергоефективності житлового фонду населених пунктів. Зокрема в «Планах заходів на 2015-2017 роки з реалізації стратегії розвитку Житомирської області на період до 2020 року» вказано, що «актуально стоїть питання сприяння у впровадженні виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел альтернативної енергії та підвищенні енергоефективності у житлово-комунальній і бюджетній сферах», «підвищення енергоефективності та сприяння у впровадженні виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел альтернативної енергії». Серед яких існує завдання «Забезпечення енергоефективності», що має цілі проекту «Підвищення енергоефективності області шляхом реалізації заходів щодо заміщення споживання природного газу альтернативними видами палива» тощо. «Питання енергоефективності та виробництва альтернативної енергетики залишається одним із найбільш пріоритетних для розвитку Хмельницької області», вказано у «Плані заходів з реалізації Стратегії регіонального розвитку Хмельницької області на 2015-2017 роки». Встановлення енергозберігаючих котелень на альтернативних видах палива є ціллю проекту «Зменшення енергетичної залежності регіону, збільшення частки використання альтернативних джерел енергії», що зазначено в даних планах. На заміщення природного газу місцевими альтернативними видами палива (біомасою,

торфом) на 2016-2020 у Волинській області згідно «Регіональної програми підвищення енергоефективності Волинської області на 2011-2020 роки» виділено загальний обсяг фінансування, 2906517,1 тис. грн. Серед основних пунктів показників успішної реалізація проектів Програми «Розвиток економічного потенціалу», є досягнення таких результатів як суттєве зменшено залежність області від імпорتنних енергоносіїв, досягнення економії енергоресурсів у бюджетних установах області [42].

Основним альтернативним видом палива для областей північно-західного регіону країни (Волинська, Рівненська, Житомирська, Хмельницька, Київська тощо) для вирішення поставлених в Планах заходів з реалізації Стратегії регіонального розвитку цілей є торф, дрова та брикети з них. Найбільше резервних і перспективних для розвідки родовищ торфу є у Рівненській області [44]. Зокрема, в Рівненській області відсутні підприємства, які займаються видобутком та переробкою нафти, природного газу, вугілля, горючих сланців, бітумінозних порід. Ці енергетичні ресурси Рівненщина отримує з інших областей України або імпортує. Рівненська область забезпечена лише покладами торфу. Торфові родовища виявлені у всіх районах області, а найбільші запаси на півночі – в Рокитнівському, Дубровицькому, Зарічненському і Володимирецькому районах. Торфовидобутком і виробництвом торфопродукції, в основному, займається ДП «Рівнеторф» державного концерну «Укрторф». Площа ділянок торфородовищ складає 123,17 тис. га. Усього в державному фонді області налічується 125 розвіданих родовищ торфу, серед них 16 – експлуатаційні, з них розробляється – 14. Запаси торфу в області складають близько 20 відсотків від загальних запасів в Україні [45]. Видобування фрезерного паливного торфу планується розпочати і в Березнівському районі на виробничій ділянці «Городищеторф».

Згідно із «Стратегію економічного та соціального розвитку Рівненської області на період до 2020 року» «котельні всіх новозбудованих закладів соціальної інфраструктури комплектуються енергоефективними системами спалювання, які працюють в автоматичному режимі на відходах деревини,

біомасі та торфі. За останні роки встановлено 50 котлоагрегатів, які працюють на зазначеному паливі, загальною потужністю 10,6 МВт. Це дало можливість замінити близько 1,6 млн. куб. м природного газу на рік. У 2013 році в установах бюджетної сфери та на теплопостачальних підприємствах області котельні з природного газу переведено на використання альтернативних видів палива, встановлено 18 котлоагрегатів загальною потужністю 4,06 МВт». В області є один показовий досвід використання фрезерного торф'яного палива на ТЗОВ «Моквинська паперова фабрика» використовує фрезерний торф із вологістю до 20 % у паровому котлі ДКВР разом із природним газом. У польових умовах вологість можна довести до 40 %, а сушильних печах – до 28 %. Як свідчать підрахунки, економія природного газу становить 80% [45, 46]. Загалом, реалізація торфопідприємствами фрезерного паливного торфу поки що незначна, окрім КП «Дубнекомуненергія», яке використовує біля 200 т у. п. на рік, інших споживачів немає, що вказує на те, що окрім підвищення виробництва фрезерного торфу та виробництва торфобрикетів необхідно здійснювати будівництво нових котелень на альтернативному паливі і на торфі зокрема.

Показники використання котелень на традиційних та альтернативних видах палива в Рівненській області наведені в таблицях 1.1 та в таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 – Інформація для розрахунку частки сумарної потужності котелень на альтернативних видах палива на території Рівненської області та обсягів виробленої теплової енергії за 2015 рік

Найменування котельні	Кількість котелень, одиниць				Загальна (фактична) потужність, Гкал/год	Обсяг виробленої теплової енергії за звітний період, Гкал	Обсяг відпущеної теплової енергії за звітний період, Гкал		
	загальна кількість котелень	у тому числі потужністю:					населенню	Бюджетним установам	Промисловості
		до 3 Гкал/год	від 3 до 20 Гкал/год	від 20 і більше Гкал/год					
Котельні на традиційних видах палива, у тому числі:	679	600	52	27	1911,29	1318686,88	894672,60	248119,48	32989,67
на газі	544	467	50	27	1839,21	1260543,77	893726,90	215210,97	32989,67
на вугіллі	31	29	2		32,05	23678,93	450,20	12084,53	
електричні	20	20			1,90	1320,68		1095,48	
на інших традиційних видах палива	84	84			38,13	33143,50	495,50	19728,50	
Котельні на альтернативних видах палива, у тому числі:	262	253	7	2	196,00	128917,17	6925,05	110736,41	11983,42
на деревному паливі	168	159	7	2	162,96	97788,38	5662,55	70481,52	11067,82
на паливі відходів з сільського господарства	1	1			0,26	548,00			
на інших альтернативних видах палива	93	93			32,78	30580,79	1262,50	40254,89	915,60
Разом :	941	853	59	29	2107,294	1447604,04	901597,65	358855,88	44973,09
Відносна кількість котелень на альтернативних видах палива	0,28	0,30	0,12	0,07	X	X	X	X	X
Частка потужності котелень на альтернативних видах палива по відношенню до загальної кількості	X	X	X	X	0,093	X	X	X	X

Відносна кількість котелень на альтернативних видах палива (крім природного газу)	0,66	0,66	0,00	0,00	X	X	X	X	X
Частка потужності котелень на альтернативних видах палива по відношенню до загальної кількості (крім природного газу)	X	X	X	X	0,73	X	X	X	X

Таблиця 1.2 – Інформація для розрахунку частки сумарної потужності котелень на альтернативних видах палива на території Рівненської області та обсягів виробленої теплової енергії за I півріччя 2016 року

Найменування котельні	Кількість котелень, одиниць				Загальна (фактична) потужність, Гкал/год	Обсяг виробленої теплової енергії за звітний період, Гкал	Обсяг відпущеної теплової енергії за звітний період, Гкал		
	загальна кількість котелень	у тому числі потужністю:					населенню	бюджетним установам	промисловості
		до 3 Гкал/год	від 3 до 20 Гкал/год	від 20 і більше Гкал/год					
Котельні на традиційних видах палива, у тому числі:	575	520	39	16	1053,28	343901,90	235769,64	93108,04	11443,13
на газі	468	415	37	16	1001,22	328039,03	235537,64	78502,17	11443,13
на вугіллі	30	29	1		27,01	7920,29		6895,29	
електричні	21	21			2,41	1123,96		1123,96	
на інших традиційних видах палива	56	55	1		22,64	6818,62	232,00	6586,62	
Котельні на альтернативних видах палива, у тому числі:	265	258	6	1	172,63	65150,25	1947,65	53365,95	5327,38
на деревному паливі	159	153	5	1	146,49	46685,74	1942,65	34906,44	5327,38
на вторинних енергетичних ресурсах	10	10			6,93	6126,09		6126,09	

на інших альтернативних видах палива	96	95	1		19,21	12338,42	5,00	12333,42	
Разом :	840	778	45	17	1225,90	409052,15	237717,29	146473,99	16770,514
Відносна кількість котелень на альтернативних видах палива	0,32	0,33	0,13	0,06	X	X	X	X	X
Частка потужності котелень на альтернативних видах палива по відношенню до загальної кількості	X	X	X	X	0,14	X	X	X	X
Відносна кількість котелень на альтернативних видах палива (крім природного газу)	0,71	0,71	0,00	0,00	X	X	X	X	X
Частка потужності котелень на альтернативних видах палива по відношенню до загальної кількості (крім природного газу)	X	X	X	X	0,77	X	X	X	X

По даним таблиць 1.1 та 1.2 можна зробити висновки, що в I півріччі 2016 в порівнянні з 2015 роком:

- на 14,7% зменшилась кількість котельнь, що працюють на традиційних видах палива, зокрема і кількість котельнь що працює на природному газу зменшилась практично на 15%;

- загальна (фактична) потужність, (Гкал/год) котельнь на традиційному паливі зменшилась на 44,9%, а загальна (фактична) потужність на газу на 45,6%, на вугіллі на 15,7%;

- збільшилась кількість котельнь, що працюють на альтернативних видах палива на 1,1%, зокрема і збільшилась кількість котельнь, що працюють на інших альтернативних видах палива до яких входять і котельні, що спалюють торф, торф'яні гранули та торфобрикети на 12,5%, в той час коли кількість котельнь на дровах скоротилась на 5%;

- загальна (фактична) потужність, (Гкал/год) котельнь на альтернативних видах палива зменшилась на 11,9% проте в структурі потужностей їх частка збільшилась так як в загальному спостерігається зменшення генерування теплової енергії в 2016 в порівнянні з 2015 на 41,8%, а загальна потужність котельнь на традиційному зменшилась на 44,9%;

- частка кількості котельнь на альтернативних видах палива до загальної кількості збільшилась на 14,3%, а частка потужностей котельнь збільшилась на 4,7%;

- частка кількості та потужності котельнь на альтернативних видах палива до загальної кількості та потужності збільшилась для котельнь малої (до 3 Гкал/год), середньої (від 3 до 20 Гкал/год), для великої потужності (від 20 і більше Гкал/год) залишилась практично на ідентичному рівні;

Опалювальний період в Рівненській області у 2015-2016 роках тривав з 12 жовтня по 04 квітня, а в 2014-2015 роках тривав з 21 жовтня 2014 р. по 15 квітня 2015 року. Тому в 2015 році було майже 6 опалювальних місяців, в той час як за 1 півріччя 2016 року було 3 опалювальних місяців. Так як загальний обсяг виробленої теплової енергії в 1 півріччі 2016 року в 3,5 рази менше ніж в

2015 році, в котельнях на традиційному виді палива в 3,8 рази, для котелень на газу також в 3,8 рази, для котелень на альтернативних видах палива – в 2 рази, а опалювального періоду було тільки в 2 рази менше, то дані про обсяги вироблення теплової енергії свідчать про динаміку зменшення обсягу генерування теплової енергії в 2016 року в порівнянні з 2015 роком по всім видам котелень окрім котелень на альтернативному паливі.

За результатами проведеного аналізу розрахунку частки сумарної потужності котелень на альтернативних видах палива на території Рівненської області та обсягів виробленої теплової енергії за 1 півріччя 2016 року та 2015 рік в Рівненській області можна зробити висновок, що загальному відбувається зменшення генерування та споживання теплової енергії та збільшення кількості та частки котелень на альтернативному паливі в загальній кількості. Також збільшилась частка потужностей котелень на альтернативному паливі, що включає в себе і торфобрикети, в порівнянні з котельнями на традиційному паливі.

Звертаючи увагу на досвід Фінляндії у будівництві ТЕС, автор у статті [47], зробив висновок, що за сукупністю показників заторфованості і лісистості, Рівненська, Волинська, Львівська, Київська області і північна частина Чернігівщини найбільш придатні для спорудження ТЕС (ТЕЦ), що використовують в якості палива торфо-деревні суміші місцевого виробництва. Для таких міні-ТЕС й достатньо актуальним буде завдання підсушування фрезерного торфу до оптимальних параметрів в енерготехнологічному комплексі сушіння.

Економічно вигідними та екологічними є схеми підсушування фрезерного торфу пневмопароводяними та паровими трубчатими сушарками із використанням відпрацьованої пари з турбін енергогенераторів. Витрати енергоресурсів зменшуються вдвічі, а забруднення навколишнього середовища практично відсутнє. У дослідженій області можливе впровадження таких енергозберігаючих схем за наявності достатньої кількості відпрацьованої пари з турбін енергогенераторів Рівненської АЕС та ВАТ “Рівнеазот”. До того ж, є всі

можливості підсушувати торф фрезерний паливний до вологості 16 % та виробляти торф'яні брикети й пелети із калорійністю 0,6 т у. п. У Рівненській області є всі можливості для щорічного видобутку 1,7 млн тонн торфу із використанням значної його кількості для потреб місцевих підприємств та комунальної теплоенергетики замість природного газу та вугілля.

Тому видобування торфу та використання його як альтернативного виду місцевого палива є актуальним і перспективним як в Рівненській, так і Волинській, Житомирській, Київській, Чернігівській, Хмельницькій областях. Це сприятиме забезпеченню торфом жителів північно-західної частини України, газифікація населених пунктів якої економічно не вигідна [45].

Отже, «Плани заходів з реалізації Стратегії регіонального розвитку» північно-західних областей України (Рівненської, Волинської, Житомирської тощо) передбачають заміщення природного газу місцевими альтернативними видами палива, зокрема торфобрикетами. З проведеного аналізу стану та перспективи розвитку теплової енергетики Рівненської області, можна зробити висновок, що в області впроваджуються заходи щодо скорочення споживання теплової енергії (зокрема підвищення енергоефективності виробництв) та будівництво нових котелень та переведення старих на альтернативні місцеві види палива (зокрема торфобрикетів). Це в свою чергу зумовлює необхідність проводити заходи по підвищенню енергоефективності виробництва торфобрикетів та в подальшому будівництву нових торфобрикетних заводів.

1.4. Структура та характеристика енерготехнологічного комплексу процесу сушіння торфу

Торф'яна сировина, що надходить на брикетний завод, направляється в підготовче відділення (рис. 1.3), де відбувається подрібнення торфу та відділення класу фракцій, придатних для брикетування. За наявності заводської котельної або ТЕЦ відсів торфу та частина сировини спрямовується для спалювання в топку парових котлів [48].

Підсушений в сушарці торф спрямовується для брикетування в пресове відділення. Виробництво брикетів супроводжується витратами теплової та електричної енергії, а також витратами торф'яної сировини в технологічному процесі. Корисним енергетичним продуктом є брикет. Найбільш енерговитратним і металоємким комплексом у виробництві торф'яних брикетів є енерготехнологічний комплекс сушіння торфу.

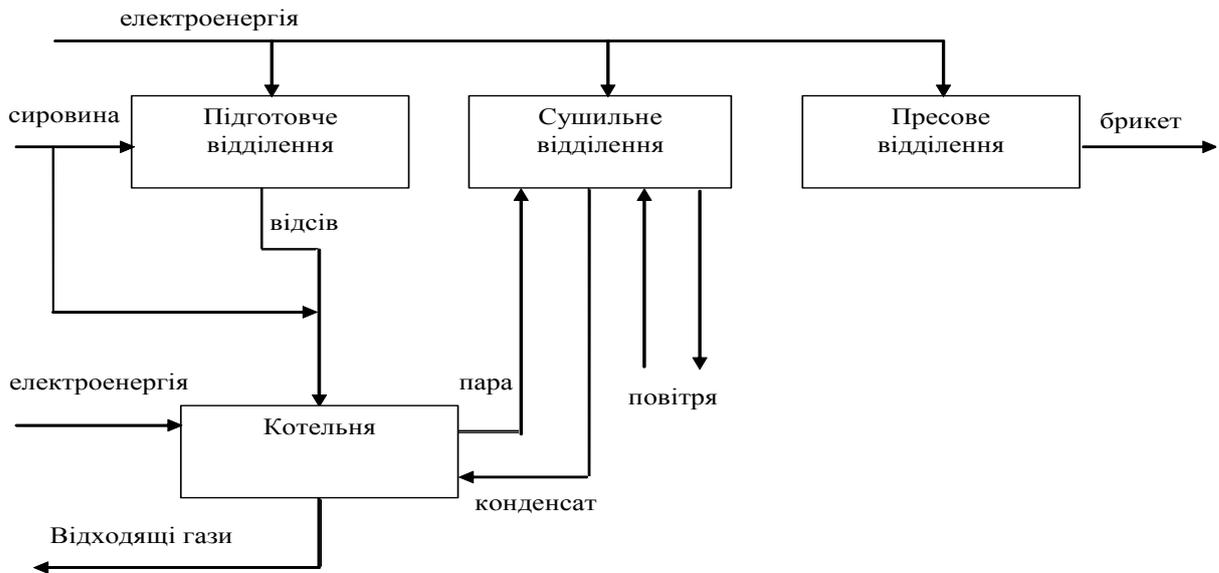


Рисунок 1.3 – Принципова схема паливно-енергетичних потоків торфобрикетного заводу з барабанними паротрубчастими сушарками

Найпотужнішим торфобрикетним заводом України є “Сойне” у селі Прилісному Волинської області, на якому використовується енерготехнологічний комплекс сушіння з використанням парової трубчастої сушарки. За 2013 рік цей завод виготовив приблизно 80 тис. т. торфобрикетів, що становить більш ніж 40% загальнодержавного виробництва торфобрикетів. Останнім часом цей завод став орієнтуватись на зовнішній ринок. Для збуту продукції закордон, торфобрикет повинен відповідати значно кращій якості ніж той, що йде на внутрішній ринок.

Парові трубчасті сушарки мають високу експлуатаційну надійність і довговічність [49, 50] зручність регулювання енерготехнологічного процесу сушіння (параметри теплоносія, витрата сушильного агента, продуктивність

сушіння регулюються незалежно один від одного), пожежобезпечність, можливість поєднання виробництва брикетів з отриманням електроенергії, малий знос, високий коефіцієнт використання робочого часу (97-99%), використовують теплоносій з високою концентрацією теплової енергії у вигляді прихованої теплоти пароутворення,. Слід зазначити також незначні втрати торфу при сушінні в парових сушарках, на відміну від пневмогазових, оскільки основна частина сушенки не проходить через циклони [50, 51].

Основним недоліком використання парових трубчастих сушарок в енерготехнологічному комплексі сушіння торфу вважається низька якість одержуваної сушенки, яка визначається різною вологістю класів крупності її часток (вологорізня), що спричинює негативний вплив на якість брикетів [52, 53, 54]. Крім того, відзначається залежність продуктивності від насипної щільності торфу [55], яка повинна бути не меншою 250 кг/м^3 (1,75), а за даними [56] – не менше 300 кг/м^3 .

Висока потужність заводу “Сойне”, можливість регулювання енерготехнологічного процесу сушіння, великі затрати енергії на процес сушіння, зокрема – теплової, високі вимоги щодо якості сушенки є основними причини для вибору парової трубчастої сушарки як об’єкта для розроблення методу підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння торфу та оптимального управління енергоспоживанням.

Сушарка – це агрегат, що є частиною енерготехнологічного комплексу сушіння, який включає в себе живильник сировини (шнек), високотемпературну барабанну сушарку та інші допоміжні елементи (вентилятори та система газоочистки тощо) [57, 58]. Розрахунок параметрів сушарок передбачає визначення їх матеріального балансу, кількості сушильного агента, необхідного для сушіння, а також складання теплового балансу сушильного процесу. Матеріальний баланс сушарки визначається з метою виконання низки технологічно важливих розрахунків [59]: встановлення

продуктивності сушарки по випаровуваній волозі, а також по вазі торфу, що входить та виходить з неї.

Основне рівняння матеріального балансу має вигляд:

$$W = M_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = M_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1}, \text{ кг вип. вологи/год}, \quad (1.1)$$

де M_1 – маса торфу, що подається вхід в сушарку за 1 год, M_2 – маса торфу на виході з сушарки за 1 год.

Наведене рівняння матеріального балансу не враховує втрат торфу в сушарці. Насправді ж деяка частина торфу (здебільшого – найдрібніша фракція) виноситься з сушарки сушильним агентом і втрачається. Ці втрати враховуються певним коефіцієнтом, значення якого завжди менше одиниці і визначається дослідним шляхом.

Розрахунок балансу вологи і витрат сушильного агенту є обов'язковим елементом комплексного розрахунку сушильного процесу і здійснюється з метою визначення витрат сушильного агенту на один кілограм випаровуваної вологи чи за одиницю часу.

Розрахунок теплового балансу сушарок починається з теоретичної сушарки. Теоретичною називається така умовна сушарка, в якій відсутні втрати теплоти в довкілля, на нагрівання матеріалу, що сохне, та транспортуючих пристроїв, і в якій температура матеріалу не змінюється та дорівнює 0°C . Рівняння теплового балансу такої сушарки має вигляд:

$$I_0L + Q = I_2L, \quad (1.2)$$

де I_0L – теплота зовнішнього повітря; Q – теплота, надана зовнішньому повітрю в калорифері; I_2L – теплота відпрацьованого сушильного агента.

Для розрахунку сушильного процесу необхідно скористатись Id-діаграмою, що дозволяє моделювати процеси, пов'язані з розрахунками сушильної установки [60].

За вихідні дані приймають такі параметри сушильного агента як температура t_0 або відносна вологість φ_0 зовнішнього повітря, температура сушильного агента на вході до сушарки t_1 , температура t_2 чи відносну вологість φ_2 сушильного агента на виході з сушарки.

Параметром, який підлягає визначенню, здебільшого є вологовміст d_2 відпрацьованого сушильного агента на виході з сушарки, після чого визначаються питомі витрати сушильного агента l_2 та питомі витрати теплоти на сушіння q .

Методику розрахунку реальної сушарки за допомогою Id-діаграм наведено в [35].

Кількість теплоти, необхідної для приготування в калорифері кількості сушильного агента, яка витрачається на випаровування 1 кг води:

$$q_k = q = l(I_2 - I_1), \text{ кДж/кг випар. вологи}, \quad (1.3)$$

де $l = \frac{1000}{d_2 - d_1}$ – питомі витрати повітря на випаровування 1 кг вологи, кг сух.

пов./кг випар. вологи;

I_1, I_2 – теплоємність (ентальпія) сушильного агента на вході і виході із сушарки.

При продуктивності сушарки за вологою, випаровується W кг/год щогодини необхідно забезпечувати генерування теплової енергії у кількості:

$$Q = qW, \text{ кДж} \quad (1.4)$$

Знаючи нижчу теплоту згоряння фрезерного торффу Q_H^P , можна також розрахувати необхідні витрати палива для нормальної роботи сушильної установки протягом години:

$$M_n = \frac{qW}{Q_H^P \eta_T}, \text{ кг/год} \quad (1.5)$$

Встановлено, що зменшення вологості сировини для брикетування нижче середньої фактичної на 1% для торфобрикетного заводу сприяє підвищенню вироблення брикетів до 4% і зниженню собівартості на 0,4%. Збільшення щільності фрезерного торфу на 10 кг/м^3 для брикетного заводу призведе до зростання його продуктивності від 0,3 до 4,7% [61, 62].

Відокремлення частинок висушеного матеріалу від димових газів чи повітря є обов'язковою операцією технологічного процесу виготовлення брикетів. Крім того, необхідність звільнення повітря або димових газів від торфових частинок диктується й санітарно-гігієнічними міркуваннями: потребою забезпечувати належну чистоту повітря в робочих зонах виробничих приміщень та дотриманням вимог щодо чистоти газів, які викидаються в атмосферу [37].

Першочерговим завданням є дослідження енерготехнологічного комплексу сушіння торфу з точки зору впливу на режим роботи параметрів як регулювання (подачі пари і сировини), так і фізико-механічних характеристик торфу (вологості, насипної щільності, виду торфу, ступеня розкладу та інших). Вирішення цього питання можливо лише шляхом математичного опису процесу сушіння даного енерготехнологічного комплексу і подальшого його дослідження. Математичний опис процесу сушіння і його дослідження дозволяють виявити не тільки основні впливи, але й оптимізувати процес як за технологічними характеристиками сировини, так і режимами роботи сушарки.

Отже, для підвищення енергоефективності використання енергоресурсів в процесі сушіння торфу енерготехнологічному комплексі з паровими трубчастими сушарками необхідно провести науково-практичні дослідження, розробити на основі системного аналізу процесу та результатів виробничих експериментів математичні моделі енерготехнологічного комплексу сушіння торфу та режими сушіння на основі методу багатомірної оптимізації за критерієм енергоефективності.

1.5 Аналіз методів побудови математичних моделей для оптимізації енергоспоживання енерготехнологічного комплексу сушіння торфу

В задачах управління технологічних об'єктів виділяють такі підзадачі як завдання класифікації (оцінка приналежності режиму роботи до одного з класів), завдання регресії (оцінка значення числової вихідної змінної «керуючого впливу» за значенням вхідних змінних), інтерполяція даних (функція зміни збуджуючих факторів) і прогнозування часових рядів [63].

Практично в будь-якій задачі класифікації, регресійного аналізу або прогнозування виникають питання: які ознаки використовувати, а які ні; чи потрібно якось перетворювати вихідні ознаки; яку модель залежності застосувати для даної задачі?

Проблема відбору ознак (features selection) часто виникає через те, що на етапах постановки завдання і формування даних ще не ясно, які ознаки несуттєві або дублюють один одного. Прагнення врахувати найбільше потенційно корисної інформації призводить до появи надлишкових (шумових) ознак. Однак якщо ознака не інформативна, тобто не впливає на відповідь, тоді включення в модель може тільки погіршити її якість. Методи навчання повинні відрізнити шумові ознаки і відхилити їх [64].

Із збільшенням числа використовуваних ознак (складності моделі) середня похибка на навчальній вибірці, як правило, монотонно убуває. При цьому середня похибка на незалежних контрольних даних спочатку зменшується, потім проходить через точку мінімуму і далі тільки зростає. Це явище називають перенавчанням. У надмірно складних моделях надлишкові ступені свободи "витрачаються" не тільки на відновлення шуканої залежності, але й на "підгонку" під конкретні дані, фактично, – на апроксимацію похибок вимірювань і самої моделі. Відбір ознак дозволяє знаходити модель оптимальної складності, для якої перенавчання мінімальне. Відбір ознак скорочує вартість збору інформації. У практичних завданнях витрати на вимірювання або обчислення окремих ознак можуть бути сумірні з вартістю втрат від помилкових прогнозів. Нарешті, він дозволить отримати

більш прості та зрозумілі моделі та підвищує швидкість виконання алгоритмів [65, 66, 67].

Проаналізуємо основні методи відбору ознак для розробки математичної моделі.

Жадібні методи (повний перебір, почергове додавання і видалення ознак, послідовне видалення ознак, послідовне додавання ознак тощо) додають або видаляють за однією ознакою, щоразу обираючи ту ознаку, з якою досягається найбільш значне поліпшення зовнішнього критерію. Жадібні стратегії можуть "застрягати" в локальних оптимумах і часто не знаходять достатньо якісного рішення [68].

Перевагою методу випадкового пошуку є простота реалізації. Це дуже простий алгоритм: маючи в t -му поколінні популяцію з B наборів, злегка модифікуємо кожний з них T раз випадковим чином. З отриманих BT наборів відберемо B найкращих за заданим зовнішнім критерієм Q , і сформуємо з них $(t+1)$ -е покоління. При $B=1$ пошук кращої моделі ведеться локально в околиці поточної моделі; в цьому випадку алгоритм називається локальним випадковим пошуком. Основним недоліком випадкового пошуку є повільна збіжність. Щоб локальний випадковий пошук дійсно призводять до найкращого набору, повинна виконуватися гіпотеза: ознаки, що входять в найкращий набір, часто зустрічаються в підмножинах із близьким значенням критерію [69]. На практиці відповідні значення параметрів доводиться підбирати експериментально для кожного конкретного завдання.

Відбір ознак методами математичного програмування відрізняється від попередніх методів тим, що в них немає явного перебору ознак [70]. Оскільки у задачі формування моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу міститься багато вхідних факторів, то даний метод застосовуватись для вирішення даної задачі не доцільно.

При пошуку в ширину або багаторядному ітераційному алгоритмі методу групового урахування аргументів (МГУА) на кожному кроці розглядається ряд наборів, до кожного з них додається по одній ознаці усіма можливими

способами, і з цієї великої кількості наборів відбираються кращі за зовнішнім критерієм. Таким чином, виявляється сформованим наступний ряд і процес повторюється. По суті, він втілює принцип незакінчених рішень Габора: приймаючи рішення, слід залишати максимальну свободу вибору для прийняття подальших рішень [71].

Метою МГУА є отримання результату повного перебору рівнянь за умовою селекції, а не результат застосування методу найменших квадратів (регресійного аналізу). Принципова відмінність МГУА від регресійного аналізу полягає в тому, що метою МГУА є досягнення мінімуму доцільно обраного критерію селекції, а метою регресійного аналізу – досягнення мінімуму середньоквадратичної похибки на всіх експериментальних точках для заданого вигляду рівняння регресії [71, 72].

Генетичний алгоритм здійснює пошук найкращого набору ознак за принципами дарвінівської еволюції. Перше покоління наборів генерується випадковим чином. Для цих наборів застосовуються операції схрещування для породження великого числа нових наборів. Потім проводиться «штучний відбір» або селекція. У друге покоління відбираються тільки V наборів кращих за заданим зовнішнім критерієм Q . Еволюційний процес переходить від покоління до покоління до тих пір, поки не наступить стагнація, тобто якість кращого набору в поколінні перестане поліпшуватися [73].

Генетичний алгоритм подібний алгоритму МГУА і відрізняється від його головним чином, правилом породження наступної популяції, і, на відміну від МГУА, в алгоритмі популяції можуть міститися набори різної довжини. Тому для відбору інформативних ознак енерготехнологічного процесу сушіння торфу доцільно використовувати алгоритм групового урахування аргументу або генетичний алгоритм.

Одним з ефективних способів аналізу об'єкту регулювання є дослідження математичної моделі, що дозволяє виявити фактори, які найсильніше впливають на процес сушіння, оптимізувати їх та розробити оптимальну структуру системи сушіння. Вибір оптимальної структури моделі залежить від

дисперсії шуму, довжини вибірки, вхідних впливів (планів експерименту), параметрів об'єкту та взаємозв'язку між ними [74].

Ефективне регулювання досить складним багатокритерійним процесом сушіння торфу неможливо без розроблення математичних моделей з наступним пошуком оптимальних режимних параметрів. Розробка математичних моделей зміни енерго-економічних показників в залежності від керованих параметрів у промислових парових трубчастих сушарках неможлива без проведення експериментів.

Оскільки при плануванні експерименту зазвичай одночасно змінюються кілька чинників, необхідно встановити вимоги, що пред'являються до сукупності факторів. Особливо важливими є сумісність і незалежність факторів. Реакція системи на вплив факторів може дуже різнитися, тому необхідно виділити параметр, який потрібно оптимізувати. Характеристику мети, що задана кількісно, називають параметром оптимізації (критерієм оптимізації, цільовою функцією). До параметрів оптимізації пред'являються ряд вимог [67]: ефективність з точки зору досягнення мети, універсальність, кількісне вираження одним числом, статистична ефективність, фізичний зміст, простота і доступність обчислення, існування для всіх різних станів. Коректність постановки завдання визначає ефективність параметру оптимізації. Параметр оптимізації повинен оцінювати функціонування системи в цілому, а не окремих її підсистем. Параметр оптимізації набувати безліч значень – область його визначення, яка може бути безперервна або дискретна, обмежена або необмежена. У випадках, коли кількісна оцінка параметра неможлива, застосовують ранговий підхід.

Роботу енерготехнологічного комплексу сушіння можна описувати різними моделями. Вибір моделі визначається конкретними вимогами до експерименту. Це можуть бути адекватність моделі, простота, змістовність, здатність прогнозу. Залежно від постановки завдання можуть застосовуватися різні поліноміальні, не поліноміальні моделі, моделі дисперсійного аналізу та ін.

Існуюча методика наукових досліджень поділяється на дві групи – пасивне і активне проведення експериментів [75]. Пасивний експеримент полягає в спостереженні за досліджуваним процесом із фіксуванням, вимірюванням і розрахунком технологічних параметрів. Такого роду експеримент має ряд недоліків, які не дозволяють у повній мірі вивчити досліджуваний процес. Межі варіювання регульованими факторами при зміні чисельних значень збурюючих впливів недостатньо широкі. Це не дозволяє відтворити чітку залежність параметрів. Суб'єктивність спостережень експериментатора при регулюванні установками часто призводить до підвищеного значення помилки серії дослідів.

При проведенні активного виробничого експерименту [75] дослідник управляє технологічним процесом з урахуванням техніки безпеки та специфіки виробництва, що розширює межі варіювання керованими параметрами до необхідних розмірів, таким чином виключається суб'єктивність проведення досліджень.

Планування активного виробничого експерименту дозволяє отримати досить достовірну інформацію про перебіг процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при мінімально можливій кількості дослідів. Планування експериментів полягає у виборі числа і умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання із заданою точністю. При проведенні планування слід керуватися такими принципами [76]:

- вхідні параметри повинні задаватися одночасно протягом всього дослідів;
- обґрунтоване зниження кількості виробничих дослідів згідно з математично розробленим планом, тобто виключається суб'єктивна помилка у проведенні експерименту;
- дотримання спеціальних правил техніки безпеки, регламентованих нормативними документами, за допомогою аналізу сумісності комбінацій керованих чинників;
- використання при проведенні експерименту контрольно-вимірювальної апаратури, що відповідає високим стандартам точності.

Для проведення експериментів необхідно підібрати план експерименту.

В плануванні експериментів використовується критерій мінімуму кількості дослідів, тобто мінімальної кількості дослідів при дотриманні вимог до якості оцінки функції або чинників [76].

Серед класів планів головна увага приділяється ортогональним та рототабельним. Для ортогонального плану використовується умова парної ортогональності стовпчиків матриці планування. При цьому коефіцієнти поліному визначаються незалежно один від одного. Еліпсоїд розсіювання орієнтовано в просторі таким чином, що напрямки його осей співпадають з напрямками осей координат простору параметрів. Використання рототабельних планів забезпечує рівнозначність точності оцінки функції відгуку для будь-якого напрямку від центру експерименту (сталість дисперсії передбачення) на рівних відстанях від центру експерименту.

Найбільш простим планом експерименту є повночинниковий експеримент (ПЧЕ) типу 2^k , в якому досліджувані змінні варіюються на двох рівнях – максимальному (+1) та мінімальному (-1), розташовані симетрично відносно деякого нульового рівня. Кількість дослідів визначається як $N = 2^k$ (k – кількість чинників). У всіх дослідах кожен фактор повинен порівну побувати на верхніх та нижніх рівнях [77].

Використання лінійних планів дозволяє досягти окіл точки оптимуму. Пошук оптимального рішення в цій області потребує переходу від лінійних моделей до моделей високого порядку. Побудова такої моделі потребує використання плану в якому кожна змінна приймає хоча би три різних значення. Плани ПЧЕ типу 3^k характеризуються надмірною надлишковістю, оскільки необхідна кількість дослідів складає $3^3 = 27$. Такі плани називають композиційними (послідовними), вони дозволяють використовувати інформацію, отриману в результаті реалізації лінійного плану.

Також можуть застосовуватись ортогональні або рототальні центральні композиційні плани (ЦКП). Поняття “центральний” означає що фактори приймають значення, симетричні відносно центру плану. Ці плани

використовуються в якості “ядра” повний чинниковий експеримент. На практиці широке застосування знайшли два типи ЦКП: плани Бокса та Хартлі. Ядром плану Бокса є ПЧЕ 2^k (при $k < 3$) або дрібний чинниковий експеримент (ДЧЕ). До ядра додається одна точка в центрі плану з координатами $(0,0,\dots,0)$ та $2k$ “зіркових” точок з координатами $(\pm g,0,\dots,0),\dots,(0,0,\dots,\pm g)$. Побудований таким чином план буде ЦКП другого порядку. Шляхом підбору зіркового плеча g , ЦКП Бокса можна зробити або ортогональним, або рототабельним. Плани типу B_n , являють собою симетричні плани другого порядку з ядром у вигляді ПЧЕ 2^k , доповнені зірковими точками з плечем $g=1$ та дослідями в центрі плану.

На підставі проведеного аналізу планів експерименту для дослідження режимних показників парової трубчастої сушарки торфу обрано:

- критерій мінімуму кількості дослідів – для проведення мінімальної кількості дослідів при дотриманні вимог до якості оцінки функції або факторів;
- ненасичений ЦКП типу B_n , що має мінімальну (достатню) кількість рівнів варіювання чинників – 3 рівні.
- ядром плану є ПЧЕ типу 2^3 – 3 чинники, що відповідає методу планування Хартлі [77].

Отже, кожен з регульованих параметрів X_i має певне мінімальне, максимальне і середнє значення. Безпосереднє проведення дослідів з мінімальним і максимальним значенням керуючих змінних на виробництві не є можливим, оскільки це призведе до значного відхилення якості сушенки від встановлених нормативних показників і появі значного браку продукції.

В багатьох дослідженнях, в основному, зарубіжних вчених, для побудови математичних моделей та алгоритми формується напрям „м’яких розрахунків” (soft computing), що об’єднує синергетичний ефект імовірнісних міркувань, теорії нейронних мереж та методів еволюційного (індуктивного) моделювання [78].

Результати порівняльного аналізу можливостей основних методів дослідження складних об’єктів, що можуть бути покладені в основу побудови

математичних моделей об'єкту, вирішення задач прогнозування стану роботи системи, класифікації режимів роботи, інтерполяції даних тощо наведено в таблиці 1.2 [72, 73, 78-81]. Аналіз таблиці показує, що класичні методи, добре зарекомендували себе на практиці (МГУА, регресійний аналіз), так і порівняно нові методи (на основі нейронних мереж, генетичних алгоритмів) мають ряд переваг та недоліків.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз основних методів, що можуть бути використані для побудови моделі роботи енерготехнологічного комплексу сушіння

Метод	Переваги	Недоліки
Нейронні мережі	Висока точність прогнозу	Відсутність пояснювальних компонентів
	Адаптація до вирішуваної задачі	Значний час навчання
	Стандартне вирішення нестандартних задач	Трудність формування топології мережі
	Замість програмування – навчання	Використання конекціоністського підходу для формалізації нейронних мереж
	Реалізація “логіки відкриття”	Необхідність представлення достатньої навчальної вибірки
	Можливість швидкого коригування прогнозу при отриманні нових даних	Евристичність параметрів алгоритмів навчання різних типів нейронних мереж
	Висока ефективність програмного забезпечення на паралельних ПК	

Продовження табл. 1.1.

Регресій- ний аналіз	Простота розрахованих алгоритмів	Невисока точність прогнозу (в основному інтерполяція даних)
	Наглядність та інтерпретованість результатів	Часте порушення основних передумов коректності методу
		Суб'єктивний характер вибору вигляду конкретної залежності (формальна підготовка моделі під емпіричний матеріал)
		Відсутність пояснювальної функції (неможливість пояснення причинно-наслідкових зв'язків)
Метод групового урахування аргументів	Зведення до мінімуму впливу суб'єктивних факторів під час побудови моделі	Неможливість побудови моделі для випадкової та псевдовипадкової поведінки об'єктів
	Незначний обсяг емпіричної інформації	Низька якість формування інтуїції користувача
	Можливість коректування отриманих рішень	Евристичність деяких процедур самоорганізації
	Наглядність інтерпретованих результатів, автоматичне формування структури мережі	Відсутність пояснювальної функції
	Простота і швидкодія настроювання структури мережі	
	Низька вартість моделі	
	Висока точність прогнозу	
	Реалізація "логіки відкриття"	
Еволюційне моделювання (генетичні алгоритми)	Некритичність до вигляду параметрів досліджувальної моделі (можливість використання експертної, емпіричної, довідкової і т.ін. інформації про об'єкт)	Можливість отримання неоднозначного результату за рахунок використання механізму випадковості під час генерації нових рішень

Продовження табл. 1.1.

Еволюційне моделювання (генетичні алгоритми)	Швидка збіжність алгоритму для вирішення задач оптимізації (значне зниження комбінаторної трудності під час пошуку оптимальних рішень)	Висока залежність якості приймаємих рішень від способу реалізації генетичних операторів та стратегії пошуку екстремуму
	Простота кодування вхідної та вихідної інформації	Невисока точність отриманих результатів
	Можливість коректування отриманих рішень	
	Високі адаптаційні можливості для вирішення складних проблем	
	Наглядність інтерпретованих результатів, автоматичне формування структури мережі	

Є три основні недоліки, що заважають штучним нейронним мережам (ШНМ) бути основними для вирішення задач управління технологічним процесом [82, 83, 84]. По-перше, користувач повинен бути досвідченим в теорії ШНМ, щоб мати можливість отримати достовірні результати. Він повинен уміти вибрати необхідну відповідну архітектуру нейронної мережі, здійснити навчання парадигми, попередню обробку даних для нейронної мережі та вміти інтерпретувати результати. Другий недолік – в тому, що знання про систему приховані у вагах мережі (чорний ящик), на відміну від статистичних методів, що дозволяють створити математичні формули, які інтерпретуються людиною. Третій недолік полягає в тому, що користувач не знає, в який саме момент можна довіряти нейронній мережі.

Методи індуктивного моделювання, спрямовані на подолання цих недоліків. По-перше, користувач не працює з середовищем подібним до нейронних мереж. Дані методи можуть включати в себе генетичні алгоритми побудови оптимальних моделей з правильним типом одиниць (гібридна модель) та оптимальними методами навчання. Моделі зростають в процесі навчання (їх топології не задано заздалегідь) таким чином, розмірність моделі

пропорційна складності завдання. По-друге, за допомогою генетичних алгоритмів або алгоритму МГУА можна отримати модель у формі математичних рівнянь. Для подолання незручності чорного ящика, існує можливість візуалізації моделей поведінки, зв'язків параметрів на кожному ряді сполучення. Третім недоліком ШНМ є проблема правдоподібності нейронної мережі, оскільки ШНМ може дати правдоподібний вихід лише для випадків успішного тренування. Якісний вихід моделі ШНМ не може бути забезпечено шляхом обмеження його вхідних параметрів. Гібридні еволюційні моделі вирішують цю проблему шляхом еволюції кількох моделей. Чим більше вони відрізняються за входом, тим менш правдоподібним буде їх вихід.

Саме тому ШНМ для вирішення регресійних задач та побудови математичної моделі об'єкта не використовуються.

Основна перевага генетичного алгоритму – в його очевидності і багатих можливостях для введення різних евристик. Недолік – відносно повільна збіжність. Незважаючи на тисячі успішних практичних застосувань, збіжність генетичного алгоритму досі залишається відкритою теоретичною проблемою [85]. Крім того, якісний генетичний алгоритм поряд з параметрами розміру популяції V , максимального числа поколінь T і ймовірності мутації p_m має ще з десяток-другий параметрів, підбір яких є мистецтвом і залежить від особливостей задачі.

Звичайний регресійний аналіз за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки дозволяє отримати оптимальне значення в малій області, коли число членів полінома регресії менше числа інтерполяції. Оптимізація за МГУА включає не лише цю область, але і всі інші співвідношення між цими величинами. При цьому можна отримати повний оптимальний опис будь-якої складності – точніше його аналог за умовою мінімуму середньоквадратичної похибки, розрахованої на окремій перевіірочній послідовності даних. Збільшення області оптимізації підвищує точність. Таким чином, висока точність в МГУА досягається за рахунок оптимізації складної моделі [86].

МГУА застосовується у випадках, коли відсутня або майже відсутня апріорна інформація про структуру моделі і розподіл її параметрів [87] та коли даних спостережень вкрай недостатньо, навіть у випадку, коли параметрів моделі більше, ніж число спостережень [86].

Незважаючи на дефіцит вихідних даних, для досягнення точності і регулярності одноразового прогнозу доводиться виділяти частину вузлів інтерполяції в окрему перевірочну послідовність даних. Інші точки утворюють навчальну послідовність, що використовується і в звичайному регресійному аналізі для оптимізації оцінок коефіцієнтів рівняння регресії. Кількість точок навчальної послідовності має бути принаймні на одиницю більшою числа доданків часткових поліномів.

Структуру МГУА можна інтерпретувати як нейромережу, оригінальність якої полягає в самоорганізації як її структури, так і параметрів. До істотних переваг МГУА належать автоматичне формування структури мережі, простота і швидкодія настроювання параметрів, а також можливість «згорнути» налаштовану мережу безпосередньо в явно виражений математичний вираз.

Широка можливість застосування МГУА та наведені переваги в побудові математичних моделей пояснюють доцільність використання МГУА для створення математичної моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу доцільно використовувати метод групового урахування аргументу.

У випадку, коли буде отримана адекватна математична модель енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках, що включає тільки основні фактори процесу, подальші завдання управління (класифікації режимів роботи, інтерполяції даних, задачі прогнозування) можуть здійснюватись за допомогою ШНМ, оскільки вони мають найкращу адаптацію до вирішуваної задачі та точність прогнозу, а також можливість швидкого коригування прогнозу при отриманні нових даних (табл. 1.1).

Для вирішення такого роду завдань можуть бути використані різні види нейронних мереж, такі як багатосаровий перцептрон, мережі з радіальними базисними функціями, імовірнісні мережі та інші, що різняться між собою за

структурою і можливостями. Основна перевага ШНМ в їх здатності до навчання. ШНМ призначені для роботи з великою кількістю змінних, успішно здійснюють прогнозування та класифікацію і можуть замінити людину у прийнятті рішень для нечітких завдань.

Багатошаровий перцептрон (MLP) – найбільш поширений вид мережі. Мережа складається з довільної кількості шарів нейронів. Перший шар називається сенсорним або вхідним, внутрішні шари називаються прихованими або асоціативними, останній шар – вихідним або результуючим [88]. Нейрони кожного шару з'єднуються з нейронами попереднього і наступного шарів за принципом «кожен з кожним». Кожен елемент мережі будує зважену суму своїх входів, потім пропускає цю величину активації через передавальну функцію, і таким чином отримується вихідне значення цього елемента.

Перевага MLP полягає в тому, що мережі такої структури можуть моделювати функцію практично будь-якого ступеня складності, причому число шарів і елементів у кожному шарі визначають складність функції. MLP-мережа відрізняється здатністю до екстраполяції даних і високою швидкістю після навчання.

Мережа з радіальними базисними функціями (RBF) у найбільш простій формі являє собою мережу з трьома шарами: звичайним вхідним шаром, що виконує розподіл даних зразка для першого шару ваг, прихованим і вихідним шарами [89]. Відображення від вхідного шару до прихованого є нелінійним, а відображення прихованого шару у вихідний – лінійне. Зазвичай, але не завжди, число прихованих елементів більше числа вхідних. На відміну від перцептронів, де розбиття простору можливих рішень проводиться за допомогою гіперплощин, у мережах з радіальними базисними функціями розбиття здійснюється гіперсферою, що задається центром і радіусом. У RBF мережах [90, 91, 92] елемент мережі нелінійно реагує на відстань від даної точки до центру радіального елемента. Поверхня відгуку радіального елемента являє собою гаусову функцію з вершиною в центрі і пониженням до країв. Оскільки функції проміжного шару нелінійні, при здійсненні моделювання RBF

мережі основну роль відіграє достатність кількості радіальних елементів для формування функції. Вихідний шар RBF мережі утворюється шляхом лінійної комбінації елементів проміжного шару, тобто зваженої суми гаусових елементів [89, 93].

У порівнянні з MLP мережа RBF моделює будь-яку довільну нелінійну функцію за допомогою всього одного шару, тобто не існує проблеми вибору оптимальної кількості шарів. Також перевагою є лінійність параметрів вихідного шару, що спрощує його оптимізацію методами лінійного програмування і дозволяє уникнути труднощів з локальними мінімумами. Тому навчання RBF мережі відбувається швидше. Однак, певні труднощі виникають з визначенням числа радіальних елементів та їх параметрів. Також алгоритми навчання RBF меншою мірою придатні для пошуку субоптимальних рішень. Модель RBF мережі через особливості побудови поверхні відгуку вимагає більшого числа елементів, ніж перцептрон і, відповідно, працює повільніше. Основні недоліки RBF мережі – це неспроможність екстраполяції даних за областю відомих даних і висока критичність до значного числа входів.

З метою підвищення ефективності використання енергоресурсів для побудови системи регулювання процесу сушіння торфу найбільш доцільно використовувати багат шаровий перцептрон як модель з можливостями екстраполяції, побудови функції будь-якої складності, меншою мірою чутливої до збільшення числа вхідних впливів, що особливо важливо для побудови моделі багат факторного об'єкта. Такий недолік як повільна здатність до навчання не чинить істотного впливу на якість моделі, а складнощів з відшуканням глобального мінімуму можна уникнути, використовуючи різні навчальні послідовності і алгоритми навчання.

1.6 Постановка задачі дослідження

Аналіз поточного стану проблеми ефективності використання енергоресурсів під час регулювання енерготехнологічного процесу сушіння ресурсів на заводах України підтвердив актуальність вирішення проблеми

енергоефективного регулювання режимними параметрами процесу сушіння в парових трубчастих сушарках з дотриманням якісних характеристик сушенки та вимог пожежобезпеки.

Аналіз стану питання дозволив сформулювати наступні задачі дослідження.

1. Провести дослідження технології сушіння корисних копалин, на прикладі торфу, в парових трубчастих сушарках для визначення об'єктивних параметрів, що описують цей процес.

2. Розробити план та провести активні виробничі експерименти з метою отримання даних, необхідних для побудови математичних моделей.

3. За допомогою індуктивних методів розробити математичні моделі зміни енерго-економічних параметрів, параметрів якості сушенки в процесі сушіння для подальшого пошуку енергоефективних режимів, що задовольняють вимогам високої якості сушенки.

4. Розробити метод багатомірної оптимізації режимів сушіння торфу за критерієм енергоефективності.

5. Знайти енергоефективні значення регульованих параметрів процесу, що дозволяють отримати якісну сушенку з дотриманням вимог пожежобезпеки виробництва.

6. Знайти структуру та провести навчання нейромережі, що дозволяє врахувати оптимальні за критерієм енергоефективності значення регулюючих параметрів за певних значень збурюючих впливів.

7. На основі знайдених результатів розробити рекомендації для виробництва, сформулювати процедуру енергоефективного регулювання режимів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Встановлено, що торф може бути використаний як енергетичний ресурс для заміщення природного газу в опаленні адміністративних та громадських будівель в місцях його видобутку, оскільки собівартість отриманої 1 ГДж нижчої теплоти згоряння від спалювання торфобрикетів приблизно вдвічі менша ніж у природному газу або мазуту.

2. Обґрунтовано доцільність вибору парової трубчастої сушарки торфу як об'єкту досліджень для зниження витрат енергії, зокрема – теплової та підвищення ефективності її роботи, зниження виходу низькоякісної сушенки, оскільки вона має широке застосування для сушіння твердих корисних копалин, існує є можливість оперативного регулювання процесу сушіння торфу.

3. Здійснено аналіз основних методів підвищення ефективності використання ПЕР за допомогою регулювання енерготехнологічного процесу сушіння торфу, що дозволило розробити відповідний математичний апарат для розв'язання задач формування режимів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу з максимальним рівнем енергоефективності. Для знаходження математичної моделі та вирішення задачі вибору значущих факторів процесу сушіння найбільш придатним є метод групового урахування аргументів, а для знаходження вихідних значень процесу за певних збурюючих раціональним є застосування нейронних мереж типу перцептронів.

Основні положення даного розділу опубліковані автором дисертаційної роботи в [14, 18, 21].

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ФАКТОРНОГО ПОЛЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТОРФУ

2.1 Визначення факторів, що впливають на процес сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі з паровою трубчастою сушаркою

В умовах переорієнтації України в сторону до Європейського Союзу підприємства повинні спрямовувати зусилля на поліпшення якості кінцевої продукції, зниження її собівартості, підвищення продуктивності існуючого обладнання. Як правило, застосовуване ручне регулювання параметрів сушіння торфу, суб'єктивність у визначенні необхідних режимів прагнення забезпечити заданий рівень тільки кінцевої вологості сушенки призводять до високих витрат енергоносіїв, низької продуктивності процесу, його пожежонебезпеки.

Вирішення проблеми підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння торфу з паровими трубчастими сушарками, можливе за рахунок комплексного, всебічного, багатофакторного дослідження технології, розробки оптимальних режимів регулювання. Їх основу складають математичні залежності зміни енерго-економічних показників, що адекватно описують процес сушіння торфу в досліджуваних установках. Оптимальні режими сушіння забезпечують ефективне регулювання сушарок що задовольняє сучасним вимогам щодо якості продукції, мінімальної собівартості та пожежної безпеки.

Сучасні рівні проведення системного аналізу, теорії планування активних експериментів, моделювання технологічних процесів, використана у виробництві контрольно-вимірювальна, регулювальна апаратура та обчислювальна техніка дають можливість досягти потрібного рівня ресурсо- та енергозбереження в процесі сушіння [94]. При цьому забезпечується необхідна продуктивність устаткування із заданими нормативними документами рівнями кінцевої вологості сушенки, і, як наслідок – торфобрикетів, ураховується рівень пожежобезпечної температури теплоносія на виході з установки. Для виявлення

характеру і ступеня взаємозв'язку між вхідними параметрами, що об'єктивно впливають на процес, і вихідними енерго-економічними показниками необхідно провести системний аналіз процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці Цемаг, яка використовується на торфобрикетному заводі "Сойне".

Характеристика об'єкту дослідження. Парова трубчаста сушарка являє собою барабан, що встановлений під кутом $8-10^\circ$ до горизонту і обертається на цапфах, частота обертання якого регулюється в межах $0,4 \dots 1,2 \text{ рад/с}$ ($4 \dots 12 \text{ об/хв}$). В середині барабана, вздовж його осі, встановлені циліндричні трубки діаметром $100/108 \text{ мм}$. Довжина барабана дорівнює 8 метрам, діаметр 4 метри, кількість трубок – 890 штук.

Торф подається в трубки і переміщується по них за рахунок обертання барабана. У міжтрубний простір надходить пара. Конденсат пари за допомогою спеціальних пристроїв повертається в котельню. Сушильним агентом служить повітря, що вентилятором з приміщення транспортується через трубки. Сушенка з трубок надходить в розвантажувальний короб, а змішаний в пароповітряній суміші торф'яний пил осідає в циклонах.

Регулювання здійснюється шляхом зміни обертів електродвигуна постійного струму, який через редуктор обертає шестерню. Завантаження сушарки торфом здійснюється безперервно за допомогою завантажувальних рукавів та полиць. Матеріал подається з бункера на полиці і зсувається з них в трубки сушарки, після чого просувається ними до вивантажувальної камери. Оскільки трубки розташовані на різній відстані від осі обертання барабана, то вони мають різну кругову швидкість: вона зростає від центру до периферії. Відповідно й швидкість просування торфу неоднакова: в трубках, розташованих ближче до центра, вона менша, і торф сохне довше ніж в периферійних трубках де швидкість просування більша. По-різному рухаються всередині трубки й частинки різного розміру: крупні проходять швидше ніж малі. Все перелічене призводить до нерівномірного сушіння матеріалу, збільшує вологорізницю частинок і негативно впливає на якість брикетів [95].

Основним призначенням енерготехнологічного комплексу сушіння торфу є отримання заданої вологості сушенки незалежно від коливань вологості торфу що надходить у сушарку. Однак, у результаті зміни температурного режиму, вологості, насипної щільності сировини та інших параметрів процесу сушіння парова трубчаста сушарка не забезпечує стабільної вологості сушенки і, як наслідок – стабільних вологості й міцності брикетів. Ці зміни якісних показників знижують продуктивність заводів, а також призводять до порушення технологічного процесу [96].

Під час сушіння торфу насипна щільність і вологість матеріалу варіюються в широкому інтервалі. Коливання вологості сушенки залежить від досвідченості оператора, а також від його інформованості про зміни якості торфу що надходить на сушіння. У разі відхилення від заданої вологості сушенки для зміни режиму сушіння потрібно знати не тільки напрямок зміни факторів, але й величину їх коригування [97].

Безперервно спостерігаючи за вологістю сушенки та значеннями факторів сушіння, оператор порівнює поточні їх значення з попередніми і на підставі свого досвіду коригує режим сушіння. Якщо ж у оператора немає достатнього досвіду, а також у разі різкої зміни властивостей торфу, виникають труднощі, які найчастіше призводять до пересушування або недосушування торфу, а іноді і до зупинки всього заводу. Налагодження режиму сушіння ускладнюється тепловою інерцією, тривалістю перехідних процесів і великою тривалістю сушіння.

Зміна якісних характеристик торфу має вплив на продуктивність заводу і якість брикетів. При переробці торфу з постійними показниками якості, підвищення продуктивності заводів по даними різних джерел сягає 15-20% [52, 98].

Продуктивність парової трубчастої сушарки за висушеною вологою залежить від наступних основних чинників: поверхні нагрівання, кута нахилу барабана, числа обертів барабана, коефіцієнта заповнення трубок, якісної характеристики матеріалу, тиску пари, швидкості сушильного агента [97].

Кут нахилу барабана приймається за дослідними даними в залежності від сушеного матеріалу і фіксується при монтажі сушарки. Змінювати його в процесі експлуатації не є можливим.

Важливим фактором, що впливає на пропускну здатність сушарки, є число її обертів. З їх збільшенням зростає кількість матеріалу, що проходить через сушарку. Однак при цьому збільшується кількість матеріалу, що не досягнув заданої вологості. В основному, глибину сушіння можна регулювати за рахунок зміни числа обертів сушарки. Підвищити ж помітно продуктивність сушарки за випаровуванням вологи не є можливим, оскільки вологість висушеного торфу не може змінюватися в широких межах, вона регламентується ДСТУ на торф'яні брикети.

Найбільш ефективним засобом підвищення продуктивності трубчастих сушарок вважається збільшення заповнення трубок матеріалом за допомогою використання різноманітних вставок. Проте в парових трубчастих сушарках їх практичне застосування часто утруднено. Це пов'язано з роботою завантажувального пристрою, якістю сушеного матеріалу, його засміченістю сторонніми предметами. Наявність вставок не тільки гальмує рух матеріалу в трубці, але може служити причиною закупорювання її шматками деревини, волокнистими включеннями тощо.

Якщо існує живильник-дозатор за допомогою якого дозується кількість торфу, що подається в загрузочний пристрій сушарки, то за високої вологості сировини замість зменшення частоти обертання або підвищення тиску пари можна обмежити завантаження сушарки сировиною. Така технологія сушіння завжди пов'язана зі зниженням продуктивності сушарки.

При повному завантаженні вологість сушенки залежить від частоти обертання сушарки, надлишкового тиску пари в ній, вологості сировини і витрати повітря через трубки. Якщо продуктивність сушарки обмежується дозатором, то додається ще один фактор – продуктивність дозатора, швидкість руху торфу уздовж трубок і кількість вологи, що надходить в сушарку.

Продуктивність по випарованій волозі, крім розглянутих факторів, залежить від швидкості повітря в трубках. Збільшення швидкості сушильного агента або збільшення розрідження сушарки завжди підвищує її поглинання вологи. Разом з цим зростає витрата теплоти на випаровування 1 кг вологи, оскільки збільшуються втрати теплоти на підігрівання сушильного агента, що викидається в атмосферу з більш низьким вологовмістом [52, 60].

Слід також мати на увазі, що зі збільшенням кількості повітря, яке проходить через сушарку, зростає винесення дрібнофракційного матеріалу, і утруднюється його уловлювання в пиловловлювальній системі. Економічність процесу може в даному випадку також знизитися за рахунок підвищених безповоротних втрат висушеного матеріалу [96].

Також однією з основних технологічних вимог до енерготехнологічного комплексу сушіння торфу є забезпечення заданої якості сушенки в комплексі з іншим обладнанням торфобрикетного заводу. Ряд негативних явищ, властивих паровій трубчастій сушарці Цемаг, зводиться до одного основного – високої вологорізниці сушенки. Однак середньозважена вологорізниця окремих фракцій незначна. Так, якщо цей параметр для сировини складає 1,55%, то для сушенки після сушіння і перед пресами він відповідно дорівнює 5,95 і 2,7% [99]. Цей параметр у цих межах не спричиняє впливу на якість готової продукції.

Гранулометричний склад сушенки, отриманої в паровій трубчастій сушарці, в порівнянні з іншими типами, відрізняється великим вмістом крупних частинок. Вологорізниця в межах 1-5% несуттєво впливає на міцність брикетів [100]. За даними досліджень [50, 54], при вирівнюванні вологорізниці, її кінцева величина залежить від тривалості контакту частинок, температури сушенки, початкової вологорізниці, середньої вологості, максимального розміру частинок.

Значна кількість великих частинок у сушенці частково пояснюється низьким коефіцієнтом подрібнення в процесі сушіння. За даними [12, 95, 101, 102] ступінь помелу (відношення середнього діаметру частинок підготовленого

торфу та сушенки) в парових трубчастих сушарках становить – 1,0÷1,4. Низький коефіцієнт подрібнення посилює здатність трубчастих сушарок пропускати великі частинки, що спричинює отримання сушенки низької якості і брикетів з низькою механічною міцністю. Саме тому, включення вимірювань збурюючого впливу по фракційному складі до складу експерименту є важливим для знаходження оптимізаційної моделі енерготехнологічного процесу сушіння по отриманню якісного торфобрикету.

Незважаючи на видалення вологи з торфу, його насипна щільність при сушінні не зменшується. Видалення вологи супроводжується усадкою торф'яних частинок. Як відомо, щільність торфу більше щільності води (1,3-1,6 г/см³). Спад води веде до зменшення, а стиснення структурних елементів – до збільшення насипної щільності [103]. Двоє протилежних процесів призводять до того, що насипна щільність торфу не змінюється.

Зміна насипної щільності торфу викликає зміну кількості поступаючої в сушарку вологи, оскільки

$$\frac{G_c}{100} w_c = \frac{V_c \gamma_c}{100} w_c, \quad (2.1)$$

де w_c – вологість сировини, %; V_c – об'ємна продуктивність по завантаженню, м³/ч; γ_c – насипна щільність, кг/м³.

Однією із характеристик, що визначає фізико-механічність торфу, є його сипучість. Сипучі властивості характеризуються кутом обрушення і кутом природного скосу. Ця властивість торфу впливає на заповнення трубок сушарки, камери пресування брикетного преса і на роботу всього обладнання брикетного заводу. Зокрема, швидкість руху торфу вздовж трубок сушарки визначається за формулою [101]:

$$u = \frac{7,4 \cdot 10^{-4} \cdot n_c}{\sin(45,56 - 0,042\gamma_n + 0,344w_n)}, \quad (2.2)$$

де n_c – швидкість обертання барабана парової трубчастої сушарки;

γ_n – насипна щільність торфу;

w_n – вологість торфу.

З формули (2.2) випливає, що чим вище сипучість (менше кут природного укосу), тим більша швидкість руху торфу в трубках парової трубчастої сушарки, оскільки сипучість торфу збільшується при підвищенні насипної щільності та зменшенні вологості торфу. Подача кількості теплоти в сушарку залежить від витрати, тиску, тепловмісту і температури пари, що подається в сушарку. Порушення рівноваги поданої і споживаної теплоти викликає відповідну зміну тиску пари.

Основним показником, що залежить від технології виготовлення торфобрикету згідно ДСТУ 2042-92 є механічна міцність. У виробничих умовах на механічну міцність брикетів впливає велика кількість чинників, які можна поділити на чотири групи: фізико-механічні властивості сушенки, якість підготовки сировини, умови пресування і конструктивні параметри преса. Фізико-механічні властивості характеризуються в основному вологістю торфу та ступенем його розкладу.

Щодо характеристик якості підготовки торфу, то тут слід відмітити такі характеристики як крупність частин сушенки та її температуру. Підвищення температури торфу збільшує його пластичність і коефіцієнт бічного розпору, а також знижує коефіцієнт зовнішнього тертя матеріалу об стінки матричного каналу. За даними лабораторних досліджень [104], підвищення температури торфу з 15°C до 100°C дозволило підвищити міцність брикетів на 40% при 25-кратному навантаженні. Для торфу низького та середнього ступеня розкладу, тобто матеріалу більш пластичного, збільшення міцності брикетів з підвищенням температури незначне.

На основі проведеного аналізу можна виділити перелік фізико-механічних властивостей торфу, що змінюються в процесі сушіння, впливають на режим сушіння а також основні параметри сушенки, що визначають її якість, що зображені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. – Фізико-механічних властивостей торфу, що визначають характер сушіння торфу

Основні параметри якості сушенки	Параметри торфу, що змінюються в процесі сушіння	Параметри торфу, що впливають на режим сушіння торфу
- фракційний склад	- вологість	- вологість
- вологість	- вологорізниця	- вологорізниця
- вологорізниця	- температура	- температура
- насипна щільність	- зольність	- насипна щільність
- температура		- фракційний склад
- зольність		- сипучість
- ступінь розкладу		

На рис. 2.1 представлена причинно-наслідкова модель процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках за схемою Ісікави. Така діаграма відображає основні структурні зв'язки всередині системи і дозволяє наочно представити ієрархію факторів. Основні позиції на діаграмі відведені п'ятьма групами факторів, що визначають технологічний процес – регульовані фактори процесу сушіння, фізико-механічні властивості торфу, конструктивні параметри системи і параметри сушильного агента. Всередині кожної групи та підгрупи також виділяються певні фактори, що формують уявлення про функціонування об'єкта дослідження. Розбиття і сортування факторів всередині кожної з груп спрощує оцінку впливу того чи іншого чинника. Фізико-механічні властивості торфу і параметри сушильного агента є збурюючими впливами процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках і є неконтрольованими. Оскільки дослідженню підлягає існуюча сушарка Цемаг на торфобрикетному заводі "Сойне", то конструктивні параметри системи для побудови математичної моделі енерготехнологічного процесу сушіння можна не враховувати, так як вони є незмінними. Сукупність досліджуваних факторів роботи комплексу представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Сукупність досліджуваних факторів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою

Вихідний вектор	Вектор вхідних вимірювальних величин, що керуються	Вектор вхідних вимірювальних величин, що не керуються	Вектор вхідних не вимірювальних величин
Енергоспоживання; продуктивність; якість сушенки; пожежобезпека	Параметри теплоносія; частота обертання барабана сушарки; витрата повітря через сушарку; завантаження сушарки	Фізико-механічні властивості торфу, що надходить; параметри повітря (сушильного агента)	Стан та умови роботи обладнання

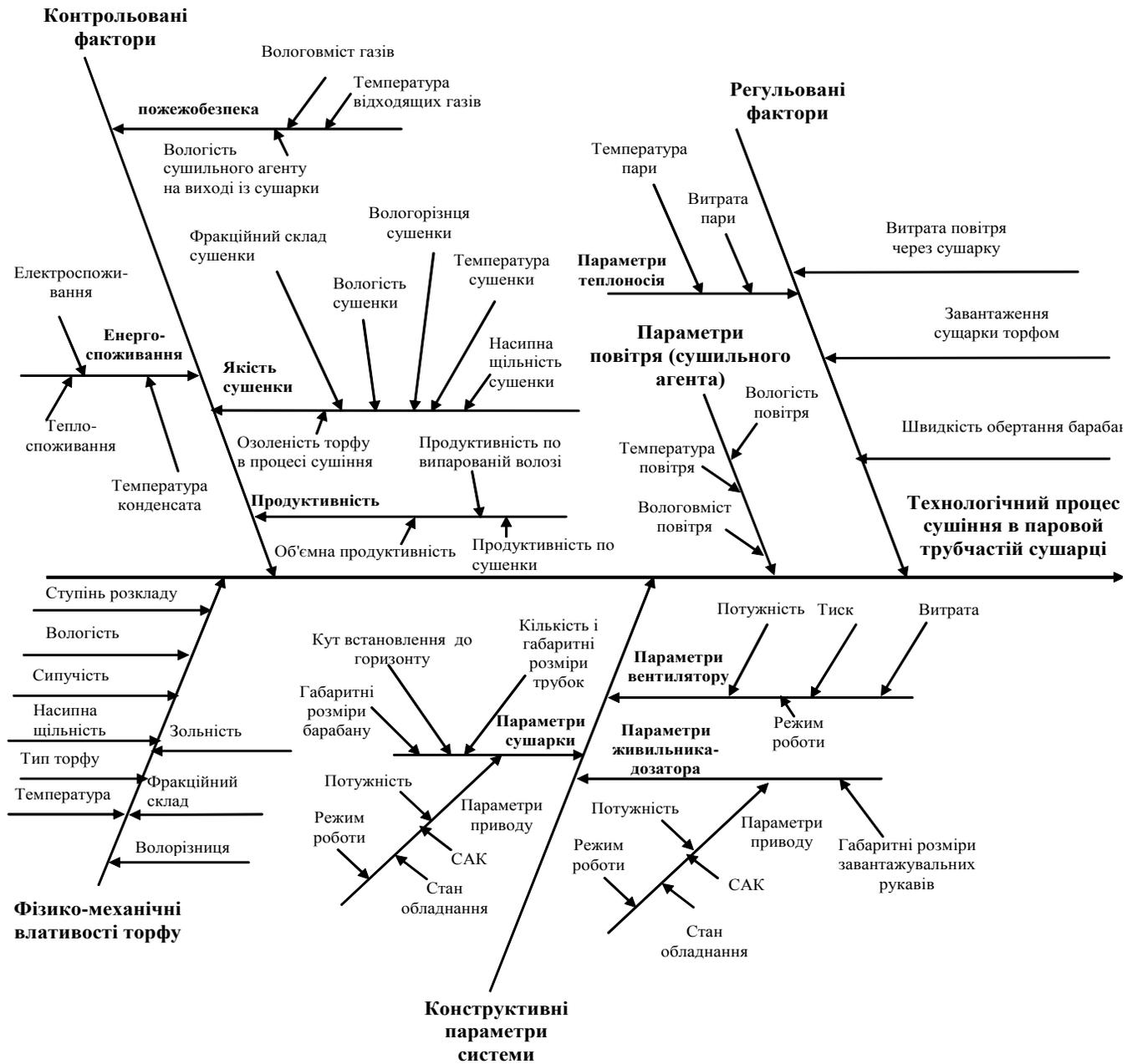


Рисунок 2.1 – Факторне поле енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою торфу

Отже, аналіз технологічних, фізико-механічних, конструктивних факторів та енерго-економічних показників дозволили виділити вхідні регульовані або керуючі параметри, вхідні нерегульовані або некеруючі параметри та вихідні показники процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці.

I. Керуючі впливи:

- завантаження сушарки сировиною	X_1
- частота обертання барабана сушарки	X_2
- температура пари	X_3
- витрата повітря через сушарку	X_4
- тиск пари	X_5
- витрата пари	X_6

II. Вихідні параметри:

- вологість сушенки	Y_1
- вологорізниця сушенки	Y_2
- температура сушенки	Y_3
- електроспоживання	Y_4
- температура відходящих газів	Y_5
- температура конденсата	Y_6
- продуктивність сушарки по сушенці	Y_7
- теплоспоживання	Y_8
- насипна щільність сушенки	Y_9
- фракційний склад сушенки (середній розмір)	Y_{10}
- озолення торфу в процесі сушіння	Y_{11}
- вологість сушильного агента на виході із сушарки	Y_{12}
- вологовміст відходящих газів	Y_{13}
- продуктивність торфу по випаровуваній волозі	Y_{14}

III. Збурюючі впливи:

- кількість води в одиниці об'єму торфу, що надходить

на вхід сушарки (вологість сировини)	F ₁
- насипна щільність сировини	F ₂
- зольність сировини	F ₃
- температура сировини	F ₄
- температура повітря	F ₅
- сипучість сировини	F ₆
- фракційний склад торфу	F ₇
- вологорізниця торфу	F ₈
- ступінь розкладу торфу	F ₉
- вологовміст повітря	F ₁₀
- відносна вологість повітря	F ₁₁
- тип торфу	F ₁₂

Представлений перелік параметрів і вихідних цільових функцій енерготехнологічного процесу сушіння торфу передбачає отримання складних багатовимірних математичних моделей, при цьому значно збільшується число дослідів під час проведення експериментів, які в умовах діючого виробництва досить складно реалізувати [18]. У зв'язку з цим постає актуальним завдання зниження кількості вхідних показників досліджуваного процесу сушіння торфу, що дозволить скоротити кількість проведених дослідів до прийнятної виробництвом кількості і спростить задачу математичного моделювання без істотного зниження точності отриманих математичних залежностей зміни енерго-економічних показників від регульованих параметрів і зовнішніх збурюючих впливів.

Аналіз факторів впливу на технологічний процес необхідно розпочинати з експертних оцінок, суть якого полягає в опитуванні спеціалістів торф'яної галузі в формі анкетування з метою визначення значимості кожного з наведеного вище параметрів та енерго-економічних показників процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці. (Додаток А).

За результатами проведення експертних оцінок та аналізу анкетування експертів були визначені найбільш важливі параметри енерготехнологічного процесу сушіння торфу за думкою експертів.

Експертні оцінки носять суб'єктивний характер визначення об'єктивності впливу кожного фактору на процес сушіння. Тому, щоб не відкинути суттєвий вплив або змінну, в експеримент потрібно включити всі фактори, що мають коефіцієнт ваги більше 0,06.

Метод визначення витрат теплової енергії був розглянутий у розділі 1.3 цієї роботи, де для розрахунку сушильного процесу використовувалась Id-діаграма.

Оскільки для побудови Id-діаграми процесу сушіння [12] необхідно знати такі параметри як температура t_0 зовнішнього повітря, температура сушильного агента на вході до сушарки t_1 , температура t_2 сушильного агента на виході з сушарки, то до складу дослідів потрібно включити і наведені параметри, а саме F_5 , X_3 та Y_5 . В план експерименту слід додати і параметр F_3 (зольність торфу), оскільки його коефіцієнт ваги за результатами анкетування близький до значення згідно з яким змінна включається в експеримент, та існує можливість його визначення у виробничих умовах.

Отже, регульованими (вихідними) показниками для даного процесу є вологість сушенки Y_1 , вологорізниця сушенки Y_2 , температура сушенки Y_3 , електроспоживання Y_4 , температура відходящих газів Y_5 , теплоспоживання Y_8 ; збурюючими – вологість торфу на вході в сушарку F_1 , насипна щільність торфу F_2 , зольність торфу F_3 , температура торфу F_4 , температура повітря F_5 , сипучість торфу F_6 , фракційний склад торфу F_7 , вологорізниця торфу F_8 , а регулюючими (вхідними) – завантаження сушарки сировиною X_1 , частота обертання барабана сушарки X_2 , температура пари X_3 , витрата повітря через сушарку X_4 (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Модель роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу з використанням парової трубчастої сушарки, побудованої за результатами експертного оцінення.

Проведений аналіз факторного поля і енерго-технічних режимів роботи парових трубчастих сушарок торфу та експертного оцінювання дозволив виділити основні фактори та показники енерготехнологічного процесу сушіння для побудови його математичної моделі.

2.2 Планування виробничого експерименту процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі з паровою трубчастою сушаркою

Як було вказано в розділі 1 для розробки математичної моделі необхідно мати достатній обсяг даних отриманих в ході проведення виробничих експериментів. В умовах проведення дослідів на торфобрикетному заводі необхідно розробити такий план експериментів, що дозволив би отримати найбільш повну інформацію про процес сушіння при мінімальній кількості дослідів, та дозволив отримати сушенку в регламентованих якісних рамках, зокрема отримання сушенки необхідної температури та вологості.

Щоб реально оцінити ступінь впливу кожного збудуючого впливу на вихідний параметр, необхідно проводити зміну керуючих параметрів при незмінному значенні вхідних даних, що у виробничих умовах провести

неможливо, оскільки сировина має різні фізико-механічні властивості в межах навіть одного вагона торфу. Саме тому за основу при здійсненні планування експерименту потрібно брати дані режимних карт і зміну керуючих впливів проводити в діапазоні режимних параметрів роботи сушарки типу «Цемаг».

Для отримання торфобрикетів необхідної якості, і зокрема сушенки, для умов заводу “Сойне” визначені режимні параметри роботи технологічного обладнання в залежності від якості сировини, що зазначені в режимній карті. Режимна карта являє собою таблицю, в якій наведено параметри сушіння: тиск і температура пари, частота обертання живильника і сушарки, витрата повітря, орієнтовна продуктивність сушарок по брикету, дано показники сировини: вологість і насипна щільність. Недоліком режимної карти сушіння торфу торфобрикетного заводу “Сойне” є те, що основним критерієм підбору параметрів сушіння є досягнення необхідної якості сушенки, але вона не враховує енергоефективність та продуктивність процесу. Саме для його усунення необхідно проводити додаткові виробничі експерименти.

Інформація про сировину, що надходить на сушіння, готується заздалегідь, до надходження вагонів у бункерну сировини. Для цього зі складу вагонів (10 і більше) відбираються проби, і визначається вологість торфу в кожному вагоні, а потім середні показники по складу – вологості і насипної щільності. Варіація вологості за складом не повинна перевищувати $\pm 3\%$. У разі правильної організації роботи живильників бункерної сировини і підготовчого відділення це коливання стає значно менших. Середні дані сировини за складом є основою для роботи по режимній карті. Інформація залишається дійсною до тих пір, поки не буде відпрацьований весь торф з даного складу вагону. За даними вологості і насипної щільності сировини з урахуванням орієнтовної продуктивності пресового відділення (за числом справних каналів) оператор підбирає необхідний режим сушіння. Режимна карта надає інформацію оператору, який діапазон керуючих впливів повинен бути при певному діапазоні значень вологості та насипної щільності сировини для того, щоб якість сушенки відповідала регламентованим нормам.

Значення X_4 (витрата повітря через сушарку) на торфобрикетному заводі «Сойне» практично не регулюється (хоча існує можливість, оскільки встановлено регульований електричний привід вентилятора). Саме тому значення даного параметру не відображається в існуючих на заводі режимних картах. Діапазон, в якому співробітники можуть, згідно з «Інструкціями з експлуатації парових трубчастих сушарок», якщо це необхідно, змінювати швидкість димососа, становить від 1370 до 1400 *об/хв*.

Чим більше потрібно випарувати вологи з одиниці маси сировини, тим більшим має бути співвідношення тиску (температури) пари і частоти обертання. Збільшення вологості сировини викликає необхідність підвищення тиску і (або) температури пари в сушарці або зниження частоти обертання двигунів живильника і (або) сушарки та (або), в рідкісних випадках, зниження витрати повітря. Ось чому параметр X_3 (температура пари) повинен мати ефект взаємодії з параметром X_2 (швидкість обертання барабана сушарки). Якщо подача торфу в сушарці, збільшується, при сталому значенні температурою теплоносія слід збільшити час перебування торфу в сушарці, а при сталому часу сушіння – підвищити температуру теплоносія. Тобто, якщо якість вологого торфу за всіма показниками за певний період не змінюється, а обладнання налаштоване на показники керуючих впливів, що дозволяють отримати сушенку необхідної якості, то у випадку, наприклад, підвищення X_1 (швидкість обертання шнека) необхідно компенсувати вплив зміни цього фактору підвищенням надходження теплоти в сушарку (збільшення показника X_3) або зменшенням значення параметру X_2 і навпаки. Компенсувати збільшення параметру X_2 за умови роботи сушарної установки при незмінних значеннях збурюючих впливів можна окрім зменшення керуючого впливу X_1 також зменшенням значенням впливу X_3 .

Наведене твердження щодо алгоритму зміни керуючих чинників застосуємо і в плануванні експерименту. План проведення експериментів представлений в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – План проведення активних виробничих експериментів на енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою торфу

№	X_1	X_2	X_3
1	0	0	0
2	+1	0	+1
3	+1	-1	0
4	-1	0	-1
5	-1	+1	0
6	0	+1	-1
7	0	-1	+1

В табл. 2.3 значення експерименту (-1) – позначає мінімальний, (1) – максимальний, 0 – середній рівень встановлення керуючого параметра при деяких значеннях збурюючих впливів в межах значень визначених за режимною картою.

На торфобрикетному заводі було проведено дві серії промислових експериментів згідно з наведеним планом активних експериментів процесу сушіння в парових трубчастих сушарках торфу.

Отже, було розроблено план активних виробничих експериментів для дослідження характеру взаємозв'язку параметрів енерготехнологічного процесу сушіння торфу, що включає в себе 7 експериментів при різних значеннях керуючих впливів.

2.3 Проведення активних виробничих експериментів на сушарці Цемаг. Статистичний аналіз результатів дослідження

Визначення параметрів та факторів процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці здійснювався за допомогою контрольно-вимірювальних приладів та методик визначення фізико-механічних властивостей торфу.

Проба сушенки відбирається в такому місці, щоб до неї потрапили великі і дрібні фракції, що осідають в циклонах. Під час досліду записуються

показники приладів, і одночасно відбираються проби сировини і сушенки. Після приготування проби визначається її вологість.

Насипна щільність підготовленого торффу визначалася за допомогою приладу ваги-пурка.

Фракційний склад торффу досліджувався за допомогою набору сит з отворами 10; 7; 5; 3; 2; 1; 0,5 і 0,25 мм.

Проба розсіювалась на протязі 10 хв за допомогою сит. За результатами визначення фракційного складу обчислювався приведений діаметр d_n частинок, якими оцінювалася середня крупність торффу,

$$d_n = \frac{\sum p_i d_i}{100}, \quad (2.3)$$

де d_i – середній розмір фракцій по верхньому і нижньому сити, мм;

p_i – вихід фракцій, %;

Під час дослідження вологорізниці сушенки використовувався метод, викладений в роботі [92]. Якщо вихід однієї з фракцій з екстремальною вологістю $p \leq 1,5\%$, то ця фракція складається з наступної або попередньої. У цьому випадку

$$w_{\max(\min)} = \frac{p_1 w_1 + p_2 w_2}{p_1 + p_2} \quad (2.4)$$

Цей метод не враховує внесок інших класів крупності у формуванні міцності брикетів, не враховується також значимість (вагу) фракцій з екстремальною вологістю у створенні міцної структури брикетів. Очевидно, що правильніше було б оцінювати вологорізницю відношенням середньоквадратичного відхилення від середньої вологості фракції до середньоквадратичного відхилення виходу:

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_p} = \frac{\sqrt{(w_i - \bar{w})^2 / N}}{\sqrt{(p_i - \bar{p})^2 / N}} \quad (2.5)$$

Зазвичай вихід фракцій з максимальною вологістю не більше 5%, а дрібних фракція з мінімальною вологістю – приблизно 30%. Природно що така нерівномірність виходу повинна впливати на міцність брикетів і на оцінку вологорізниці. Запропоноване відношення середньоквадратичних відхилень це враховує – воно зростає із збільшенням вологорізниці і рівномірних виходів класів крупності.

Сипучі властивості характеризуються кутами обрушення і природного скосу. Так як діапазон зміни кута обрушення більший ніж кут природного скосу, то для зменшення кількості факторів експерименту будемо досліджувати лише кут обрушення як властивість сипучості торфу. Чим вищий кут обрушення, тим меншою сипучістю володіє матеріал [105].

Під зольністю торфу розуміється вираз у відсотках відносної маси золи, отриманої в результаті згоряння торфу до первісної маси [97, 105]. Вимірювання проводяться в лабораторії торфобрикетного заводу згідно ГОСТ 11306-83.

Реєстрація всіх температур сировини і сушенки проводилася за показами встановлених на сушарці термометрів опору.

Фізичний процес електроспоживання є безперервною функцією часу. Вимірювання та подальше оброблення інформації щодо електроспоживання здійснювалася за допомогою цифрових технічних засобів.

Період, протягом якого потрібно контролювати затрати електричної енергії, доцільніше визначити з аналізу технології процесу виробництва торфобрикетів. Фрезерний торф доставляється на завод вузькоколійкою в саморозвантажувальних вагонах типу ТСЗ-6А. Згідно з нормативних даних вантажопідйомність вагонеток становить 19 т. Необхідна кількість фрезерного торфу згідно нормативних даних (сировини і палива за умови 40% вологості торфу) – 28,8 т/год. Тобто в середньому в годину на торфобрикетному заводі завантажується 1,5 вагонетки (одна вагонетка кожні 40 хвилин). Отже, здійснювати всі вимірювання досить зручно за період, який відповідає часу сушіння торфу в кількості, що надходить від однієї вагонетки. В ході

проведення експерименту, між завантаженнями вагонів в бункери потрібно робити паузу на час, необхідний для знімання показників лічильника електричної енергії. Окрім цього визначався час за який відбувалось сушіння одного вагона торфу. За показниками лічильника та часу сушіння було визначено споживання електричної енергії, кВт·год.

На торфобрикетному заводі відсутня контрольно-регулююча апаратура з фіксацією значень витрат пари на сушарну установку. Тому при розрахунку затрат теплової енергії необхідно використати рівняння теплового та масового балансу процесу сушіння. Задача в цьому випадку складається в розрахунку необхідної кількості теплової енергії для якісного сушіння торфу певної фізико-механічної властивості та кількості.

Кількість теплової енергії, що затрачається на сушіння торфу визначалась аналітичним способом визначенням питомих витрат теплоти.

Питомі витрати теплоти в розрахунку на 1 кг вологи, яка видалена з матеріалу, у дійсній сушарці складають:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \quad (2.6)$$

де q_1 – питомі витрати теплоти на випаровування вологи із матеріалу, *кДж/кг випар. вологи*;

q_2 – питомі витрати теплоти на підігрів сушенки, *кДж/кг випар. вологи*;

q_3 – питомі витрати теплоти на підігрів сушильного агента, *кДж/кг випар. вологи*;

q_4 – питомі витрати теплоти на підігрів транспортних пристроїв, *кДж/кг випар. вологи*;

q_5 – питомі витрати теплоти на покриття втрат у довкілля, *кДж/кг випар. вологи*.

Питомі витрати теплоти на випаровування вологи із матеріалу [12]:

$$q_1 = i_n'' - \mathcal{Q}_1 \text{ кДж/кг випаровуваної вологи}, \quad (2.7)$$

де $i_n'' = 4,19 \cdot (595 + 0,47 \cdot t_2)$ – ентальпія пари при параметрах сушильного агента, який виходить з сушарки; t_2 – температура сушильного агента,

який виходить з сушарки; ϑ_1 – температура торфу (і наявної в ньому води).

Питомі витрати теплоти на підігрів сушильного агенту від вихідної температури t_0 до кінцевої t_2 :

$$q_2 = l c_{\text{суш}} (t_2 - t_0), \text{ кДж/кг випаровуваної вологи}, \quad (2.8)$$

де $c_{\text{суш}}$ – питома теплоємність сушильного агента;

l – питомі витрати сухого повітря, необхідного для випаровування 1 кг вологи, що визначається відношенням маси сухого повітря, який витрачається в сушильному процесі протягом години (L) на масу вологи, що випаровується (W).

Питомі витрати теплоти на підігрів торфу:

$$q_3 = \frac{M_2}{W} c_m (\vartheta_2 - \vartheta_1), \text{ кДж/кг випаровуваної вологи}, \quad (2.9)$$

де M_2 – маса торфу, що виходить з сушарки протягом 1 години;

W – годинна продуктивність сушарки по випаровуваній волозі, *кг/кг випар. вологи*;

$$c_m = (B - KA^c) \cdot \frac{100 - w_1}{100} + 4,19 \frac{w_1}{100} - \text{питома теплоємність торфу};$$

де B та K – коефіцієнти, значення яких залежність від типу торфу; A^c зольність торфу.

Питомі витрати теплоти на покриття втрат у доквілля зумовлені тепловипромінюванням поверхні сушарки. Для спрощення розрахунків значення q_5 визначають за спрощеною формулою:

$$q_5 = 0,21 \cdot (q_1 + q_3), \text{ кДж/кг випаровуваної вологи}. \quad (2.10)$$

В сушарках, які застосовуються на торфобрикетних заводах, підігрів сушильного агента відсутній (йдеться про підведення теплоти безпосередньо в сушарку). Певна кількість теплоти потрапляє до сушарки разом з торфом, що подається на сушіння і має позитивну температуру. Втратами теплоти на

нагрівання транспортуючих пристроїв можна знехтувати, оскільки вони є несуттєвими. Тоді за формулою (1.4) визначаємо необхідну кількість теплоти.

Підсумовуючи вищенаведену методику визначення аналітичним способом кількості теплоти, необхідної для сушіння торфу певної кількості та певних фізико-механічних властивостей, можна зробити висновок, що для визначення цього параметру необхідні наступні дані: за збурюючими впливами – це температура сушильного агента на вході (повітря) F_5 , температура торфу F_4 , зольність торфу F_3 , вологість торфу F_1 ; за керуючими впливами – витрата повітря (продуктивність димососа) X_4 ; за вихідними параметрами – вологість сушенки Y_1 , температура сушенки Y_3 та температура сушильного агента на виході із сушарки (димових газів) Y_5 , а також даним щодо маси торфу, який подається на вхід сушарки за 1 год (визначається із підрахунку кількості вагонеток торфу направлених на процес сушіння торфу в сушарці) та маси сушенки на виході із сушарки (визначається із матеріального балансу (1.1)). Узагальнений перелік параметрів енерготехнологічного процесу сушіння торфу з місцями визначення їх значень наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Місця проведення виміру параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу на заводі «Сойне»

Місце		Показники	Символ	одиниця виміру
в лабораторії	торф з вагонетки	вологість торфу	F_1	%
		насипна щільність торфу	F_2	кг/м ³
		зольність торфу	F_3	%
		сипучість торфу	F_6	град
	сушенка з транспортеру	вологість сушенки	Y_1	%
		вологорізниця сушенки	Y_2	%
		вологорізниця торфу	F_8	%

Продовження таблиці 2.4

в операторській (показники приборів)	електроспоживання	Y_4	кВт·год
	температура відходящих газів	Y_5	°С
	частота обертання барабана сушарки	X_2	об/хв
	частота обертання шнека	X_1	об/хв
	витрата сушильного агента	X_4	м ³ /год
	температура пари	X_3	°С
	температура сушильного агента на виході із сушарки (димових газів)	Y_5	°С
	температура повітря	F_5	°С
вивантаження торфу з вагонеток на конвеєри	кількість вагонеток, поданих на сушіння за 1 год	N	шт/год
	температура торфу	F_4	°С
на виході з сушарки на транспортері	температура сушенки	Y_3	°С

Експерименти були проведені на торфобрикетному заводі в період з травня по червень місяць 2013 року. Результати наведено в додатках Б.

Отримані під час проведення активних виробничих експериментів дані є основою для розробки математичних моделей енерго-економічних показників, що описують технологію сушіння торфу. Розробка методу багатомірної оптимізації на основі математичного моделювання цього енерготехнологічного процесу дозволить здійснити пошук енергозберігаючих режимів сушіння залежно від величини збурюючих дій.

Статистичне оброблення результатів активних виробничих експериментів проводилось за допомогою пакету програм "Statistica" з метою визначення показників, що характеризують надійність, достовірність і точність їх результатів [106]. Початкове оброблення експериментальних даних вибірки полягала у визначенні статистичних характеристик [107]: вибіркового середнього \bar{X} (2.11), середнього геометричного $\bar{X}_{ГЕОМ}$ (2.12), вибіркової дисперсії S^2 (2.13), середнього квадратичного відхилення S (2.14), коефіцієнта

варіації V (2.15), помилки середнього σ (2.16), коефіцієнти асиметрії γ_1 (2.17) та ексцесу γ_2 (2.18), медіани \tilde{x} (2.19), за наступними формулами:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n X_r, \quad (2.11)$$

де n – кількість вибірок;

$$\bar{X}_{GEOM} = \sqrt[n]{\prod_{r=1}^n X_r}; \quad (2.12)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (X_r - \bar{X})^2; \quad (2.13)$$

$$S = \sqrt{S^2}; \quad (2.14)$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (2.15)$$

$$V = \frac{S \cdot 100\%}{\bar{X}}; \quad (2.16)$$

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad (2.17)$$

де μ_3 – центральний момент третього порядку, σ^2 – дисперсія;

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (2.18)$$

де μ_4 – центральний момент четвертого порядку;

$$\tilde{x} = \frac{(x_k + x_{k+1})}{2}. \quad (2.19)$$

Результати статистичної обробки значень керуючих параметрів X_i збурюючих впливів F_e і вихідних цільових функцій Y_j технологічного процесу сушіння торфу представлені в додатку В.

Коливання коефіцієнта варіації збурюючих впливів (понад 35 %) свідчать про їх значну зміну, що вказує на необхідність компенсації їх впливу в системах регулювання паровими трубчастими сушарками [108]. Як видно з додатку Г, коефіцієнт варіації V має найбільше значення для параметрів F_8 та Y_2 , що зумовлено, насамперед, нерівномірним розподілом частинок торфу в трубках сушарки та F_3 як параметр, що змінюється в широких межах. Якщо

ексцес деякого розподілу відмінний від нуля, то крива щільності цього розподілу відрізняється від кривої щільності нормального розподілу: якщо ексцес додатний, то крива теоретично має вищу та «гострішу» вершину ніж крива нормального; якщо ексцес від'ємний, то крива теоретично має нижчу та «плоскішу» вершину ніж крива нормального. З проведених дослідів можна зробити висновок, що ексцес по всім параметрам не рівний нулю, що вказує на значну зміну перш за все фізико-механічних властивостей торфу, що надходять з різних вагонів з торфом.

Для оцінки взаємозв'язку вхідних і вихідних показників сушіння торфу в парових трубчатих сушарках використовувався метод кореляційного аналізу [109]. Чисельні значення коефіцієнтів кореляції показують наявність або відсутність зв'язків між параметрами сушіння. Вибірковий коефіцієнт кореляції, за даними експерименту, розраховувався по формулі:

$$k_{кор} = \frac{N \sum_{i=1}^N m_i n_i - (\sum_{i=1}^N m_i)(\sum_{i=1}^N n_i)}{\sqrt{[N \sum_{i=1}^N m_i^2 - (\sum_{i=1}^N m_i)^2][N \sum_{i=1}^N n_i^2 - (\sum_{i=1}^N n_i)^2]}}, \quad (2.20)$$

де N – число дослідів у експерименті; m_i та n_i – показники процесу сушіння торфу між якими потрібно визначити наявність статистичного зв'язку.

Коефіцієнти кореляції лежать в межах $-1 < k_{кор} < +1$ і характеризують залежність між показниками процесу. Якщо $k_{кор}$ позитивний, то можна припускати, що із зростанням одного з показників інший теж зростає.

Якщо $k_{кор}$ негативний, то із зростанням одного показника інший буде зменшуватись. Чим ближче величина коефіцієнта кореляції $k_{кор}$ до $(+1)$ або до (-1) , тим більше міра залежності між показниками. Значення $k_{кор} = 0$ свідчить про відсутність тісного статистичного взаємозв'язку між показниками [109].

Для наведеної математичної моделі сушарки торфу найбільш суттєвим є аналіз зв'язків між вхідними та вихідними параметрами, що дозволяють сформулювати характер технологічного процесу.

Аналіз результатів кореляційної залежності між вхідними параметрами процесу сушіння торфу і вихідними цільовими функціями (додаток Г) дозволили зробити наступні висновки:

1. Між частотою обертання барабана сушарки, завантаженням сушарки торфом та кінцевою вологою торфу існує прямий зв'язок. Це означає, що зі збільшенням частоти обертання барабана сушарки та (або) завантаженням сушарки кінцева вологість торфу також збільшується.

2. Вологорізниця сушенки Y_2 збільшується на незначну величину із збільшенням будь-якого із вхідних параметрів, окрім впливу F_2 . Кореляція з цим впливом даного вихідного параметра від'ємна. З керуючими впливами цей показник теж не має значного зв'язку, найбільший – 0,35 з параметром X_1 .

3. Температура сушенки Y_3 знижується при збільшенні частоти обертання барабана сушарки X_2 , збільшенні завантаження сушарки торфом X_1 і витрати повітря через сушарку X_5 та зростає при збільшенні температури пари X_3 .

4. Між температурою відходящих газів Y_5 існує тісний прямий зв'язок з температурою пари X_3 , рівний 0,9.

5. Найбільший вплив серед збурюючих впливів на показники електро- і теплоспоживання має вологість торфу – 0,61 та 0,42 відповідно. Керуючі впливи X_1 , X_2 , X_4 мають більший вплив на показники електроспоживання (коефіцієнти кореляції – 0,64; 0,82 та 0,5 відповідно) ніж теплоспоживання (0,51; 0,32; 0,37). Параметр теплоспоживання Y_8 серед керуючих впливів має найбільшу кореляцію з температурою пари (коефіцієнти кореляції – 0,71).

Отже, було сформовано процедуру здійснення виміру керуючих та збурюючих впливів та вихідних параметрів енерготехнологічного процесу сушіння, що включає розроблений план активного виробничого експерименту. За даними результатів активного виробничого експерименту був проведений кореляційний аналіз результатів експерименту що вказав на те, що цільові функції моделі сушіння мають не однакою кореляцію із збурюючими впливами енерготехнологічного процесу сушіння.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Проведений аналіз технологічних, фізико-механічних, конструктивних факторів та енерго-економічних показників дозволив виділити вхідні керуючі параметри – завантаження сушарки торфом, частота обертання барабана сушарки, температура пари, витрата повітря через сушарку, вхідні некеруючі параметри – вологість, насипна щільність, зольність, температура, фракційний склад, сипучість, вологорізниця торфу, температура повітря та вихідні енерго-економічні показники процесу сушіння до яких відносяться вологість, вологорізниця, температура сушенки, теплоспоживання, температура відходящих газів, електроспоживання та теплоспоживання процесу сушіння. Визначення коефіцієнтів ваги вхідних і вихідних параметрів технології на основі методу експертних оцінок дало можливість розрахувати міру значущості параметрів та виключити змінні, що мають незначний вплив на процес.

2. Розроблено план активних виробничих експериментів за методом Хартлі, що дає можливість обмежитися найменшою достатньою кількістю експериментів (7), що дозволило ефективно провести виробничі експерименти з мінімальним втручанням в роботу торфобрикетного заводу.

3. Визначено характер впливу вхідних керованих і некерованих параметрів на енерго-економічні показники за допомогою статистичного та кореляційного аналізу активних експериментів, що дозволило виявити основні закономірності зміни вихідних параметрів процесу сушіння у залежності від збурюючих та керуючих впливів. Встановлено, що найбільший вплив на показники електроспоживання має завантаженість сушарки торфом з коефіцієнтом кореляції – 0,64; швидкість обертання сушарки – 0,82; витрата повітря – 0,5; вологістю торфу – 0,61; на показники теплоспоживання має вплив температура пари, де коефіцієнт кореляції – 0,71 та завантаженість сушарки торфом – 0,51.

Основні положення даного розділу опубліковані автором дисертаційної роботи в [13, 14, 16, 17].

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТОРФУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПИТОМОГО СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ

3.1 Розробка математичних моделей енерготехнологічного процесу сушіння торфу за допомогою МГУА

Після проведення експериментальних досліджень процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках, статичного та кореляційного аналізу отриманих досліdnих даних, що дозволило виявити характер залежностей між вхідними та вихідними параметрами, потрібно здійснити відбір значущих ознак та побудувати адекватну математичну модель.

Нехай X – простір об'єктів; Y – множина відповідей; $y^* : X \rightarrow Y$ – цільова залежність, значення якої відомі тільки на об'єктах навчальної вибірки $X^l = (x_i, y_i)_{i=1}^l$, $y_i = y^*(x_i)$. Потрібно побудувати алгоритм $a : X \rightarrow Y$, апроксимуючий цільову залежність y^* на всій множині X .

Тобто для енерготехнологічного процесу сушіння торфу необхідно визначити взаємозв'язки вихідних параметрів Y_j від вхідних збудуючих та керуючих впливів та отримати модель типу:

$$Y_j^m = \sum_{k=1}^N \beta_{jk} \phi_k(X_1, \dots, X_4; F_1, \dots, F_8), \quad (3.1)$$

де β_{jk} – невідома константа, коли $\phi_k(\cdot)$ є визначений набір базових функцій, $N=12$; при $k \in \{1, \dots, 4\}$: $\phi_k = X_k$; коли $k \in \{5, \dots, 12\}$: $\phi_k = F_k$.

Завдання вибору методу навчання моделі полягає в тому, щоб у заданій множині методів навчання M знайти такий, що видає алгоритми з найкращою спроможністю відновлення, тобто вибрати адекватну структуру моделі. Методом навчання називається відображення $\mu : X^l \rightarrow a$, яке довільній навчальній вибірці X^l ставить у відповідність деякий алгоритм $a : X \rightarrow Y$ із

заданої моделі алгоритмів А.

Доцільність вибору МГУА або еволюційного моделювання для відбору ознак та побудови математичної моделі обґрунтовано в розділі 1 даної дисертаційної роботи.

Алгоритми МГУА розрізняються, головним чином, за способом генерування безлічі моделей-кандидатів, які підлягають перебору за заданим зовнішнім критерієм. Вибір алгоритму залежить від проблеми, що вирішується, дисперсії рівня перешкод та достатності вибірки даних. Робота алгоритмів МГУА має пряму аналогію з роботою садівника під час селекції нової рослини [87].

Серед параметричних алгоритмів найбільш відомими є комбінаторний (COMBI) алгоритм і багатосаровий ітераційний алгоритм (БІА) [71]. Всі алгоритми є багаторядними. Кожен ряд пов'язаний з одним рівнем складності моделі. Ці алгоритми відрізняються умовами формування та відбору змінних при переході від одного ряду до іншого.

Кожен алгоритм має параметри налаштування, що задаються користувачем серед яких число кращих моделей кожного ряду.

Комбінаторний (COMBI) алгоритм – це найпростіший з базових алгоритмів МГУА, що може бути застосовуватися для контролю процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

Ідея алгоритму: не пропустити жодної із можливих моделей.

Тому, на кожному рівні складності:

- розглядаються всі моделі;
- не проводиться селекція кращих комбінацій змінних.

Основний комбінаторний алгоритм МГУА має багаторядну ітераційну структуру. Його особливість полягає в тому, що правило ітерації не залишається постійним, а розширюється з кожним новим рядом (рис. 3.1).

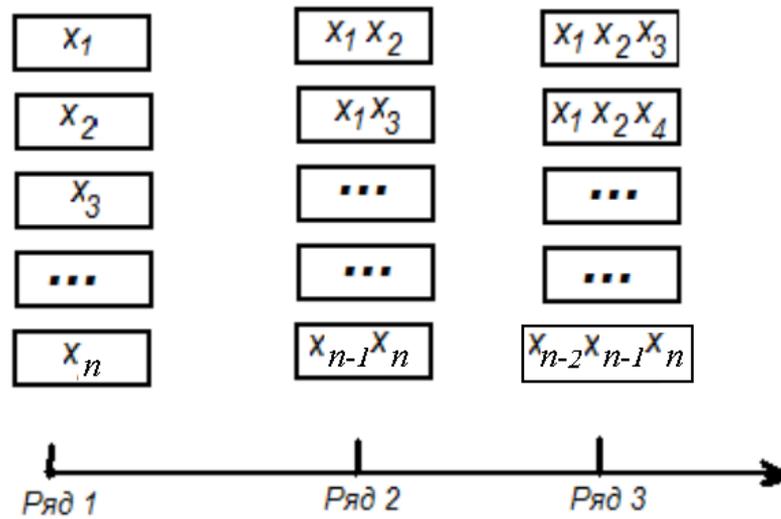


Рисунок 3.1 – Графічна ілюстрація комбінаторного алгоритму

На першому ряді перебору підлягають всі моделі найпростішої структури, і вибирається деяка кількість F кращих за вибраними критеріями моделей.

$$y = a_0 + a_1 x_i, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (3.2)$$

де M – кількість змінних, що входять в модель процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці, x – вхідні збудуючі та керуючі впливи процесу

На другому ряді перебираються моделі більш складної структури, побудовані для вихідних змінних кращих моделей першого ряду:

$$y = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j, \quad i = 1, 2, \dots, F; \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad F \leq M \quad (3.3)$$

На третьому ряді перебору підлягають ще складніші структури виду:

$$y = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_k \quad i = 1, 2, \dots, F; \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (3.4)$$

і так далі. Нарощування рядів продовжується до того часу, поки знижується значення мінімуму критерію. При великих значеннях "свободи вибору" $F=M$, алгоритм забезпечує повний перебір всіх моделей процесу сушіння поліноміальною виду [110].

Багаторядний ітеративний алгоритм (БІА) – це історично перший з алгоритмів МГУА.

Основні ідеї БІА [111]:

- зменшити кількість моделей, що розглядаються на кожному ряді;
- зменшити кількість рядів, і, тим самим пришвидшити вихід на оптимальний рівень складності.

Тому, для кожного ряду:

- відбирається фіксоване число кращих моделей (кожна модель розглядається, як змінна);
- кожна пара кращих змінних породжує нову змінну при переході на наступний рівень.

У багаторядному алгоритмі, правило ітерації (частковий опис) залишається для всіх рядів одним і тим же. На першому ряду використовувався частковий опис виду:

$$y = a_0 + a_1x_i + a_2x_j + a_3x_ix_j \quad (3.5)$$

на другому рядуі:

$$z = b_0 + b_1y_i + b_2y_j + b_3y_iy_j \quad (3.6)$$

на третьому рядуі:

$$w = c_0 + c_1z_i + c_2z_j + c_3z_iz_j \quad (3.7)$$

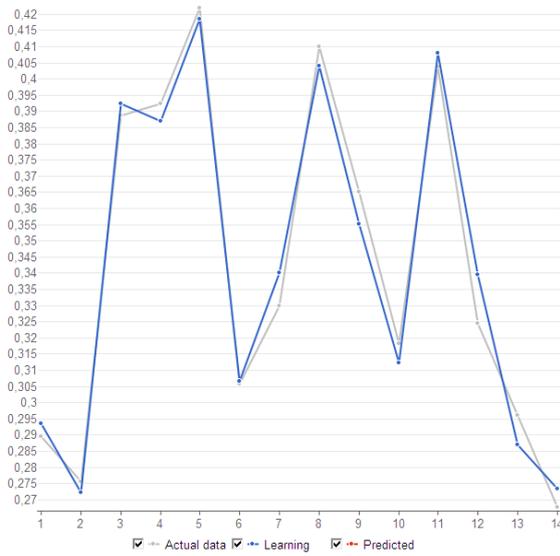
і так далі, тобто на кожному наступному рядуі аргументами служать вихідні величини попереднього рядуу.

Результати моделювання процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках комбінаторним та БіА алгоритмами представлені графіком моделей цільових функцій електроспоживання та теплоспоживання (рис. 3.2, 3.3), а також таблицею відхилень значень отриманих моделей від дійсних значень (табл.3.1). Графіки цільових функцій Y_1, Y_2, Y_3, Y_5 представлені в додатку Д.

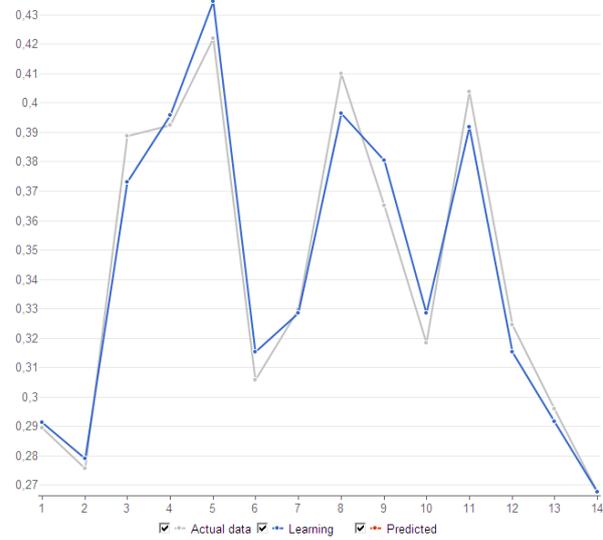
Параметри БіА моделей:

- кількість рядів – 13 (кількість рядів відповідає кількості факторів моделі);
- кількість одиниць сполучень в рядуі – 3;

- максимальна кількість з'єднань для утворення одиниці сполучення в ряді – 10.

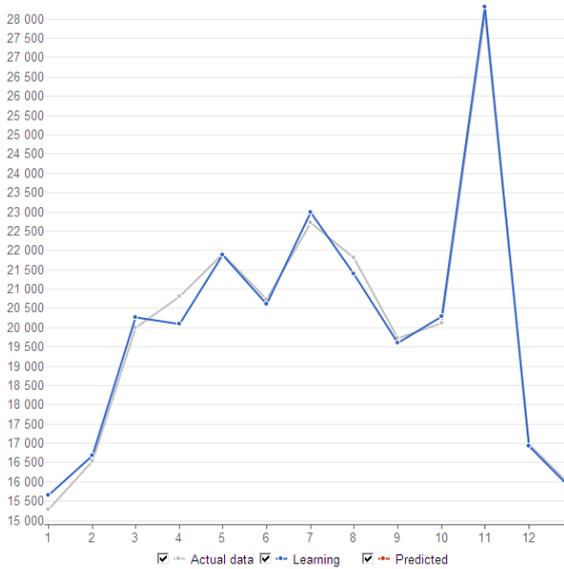


а)

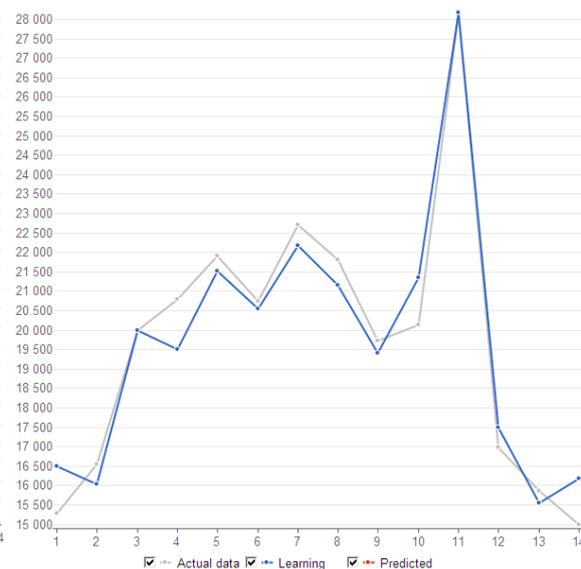


б)

Рисунок 3.2 а) Графік порівняльного аналізу фактичних та математичних розрахунків моделі для цільової функції електроспоживання (Y_4) отриманої алгоритмом БІА МГУА та б) параметричним алгоритмом



а)



б)

Рисунок 3.3 а) Графік порівняльного аналізу фактичних та математичних розрахунків моделі для цільової функції теплоспоживання (Y_8) отриманої алгоритмом БІА МГУА та б) параметричним алгоритмом

Таблиця 3.1 – Значення середньоквадратичної похибки моделей цільових функцій (RMS)

Алгоритм навчання	Цільова функція					
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_8
COMBI	0,053298	0,057419	0,057419	0,054312	0,038591	0,065312
БІА	0,013399	0,019476	0,044706	0,043124	0,036048	0,048965

За результатами моделювання можна зробити наступні висновки:

1) Моделі енерготехнологічного процесу сушіння, побудовані за допомогою МГУА з комбінаторним алгоритмом, мають значно більшу середньоквадратичну похибку ніж МГУА з БІА алгоритмом, а отримання моделі вимагає більшої витрати часу, оскільки на кожному етапі вибирається деяка кількість кращих за вибраними критеріями моделей;

2) COMBI моделі МГУА мають меншу розмірність, є більш простими та зручними для виконання наступних оптимізаційних алгоритмів у порівнянні з БІА алгоритмом, а цільові функції БІА моделей включають всі вхідні фактори, що утруднює в подальшому отримання оптимізаційної моделі та не вирішує в повній мірі “проблему відбору ознак”, оскільки кожен фактор має свою власну вимірювальну похибку.

Як показали результати моделювання комбінаторним та БІА алгоритмом методу групового урахування аргументів, досить важко створити адекватну модель складного об'єкту з використанням тільки одного методу індуктивного моделювання. З метою підвищення точності і розширення горизонтів застосування індуктивного моделювання багатьма фахівцями були досліджені основні аспекти МГУА і запропоновані та розроблені на їх основі гібридні алгоритми, методи і технології евристичної самоорганізації, методи багаторівневого моделювання тощо [72, 83, 112].

Одним із таких методів є метод гібридних самоорганізованих нейронних мереж еволюційного типу під назвою GAME (Group of adaptive model

evolution – еволюція груп адаптивних моделей), що побудований на основі МГУА.

3.2 Розробка математичних моделей енерготехнологічного процесу сушіння торфу із застосуванням методу еволюції груп адаптивних моделей

GAME метод генерує групу індуктивних моделей в залежності від характеру набору даних і від їх складності. Індуктивна модель збільшується на величину необхідну для вирішення проблеми з достатньою точністю. Вона складається з одиниць (нейронів), що були найбільш успішними в моделюванні взаємозв'язків набору даних. Метод працює як з безперервними, так і дискретними змінним. Топологія GAME моделі адаптується до природи набору даних, що вимагається. Окрім цього, мережа GAME має високу стійкість до невідповідних і зайвих ознак, підходить для коротких і зашумлених наборів даних, що особливо актуально для побудови моделей енерготехнологічного комплексу сушіння торфу. Вона має більше ступенів свободи (одиниць з більшою кількістю входів, міжшарових зв'язків тощо) ніж МІА МГУА (рис. 3.4).

Переваги GAME методу над алгоритмом БІА МГУА:

- різноманітність сполучень (гетерогенні сполучення) – ряд має декілька типів сполучень з різноманітними передавальними функціями, що конкурують між собою з метою включення в GAME модель;
- зростаюча складність – зростання кількості з'єднань параметрів, що можуть мати кілька входів;
- міжшарові з'єднання – наступні зв'язки можуть бути утворені з будь-яких попередніх шарів або вхідних параметрів;
- група генеруючих моделей – їх сукупність підвищує точність та дозволяє оцінити правдоподібність вибраної моделі;
- генетичний алгоритм – використання евристичної побудови GAME мереж.

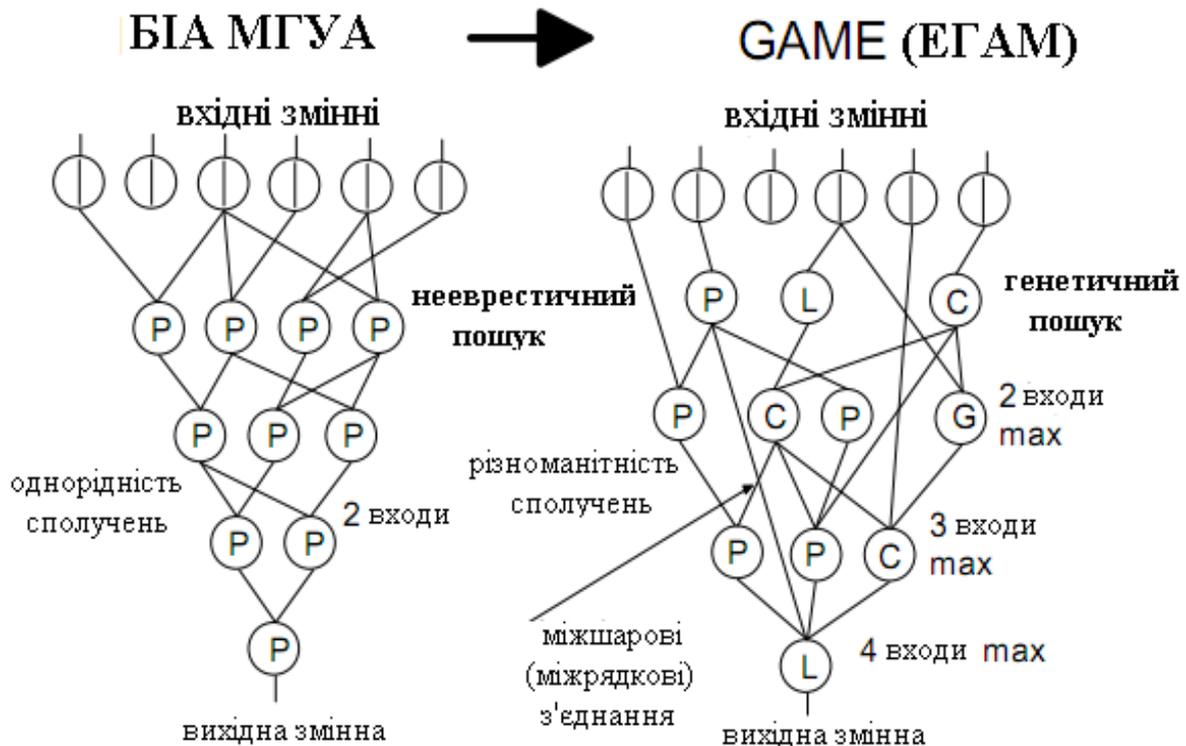


Рисунок 3.4 – Порівняльна схема БІА МГУА та GAME методів побудови математичної моделі, де P – поліноміальна, L – лінійна, C – комбінаційна, G – гаусовська передавальна функція сполучень параметрів моделі [117]

Передавальна функція сполучень параметрів моделі може бути лінійною, поліноміальною, логістичною, експоненціальною, мережею персептрона і т.д. (рис. 3.5). Передавальні функції сполучень параметрів можуть бути об'єднані в одній моделі. Таку модель називають гібридною з гетерогенними сполученнями.

Кожний тип блоку має свій власний алгоритм навчання для оцінки коефіцієнтів (Метод Гауса-Жордана, ітерації Ньютона, SADE генетичний алгоритм [118], алгоритм зворотного поширення і т.ін.). Вибір типу передавальної функції для моделі залежить від характеру даних моделювання.

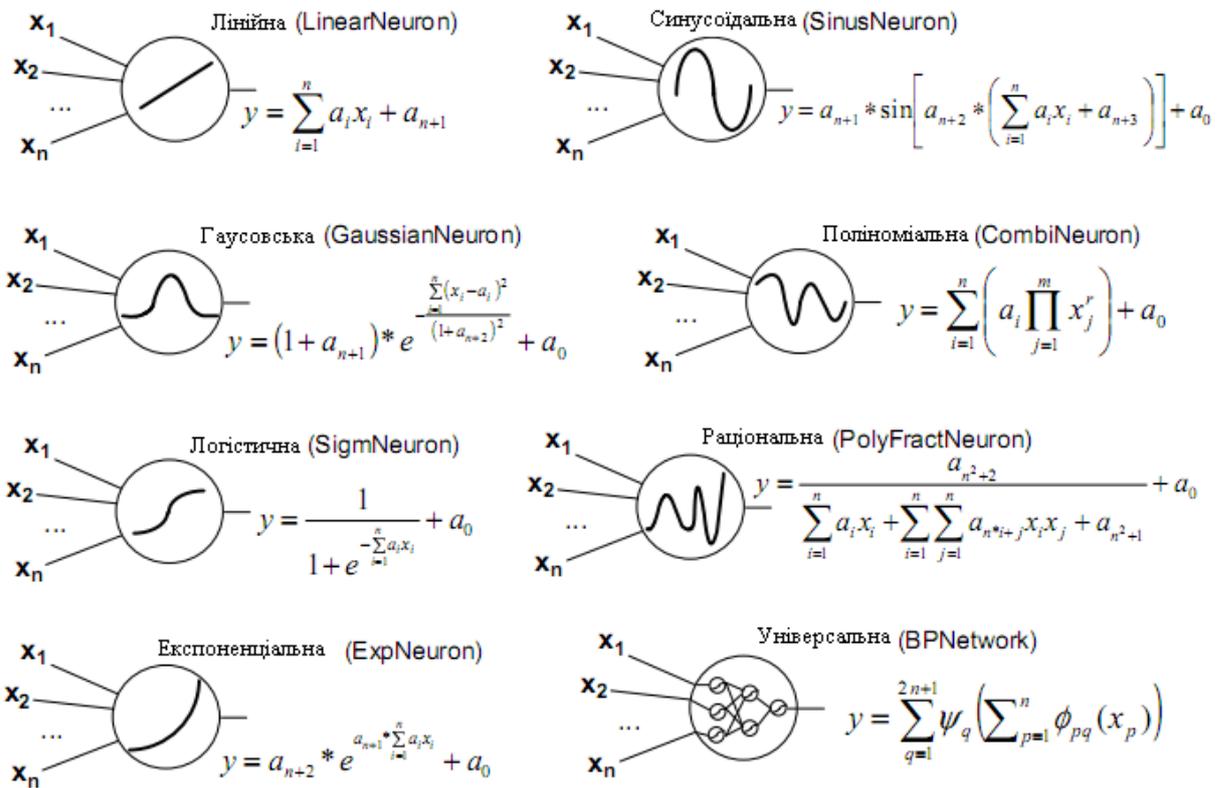


Рисунок 3.5 – Передавальні функції для побудови блоків GAME моделі

Для вирішення оптимізаційної задачі енергоефективності процесу сушіння торфу найкраще підходить модель з використанням лінійної передавальної функції, оскільки вона дозволяє отримати рівняння моделі, що набагато легше дослідити на екстремуми в порівнянні з рівняннями, що були отримані іншими передавальними функціями.

У МГУА методи можуть бути поділені на два типи: параметричні і непараметричні. БіА МГУА, а також GAME належать до параметричного типу. Параметричні моделі містять параметри, що оптимізовані під час етапу навчання (тренування). Оптимальні значення параметрів – це ті параметри, що відповідають мінімальній різниці між поведінкою реальної системи та її моделі. Ця різниця, як правило, визначається середньоквадратичною похибкою.

Похибка моделі процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках на тренувальній вибірці є сума похибок окремих тренувальних векторів [119]

$$E = \sum_{j=0}^m (y_j - d_j)^2, \quad (3.8)$$

де y_j – вихідна модель y -ого вектору навчання і d_j – відповідне цільове вихідне значення системи.

Коефіцієнти сполучень параметрів моделі a_1, a_2, \dots, a_n можуть бути оцінені на стадії навчання за допомогою реалізації будь-якого з методів оптимізації (табл. 3.2). При кожній ітерації, застосовуючи певний метод оптимізації, знаходимо значення коефіцієнтів та розраховуємо похибку моделі на тренувальній вибірці. (рис. 3.6,а). Якщо градієнт похибки може бути обчислений аналітично, то кількість ітерацій буде істотно скорочена, оскільки ми знаємо в якому напрямку коефіцієнти повинні бути скориговані (рис. 3.6,б).

Для побудови успішних моделей, необхідно мати можливість регулювати їх параметри. Мережа GAME використовує методи оптимізації для регулювання ваги і коефіцієнтів параметрів (табл. 3.2).

Не існує методу оптимізації, що найкраще підходить би для вирішення певних задач. Однак є популярні методи, що добре зарекомендували себе при вирішенні великого спектру проблем.

Серед цих широкоживаних методів, можна виділити так звані градієнтні методи – метод квазі-Ньютона, метод спряжених градієнтів і Левенберга-Марквардта. Вони використовують аналітичний градієнт для оцінки похибки поверхні моделей. Такий пошук, як правило, повільніший і має схильність застрягати в локальних мінімумах. Пошук за допомогою методу рою можна представити як рій птахів, що летять над поверхнею похибки в пошуках їжі в глибоких долинах. В даному методі існує також можливість, що для певного типу ландшафту, вони можуть упустити найглибші долини [117].

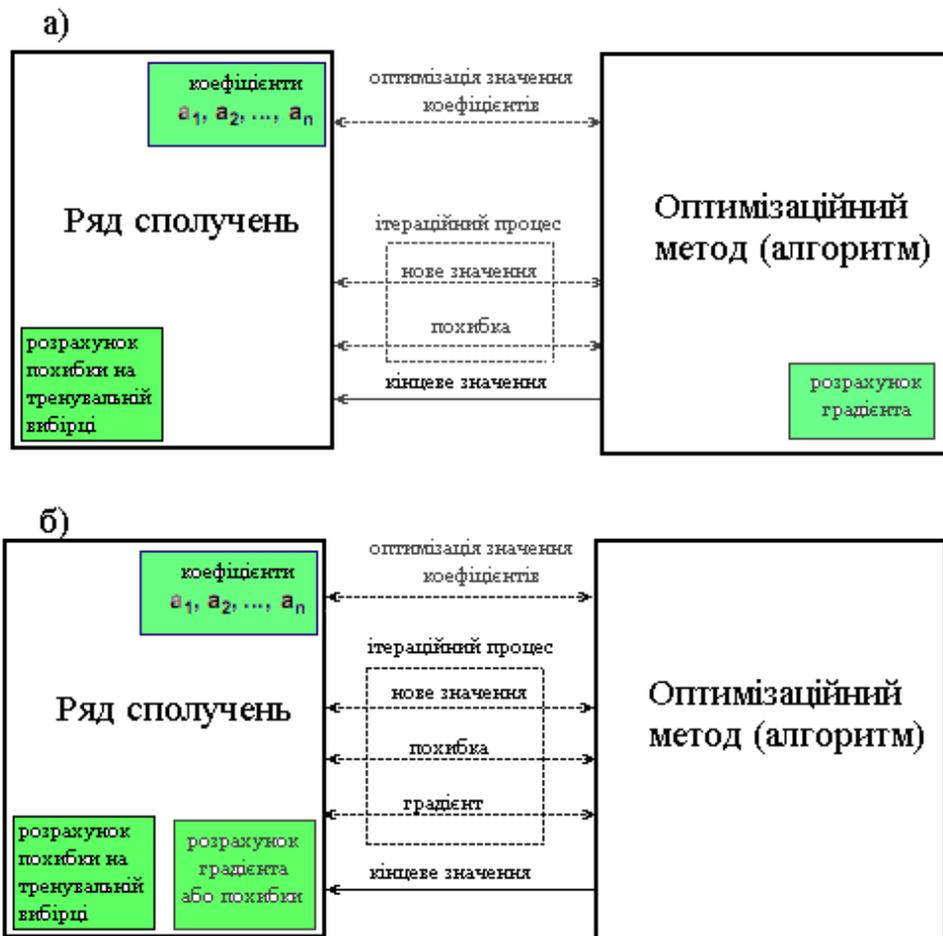


Рисунок 3.6 – Схема знаходження оптимального ряду селекції параметрів моделі процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках а) з розрахунком градієнта похибки застосовуючи певний метод оптимізації та б) без розрахунку градієнта в оптимізаційному методі

Таблиця 3.2 – Найпоширеніші методи навчання, що застосовуються в GAME методі формування математичної моделі [116]

Назва моделі	класу	Абревіатура	Пошук	Алгоритм навчання
UncminTrainer		QN	Гرادієнтний	квазі-Ньютона
SADETrainer		SADE	Генетичний	спрощений атакістичної диференціальної еволюції
PSOTrainer		PSO	Поведінковий	метод рою часток (MPЧ)
HGAPSOTrainer		HGAPSO	Гібридний	гібрид ГА і MPЧ
Differential EvolutionTrainer		DE	Генетичний	диференціальної еволюції

Продовження табл. 3.2

StochasticOSearch Trainer	SOS	Випадковий	стохастичний ортогональний пошук
OrthogonalSearch Trainer	OS	Емпіричний	ортогональний пошук
ConjugateGradient Trainer	CG	Градiєнтний	спряжених градиєнтів
ACOTrainer	ACO	Поведінковий	алгоритм оптимізації колонії мурах
CACOTrainer	CACO	Поведінковий	алгоритм безперервної оптимізації колонії мурах

Кожен набір даних має різні складнощі. Поверхня моделі залежить від набору даних, передавальної функції оптимізованого ряду, а також від попередніх рядів у мережі. Саме тому не існує універсального методу оптимізації, що був би оптимальним на кожному наборі даних.

У GAME методі кожен ряд має різні поверхні похибки навіть в межах однієї мережі та може використовувати довільний алгоритм навчання для оцінки його коефіцієнтів (квазі-Ньютона, спряжених градиєнтів, метод диференційної Еволюції, SADE генетичний алгоритм, рою частинок, алгоритм зворотного поширення та ін).

Знаходження оптимальних значень ваги і коефіцієнтів вирішує наступну задачу нелінійного програмування:

$$\min f(\vec{x}), \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \quad (3.9)$$

де $f(\vec{x})$ – диференціюється функція вектора (ваги або коефіцієнтів), визначених у \mathbb{R}^n . При початковому значенні змінної x_0 послідовність елементів має вигляд

$$\begin{aligned} \vec{x}_{k+1} &= \vec{x}_k + a_k \vec{d}_k \\ \vec{x}_{k+1} &= \vec{x}_k + a_k \vec{d}_k, \end{aligned} \quad (3.10)$$

де a_k – довжина кроку.

У випадку побудови математичної моделі процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках GAME методом, є вектор ваги або коефіцієнтів ряду моделі, яку потрібно оптимізувати. Ця функція $f(\vec{x})$ є похибкою на навчальній вибірці і, отже, має бути мінімізована.

Для досягнення збіжності моделі, потрібно знайти правильний напрямок пошуку \vec{d}_k в просторі станів з усіх можливих значень коефіцієнтів. Найпростіший спосіб пошуку напрямку полягає у використанні градієнтного методу найшвидшого спуску

$$\vec{d}_k = -\nabla f(\vec{x}_k), \quad \nabla f(\vec{x}_k) = \left(\frac{\partial}{\partial \bar{x}_1} f(\vec{x}_1), \dots, \frac{\partial}{\partial \bar{x}_n} f(\vec{x}_n) \right)^T. \quad (3.11)$$

Градієнтні методи "першого порядку" є не дуже ефективні. Особливо коли функція $f(\vec{x})$ лінійна, то необхідно провести багато ітерацій щоб знайти оптимальне рішення. Більш ефективними методами являються обчислення «другого порядку» або оцінки диференціювання другого порядку функції $f(\vec{x})$, що дозволяють забезпечити більш високу збіжність до оптимального рішення [120].

Найбільш популярним методом оптимізації другого порядку нелінійного програмування є метод квазі-Ньютона [121]. Згідно з цим методом, напрям пошуку обчислюється за наступним виразом

$$\vec{d}_k = -\nabla^2 f(\vec{x}_k)^{-1} \nabla f(\vec{x}_k) \quad (3.12)$$

Оптимальний підхід полягає в досягненні компромісу і використанні також похідних функції f першого порядку для визначення напрямку пошуку точніше. Це може бути реалізовано, наприклад, за допомогою формули

$$\vec{d}_k = -H_k \nabla f(\vec{x}_k), \quad H_k = \left(\frac{\partial^2}{\partial \bar{x}_i \partial \bar{x}_j} f(\vec{x}) \right)_{i,j=1,\dots,n}, \quad (3.13)$$

де $H_k \in R^{n \times n}$ – так звана матриця Гессе.

Шляхом обчислення градієнта і матриці Гессе функції f для кожної ітерації навчання знаходиться оптимальний напрям у просторі станів

коефіцієнтів \vec{x} . Через кілька кроків (ітерацій навчання), похибка ряду мережі GAME буде набагато менша, ніж початкова похибка ($f(\vec{x}_n) \ll f(\vec{x}_0)$).

Метод спряжених градієнтів [122] – метод знаходження локального мінімуму функції на основі інформації про її значення і її градієнта. У разі квадратичної функції в R^n мінімум перебуває за n кроків.

Нехай $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n \in X \subset R^n$

Введемо цільову функцію $f(\vec{x}) \in C^2(X)$.

Вектори $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n$ називаються спряженими, якщо:

$$\vec{x}_i^T H \vec{x}_j = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n$$

$$\vec{x}_i^T H \vec{x}_j \geq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

де H – матриця Гессе $f(\vec{x})$.

Ортогональний пошук (ОП) оптимізує багатовимірну проблему, за допомогою вибору одного виміру в часі, зводячи до мінімуму похибки на кожному етапі. ОП може бути використаний для тренування одношарових нейронних мереж [123]. Наведений метод здійснює мінімізацію наявної функції декількох змінних без використання градієнта, оптимізація проводиться змінних одного за одним. Стохастичний ортогональний пошук відрізняється від ОП тільки випадковим вибором змінних.

Відносно новими та швидко розвиваючими методами глобальної оптимізації є клас евристичних методів. Серед методів цього класу виділяють еволюційні та поведінкові (імітаційні) методи [124]. Поведінкові методи засновані на моделюванні колективної поведінки самоорганізованих живих або неживих систем, взаємодіючі елементи яких називають агентами.

Метод рою часток, (МРЧ) — метод чисельної оптимізації, що оптимізує функцію, підтримуючи популяцію можливих розв'язків, що називаються частками, та за допомогою переміщення цих часток у просторі розв'язків. Переміщення підпорядковуються принципу найкращого знайденого в цьому просторі положення, що постійно змінюється при знаходженні частками вигідніших положень. Порівняно з іншими еволюційними алгоритмами, PSO

швидше сходиться до вирішення. Однак алгоритм PSO не завжди знаходить правильне рішення [125].

Нехай $R^m \rightarrow R$ цільова функція, n – кількість часток, кожна з яких пов'язана з позицією $x_i \in R^m$ і швидкістю $v_i \in R^m$, $i = 1, \dots, n$; \hat{x}_i – поточний стан кожної частки, а \hat{g} – найкращий відомий стан рою в цілому. Згенеруємо x_i та v_i для всіх i -их часток перебору $x_{ij} \in U[a_j, b_j]$ та $v_i = 0$. Для всіх i та $j = 1, \dots, m$, в кожному напрямку:

$$\hat{x}_i \leftarrow x_i, i=1, \dots, n$$

Спочатку встановимо \hat{g} в положення з найменшим цільовим значенням.

Для $1 \leq i \leq n$

$$x_i \leftarrow x_i + v_i$$

$$v_i \leftarrow wv_i + c_1 r_1 (\hat{x}_i - x_i) + c_2 r_2 (\hat{g} - x_i),$$

якщо $f(x_i) < f(\hat{g})$, то $\hat{g} \leftarrow x_i$,

де w – інерційна стала.

Алгоритм оптимізації колонії мурах (ACO) зазвичай використовується вирішення для дискретних завдань (наприклад, задача комівояжера, задача маршрутизації пакетів) [126].

Перший – алгоритм безперервної оптимізації колонії мурах (CACO) був запропонований в [127]. Він описує алгоритм пошуку мурахою напрямку переміщення до мурашника. Напрямок визначається імовірнісним методом, на підставі формули:

$$P_i = \frac{l_i^q \cdot f_i^p}{\sum_{k=0}^N l_k^q f_k^p}, \quad (3.14)$$

де P_i – вірогідність переходу по дорозі i ; l_i – довжина i -ого переходу; f_i – кількість феромонів на i -ому переході; q – величина, яка визначає «жадібність» алгоритму; p – величина, яка визначає «стадність» алгоритму.

Якщо мураха знайшла краще рішення, вона збільшує кількість феромонів у напрямку пошуку [127].

Другий алгоритм називається алгоритм мурашиної Колонії для Безперервної Оптимізації Простору (ACO) [128]. Він був розроблений для тренування нейронних мереж зустрічного поширення. Кожна мураха представляє точку в просторі пошуку. Позиція нової мурахи обчислюється через розподіл існуючих мурах у просторі станів [129].

В генетичному алгоритмі (GA) спочатку здійснюються операції схрещування і мутації для породження великого числа нових наборів. Потім проводиться "штучний відбір" або селекція: у друге покоління відбираються тільки B наборів кращих по заданому зовнішньому критерію Q . Еволюційний процес переходить від покоління до покоління до тих пір, поки не наступить стагнація, тобто якість кращого набору в поколінні перестане покращуватись.

Алгоритм диференціальної еволюції (DE) [130] є, по суті, генетичним алгоритмом з особливою схемою схрещування. Він додає вагову різницю між двома індивідами третьому. Для кожного індивіда в популяції потомство створюється за допомогою зваженої різниці батьківських рішень. Потомство замінює батьків у випадку, якщо вони є більш підходящими. В іншому випадку, батько виживає і копіюється в наступне покоління [131].

Для кожного вектора x_i зі старого покоління вибираються три різних випадкових вектори v_1, v_2, v_3 серед векторів старого покоління, за винятком самого вектора x_i , і генерується так званий мутантний вектор за формулою:

$$v = v_1 + F \cdot (v_2 - v_3), \quad (3.15)$$

де F — один з параметрів методу, деяка позитивна дійсна константа в інтервалі $[0, 2]$.

Над мутантним вектором v виконується операція «схрещування» (англ. crossover), яка полягає в тому, що деякі його координати заміщаються відповідними координатами з початкового вектора x_i . Якщо отриманий вектор виявляється краще вектора x_i (тобто значення цільової функції стало менше),

то в новому поколінні вектор x_i замінюється на пробний вектор, а в іншому разі – залишається x_i .

Спрощений Атавістичний диференціальний еволюційний (SADE) алгоритм [132] є генетичний алгоритм поліпшений за рахунок однієї операції схрещування взятої з диференціальної еволюції. Він також запобігає передчасну збіжність за допомогою так званих полів випромінювання. Ці поля збільшили ймовірність мутацій і вони розміщені в локальних мінімумах функції енергії. Коли індивіди досягають поля випромінювання, вони, ймовірно, будуть сильно мутувати. Глобальний мінімум енергії досягається тоді, коли діаметр поля випромінювання спускаються до нуля.

Для підвищення ефективності поведінкових методів глобальної оптимізації в даний час використовують гібридизацію методів. При гібридизації об'єднують або різні методи, або однакові, але з різними значеннями вільних параметрів так щоб ефективність одного методу компенсувала слабкість іншого [133]. Серед таких методів є гібридизація гібридного алгоритму (ГА) і рою частинок (HGAPSO) запропонований в [134] і заснований на наступних ідеях. Оскільки обидва алгоритми PSO і GA вирішують проблему популяції, то існує можливість поєднання пошукових здібностей обох методів.

В своїх працях [134, 135] автори методу GAME П. Кордика та М. Шнорек досліджували проаналізовані вище методи навчання для визначення оптимального алгоритму навчання GAME моделі при вирішенні багатьох прикладних задач.

Автори дійшли висновку, що для вирішення багатьох задач класифікації, інтенсифікації, регресії, прогнозування об'єднання всіх методів навчання практично для кожної з них ввійшло в п'ятірку кращих для побудови модель з найменшою середньоквадратичною похибкою на тренувальній та контрольній вибірці даних, проте найкращі результати для окремих наборів були отримані і при застосуванні лише одного методу навчання (в більшості випадків це були градієнтні та генетичні методи).

Тому для знаходження математичної моделі з коефіцієнтами сполучень, що мають найменшу похибку при тренуванні мережі процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках дослідимо мережі з кожною оптимізаційною моделлю табл. 3.2 та мережу, що об'єднує всі оптимізаційні методи.

Параметри GAME моделі задаємо такі ж як і алгоритмі БІА МГУА:

- процентне співвідношення тренувальної та вибірки валідації – 30/70.

Така пропорція запропонована академіком А. Г. Івахненко, засновником МГУА [66].

- максимальна кількість рядів моделі – 13;

- максимальна кількість одиниць сполучень в ряді (чисельність популяції в кожному шарі, що утворюються за один цикл спарювання генетичного алгоритму) – 3;

- максимальна кількість з'єднань для утворення одиниці сполучення в ряді – 10.

Серед моделей отриманих різними оптимізаційними методами необхідно вибрати ту модель, яка найбільш задовольняє критеріям відбору ознак, а утворені моделі при дослідженні на екстремуми дозволять уникнути локальних мінімумів або максимумів та однозначно визначити екстремуми цільових функції процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. Для полегшення комп'ютерного пошуку мінімуму функції найбільш прийнятною є лінійна функція. Чим менше рядів сполучень та міжшарових з'єднань в утвореній математичній моделі тим простіший буде алгоритм пошуку оптимальних значень керуючих параметрів при певних збурюючих впливах для роботи сушарної установки в енергоефективних режимах. Для вибору моделі необхідно сформулювати процедуру оцінки якості кожної з моделей та вибору оптимальної з них для проведення подальших досліджень.

Головним критерієм оцінки математичних моделей побудованих за допомогою різних алгоритмів навчання приймаємо значення середньоквадратичної похибки значень моделі на контрольній вибірці. При проведенні моделювання було встановлено, що певні параметри

енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках не утворювали зв'язків з іншими параметрами і не були включені до жодного із сполучень. Зменшення ознак дозволить скоротити розмірність та підвищити швидкість знаходження математичної моделі, проте може призвести до зростання похибки на контрольній вибірці. Крім цього потрібно врахувати і кількість рядів з'єднань, що утворюються при різних методах навчання, оскільки, зазвичай, чим їх більше, тим складніше буде отримане рівняння моделі. Тому в таблицю оцінки моделей навчання (табл. 3.3), необхідно включити і дані по кількості рядів та змінних процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках, що не були включенні в модель.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання цільових функцій

Оптимізаційний метод	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель
	Для функції Y_1			Для функції Y_2			Для функції Y_3		
QN	0,00552	6	F₂,X₃,X₄	0,00753	7	F ₃ ,F ₇ ,F ₈	0,00713	5	F ₅ ,F ₇ ,F ₈ , X ₄
SADE	0,01033	6	F ₁ ,F ₃ ,X ₄	0,01233	6	F ₃ ,F ₅ ,X ₄	0,01423	5	F ₂ ,F ₃ ,F ₈ , X ₁ ,X ₄
PSO	0,01517	4	F ₁ ,F ₂ ,F ₄ ,F ₅ , F ₇ ,X ₁ ,X ₂ , X ₃	0,00938	5	F ₁ ,F ₂ ,F ₄ , F ₆ ,X ₁ ,X ₂ , X ₃	0,00712	5	F₁,F₂,F₆, X₁,X₃
HGAP SO	0,00689	6	F₂,X₁	0,00677	6	F₆,X₃,X₄	0,00588	6	F₃,F₅, F₆,X₁,X₄
DE	0,01139	5	F ₁ ,F ₂ ,F ₄ ,F ₅ , , X ₃	0,00633	6	F₁,F₃,F₅, F₆	0,00673	5	F₁,F₂,F₅, F₇,F₈,X₁, X₄

Продовження табл. 3.3.

Оптимізаційний метод	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель
SOS	0,01323	5	F ₂ ,F ₃ ,F ₄ ,X ₂ ,X ₃	0,01452	4	F ₂ ,F ₃ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₃	0,01252	5	F ₁ ,F ₃ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₁ ,X ₃
OS	0,02107	4	F ₂ ,F ₄ ,F ₅ ,F ₈ ,X ₂	0,01934	4	F ₂ ,F ₄ ,F ₅ ,F ₈	0,02534	4	F ₁ ,F ₄ ,F ₆ ,X ₁ ,X ₂ ,X ₄
CG	0,00597	7	F₄	0,00603	5	F ₃ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₃	0,00737	4	F ₁ ,F ₅ ,F ₇ ,X ₁ ,X ₄
ACO	0,03445	2	F ₂ ,F ₄ ,F ₇ ,X ₄	0,04452	2	F ₃ ,F ₄ ,F ₆ ,X ₄	0,04321	2	F ₂ ,F ₅ ,F ₈ ,X ₂ ,X ₄
CACO	0,01119	7	F ₂ ,F ₇ ,X ₄	0,00979	7	F ₃ ,F ₇ ,X ₄	0,00991	6	F ₃ ,F ₇ ,X ₄
Bci	0,01123	5	F ₁ ,F ₂ ,F ₃ ,X ₃	0,00999	5	F ₅ ,F ₆ ,F ₇ ,X ₃ ,X ₄	0,01065	4	F ₅ ,F ₆ ,F ₇ ,F ₈ ,X ₁ ,X ₄
	Для функції Y4			Для функції Y5			Для функції Y8		
QN	0,00772	5	F₂,F₃,F₈,X₂,X₄	0,00785	7	F₁,F₃,F₈	0,00913	6	F₂,F₇,F₈,X₄
SADE	0,01546	5	F ₂ ,F ₃ ,F ₆ ,X ₃	0,00832	6	F ₃ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₁ ,X ₄	0,02743	5	F ₂ ,F ₃ ,F ₇ ,F ₈ ,X ₂
PSO	0,01314	4	F ₁ ,F ₂ ,F ₄ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₁	0,00991	5	F ₁ ,F ₃ ,F ₄ ,F ₆ ,X ₁	0,01714	5	F ₁ ,F ₂ ,F ₆ ,F ₈ ,X ₂
HGAPSO	0,00873	4	F ₃ ,F ₄ ,F ₆ ,X ₁ ,X ₂	0,00829	5	F₃,F₇,X₁,X₄	0,01588	5	F ₁ ,F ₃ ,F ₅ ,F ₇ ,X ₁ ,X ₂
DE	0,00936	6	F ₁ ,F ₂ ,F ₄ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₃	0,01284	6	F ₁ ,F ₃ ,F ₄ ,F ₆ ,F ₈	0,01275	5	F ₁ ,F ₂ ,F ₃ ,F ₅ ,F ₇ ,X ₂
SOS	0,01672	5	F ₃ ,F ₄ ,F ₈ ,X ₂ ,X ₄	0,01631	4	F ₁ ,F ₃ ,F ₅ ,F ₆ ,X ₃ ,X ₄	0,01876	4	F ₁ ,F ₃ ,F ₅ ,F ₈ ,X ₂

Продовження табл. 3.3.

Оптимізаційний метод	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель	RMS	S	Параметри, що не ввійшли в модель
OS	0,00912	4	F ₂ ,F ₃ ,F ₄ ,F ₅ , X ₂	0,02176	4	F ₃ ,F ₄ ,F ₇ , X ₁	0,04531	4	F ₁ ,F ₅ ,F ₆ , X ₁ ,X ₂ ,X ₃
CG	0,01053	5	F ₄ ,F ₅ ,X ₁ ,X ₃ ,X ₄	0,00881	5	F ₃ ,F ₅ ,F ₆ , X ₄	0,01164	6	F₁,F₃,F₅, F₇,F₈,X₁, X₂
ACO	0,02104	4	F ₂ ,F ₃ ,F ₇ ,X ₃	0,03875	3	F ₃ ,F ₄ ,F ₇ , X ₄	0,04615	4	F ₁ ,F ₄ ,F ₅ , F ₈ ,X ₂ ,X ₄
CACO	0,00824	7	F₁,F₃,F₄,X₃	0,01732	7	F ₃ ,F ₇ ,X ₁ , X ₄	0,01692	6	F ₁ ,F ₃ ,F ₇ X ₂
Vci	0,00781	5	F₃,F₄,F₅,F₆,X₃	0,0088	5	F₁,F₆,F₇, F₈,X₁,X₂, X₄	0,00922	5	F₁,F₂,F₃, F₅,F₇,F₈, X₂

В табл. 3.3 RMS – значення середньоквадратичної похибки моделі, S – кількість рядів з'єднань в моделі.

Оскільки значення середньоквадратичної похибки на контрольній вибірці у багатьох моделях відрізняється на незначну величину, то вибір оптимальної GAME моделі доцільно провести в два етапи:

I етап. Вибрати три найкращі моделі по значенню середньоквадратичної похибки на контрольній вибірці для кожної цільової функції. В більшості випадків найменша середньоквадратична похибка досягалась при використанні градієнтних, генетичних, гібридних алгоритмів та об'єднанні 10 алгоритмів.

II етап. На другому етапі необхідно визначити змінні, які мають найменший зв'язок з цільовими функціями. Так як при використанні різного алгоритму навчання до складу математичної моделі включаються різні

фактори, тому, доцільно, визначити загальну кількість кожного окремого фактору, що не входить в модель (табл. 3.4).

Після того, як було відібрано по три найкращі моделі за значенням середньоквадратичної похибки з використанням різних методів навчання, для визначення підходящої моделі необхідно враховувати розмірність задачі і те, які змінні були включені в кожен з них. Для оцінки того наскільки точно отримана модель вирішує «проблему відбору ознак» вводиться такий критерій як оцінка невходження параметрів процесу сушіння в математичну модель цільової функції.

Таблиця 3.4 – Сукупність невходжень факторів процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці в цільові функції роботи сушарної установки

Вих. Пар.	Фактори	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_8
1.	F_1	4	2	6	3	5	9
2.	F_2	7	3	3	6	0	5
3.	F_3	3	7	2	8	10	7
4.	F_4	5	3	1	7	4	1
5.	F_5	3	5	7	5	3	7
6.	F_6	0	7	5	5	6	2
7.	F_7	3	2	5	1	5	6
8.	F_8	1	1	5	2	3	7
9.	X_1	2	1	8	3	6	3
10.	X_2	3	1	3	4	1	10
11.	X_3	5	5	2	6	1	1
12.	X_4	3	5	9	3	7	2

Для окремої моделі та кожного параметру, що не був включений до її складу визначається загальна кількість невходжень в окрему модель цільової функції при різних методах навчання.

$$OP_i = \sum_1^n P_i, \quad (3.16)$$

де P_i – певний параметр, що не входить до складу математичної моделі окремої цільової функції; n – кількість методів навчання ($n=11$); OP_i – параметр, що не входить до окремо взятої математичної моделі.

Потім визначається загальна кількість невходжень кожної змінної що не належить до даної математичної моделі:

$$NB = \sum_{i=1}^p OP_i, \quad (3.17)$$

де p – кількість параметрів, що не ввійшли в математичну модель певного методу.

Визначаємо середньозважене значення кількості параметрів (оцінка невходження), що не ввійшли до складу моделі

$$OH = \frac{NB}{p} \quad (3.18)$$

Результати розрахунку оцінки невходжень параметрів моделі, на прикладі моделі цільової функції вологості сушенки Y_1 , представлено в табл. 3.6. Математичну модель вибираємо того методу, який має найвищу оцінку невходжень. Як помітно із табл. 3.5, метод квазі-Ньютона має найвищу оцінку невходження для побудови математичної моделі функції вологості сушенки.

Якщо значення оцінки в моделях з різними методами навчання для однієї і тієї ж цільової функції однакові, то пропонується вибирати модель з меншим значенням середньоквадратичної похибки на контрольній вибірці.

Таблиця 3.5 – Оцінка невходжень параметрів процесу сушіння в математичну модель цільової функції вологості сушенки Y_1

Оптимізаційний метод	Оцінка невходження
QN (метод квазі-Ньютона)	5
HGAPSO (гібрид ГА і МРЧ)	4,5
CG (спряжених градієнтів)	3

Якщо значення середньоквадратичної похибки моделей на контрольній вибірці відрізняється на незначну величину ($\pm 0,001$), тоді залишаємо модель, що має меншу розмірність, а саме кількість рядів селекції. В такій моделі полегшується процедура знаходження екстремуму функції математичної моделі.

З метою вибору мінімально необхідного складу, критерії адекватності моделей, в залежності від певної ознаки яку вони характеризують, умовно можуть бути розділені на три групи [136]:

1) критерії, що характеризують точність математичної моделі: ESS (сума квадратів залишків моделювання), $D_{\text{зал}}$ (залишкова дисперсія), SEE (стандартна похибка моделювання), R^2 (коефіцієнт детермінації), R^2_{adj} (уточнений коефіцієнт детермінації), \bar{A} (середня похибка апроксимації), MAE (середня абсолютна похибка), RMS (середньоквадратичне відхилення);

2) критерії, що характеризують одночасно точність і складність моделі: АІК (інформаційний критерій Акаїке), ВІС (критерій Шварца);

3) критерії, що характеризують стійкість моделі, тобто можливість її застосування на нових даних: n_{3c} (критерій мінімуму зсуву)

$$n_{3c} = \frac{1}{R_1 + R_2} \sum_{i=1}^{R_1+R_2} (z_r^* - z_r^{**}) \quad (3.19)$$

де R_1 та R_2 – розміри першої і другої підвибірок даних відповідно, z_r^* , z_r^{**} – значення прогнозу першої та другої моделі щодо всіх точок вибірок.

Як вже зазначалося, критерії адекватності математичних моделей, що входять до однієї і тієї ж групи, перевіряють на «однорідність», тобто вони не повинні дублювати один одного за своїм змістом і співвідношенням числових значень одержаних для різних моделей. З першої групи критеріїв адекватності математичних моделей одночасно доцільно використовувати лише два з них, наприклад критерій (ESS, $D_{\text{зал}}$, SEE, \bar{A} , MAE, RMS) та критерій R^2 (або R^2_{adj}) [137]. Так як коефіцієнт кореляції між критеріями АІК та ВІС дорівнює практично 1, згідно із [138], то вони дублюють один одного. При цьому, зважаючи на те, що критерій Шварца (BIC) більшою мірою, ніж критерій Акаїке (AIC), «штрафує» за зайву складність математичної моделі, тому його використання є більш доцільним.

Критерій Шварца вираховується за наступною формулою:

$$BIC = \ln(\sigma^2) + \frac{k \ln n}{n}, \quad (3.20)$$

де σ^2 – залишкова дисперсія моделювання; n – кількість спостережень; k – число параметрів або незалежних змінних моделі.

Коефіцієнт детермінації визначається як

$$R^2 = 1 - \frac{ESS}{TSS}, \quad (3.21)$$

де TSS – сума квадратів відхилення фактичних значень залежної змінної y_k від її середньої величини \bar{y} :

$$TSS = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2, \quad (3.22)$$

ESS – сума квадратів залишку моделювання фактичних y_k від розрахункових значень залежної змінної \hat{y} :

$$ESS = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y})^2 \quad (3.23)$$

Чим ближче значення коефіцієнту детермінації до одиниці, тим краще модель описує реальні дані. На практиці прийнято вважати модель адекватною,

якщо $R^2 > 0,75$ [139]. Цей критерій розглядають як універсальну міру тісноти статистичної залежності однієї випадкової величини від певної кількості інших величин. Також вважається, що найкращою буде модель з найменшим значенням критерію ВІС [140]. Критерій мінімуму зсуву приймає значення близьке до нуля у випадку знаходження «істинної» моделі. Як видно з табл. 3.6, критерії R^2 , n_{zc} і ВІС дають узгоджений результат і виділяють моделі отримані GAME методом для процесу сушіння, як найбільш точні в порівнянні з іншими моделями для кожної цільової функції.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунку критеріїв адекватності моделі енерготехнологічного процесу сушіння (уточненого коефіцієнта детермінації, критерія Шварца та критерія мінімуму зсуву)

Кри- терій	Метод	Вихідні параметри моделі					
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_8
R^2	GAME	0,76	0,67	0,75	0,82	0,78	0,66
	БІА	0,66	0,68	0,51	0,32	0,46	0,56
	СОМВІ	0,43	0,61	0,48	0,31	0,56	0,67
n_{zc}	GAME	0,06	0,07	0,07	0,11	0,09	0,11
	БІА	0,05	0,23	0,27	0,13	0,45	0,12
	СОМВІ	0,11	0,09	0,34	0,28	0,41	0,27
ВІС	GAME	-0,7	0,98	1,78	1,19	0,89	-0,7
	БІА	-1,6	1,1	1,88	2,78	1,23	-0,5
	СОМВІ	-1,4	1,71	2,67	2,68	1,67	-0,5

За результатами проведеного моделювання був вибраний алгоритм побудови математичної моделі та отримані цільові функції процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. Згідно з наведеною методикою, для цільової функції Y_1 була вибрана GAME модель, що побудована з використанням квазі-Ньютовогo методу навчання мережі, Y_2 – методу спряжених градієнтів, Y_3 – методу диференціальної еволюції, Y_4 – методу, що

поєднує основні алгоритми навчання, Y_5 – гібридний метод навчання, Y_8 – методу, що поєднує основні алгоритми навчання. Структура зв'язків параметрів досліджуваних цільової функції Y_1 з вибраним методом навчання GAME моделі представлено на рис. 3.7, інших цільових функцій в додатку Е.

Також було отримано цільові функції енеротехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках:

$$Y_1=0,6146F_1-0,4517F_3+0,6422F_4+0,483F_5-0,2333F_6-10,26F_7+1,186F_8+1,57X_1-1,693X_2; \quad (3.24)$$

$$Y_2=64,21+1,571F_1-0,1532F_2-2,137F_4-3,06F_7+17,09F_8+1,084F_{12}+1,124X_1+1,679X_2+2,356X_4; \quad (3.25)$$

$$Y_3=608,2+1,235F_1-0,1552F_2+2,823F_5-4,354F_7-59,09F_8+7,84X_1-13,29X_4; \quad (3.26)$$

$$Y_4=-315,781-0,2288F_1+0,0193F_2+1,004F_7-0,0624F_8+0,4966X_1+0,7834X_2+11,4723X_4; \quad (3.27)$$

$$Y_5=-1,148F_1-0,1294F_2+1,961F_4-1,502F_5+1,074F_6+1,78F_8-1,782X_2+0,4177X_3; \quad (3.28)$$

$$Y_8=-364,4F_4-1022F_6+4107X_1-105X_3+2417X_4. \quad (3.29)$$

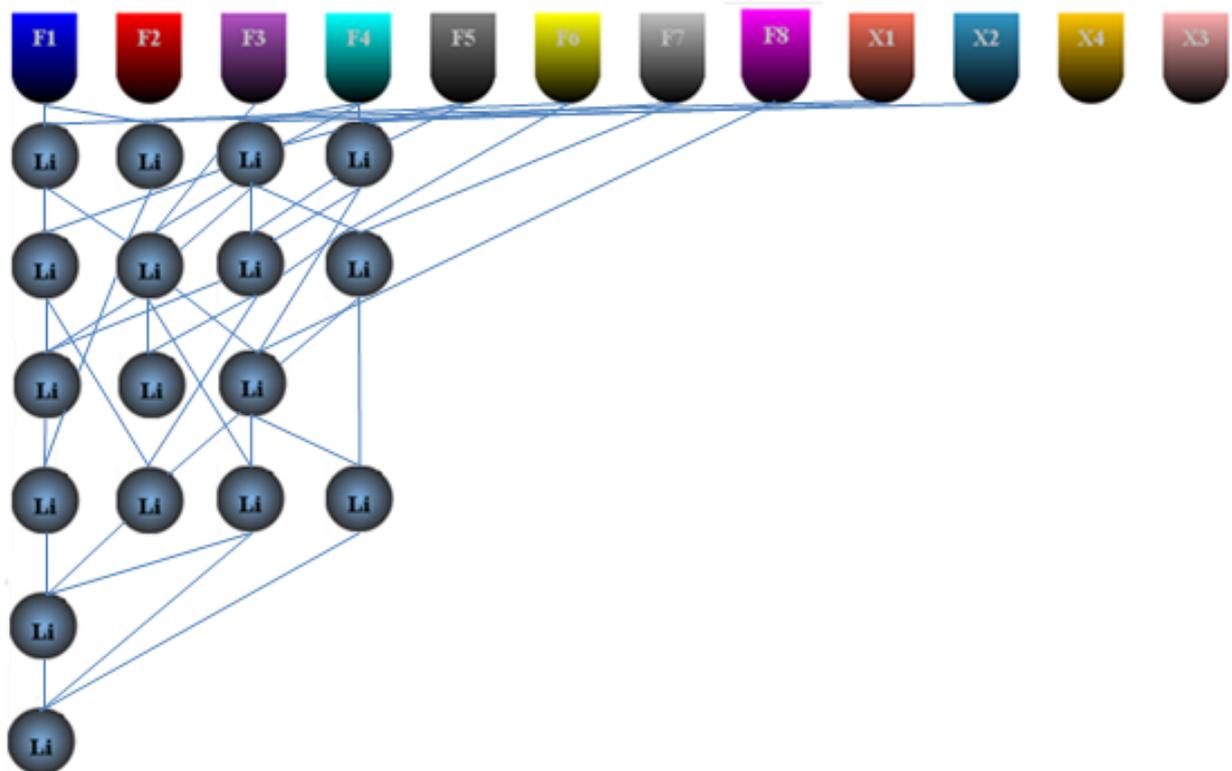


Рисунок 3.7 – Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_1

Моделі побудовані за методу GAME вирішують проблему відбору ознак, оскільки цільові функції включають від 5 до 9 параметрів, що мають вплив на

формування значень кожного вихідного параметру енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. Отримані цільові функції мають незначну середньоквадратичну похибку при апроксимації моделі. Моделі отримані за допомогою методу GAME мають значення RMS від 0,00552 для функції Y_1 до 0,00922 для функції Y_8 , в той час як по результатам моделювання БІА і параметричних алгоритмів МГУА найменше значення RMS становить 0,013399 для цільової функції Y_1 до 0,048965 для функції Y_8 .

Отже, за допомогою алгоритмів GAME було отримано адекватні моделі цільових функцій роботи енерготехнологічного процесу сушіння торфу, що використовуються для подальшого пошуку енергозберігаючих режимів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння.

3.3. Оптимізація значень цільових функцій споживання теплової та електричної енергії енерготехнологічним комплексом сушіння торфу

Для підвищення ефективності використання енергоресурсів енерготехнологічним комплексом сушіння торфу найбільш перспективними є розробка математичних моделей, адекватних реальному виробничому процесу, і знаходження за допомогою процедур оптимізації режимних параметрів при яких забезпечуються екстремальні значення вихідних цільових функцій.

Для знаходження енергозберігаючих режимів керування енерготехнологічного процесу сушіння торфу на брикетних заводах, то цільовими функціями, що потрібно мінімізувати є теплоспоживання Y_8 та електроспоживання Y_4 .

Для того, щоб звести до мінімуму споживання енергії в процесі сушіння необхідно спочатку здійснити визначення необхідної кількості тепла (кДж) для сушіння торфу певних фізичних і механічних властивостей торфу та продуктивності сушарки, які дозволяють отримувати сушенку з необхідними якісними характеристиками.

В перелік даних необхідних для розрахунку необхідної витрати теплової енергії, що були вказані в розділі 2, входять параметри вихідних цільових

показників. Значення цих параметрів повинно бути в регламентованих межах – $10 \geq Y_1 \leq 20$; $30 \leq Y_3 \leq 80$; $Y_5 \leq 120$. Здійснивши підстановку критичних значень цих параметрів в цільову функцію теплоспоживання, для кожної серії дослідів за допомогою формул 2.6-2.10 було вираховано мінімальне та максимальне значення питомих затрат теплоенергії. Фактичне значення витрат теплової енергії повинно бути в межах мінімального та максимального значення. Якщо у разі зміни збурюючих впливів (температури, вологості, зольності торфу тощо) витрати теплової енергії менші за мінімальне або більші за максимальне значення, то необхідно збільшити або зменшити подачу теплової енергії в сушарку.

Результати розрахунку питомих витрат теплової енергії енерготехнологічного процесу сушіння для кожного дослідів представлені у вигляді діаграми на рис. 3.8.

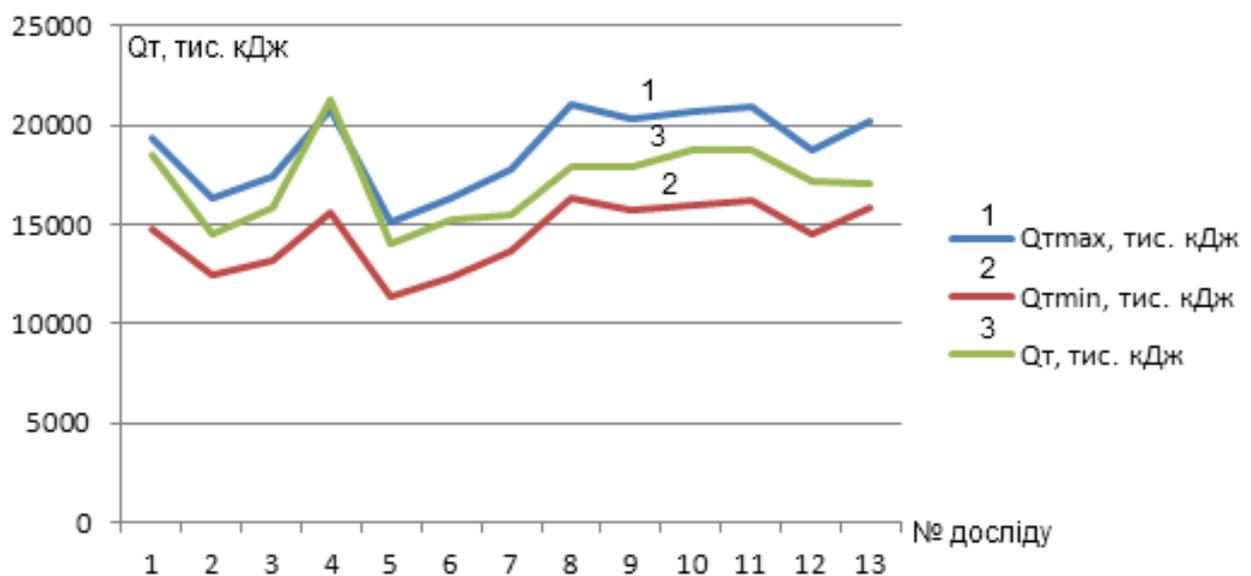


Рисунок 3.8 – Графік витрат теплоти за 1 год: 1 – максимально допустимі значення витрат теплоти у виробничих дослідів, $Q_{T\max}$; 2 – мінімально допустимі значення витрат теплоти у виробничих дослідів, $Q_{T\min}$; 3 – фактичні витрати теплоти у виробничих дослідів Q_T .

За результатами виробничого експерименту з рис. 3.8 можна зробити висновок, що в четвертому досліді значення витрат теплової енергії за 1 год

вище за допустиме $Q_{T_{\max}}$. В наступному досліді витрати теплової енергії були зменшені.

Визначення границі витрат теплоти згідно з розглянутою методикою визначення допустимих значень витрат теплоти може виконувати функцію контролю споживання ПЕР.

Основними фізико-механічними властивостями торфу, які впливають на величину випарованої вологи згідно з аналітичним розрахунком питомих витрат теплоти [97], є його вологість, насипна щільність та зольність.

Вимоги до фрезерного торфу для виробництва брикетів викладені у ДСТУ 2043-92. При дотриманні якості фрезерного торфу рекомендованим та розрахунковим значенням питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу в парових трубчастих сушарках становить 4483,3 кДж/кг [145]. Графік питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу за результатами виробничих експериментів та за допустимих максимальних та мінімальних витрат теплоти за 1 год наведений на рис. 3.9.

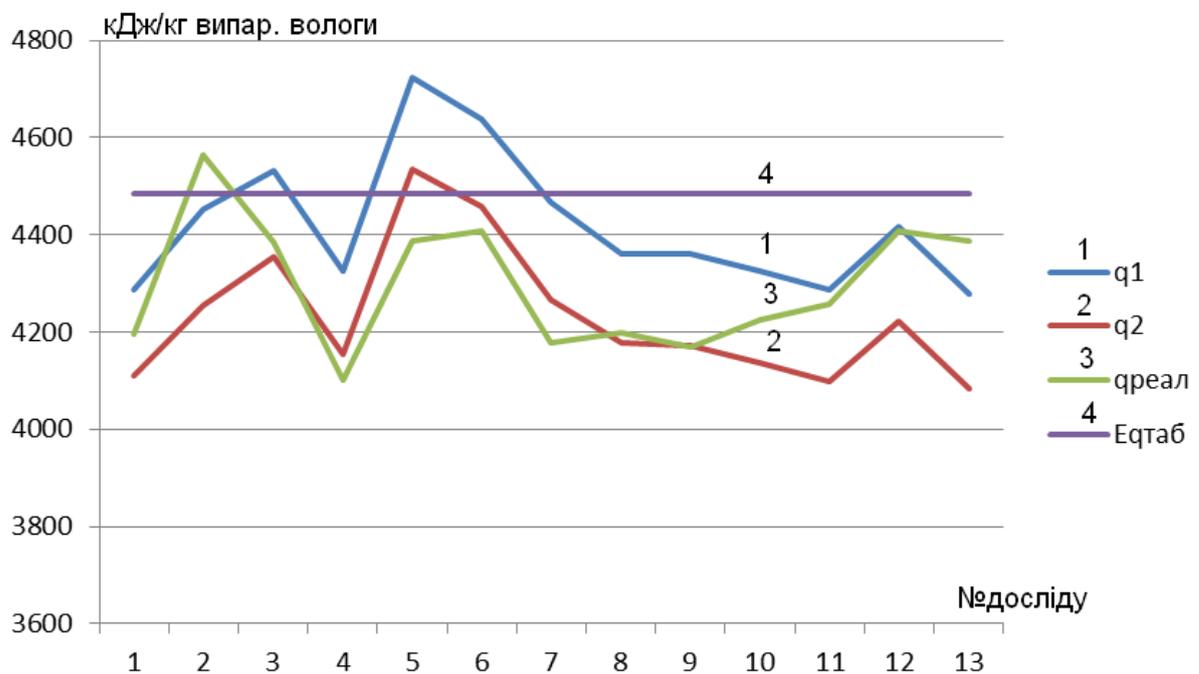


Рисунок 3.9 – Графік питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу: 1 – питомі витрати теплоти на випаровування за максимально допустимими значеннями витрат теплоти за 1 год у виробничих дослідів q_1 ; 2 – питомі витрати теплоти на випаровування за мінімально допустимими

значеннями витрат тепла у виробничих дослідах q_2 ; 3 – питомі витрати теплоти на випаровування за фактичних досліджуваних витрат теплоти за 1 год у виробничих дослідах q_{real} ; 4 – рекомендоване значення питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу $E_{q_{tab}}$.

Значна відмінність графіків витрат теплоти за 1 год від графіка питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу полягає у різній масі торфу що транспортувалась конвеєром. З рис. 3.9 помітно, що в п'ятому досліді процес сушіння торфу за максимально допустимих значеннях витрат теплоти за 1 год є не ефективним і перевищує більш ніж на 5% рекомендованого значення.

Отже, система контролю споживання ПЕР, що базується на аналізі витрат теплоти за 1 год та питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу, дозволяє підібрати ефективні рівні споживання ПЕР для отримання сушенки необхідної якості. Необхідний рівень споживання теплової енергії для сушіння торфу певних фізико-механічних властивостей розраховується аналітичним способом і повинен бути в певних межах. Тому в задачі оптимізації витрат енергії цільовою функцією буде лише вихідний параметр споживання електричної енергії (Y_4), а функцію споживання теплової енергії слід віднести до обмеження цільової функції Y_4 .

Згідно з даними [104] та технічної документації торфобрикетного заводу «Сойне» вологість сушенки (Y_1) не повинна перевищувати 20%, вологорізниця сушенки (Y_2) – 6%, температура агента сушіння на виході із сушарки (Y_5) – 120 °С, температура пари (X_3) – 150 °С, витрата повітря через сушарку (X_4) теплоспоживання повинно бути в межах $Q_{min} \leq Y_8 \leq Q_{max}$ (кДж), температура сушенки (Y_3) в межах від 30 °С до 90 °С, швидкість шнека (X_1) – з 3 до 7 об/хв, швидкість обертання сушарки (X_2) – з 5 до 12 об/хв.

Отже, для знаходження енергозберігаючих режимів роботи за певних збурюючих впливах F_1, \dots, F_8 необхідно знайти значення X_1, X_2, X_3, X_4 , що задовольняють умовам мінімуму споживання електричної енергії для отримання сушенки необхідної якості, оптимальному споживанню теплової енергії та умовам пожежобезпеки:

$$Y_4 = -315,781 - 0,2288F_1 + 0,0193F_2 + 1,004F_7 - 0,0624F_8 + 0,4966X_1 + 0,7834X_2 + 11,4723X_4 \rightarrow \min \quad (3.30)$$

з обмеженнями

$$0,6146F_1 - 0,4517F_3 + 0,6422F_4 + 0,4832F_5 - 0,2333F_6 - 10,26F_7 + 1,186F_8 + 1,57X_1 - 1,693X_2 \leq 20;$$

$$64,21 + 1,571F_1 - 0,1532F_2 - 2,137F_4 - 3,06F_7 + 17,09F_8 + 1,084F_{12} + 1,124X_1 + 1,679X_2 + 2,356X_4 \leq 6;$$

$$30 \leq 608,2 + 1,235F_1 - 0,1552F_2 + 2,823F_5 - 4,354F_7 - 59,09F_8 + 7,84X_1 - 13,29X_4 \leq 80;$$

$$-1,148F_1 - 0,1294F_2 + 1,961F_4 - 1,502F_5 + 1,074F_6 + 1,78F_8 - 1,782X_2 + 0,4177X_3 \leq 120;$$

$$Q_{\min} \leq -364,4F_4 - 1022F_6 + 4107X_1 - 105X_3 + 2417X_4 \leq Q_{\max};$$

$$2,5 \leq X_1 \leq 4,5;$$

$$5 \leq X_2 \leq 12;$$

$$X_3 \leq 150;$$

$$X_4 \leq 40.$$

Цілями наукових досліджень у ХХ столітті було підвищення продуктивності існуючого обладнання торфобрикетного заводу для того щоб підвищити річні показники виробництва торфобрикетного виробництва. В умовах ринкової економіки не завжди доцільно налаштовувати виробництво на максимальну продуктивність, так як обсяги виробництва на певних період диктує ринок, зокрема – попит на товари. За місяць для умов на заводу „Сойне” необхідно виробляти певну кількість продукції передбачену умовами контрактів. Виготовляти торфобрикету в понад передбаченій умовами договорів кількості може бути не вигідним, так як виникає проблема збуту продукції і виникне можливість того, що підприємство працюватиме збитково тощо. Саме тому, постає завдання визначення енергозберігаючих режимів роботи при необхідній продуктивності сушарки по сушенці. Основним параметром, яким можна регулювати кількість торфу, що подається в сушарку, є швидкість обертання шнека (X_1). Крім цього мінімальне значення цільової функції електроспоживання Y_4 за певних збурюючих впливах буде при мінімальному значенні керуючого впливу X_1 та відповідно і продуктивності сушарці. Проте, продуктивність торфобрикетного заводу повинна регулюватись у відповідності з необхідною кількістю виготовлення брикетів за певний період. Тому необхідно встановлювати режими роботи сушарки у відповідності із її завантаженням. Пропонується здійснення регулювання

завантаженості по трьом режимам – мінімальним значенням керуючого параметру $X_1=2,5$ об/хв, його середнім значенням $X_1=3,5$ об/хв та максимальним $X_1=4,5$ об/хв.

Тому потрібно розв'язати задачу лінійного програмування, підставляючи в функцію цілі Y_4 та обмеження даної функції значення F_j , отримані в результаті проведення виробничого експерименту для кожного дослідження, за умов мінімального, середнього та максимального значення параметру X_1 . В результаті розв'язано – $14 \cdot 3 = 42$ задачі лінійного програмування. Найбільш відомим і широко застосовуваним на практиці для вирішення загальної задачі лінійного програмування є симплекс-метод [63]. Результати вирішення оптимізаційної задачі знаходження енергозберігаючих режимів енерготехнологічного процесу сушіння торфу за допомогою програми SimplexWin 3.1 представлено в додатку Ж.

Отже, за допомогою симплекс-методу було знайдено контрольовані параметри енерготехнологічного процесу сушіння торфу для кожного проведеного на торфобрикетному заводі «Сойне» дослідження, що забезпечують підвищення енергоефективності процесу в порівнянні із застосованими на виробництві.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Аналіз розроблених моделей процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння, отриманих за допомогою моделювання набору даних, що характеризують енерготехнологічний процес сушіння, методом МГУА з використанням комбінаторого та багат шарового ітераційного алгоритму показав, що ці моделі дозволяють повною мірою вирішити «проблему відбору ознак» та мають середньоквадратичну похибку що перевищує 0,01, в той час як в моделі отриманій з використанням методу еволюції груп адаптивних моделей вона менша 0,01 для всіх значень цільових функцій. Отже, для побудови моделей процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках є доцільним використання методу GAME (еволюції груп адаптивних моделей) для отримання рівняння цільових функцій електроспоживання, теплоспоживання, вологості, вологорізниці, температури сушенки та температури відходящих газів.

2. Введено поняття оцінки невходження параметрів процесу сушіння в математичну модель цільової функції, визначення якого дозволило вибрати оптимальний метод навчання моделі роботи енерготехнологічного комплексу сушіння отриманої методом еволюції груп адаптивних моделей, який дозволив отримати функції цілей процесу сушіння торфу з параметрами, які мають найбільший вплив на кожен з визначених цільових функцій.

3. Розроблено процедуру контролю споживання теплової енергії енерготехнологічним процесом сушіння торфу, що містить контроль витрат теплоти за 1 год, питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу та визначення необхідного рівня подачі теплової енергії на процес сушіння торфу. Це дозволить контролювати в необхідних межах витрати теплової енергії та підібрати необхідні рівні споживання теплоти для даного процесу. Контроль споживання теплової енергії для кожної серії експериментів показав, що в четвертому досліді значення витрат теплової енергії за 1 год вище за допустиме, а питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу у п'ятому досліді вищі за рекомендовані.

4. Сформульовано оптимізаційну задачу визначення мінімального споживання електричної енергії, що включає в себе цільову функцію споживання електричної енергії та лінійні обмеження за функціям вологості, вологорізниці, температури сушенки, теплоспоживання, температури димових газів для знаходження оптимальних енергоефективних керуючих параметрів за певних збурюючих впливів, які дозволяють отримати сушенку необхідної якості, задовольняють вимогам пожежобезпеки процесу при необхідній продуктивності сушарної установки для кожної серії виробничих експериментів.

Основні положення даного розділу опубліковані автором дисертаційної роботи в [19, 20].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЗДІЙСНЕННЯ РЕГУЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СУШІННЯ ТОРФУ В ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМАХ

4.1. Визначення статистичного ансамблю даних необхідних для навчання нейромережі знаходження енергоефективних керуючих параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння

Побудовані за допомогою методів індуктивного моделювання математичні моделі енергоспоживання енерготехнологічним комплексом сушіння торфу дозволили знайти оптимальні керуючі змінні за певних значень збурюючих впливів, які відповідають умовам якості сушенки і пожежобезпеки. Для побудови системи регулювання процесом сушіння торфу, як було визначено в розділі 1 дисертаційної роботи, найбільш доцільно використовувати багат шаровий перцептрон. Навчений на експериментальних дослідах перцептрон дозволяє реалізувати рішення задачі «вхід-вихід», тобто при надходженні нових значень збурюючих впливів він дозволяє прорахувати оптимальні керуючі впливи.

Для вирішення завдань за допомогою нейронних мереж необхідно зібрати достатній і представницький обсяг даних для того, щоб навчити нейронну мережу її розв'язанню. Навчальний набір даних – це набір спостережень, що містять ознаки досліджуваного об'єкта. Нейронні мережі працюють з числовими даними взятими, як правило, з деякого обмеженого діапазону. Відомий ряд евристичних правил, що погоджує число необхідних спостережень з розмірами мережі (найпростіше з них свідчить, що число спостережень має бути в десять разів більшим числа зв'язків у мережі). Зі зростанням кількості змінних кількість необхідних спостережень зростає нелінійно.

Для багатьох реальних задач трапляються випадки, коли необхідно кілька сотень або тисяч спостережень. Для складних завдань може знадобитися

ще більша кількість, однак дуже рідко може зустрітися задача (навіть тривіальна), де вистачило б менше сотні спостережень. Якщо даних менше, то інформації для навчання мережі буде недостатньо.

Хорошу якість моделі можна отримати тільки при більш тривалому навчанні з якомога більшим набором даних. В ході виконання виробничих експериментів було отримано 14 серій спостережень згідно плану проведення активних експериментів, що для вирішення задачі інтерполяції і регресії за допомогою нейронних мереж вкрай мало. Тому виникає завдання збільшення числа набору даних вхідних і вихідних параметрів. Для цього необхідно провести генерацію випадкових наборів вхідних параметрів (в даному випадку збурюючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках). Генерація чисел повинна проводитися за певними функціональними залежностями збурюючих впливів між собою, які вказані в таблиці кореляційного аналізу (додаток Г). З цією метою необхідно провести генерація випадкових чисел з заданим розподілом використовуючи метод Монте-Карло, який є найбільш зручним для моделювання випадкових і ймовірнісних процесів [146]. Для цього спочатку генеруємо перелік випадкових чисел U_i , здебільшого які мають значення від 0 до 1. Згідно із статистичним аналізом результатів проведення активних виробничих експериментів в умовах торфобрикетного заводу «Сойне», зміна фізико-механічних властивостей торфу відбувається за нормальним законом розподілу випадкових величин. Тому перелік випадкових величин збурюючих впливів повинен також відповідати цьому закону.

Для того щоб розіграти значення випадкової величини X , потрібно вибрати з таблиці число U_i і від нього перейти до x_i за формулою

$$x_i = U_i \delta_x + m_x \quad (4.1)$$

де x_i – згенероване значення збурюючого впливу, δ_x – значення середньоквадратичного відхилення, m_x – середнє математичне значення величини збурюючих впливів (математичне очікування)

Зазначена процедура використовується при розіграші випадкової

величини вручну.

На практиці для цього закону знайшов застосування інший метод, заснований на центральній граничній теоремі ймовірностей. Відповідно до цієї теореми, при додаванні досить великого числа незалежних випадкових величин, рівними за своїми дисперсіями, знаходиться випадкова величина, розподілена наближено за нормальним законом, причому цей закон тим ближче до нормального чим більше випадкових величин складаються.

Алгоритм отримання нормально розподіленої величини X полягає в наступних операціях [146]:

1. Проводиться розіграш N випадкових рівномірно розподілених величин r_i (зазвичай $N \geq 12$).

2. Знаходиться сума N величин

$$S = \sum_{i=1}^N r_i, \quad (4.2)$$

математичне сподівання якої $m = \sum_{i=1}^N r_i \cdot P_i = N \cdot 0,5$; дисперсія $D = \sum_{i=1}^N (r_i - m)^2 \cdot \frac{1}{N} = 1$

і середньоквадратичне відхилення $\sigma = \sqrt{D} = 1$.

3. Проводиться нормування величини

$$S_H = (S - m) / \sigma = S - 0,5N \quad (4.3)$$

4. Знаходиться значення випадкової величини X , розподіленої за нормальним законом, виходячи із зворотного нормованої величини формули $X = \sigma_x S + m$ або

$$x_i = \sigma_x \left(\sum_{i=1}^N r_i - N / 2 \right) + m_x. \quad (4.4)$$

При моделюванні системи випадкових величин X_1, X_2, \dots, X_n їх реалізації x_1, x_2, \dots, x_n можна розглядати як координати реалізації випадкового вектора X в n -вимірному просторі.

Часто на практиці зустрічаються системи випадкових величин, тобто дві (і більше) різні випадкові величини X, Y (та інші), які залежать один від

одного. Згідно з проведеного кореляційного аналізу результатів експерименту, існують фізико-механічні властивості торфу, що тісно пов'язані і в яких значення коефіцієнту кореляції більше ніж $\pm 0,5$, зокрема зв'язок насипної щільності торфу (F_2) від фракційного складу торфу (F_6). Тобто в даному випадку фактори є взаємозалежними, тому і випадкові величини системи також повинні бути залежними

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1) \cdot f(x_2 / x_1) \cdot f(x_3 / x_2, x_1) \cdot \dots \cdot f(x_n / x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_2, x_1) \quad (4.5)$$

де кожна наступна щільність розподілу є умовною у випадку, що попередні випадкові величини прийняли конкретні значення.

Оскільки утворити систему факторів із хорошими кореляційними зв'язками кожного параметру з іншим, що включається в систему, досить складно і, як показали розрахунки коефіцієнтів кореляцій, існує тісний зв'язок тільки між факторами F_7 та F_1 , F_2 та F_6 , F_3 та F_5 , F_3 та F_8 , F_7 та F_4 (додаток Г). Саме тому необхідно моделювати системи тільки з двома незалежними випадковими величинами. Вибір досить великого значення коефіцієнта кореляції – $0,5$ зумовлено наявністю похибок вимірювань, що не дозволяє в повній мірі констатувати факт наявності тісного зв'язку між факторами, що мають менший коефіцієнт кореляції.

Алгоритм пошуку випадкових величин для двох факторів, що мають тісний зв'язок буде наступним:

1. Розігрується N випадкових рівномірно розподілених на інтервалі $[0; 1]$ чисел r_1, r_2, \dots, r_i та знаходиться їх сума S за формулою (4.2).
2. Знаходиться значення випадкової величини X , розподіленої за нормальним законом, виходячи із зворотного нормованої величини формули $X = \sigma_x S + m$ за формулою (4.5)
3. За формулою

$$m_{y/x} = m_y + q \cdot (\sigma_y / \sigma_x) \cdot (x - m_x) \quad (4.6)$$

знаходиться математичне сподівання $m_{y/x}$ (знак y/x означає, що y буде приймати випадкові значення з врахуванням умови, що x вже прийняв деякі певні значення).

4. За формулою

$$\sigma_{y/x} = \sigma_y \sqrt{1 - q^2} \quad (4.7)$$

знаходиться середньоквадратичне відхилення умовного закону розподілу $\sigma_{y/x}$ (знак y/x означає, що y буде приймати випадкові значення з врахуванням умови, що x вже прийняв якісь певні значення).

5. Знаходиться можливе значення випадкової величини y_i :

$$y_i = \sqrt{\sigma_{x/y}} \left(\sum_{i=1}^N r_i - N/2 \right) + m_x. \quad (4.8)$$

За наведеним алгоритмом здійснимо генерацію 86 спостережень, що в сумі з 14 отриманими в ході проведення виробничих експериментів дасть набір даних із 100 входів і 100 виходів для побудови нейронної мережі. Спочатку проводимо генерацію випадкових величин за алгоритмом отримання нормально розподіленої величини факторів F_2, F_3, F_7 за формулами (4.2-4.6). Потім згідно з алгоритму пошуку випадкових величин для двох факторів, що мають тісний зв'язок по даним величин фактору F_2 за формулами (4.6-4.8) знаходяться F_6 , по фактору F_3 відбувається пошук F_5 та F_8 , а по фактору F_7 набір значень факторів F_5 та F_1 .

Знайдені значення факторів підставляються у функцію електроспоживання, яку досліджуємо на мінімум, та знаходимо оптимальні значення керуючих впливів, що відповідають мінімальним затратам енергії та дотриманням вимог щодо якості сушенки і умовам пожежобезпеки, так як це було проведено в розділі 2 за допомогою симплексного методу. В результаті була отримана таблиця значень оптимальних керуючих впливів при різних збурюючих впливах (додаток 3).

4.2. Проведення навчання нейронної мережі знаходження енергоефективних керуючих параметрів роботи енерготехнологічного комплексу сушіння з паровою трубчастою сушаркою

Для подальшого дослідження необхідно вибрати, сформулювати та провести процедуру навчання нейронних мереж.

У контексті ШНМ процес навчання може розглядатися як налаштування архітектури мережі і вагових зв'язків для ефективного виконання поставленої задачі. Нейронна мережа повинна налаштувати вагові зв'язки по наявній навчальній вибірці. Функціонування мережі поліпшується у міру інтерактивного налаштування вагових коефіцієнтів. Властивість мережі навчатися на прикладах робить їх більш привабливими в порівнянні з системами, які слідують певній системі правил функціонування, сформульованої експертами.

Похибка навчання для конкретної конфігурації нейронної мережі визначається шляхом прогону через мережу всіх наявних спостережень і порівняння вихідних значень з бажаними, цільовими значеннями. Ці різниці дозволяють формувати так звану функцію помилок (критерій якості навчання). В якості такої функції найчастіше береться сума квадратів похибок.

При моделюванні нейронних мереж з лінійними функціями активації нейронів можна побудувати алгоритм, який гарантує досягнення абсолютного мінімуму похибки навчання. Для нейронних мереж з нелінійними функціями активації в загальному випадку не можна гарантувати досягнення глобального мінімуму функції похибки. При такому підході до процедури навчання досить корисним є геометричний аналіз поверхні функції похибок. При визначенні ваг і зміщень як вільних параметрів моделі і позначенні їх загального числа через N , кожному набору таких параметрів ставиться у відповідність один вимір у вигляді похибки мережі. Тоді для будь яких поєднань ваг і зміщень відповідну похибку можна зобразити у вигляді точки в $N+1$ -вимірному просторі, а всі точки утворюють деяку поверхню похибок. При такому підході мета навчання нейронної мережі полягає в тому, щоб знайти на цій багатовимірній поверхні

глобальний мінімум. У разі лінійної моделі мережі та функції похибок у вигляді суми квадратів така поверхня буде являти собою параболоїд, який має єдиний мінімум і це дозволяє відшукати такий мінімум досить просто. У разі нелінійності поверхні похибки модель має набагато більш складну будову і може містити локальні мінімуми, плоскі ділянки, сідлові точки.

Визначити глобальний мінімум багатовимірної поверхні аналітично неможливо і тому навчання нейронної мережі є процедурою вивчення поверхні функції похибок. Відштовхуючись від випадково обраної точки на поверхні похибок, алгоритм навчання поступово відшукує глобальний мінімум. Як правило, для цього обчислюється градієнт функції похибок в даній точці, а потім ця інформація використовується для переміщення вниз по схилу. Алгоритм зупиняється при досягненні деякого мінімуму, який може виявитися локальним.

Сучасні програмні продукти, найбільш поширеним з яких є Statistica Neural Networks, дають можливість автоматизованого підбору оптимального виду і структури нейромережевої моделі, що значно спрощує процес моделювання [147].

Найвідоміший варіант алгоритму навчання нейронної мережі – так званий алгоритм зворотного поширення (back propagation) [90, 148]. У пакеті ST Neural Networks реалізовані ще два подібних методи: методи спуску по спряженим градієнтам і Левенберга-Маркара, що представляють собою реалізацію двох типів алгоритмів: лінійного пошуку і довірчих областей [147].

Ідея методу спуску по спряженим градієнтам полягає в тому, що похідна за цим напрямком дорівнює нулю. Спряжений напрямок вибирається таким чином, щоб ця похідна і далі залишалася нульовою – в припущенні, що поверхня має форму параболоїда. Якщо ця умова виконана, то для досягнення точки мінімуму достатньо буде N епох. На реальних, складних поверхнях по мірі руху алгоритму умова спряженості псується, і тим не менш такий алгоритм, як правило, вимагає набагато меншого числа кроків, ніж метод зворотного поширення, і дає кращу точку мінімуму (для того, щоб алгоритм

зворотного поширення точно встановився в деякій точці, потрібно вибирати малу швидкість навчання) [149].

Метод Левенберга-Маркара реалізує наступну стратегію для оцінки матриці Гессе. Алгоритм Левенберга-Маркара використовує апроксимацію гессіан такого вигляду:

$$x_{k+1} = x_k - (J^T J + \mu J)^{-1} J^T e \quad (4.9)$$

при μ рівному 0 вираз відображає метод Ньютонна, коли значення μ велике – метод градієнтного спуску з маленьким кроком. Оскільки метод Ньютонна має більшу точність і швидкість збіжності поблизу мінімуму, то завдання полягає в якнайшвидшому переході до методу Ньютонна. З цією метою параметр μ зменшують після кожної ітерації. Це найшвидший алгоритм навчання з усіх, які реалізовані в пакеті ST Neural Networks, проте його використання має ряд значних обмежень. Він застосовується тільки для мереж з одним вихідним елементом, працює тільки з функцією помилок суми квадратів і потребує чимало об'єму пам'яті, тому для великих мереж він поганий для застосування. Метод спряжених градієнтів не пов'язаний подібними обмеженнями.

Методу зворотного поширення слід віддати перевагу, коли обсяг даних великий, і серед них можуть надлишкові. Завдяки тому, що в методі зворотного поширення коригування помилки відбувається по окремих випадках, тому надмірність даних не шкодить. Методи ж Левенберга-Маркара і спряжених градієнтів проводять обчислення на всьому наборі даних, тому при збільшенні числа спостережень тривалість однієї епохи сильно зростає, але при цьому не обов'язково поліпшується результат, досягнутий на цій епосі [150].

Крім того, зворотне поширення не поступається іншим методам в ситуаціях, коли даних мало, оскільки в цьому випадку недостатньо даних для прийняття дуже точного рішення (більш тонкий алгоритм може дати меншу помилку навчання, але контрольна похибка у нього, швидше за все, не буде менша).

Кроки алгоритму називаються епохами. На кожній епосі на вхід мережі послідовно подаються всі навчальні спостереження, тобто набір значень

збурюючих впливів, що згенеровані методом Монте Карло, вихідні значення порівнюються з цільовими значеннями і обчислюється функція помилки. Значення функції помилки, а також її градієнта використовуються для коригування ваг і зміщень, після чого всі дії повторюються.

Процес навчання припиняється або по реалізації певної кількості циклів (епох), або коли похибка досягає деякого мінімального значення або перестає зменшуватися [151]. Нехай заданий багатошаровий персептрон з гладкою функцією активації (рис. 4.1).

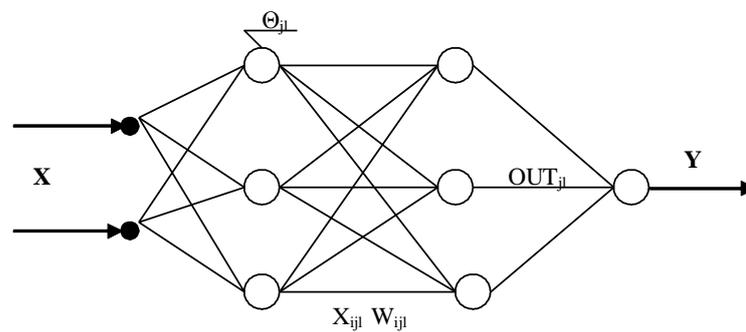


Рисунок 4.1 – Багатошаровий персептрон

Його робота задається рівняннями:

$$NET_{jl} = \sum w_{ijl} \cdot x_{ijl} - \theta. \quad (4.10)$$

$$OUT_{jl} = F(NE_{jl}). \quad (4.11)$$

$$x_{ij(l+1)} = OUT_{il}. \quad (4.12)$$

Приймаємо сумарну квадратичну помилку в якості цільової функції:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \sum_j \sum_s (y_j^s - d_j^s)^2 \quad (4.13)$$

Мережа задається вектором параметрів – набором вагових коефіцієнтів і порогових рівнів:

$$P = \begin{pmatrix} W \\ \Theta \end{pmatrix}, \quad (4.14)$$

де dW – вектор, компоненти якого являються всі вагові коефіцієнти мережі;

Θ – вектор порогових рівнянь мережі.

Таким чином, якщо вважати навчальну множину заданою, то помилка мережі залежить тільки від вектора параметрів: $E = E(P)$.

При навчанні на кожній ітерації коригуються параметри в напрямку антиградієнта E :

$$\Delta P = -\varepsilon \nabla E(P) \quad (4.15)$$

У теорії оптимізації доведено, що такий алгоритм забезпечує збіжність до одного з локальних мінімумів функції помилки, за умови правильного вибору $\varepsilon > 0$ на кожній ітерації. Тому кожна ітерація вимагає розрахунку компонент градієнта ∇E і вибору оптимального кроку ε . Використаний для цих цілей алгоритм зворотного поширення помилки являє собою спосіб прискореного розрахунку компонент градієнта. Ідея методу полягає в поданні E у вигляді складної функції і послідовно розрахувати часткові похідні для складної функції [152].

Запишемо вираз для вагових коефіцієнтів:

$$\Delta w_{ijl} = -\varepsilon \left(\frac{\partial E(W, \Theta)}{\partial w_{ijl}} \right)_{W, \Theta} \quad (4.16)$$

$$w'_{ijl} = w_{ijl} + \Delta w_{ijl} \quad (4.17)$$

Значення похідної розраховуються для поточних значень параметрів W, Θ на даному етапі навчання, w_{ijl} – значення ваги на певному кроці навчання, w'_{ijl} – значення ваги на наступному кроці навчання. Аналогічні корекції вводяться і для порогових рівнів.

Для вихідного шару компоненти градієнта можуть бути представлені як похідна складної функції:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ijl}} = \frac{\partial E}{\partial OUT_{jl}} \cdot \frac{\partial OUT_{jl}}{\partial NET_{jl}} \cdot \frac{\partial NET_{jl}}{\partial w_{ijl}} \quad (4.18)$$

де NET_{jl} – сигнал NET для j -го нейрона в вихідному шарі 1.

Аналогічно представимо похідну по пороговим значенням:

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_{jl}} = \frac{\partial E}{\partial OUT_{jl}} \cdot \frac{\partial OUT_{jl}}{\partial NET_{jl}} \cdot \frac{\partial NET_{jl}}{\partial \theta_{jl}}. \quad (4.19)$$

Для вихідного шару $y_i = OUT_{jl}$. Похідна функція помилки:

$$\frac{\partial E}{\partial OUT_{jl}} = \sum_s (y_j - d_j^s). \quad (4.20)$$

Похідна від зваженої суми за вагами:

$$\frac{\partial NET_{jl}}{\partial w_{ijl}} = \frac{\partial \left(\sum_i w_{ijl} \cdot x_{ijl} - \theta_{jl} \right)}{\partial w_{ijl}} = x_{ijl}. \quad (4.21)$$

Похідна від функції активації:

$$\frac{\partial OUT_{jl}}{\partial NET_{jl}} = \frac{\partial F(NET_{jl})}{\partial NET_{jl}}. \quad (4.22)$$

Похідна за пороговому рівню:

$$\frac{\partial NET_{jl}}{\partial \theta_{jl}} = -1. \quad (4.23)$$

Якщо $F(NET) = th(NET)$, то

$$\frac{\partial F(NET_{jl})}{\partial NET_{jl}} = 1 - F^2(NET_{jl}). \quad (4.24)$$

Величина $F(NET)$ являє собою поточне значення вихідного сигналу нейрона, тому значення похідної розраховується через значення сигналу OUT_{jl} :

$$\left. \frac{\partial F(NET_{jl})}{\partial NET_{jl}} \right|_{NET_{jl}} = (1 - OUT_{jl}^2) \Big|_{OUT_{jl}}. \quad (4.25)$$

Аналогічно розраховується похідна сигмоїди (функції Фермі):

$$F(NET) = \sigma(NET) = \frac{1}{1 + e^{-NET}}. \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial F(NET)}{\partial NET} = e^{NET} \left(\frac{1}{1 + e^{-NET}} \right)^2 = \frac{e^{-NET} + 1}{(1 + e^{-NET})^2} - \frac{1}{(1 + e^{-NET})^2} = \sigma(NET) \cdot (1 - \sigma(NET)) \quad (4.27)$$

$$\left. \frac{\partial F(NET_{jl})}{\partial NET_{jl}} \right|_{NET_{jl}} = OUT_{jl} (1 - OUT_{jl}) \Big|_{OUT_{jl}}. \quad (4.28)$$

Завдяки тому, що для сигмоїди і гіперболічного тангенса похідна розраховується через значення виходу нейрона, ці дві функції активації

найчастіше застосовуються в мережах, що навчаються методом зворотного поширення.

Логістична функція має такі характеристики як гладкість та безперервність. Безперервність першої похідної дозволяє навчати мережу градієнтними методами, методом зворотного поширення помилки. Функція симетрична щодо точки ($NET = 0$, $OUT = 1/2$), це робить рівноправним і значення $OUT = 0$ и $OUT = 1$, що є досить істотним в роботі мережі. Тим не менш, діапазон вихідних значень від 0 до 1 є несиметричним, тому навчання значно сповільнюється. Сигмоїдна (логістична) функція з вихідними значеннями в проміжку $[0,1]$ має вигляд:

$$\sigma(z) = (1 + e^{-z})^{-1} \quad (4.29)$$

z – вихідний сигнал нейрона дорівнює його потенціалу

Гіперболічний тангенс також часто застосовується для мереж з безперервними сигналами. Ця функція активації симетрична щодо точки $(0,0)$, що є перевагою в порівнянні з сигмоїдою. Похідна також безперервна і виражається через функцію:

$$th(z) = 2\sigma(2z) - 1 \quad (4.30)$$

σ – середньоквадратичне відхилення

У вхідних нейронах (прихованих шарах) може використовуватися тотожна функція активації, в якій сигнал на виході ШНМ повністю відповідає вхідному сигналу.

Значення похідних $\frac{\partial E}{\partial w_{ijl}}$ і $\frac{\partial E}{\partial \theta_{jl}}$ розраховані за формулами (4.21-4.28)

дозволяють вводити корекцію Δw_{ijl} і $\Delta \theta_{jl}$ для нейронів останнього шару.

Зробимо узагальнення результатів для всіх шарів:

для останнього шару:

$$\frac{\partial E}{\partial x_{ijl}} = \frac{\partial E}{\partial OUT_{jl}} \cdot \frac{\partial OUT_{jl}}{\partial NET_{jl}} \cdot \frac{\partial NET_{jl}}{\partial x_{ijl}} \quad (4.31)$$

вирази $\frac{\partial E}{\partial OUT_{jl}}$ і $\frac{\partial OUT_{jl}}{\partial NET_{jl}}$ були розраховані в (4.22), (4.24).

$$\frac{\partial NET_{jl}}{\partial x_{ijl}} = \frac{\partial \left(\sum_i w_{ijl} \cdot x_{ijl} - \theta_{jl} \right)}{\partial x_{ijl}} = w_{ijl}. \quad (4.32)$$

Але похідна по вхідному значенню x_{ijl} для останнього шару збігається з похідною по відповідному виході для попереднього шару:

$$\frac{\partial E}{\partial x_{ijl}} = \frac{\partial E}{\partial OUT_{j(l-1)}}. \quad (4.33)$$

Цей вираз забезпечує рекурсивний перехід від подальшого шару до попереднього і є аналогом виразу (4.18) для попередніх шарів. Наведений набір формул зворотного поширення дозволяє отримати значення компонент градієнта для всіх шарів і всіх нейронів у нейронній мережі пошуку оптимальних значень керуючих параметрів процесу сушіння торфу. Знаючи вектор градієнта, можна проводити навчання у вигляді ітерацій згідно з формулою (4.22). Розрахунок проводиться за рекурентними формулами і не вимагає перерахунку вихідних значень нейронів. Такий підхід дозволив скоротити обчислювальні витрати на розрахунок градієнта порівняно з розрахунками по визначенню градієнта.

Отже, для вирішення задачі знаходження оптимальних керуючих параметрів для певних збурюючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках необхідно побудувати та здійснити навчання (тренування) персепрона методом зворотного поширення, для більш вдалого навчання встановити велику кількість числа можливих епох (наприклад, близько 2000), так як тривалість епох при алгоритмі зворотного поширення менша ніж при інших алгоритмах, а функціями активації можуть бути логістична, гіперболічний тангенс та тотожна функція. В навчальну підвибірку даних слід включити обов'язково набір даних отриманих із виробничих експериментів, як такі які найкраще описують математичну модель енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

В тестову і контрольну ввійдуть дані отримані після генерування випадкових величин.

Для знаходження оптимальної структури нейромережі – необхідної кількості прихованих нейронів, функції активації прихованих та вихідних нейронів необхідно за допомогою автоматизованої стратегії для створення моделі нейронної мережі пакету Statistica Neural Network провести тренування сукупності моделей, що реалізують задачу знаходження оптимальних керуючих параметрів. Кількість мереж для навчання і кількість отриманих мереж для подальшого аналізу, що мають найменшу середньоквадратичну похибку (RMS) на контрольній вибірці користувач задає самостійно.

Для подальшого аналізу нейронних мереж необхідно задати в інтерфейсі програми побудови нейронних мереж вибір трьох кращих моделей з найменшим значенням RMS для кожної продуктивності сушарної установки. Для кожного виходу нейронної мережі будуємо діаграми залишків (Додаток И). За цією діаграмою можна простежити кількість наборів даних на тренувальній вибірці, виходи яких не відповідають цільовим значення взятими із моделі з певними відхиленнями за абсолютними значеннями. Ті мережі, що на тренувальній виборці мають найбільшу кількість викидів значень параметру виходу від нульових значень є найменш підходящими для вирішення задачі знаходження оптимальних керуючих факторів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках. В мережі MLP 8-5-3, побудованої для $X_1=3,5$ є 2 тренувальні вибірки, що мають відхилення параметра X_2 приблизно $(-0,2)$, три – $0,2$ та $(-0,15)$, чотири – $(-0,1)$, в MLP 8-12-3 – більше $|0,1|$ є лише одна тренувальна вибірка, для MLP 8-11-3 також одна вибірка із значенням більше $|0,1|$. Для параметра X_3 при $X_1=3,5$ в мережі MLP 8-5-3 спостерігаються 7 тренувальних вибірок більше значення $|1,0|$, в MLP 8-12-3 таких вибірок не було, а в MLP 8-11-3 – лише одна. Для параметра X_4 при $X_1=3,5$ в мережі MLP 8-5-3 за результатами її навчання є 8 вибірок, що мають відхилення більше $|0,05|$, в MLP 8-12-3 таких вибірок немає, а в MLP 8-11-3 тільки дві. Для нейронних мереж побудованих для значень параметру $X_1=3,5$, згідно з табл.

4.1, найкращу продуктивність навчальної та тестової вибірки має мережа MLP 8-12-3, на контрольній – MLP 8-5-3, похибки на навчальній та тестовій вибірці даних найменші в мережі MLP 8-12-3, на контрольній – в MLP 8-11-3.

Так як мережа MLP 8-12-3 при параметрі $X_1=3,5$ має найменшу кількість «викидів», тобто кількості вибірок, що мають значні відхилення від цільових значень виходів мережі та в загальному найкращі продуктивності та похибки вибірок, то для вирішення задачі знаходження параметрів X_2, X_3, X_4 найбільш доцільна саме дана мережа. Для параметра $X_1=4,5$ мережа MLP 8-10-3 згідно з діаграм залишків має 5 відхилень на тренувальній вибірці більше $|0,1|$ по абсолютному значенню за виходом X_2 , 3 відхилення більше $|1,0|$ за виходом X_3 , 2 – більше $|0,1|$ за виходом X_4 , мережа MLP 8-5-3 – 4 за виходом X_2 , 3 – за виходом X_4 більших $|0,1|$ та 5 за виходом X_3 більшим $|1,0|$.

Таблиця 4.1 – Результати побудови найкращих нейромереж для знаходження оптимальних параметрів X_2, X_3, X_4 при значенні керуючого впливу $X_1=3,5$; $X_1=4,5$; $X_1=2,5$ в пакеті програми Statistica Neural Network

	Назва мережі	Продуктивність тренувальної вибірки	Продуктивність тестової вибірки	Продуктивність контрольної вибірки	Похибка тренувальної вибірки	Похибка тестової вибірки	Похибка контрольної вибірки	Тренувальний алгоритм	Активіація прихованого шару	Активіація вихідного шару
При значенні керуючого впливу $X_1=3,5$										
1	MLP 8-5-3	0,991440	0,998473	0,990765	0,427886	0,089253	0,869717	BFGS 126	логістична	експонен.
2	MLP 8-12-3	0,9994	0,99977	0,95377	0,02001	0,00203	0,67407	BFGS 208	логістична	логістична
3	MLP 8-11-3	0,99855	0,99945	0,98557	0,03400	0,01006	0,24957	BFGS 114	тангенц.	експонен.

Продовження табл. 4.1

	Назва мережі	Продуктивність тренувальної вибірки	Продуктивність тестової вибірки	Продуктивність контрольної вибірки	Похибка тренувальної вибірки	Похибка тестової вибірки	Похибка контрольної вибірки	Тренувальний алгоритм	Активція прихованого шару	Активція вихідного шару
При значенні керуючого впливу $X_1=4,5$										
1	MLP 8-10-3	0,979644	0,992992	0,911165	0,137813	0,019554	0,334248	BFGS 48	логістична	експонен.
2	MLP 8-5-3	0,965887	0,630073	0,966342	0,462950	0,355768	0,107938	BFGS 44	тангенц.	експонен.
3	MLP 8-12-3	0,985601	0,915082	0,863469	0,105486	0,018865	0,837460	BFGS 54	логістична	експонен.
При значенні керуючого впливу $X_1=2,5$										
1	MLP 8-4-3	0,670258	0,033703	0,821227	5,884435	1,851211	2,011350	BFGS 10	логістична	логістична
2	MLP 8-8-3	0,992469	0,258916	0,843251	0,276900	6,380243	3,726783	BFGS 42	експоненц	тангенц.
3	MLP 8-15-3	0,989971	0,399430	0,850929	0,190858	0,181097	4,031000	BFGS 36	логістич.	тотожна

Найкращою ж мережею за даним критерієм для параметра $X_1=4,5$ являється MLP 8-12-3, яка сумарно має 9 вибірок які мають відхилення більші за $|0,1|$ по абсолютному значенню по виходам X_2 та X_4 та $|1,0|$ по виходу X_3 . За підсумками побудови нейромереж при роботі сушарної установки з параметром $X_1=4,5$ (табл. 4.1) кращою мережею також можна вважати MLP 8-12-3 так як вона має найкращу продуктивність по навчальній вибірці та найменші похибки тестової та тренувальної вибірки. Мережа MLP 8-5-3 має найкращі показники на контрольній підвбірці.

Для вирішення задачі знаходження оптимальних керуючих впливів X_2, X_3, X_4 при значенні $X_1=4,5$ також як і для $X_1=3,5$ вибираємо мережу MLP 8-12-3. По діаграмі залишків для нейромереж знаходження оптимальних параметрів X_2, X_3, X_4 при керуючому впливі $X_1=2,5$ викиди вибірок даних

будуть при величині абсолютного відхилення виходу параметра X_2 від оптимального значення на $[0,2]$, X_3 – на $[2,0]$, X_4 – на $[0,5]$. Мережа MLP 8-8-3 має найменшу загальну кількість таких відхилень – всього 4, MLP 8-15-3 – 6, MLP 8-4-3 – 54.

Згідно з даними табл. 4.1 мережа MLP 8-4-3 для вирішення поставленої задачі має найменшу із трьох мереж похибку на контрольній вибірці, MLP 8-8-3 – найкращу продуктивність по навчальній вибірці, MLP 8-15-3 – найкращу продуктивність на тестовій та контрольній вибірці, а також найменшу похибку на тренувальній та тестовій вибірці.

Так як мережа MLP 8-15-3 має незначну кількість викидів відхилень вибірок на тренувальній вибірці та хороші результати підсумків тренування мереж за даними табл. 4.1, то дану мережу вибираємо для вирішування поставленої задачі.

Як показують результати вибору найкращої моделі нейронної мережі, що здійснює пошук оптимальних керуючих параметрів процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння за певних збудуючих впливів при різних значеннях подачі торфу в парову трубчасту сушарку, за значеннями продуктивності і похибок на тренувальних, тестових та контрольних вибірках, кількість внутрішніх шарів нейронів становить 12 або 15 в залежності від подачі торфу з логістичними функціями активації нейронів, а у вихідному шарі слід застосовувати логістичну для значення параметру $X_1=2,5$ об/хв, експоненціальну для $X_1=3,5$ об/хв та тотожну для $X_1=4,5$ об/хв функції.

Отже, в середовищі програми Statistica Neural Network було знайдено структуру та архітектуру нейронних мереж які виконують задачу знаходження оптимальних керуючих впливів енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках в залежності від значень збудуючих впливів з найменшою похибкою.

4.3. Розробка методу розпізнавання і класифікація виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою за допомогою дискримантного аналізу

У реальних умовах здійснити швидку зміну існуючих значень керуючих впливів на оптимальні, що задовольняють умовам мінімуму споживання енергії та якості отриманої сушенки, не завжди можливо. Складність зміни керуючих впливів, які встановлені для торфу доставленого попередньою вагонеткою, на нові, пояснюється інерційністю процесу сушіння, оскільки швидка зміна одного з керуючих параметрів може привести до виходу неякісної сушенки, що знаходиться в барабані сушарки на момент переходу роботи сушарки на нові режимні параметри. Крім цього, трапляються випадки, коли, наприклад, температуру агента сушіння необхідно збільшити з 100 °С до 130 °С, а для торфу наступної вагонетки навпаки. Це в свою чергу призведе до збільшення витрат торфу на спалювання в котельнях, значні витрати часу на перехід до необхідних режимних параметрів роботи сушарки, і є досить складним для регулювання кількості подачі торфу необхідного для спалювання і температури сушильного агента зокрема.

Для зменшення впливу різкої зміни значень керуючих параметрів на процес сушіння при зміні збурюючих впливів необхідно проводити розпізнавання і класифікацію виробничих ситуацій і згідно з цим підбирати значення керуючих впливів [15]. Метою створення обчислювальних систем розпізнавання є автоматизація групи процесів сприйняття і пізнання, пов'язаних з пошуком, виділенням, ідентифікацією, класифікацією та описом ситуацій на основі аналізу реальних даних, отриманих тим чи іншим способом [153].

В якості критерію об'єднання ситуацій в класи можна використовувати витрати енергії для отримання сушенки необхідної якості. Тобто згідно значенню функції енергоспоживання, які вона приймає при відповідних значеннях збурюючих і керуючих впливах, ситуації можна класифікувати з найменш до найбільш енерговитратних.

В середовищі програми Microsoft Excel виробничі ситуації розбиваються на K класів за значеннями мінімальної витрати електричної енергії в процесі сушіння торфу за певних збурень і при деякому значенні параметра X_1 . Для умов торфобрикетного заводу «Сойне» ситуації було поділено на 4 класи. Для цього вибиралися мінімальні та максимальні значення витрат електричної енергії і в межах даного діапазону розділяють на 4 проміжки, що відповідали певному класові. Для кожного класу необхідно також зафіксувати діапазон зміни керуючих впливів X_2^* , X_3^* , X_4^* , де X_k^* – оптимальне значення k -того керуючого впливу. Результати аналізу представлені в Додатку К.

Постановка завдання – необхідно вирішити задачу класифікації виробничих ситуацій, в якій по навчальній вибірці $(F_{1i}, \dots, F_{8i}, X_{2i}^*, X_{3i}^*, X_{4i}^*; Y_{4i})$ ($i=1, 2, \dots, N$) необхідно відновити невідому функцію $f(F_1 \dots F_8, X_2 \dots X_4)$, якщо $f(F_{1i}, \dots, F_{8i}, X_{2i}^*, X_{3i}^*, X_{4i}^*) = Y_{4i}$ ($i=1, 2, \dots, N$), $f(F_{1i}, \dots, F_{8i}, X_{2i}^*, X_{3i}^*, X_{4i}^*) \in Y = \{1, 2, \dots, K\}$, де i – порядковий номер спостереження, N – кількість спостережень. Ситуації $F_{1i}, \dots, F_{8i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}$ розбиваються на $K=4$ класів, таких, що в K -му класі перебувають ситуації з вхідними збурюючими впливами $F_{1i}, \dots, F_{8i}, X_{2i}^*, X_{3i}^*, X_{4i}^*$ для яких $f(F_{1i}, \dots, F_{8i}, X_{2i}^*, X_{3i}^*, X_{4i}^*) = K$.

Розпізнавання, звичайно, пов'язують з двома функціями: віднесенням деякого об'єкта до невідомого класифікатору класу об'єктів та ідентифікації нового об'єкта як елемента відомого класифікатору класу [154]. Перша функція являє собою процес виділення нових класів, так звана, кластеризація, а друга – це власне розпізнавання. Центральна задача розпізнавання образів – побудова на основі систематичних теоретичних і експериментальних досліджень ефективних обчислювальних засобів для віднесення формалізованих описів ситуацій та об'єктів до відповідного класу.

Численні завдання оцінки стану об'єктів з метою його класифікації в техніці, економіці, медицині, соціології і т.п. вирішуються із застосуванням технології багатовимірного дискримінантного аналізу [155]. Мета дискримінантного аналізу полягає в тому щоб на основі вимірювання різних характеристик (ознак, параметрів) об'єкту, класифікувати його, тобто віднести

до однієї з декількох груп (класів) деяким оптимальним способом. Під оптимальним способом розуміється або мінімум математичного очікування втрат, або мінімум вірогідності помилкової класифікації. Сутність відповідної методики полягає в наступному. Об'єкт, приналежність якого до одного з двох класів необхідно визначити, характеризується набором вимірювань контрольованих параметрів. Відносно цих вимірів робляться такі припущення: по-перше, похибки всіх вимірювань розподілені нормально з відомими математичними очікуваннями; по-друге, дисперсії вимірювань однакові, незалежно від того, до якого класу належить об'єкт. Далі, в багатовимірному просторі контрольованих параметрів, будується так звана дискримінантна гіперплощина, що ділить цей простір на два підпростори. Коефіцієнти цієї гіперплощини відшукуються шляхом вирішення спеціальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Належність об'єкта до одного з двох класів визначається тим, в яке з підпросторів потрапляє вектор вимірювань параметрів об'єкта. Для вирішення завдання класифікації і розпізнавання виробничих ситуацій проведено розбиття множини об'єктів на K класів (при $K > 2$). У цьому випадку потрібно розрахувати K дискримінантних функцій, так як класи будуть відокремлюватися один від одного індивідуальними розподільними поверхнями.

Метою дискримінантного аналізу є розробка прийомів вирішення завдань розпізнавання (дискримінації) нових об'єктів шляхом порівняння величини їх ознак з аналогічними показниками вже досліджених кластерів. Таке порівняння дозволяє класифікувати нові об'єкти (ситуації), віднести їх в ті чи інші групи [155].

При наявності великих кореляцій між даними (наприклад, $R > 0.7$), навіть малі розміри вибірки (наприклад, $n = 50$) дозволяють в більшості випадків виявити ці кореляції. Проте, для отримання достовірних оцінок канонічних факторів (для інтерпретації), рекомендується використовувати як мінімум в 20 разів більше вибірок, ніж число змінних, що використовуються в аналізі [156]. Тому у випадку з проведенням дискримінантного аналізу виробничих ситуацій

енерготехнологічного процесу сушіння торфу необхідно застосувати весь набір даних отриманих в розділі 4.1.

Ознаки, які використовуються для того, щоб відрізнити один клас (підмножину) від іншого, називаються дискримінантними змінними. Кожна з цих змінних повинна вимірюватися або за інтервальною шкалою, або за шкалою відносин.

Кожна функція класифікації має наступний вигляд:

$$f_i = \sum_j a_{ij}x_j + a_0 \quad (4.34)$$

де f_i – i -а функція класифікації,

x_j – j -ий ефект плану,

a_{ij} – коефіцієнт i -ої функції класифікації при j -ом ефекті плану,

a_0 – вільний член.

Кожна одиниця спостереження вибірки характеризується кількома ознаками (змінними) x_{ij} – значення j -й змінної y_i -го об'єкту $i=1, \dots, N$; $j=1, \dots, p$. У випадку побудови функції класифікації для виробничих ситуацій енерготехнологічного процесу сушіння торфу x_{ij} – це значення змінних збудуючих та контрольованих впливів ($F_1, \dots, F_8, X_2, X_3, X_4$).

Всі множини ситуацій розбиваємо на кілька підмножин (два і більше). З кожної підмножини береться вибірка обсягом n_k , де k – номер підмножини (класу), $k=1, \dots, q$. Щоб найкращим чином розділити дві множини, потрібно побудувати відповідну лінійну комбінацію змінних x_1 і x_2 . Для двовимірного простору ця задача зводиться до визначення нової системи координат [157].

Коефіцієнти дискримінантної функції a_i визначаються таким чином, щоб $f_1(x)$ і $f_2(x)$ якомога більше різнилися між собою, тобто щоб для двох множин (класів) наступний вираз був максимальним:

$$\bar{f}_1(x) - \bar{f}_2(x) = \sum_{i=1}^{n1} a_i x_{1i} - \sum_{i=1}^{n2} a_i x_{2i} \quad (4.35)$$

де i – номер об'єкту

Тоді для множини класів можна записати наступне:

$$f_{kt}(x) - \bar{f}_k(x) = a_1(x_{1kt} - \bar{x}_{1k}) - a_2(x_{2kt} - \bar{x}_{2k}) + \dots + a_p(x_{pkt} - \bar{x}_{pk}) \quad (4.36)$$

де k – номер групи; p – число змінних, що характеризують кожне спостереження.

Позначимо дискримінантну функцію f_k як Y_{kt} (k – номер групи, t – номер спостереження в групі). Внутрішня групова варіація може бути виміряна сумою квадратів відхилень $\sum_{t=1}^{n_k} (Y_{kt} - \bar{Y}_k)^2$.

В обох групах це буде виглядати наступним чином:

$$\sum_{t=1}^{2k} (Y_{kt} - \bar{Y}_k)^2 = \sum_{k=1}^2 \sum_{t=1}^{n_k} [a_1(x_{1kt} - \bar{x}_{1k}) + a_2(x_{2kt} - \bar{x}_{2k}) \dots + a_p(x_{pkt} - \bar{x}_{pk})]^2 \quad (4.37)$$

У матричній формі цей вираз може бути представлений наступним чином:

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^{n_k} (Y_{kt} - \bar{Y}_k)^2 = A'(X'_1 X_1 + X'_2 X_2) A \quad (4.38)$$

де A – вектор коефіцієнтів дискримінантної функції;

X'_1 – транспонована матриця відхилень спостережуваних значень вихідних змінних від їх середніх величин в першій групі;

X'_2 – аналогічна матриця для другої групи.

У задачі класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій енерготехнологічного процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках бажано здійснити виділення ситуацій в більш ніж два класи (групи). Необхідну кількість груп позначимо m . Тоді функцію (4.38) можна представити у вигляді:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{n_k} (Y_{kt} - \bar{Y}_k)^2 = A'(X'_1 X_1 + X'_2 X_2 + \dots + X'_m X_m) A, \quad (4.39)$$

де

$$X'_1 = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n_1} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p,1} & x_{p,2} & \dots & x_{p,n_1} \end{pmatrix}; X'_2 = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n_2} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p,1} & x_{p,2} & \dots & x_{p,n_2} \end{pmatrix}; \dots$$

$$\dots X'_m = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n_m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p,1} & x_{p,2} & \dots & x_{p,n_m} \end{pmatrix};$$

Об'єднана матриця коваріації S_* визначається так:

$$S_* = \frac{1}{n_1 + n_2 + \dots + n_m - m} (X'_1 X_1 + X'_2 X_2 + \dots + X'_m X_m) \quad (4.40)$$

Отже, вираз (4.39) дає оцінку внутрішньогрупової варіації і його можна записати у вигляді:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{n_k} (Y_{kt} - \bar{Y}_k)^2 = A'[(n_1 + n_2 + n_m - m) \cdot S_*]A \quad (4.41)$$

Міжгрупова варіація може бути виміряна як

$$(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)^2 + \dots + (\bar{Y}_{m-1} - \bar{Y}_m)^2 = A'(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \cdot (\bar{X}_1 - \bar{X}_2)A + \dots + A'(\bar{X}_{m-1} - \bar{X}_m) \cdot (\bar{X}_{m-1} - \bar{X}_m)A \quad (4.42)$$

При знаходженні коефіцієнтів дискримінантної функції слід виходити з того, що для розглянутих об'єктів внутрішньогрупова варіація повинна бути мінімальною, а міжгрупова варіація – максимальною. У цьому випадку буде досягнуто найкращого поділу між групами, тобто необхідно, щоб величина F була максимальною:

$$F = A' \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \cdot (\bar{X}_1 - \bar{X}_2)A + \dots + A'(\bar{X}_{m-1} - \bar{X}_m) \cdot (\bar{X}_{m-1} - \bar{X}_m)A}{A'[(n_1 + n_2 + n_m - m) \cdot S_*]A} \quad 4.43)$$

У точці, де функція F досягає максимуму, часткові похідні по a_j будуть рівні нулю.

Отримані значення коефіцієнтів підставляють в формулу (4.34) і для кожної ситуації в обох групах (множинах) обчислюють дискримінантні функції, потім знаходять середнє значення для кожної групи. Таким чином, кожне i -е спостереження, яке спочатку описувалося m змінними, буде переміщене в одновимірний простір, тобто йому буде відповідати одне

значення дискримінантної функції, що відповідно знижує розмірність простору ознак.

Аналіз результату класифікації кожної виробничих ситуацій із набору за допомогою дискримінантного аналізу у відповідності з даними класифікатора розпочнемо з оцінки якості проведення класифікації. Головним критерієм на основі якого відбувається класифікація змінних в певні групи є відстань Маханалобіса [158]. Відстань Маханалобіса є мірою відстані, яку можна використовувати в багатовимірному просторі, визначеному змінними моделі. Для цього необхідно обчислити відстань між вибіркою і центром кожної сукупності (тобто центроїдом сукупності, визначеного відповідним середнім сукупності для кожної змінної). Чим ближче спостереження до центроїду групи, тим більшою мірою можна бути впевненим, що розглядаєма вибірка належить цій групі.

Вважатимемо, що x_1, \dots, x_k – випадкова вибірка, яка має багатовимірний нормальний розподіл ($N(\mu, \Sigma)$).

Тоді вибіркоче середнє і коваріаційна матриця мають відповідно вигляд:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad (4.44)$$

$$S = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x}) \quad (4.45)$$

Якщо x – деякий вектор спостережень, що має розподіл $N(\mu, \Sigma)$, то вибіркочий аналог величини $\chi^2 = (x - \mu)\Sigma^{-1}(x - \mu)$, що називається вибірковою відстанню Маханалобіса, задається формулою:

$$D^2 = (x - \bar{x})S^{-1}(x - \bar{x}) \quad (4.46)$$

Відстань від вектора $x = (x_1, \dots, x_N)$ до множини із середнім значенням $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_N)$ і матрицею коваріації S визначається як:

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu)S^{-1}(x - \mu)^T} \quad (4.47)$$

Відстань Маханалобіса також може бути визначено як міра відмінності між двома випадковими векторами з рівними розподілами:

$$d(x, y) = \sqrt{(x - y)S^{-1}(x - y)^T} \quad (4.48)$$

За даними квадрату відстані Махалобіса кожної вибірки до центру кожного з класів виробничих ситуацій, робиться висновок точності визначення приналежності певної вибірки до одного із чотирьох класів виробничих ситуацій.

Використовуючи для класифікації відстань Махаланобіса, можна отримати імовірність того, що зразок належить до конкретної сукупності. Це значення буде не цілком точним, так як розподіл навколо середнього значення для кожної сукупності буде не в точності нормальним. Так як приналежність кожного зразка обчислюється за апріорне знання модельних змінних, ці імовірності називаються апостеріорними імовірностями. Тобто, апостеріорні імовірності – це імовірності, обчислені з використанням знання значень інших змінних для зразків з часткової сукупності.

Апостеріорні ймовірності пов'язані з апріорними за такою формулою [159]:

$$P_{aposterior}(w_j) = \sum_{i=1}^k P(w_j/w_i)P_{aprior}(w_j) \quad (4.49)$$

де $P(w_j/w_i) = \sum_{x \in S_j} p_i(x)$, w_i – подія, « $x \in S_i$ », де S_i – множина елементів i -

групи.

Результати проведення дискримінантного аналізу класифікації виробничих ситуацій при значенні керуючого впливу $X_1=3,5$; $X_1=2,5$; $X_1=4,5$ в пакеті програми Statistica представлені в додатку Л. По даним додатку можна зробити висновок, що практично по кожній виробничій ситуації відстань Махаланобіса є найменшою відповідно для функції класу до якого дана ситуація повинна належати. Апостеріорна імовірність виробничої ситуації до необхідного класу під час роботи завантажувального пристрою із значенням $X_1=3,5$ становить по більшості вибірок більше ніж 90%, особливо це чітко помітно з розпізнаванням ситуації 3 класу, де по всіх вибірках спостерігається такий відсоток, а в першому класі більшість вибірок мають 100% відповідність класу. При роботі сушарної установки із значення $X_1=2,5$ апостеріорна

імовірність відношення виробничих ситуацій до необхідних класів оцінюється для класів з другого по четвертий від 70% до 95%, точність відношення до першого класу становить 100%. Найкраще класифікація виробничих ситуацій здійснюється для $X_1=4,5$, де апостеріорна імовірність приналежності всіх вибірок до необхідного класу становить 100%.

Також було оцінено точність проведення класифікації виробничих ситуацій за допомогою класифікаційної матриці, де вказано відсоткове значення точності класифікації ситуації відповідно до необхідного класу. Згідно з таблицями загальний відсоток відповідності класів виробничих ситуацій класам отриманим після проведення дискримінантного аналізу становить 91% для значення $X_1=3,5$, для $X_1=2,5$ – 99%, а для $X_1=4,5$ – 100%. У випадку коли апостеріорна імовірність класифікації здійсненої за допомогою дискримінантного аналізу у більшості випадків не відповідає би необхідному класу, або відповідає по більшості вибірках із значенням 50-55%; відстані Махалобіса були менші до класів які не відповідають тим які повинні бути згідно з проведенням класифікації по показнику мінімального споживання електричної енергії, а відсоток відповідності класів виробничих ситуацій класам отриманим після проведення дискримінантного аналізу становив низьким (наприклад, менше 75%), то розпізнавання та класифікація виробничих ситуацій потрібно здійснити за допомогою інших математичних апаратів, наприклад за допомогою нейронних мереж. Проте оцінка якості дискримінації та результатів проведення дискримінантного аналізу виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках показав необхідну точність приналежності виробничої ситуації до конкретного сукупності, що відповідає певному класу.

Найдені стандартизовані коефіцієнти канонічних змінних представлені в таблиці 4.2, а функції класифікації в табл. 4.3, 4.4.

Таблиця 4.2 – Стандартизовані коефіцієнти канонічних змінних відповідно при значеннях керуючих впливів $X_1=2,5$; $X_1=3,5$; $X_1=4,5$

Ефект	$X_1=2,5$			$X_1=3,5$			$X_1=4,5$		
	корінь 1	корінь 2	корінь 3	корінь 1	корінь 2	корінь 3	корінь 1	корінь 2	корінь 3
Вільний член	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F ₁	2,98	-0,64	-0,11	1,35	-7,19	-3,39	-8,65	2,72	1,85
F ₂	-2,69	0,35	0,65	-2,39	7,94	1,85	10,21	-4,05	-4,81
F ₃	-4,08	2,58	1,50	-0,91	-0,43	-1,25	-12,56	2,10	-1,91
F ₄	1,10	-0,88	0,18	0,82	7,80	3,34	28,13	-4,38	0,63
F ₅	4,51	-2,93	-1,53	1,91	0,67	1,42	42,63	-4,40	4,94
F ₆	-2,46	0,76	1,22	-0,78	4,31	1,11	16,32	-4,06	-3,33
F ₇	-2,60	1,76	0,91	-1,35	-3,71	-2,29	-23,26	2,85	-3,03
F ₈	1,78	-0,34	-0,10	0,84	-0,80	0,42	-14,92	1,74	-1,20
X ₂	-3,58	-1,00	-1,66	-0,75	-1,55	-0,04	-22,53	2,78	1,43
X ₃	-3,68	-1,25	-1,50	0,37	4,12	-0,23	-2,87	-0,58	0,34
X ₄	1,29	0,37	-0,13	-1,23	0,52	0,33	-3,43	-0,88	0,13

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнтів для функцій класифікації виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значеннях керуючих впливів $X_1=2,5$; $X_1=3,5$, отриманих за результатами проведення дискримінантного аналізу

Ефекти	$X_1=2,5$				$X_1=3,5$			
	1. p=0,07	2. p=0,09	3. p=0,42	4. p=0,42	1. p=0,07	2. p=0,09	3. p=0,42	4. p=0,42
Вільний Член	-87196	-88996	-89339	-89273	-656250	-658330	-659214	-663532
F ₁	-682,357	-590,207	-573,424	-576,659	-9918	-9918	-9920,1	-9952,1
F ₂	70,75283	66,05498	65,16128	65,2285	424,78	425,15	425,34	427,74
F ₃	-347,997	-435,43	-440,25	-434,504	-1705,5	-1699,8	-1698,6	-1696,6
F ₄	83,16267	130,5181	133,0582	128,128	13148	13132	13128	13163
F ₅	530,0742	723,6801	733,9228	720,617	12971	12952	12947	12938
F ₆	1302,379	1200,007	1187,654	1190,253	12199	12200	12202	12245
F ₇	-3403,97	-5044,25	-5121,24	-5005,24	-181229	-180921	-180844	-181074
F ₈	-664,441	-592,096	-578,54	-580,824	-8218,4	-8228,4	-8231,2	-8246,2
X ₂	3837,273	3676,194	3609,626	3607,79	-9493,6	-9471	-9461,9	-9474,7
X ₃	349,0444	334,67	328,4349	328,0761	771,01	770,26	769,88	772,18
X ₄	1640,103	1816,024	1877,824	1885,447	26639	26720	26754	26846

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнтів для функцій класифікації виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значеннях керуючих впливів $X_1=4,5$, отриманих за результатами проведення дискримінантного аналізу

Ефекти	$X_1=4,5$			
	1. $p=0,04$	2. $p=0,87$	3. $p=0,06$	4. $p=0,003$
Вільний Член	-1339162	-1189821	-1204032	-1071183
F_1	-18280,6	-17040,1	-17110,2	-15883,5
F_2	1495,683	1399,461	1404,976	1312,216
F_3	-17838,4	-16431,8	-16506	-15061,6
F_4	72263,52	66680,28	66949,63	61271,81
F_5	112090,7	103041,6	103456,4	94156,52
F_6	55867,21	51874,61	52077,85	48112,1
F_7	-951562	-875555	-879205	-801087
F_8	-51994,8	-47891,4	-48080,7	-43878,9
X_2	-79592,4	-73327,7	-73597,1	-67258,4
X_3	-2117,65	-1919,99	-1922,16	-1719,25
X_4	-55799,5	-50050	-50093,7	-44133,8

Отже, в результаті проведення дискримінантного аналізу було знайдено функції класифікації (дискримінантні функції), що дозволяють здійснити класифікацію виробничих ситуацій. Вибірki які знаходяться найближче до відповідної прямої дискримінантної функції належать цьому класу. Функції класифікації дозволяють з достатньою точністю класифікувати певну вибірку до необхідного класу про що свідчать результати розрахунку апостеріорної імовірності, відстані Махалобіса та аналіз класифікаційної матриці.

4.4 Формування методу проведення регулювання процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці торфу в енергоефективних режимах

Після проведення класифікації і розпізнавання ситуацій необхідно розробити процедуру здійснення регулювання процесу сушіння торфу і сформувавши процедуру вибору керуючих впливів для регулювання процесом сушіння згідно з відповідним класом. Тобто необхідно знайти набір значень керуючих параметрів X_k^{**} , що при даному значенні збурюючих впливів F_k

відповідав би певному класу ситуації (режиму роботи) $\{X_k^{**}; F_k\} \in K_n$, де $n=1\dots 4$, знайденому за умови визначення оптимальних значень керуючих впливів X_k^* при збурюючих впливах F_k , де k – номер параметра.

Алгоритм здійснення регулювання процесу наступний:

1. Перед запуском сушарної установки визначаються фізико-механічні властивості торфу ($N=1$, де N – номер виміру збурюючих впливів) з вагону торф якої спочатку подається в сушарку ($F_{1i}, F_{2i}, F_{3i}, F_{4i}, F_{5i}, F_{6i}, F_{7i}, F_{8i}$, де i -номер ітерації алгоритму встановлення значень оптимальних значень параметрів виробничих ситуацій). Потім оператором в залежності від поставлених цілей щодо продуктивності сушарної установки встановлюється необхідне значення параметра X_{1i} . За допомогою багатошарового перцептрона, що був розроблений в розділі 4.2 для вирішення задачі визначення оптимальних енергозберігаючих параметрів керуючих впливів в залежності від значень збурюючих впливів, визначаються необхідні значення параметрів X_{2i}^* , X_{3i}^* , X_{4i}^* , що i встановлюються на виробництві (X_{2i} , X_{3i} , X_{4i}). За допомогою проведеного дискримінантного аналізу встановлюється до якої найближче дискримінантної функції наближається дана виробнича ситуація і визначається клас ситуації K_i^* .

2. Виміри техніко-фізичних властивостей в даний час на торфобрикетному заводі “Сойне” здійснюються для кожного вагона. Хоча якість торфу на поверхні і внизу вагону може суттєво відрізнятись. Після здійснення нових вимірів $N=2$ ($F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}$) визначаються оптимальні енергозберігаючі значення керуючих впливів (X_{2i}^* , X_{3i}^* , X_{4i}^*) за допомогою штучних нейронних мереж та за допомогою дискримінантного аналізу проводиться визначення класу виробничої ситуації. Якщо клас нової виробничої ситуації K_{i+1}^* відповідає класу визначеному і встановленому для першого вагону торфу K_i^* , то встановлені на виробництві значення керуючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках залишаються незмінними X_{2i} , X_{3i} , X_{4i} і робота сушарної установки продовжується при цих значеннях. У випадку, коли виробнича ситуація не буде належати до класу

попередньої на виробництві ситуації, то необхідно здійснювати визначення керуючих впливів, що наближалися б до оптимальних і дозволили б отримати виробничу ситуацію відповідну визначеному новому класу ситуації.

3. Встановлення значення X_{4i+1} відповідно до значень необхідного класу. Згідно з Додатком А найбільше серед електричних машин споживає енергію димосос (згідно з показниками амперметра – електричний струм змінювався від 83,0 до 91 А). Саме із зміни даного параметра необхідно проводити перехід до необхідного класу виробничої ситуації. Тобто, необхідно встановити X_{4i+1} , яке найближче знаходиться до області необхідного класу K_{i+1}^* ($X_{4i+1} \in K_{i+1}^*$) відповідно до значень Додатку К.

4. При зміні витрати сушильного агента в сушарці необхідно визначити достатнє значення питомих витрат теплової енергії для підігріву сушильного агента q_2 так як змінилась питома витрата сухого повітря l . Відповідно до формули (2.8) визначаються питомі витрати теплоти на підігрів сушильного агента від вихідної температури t_0 до кінцевої t_2 та мінімально допустимими значеннями питомих витрат теплоти на випаровування q згідно з формулою (2.6). Для розрахунку мінімального значення q для енерготехнологічного процесу сушіння торфу необхідно знати значення параметрів $F_5, F_4, F_3, F_1, X_4, Y_1, Y_3, Y_5$. Так як значення збурюючих впливів вимірюються для кожної виробничої ситуації, параметр X_4 має значення відповідне X_{4i+1} . Значення Y_1 встановлене на максимально-допустимому; Y_5, Y_3 – на мінімально-допустимому рівні відповідно до вимог виробництва для отримання сушенки необхідної якості та пожежобезпеки при мінімальному значення q для енерготехнологічного процесу сушіння торфу. Здійснивши підстановку отриманих значень параметрів $F_{1i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, X_{4i+1}, Y_{1max}, Y_{3min}, Y_{5max}$ в рівняння (2.6)-(2.10), отримуємо значення q_{min} . За формулою (1.4) знаходиться значення мінімальної витрати теплової енергії Y_{8i} для виробничої ситуації $\{F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i+1}\}$.

5. З математичної моделі теплоспоживання отриманої за допомогою МГУА – $Y_8 = -364,4F_4 - 1022F_6 + 4107X_1 - 105X_3 + 2417X_4$ – можна отримати значення параметра X_3 :

$$X_3 = -3,47048F_4 - 9,73333F_6 + 39,11429X_1 + 23,01905X_4 - 0,00952Y_8 \quad (4.50)$$

Здійснивши підстановку значень F_{4i+1} , F_{6i+1} , X_{4i+1} , Y_{8i} , знаходиться значення керуючого впливу X_{3i+1} .

6. Встановлюється до якої найближче дискримінаційної функції наближається дана виробнича ситуація $\{F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}, X_{2i}, X_{3i+1}, X_{4i+1}\}$ і визначається клас ситуації K_{i+2} . Якщо клас K_{i+2} відповідає класу K_{i+1}^* , то для другого виміру фізико-механічних властивостей $N=2$ встановлюються значення керуючих впливів X_{2i} , X_{3i+1} , X_{4i+1} . Якщо ні, то необхідно змінити значення параметра X_2 .

7. Відповідно до даних додатку К, середнє значення параметра X_2 збільшується з 1 до 4 класу. Проте певне значення параметру X_2 може належать трьом і навіть чотирьом класам. Тому значення параметра X_{2i} може належати необхідному класу K_{i+1}^* ($X_{2i} \in K_{i+1}^*$) і не підлягає зміні. В такому випадку можливо підбирати значення X_{2i+1} з певним кроком в напрямку до середнього значення необхідного класу, наприклад збільшуючи або зменшуючи встановлене значення на 1-2%. Більш точне значення можна отримати здійснивши побудову математичної функції зміни значення параметра X_2 відповідно до значень збурюючих впливів F_k та оптимальних керуючих впливів X_3^* , X_4^* , при певному значенні параметра X_1 , $X_2 = f(F_k; X_3^*, X_4^*)$ за допомогою методів МГУА.

При значенні $X_1 = 2,5$:

$$X_2 = 18,0457 + 0,58F_3 + 0,1455F_4 + 0,1438F_8 - 0,1011X_3; \quad (4.51)$$

при значенні $X_1 = 3,5$:

$$X_2 = 0,0347X_3 + 0,2374X_4 - 0,751F_7 - 0,05432F_8; \quad (4.52)$$

при значенні $X_1 = 4,5$:

$$X_2 = 0,0351F_2 + 0,05646F_3 + 0,2931F_4 + 0,6645F_6 - 1,218X_4. \quad (4.53)$$

8. Після знаходження нового значення параметра X_{2i+1} необхідно для виробничої ситуації $\{F_{1i+1}, F_{2i+1}, F_{3i+1}, F_{4i+1}, F_{5i+1}, F_{6i+1}, F_{7i+1}, F_{8i+1}, X_{2i+1}, X_{3i+1}, X_{4i+1}\}$ визначити клас K_{i+2} . Якщо знайдений клас K_{i+2} відповідає необхідному класу K_{i+1}^* , то на виробництві встановлюються значення керуючих параметрів, що відповідають $X_{2i+1}, X_{3i+1}, X_{4i+1}$. Якщо ні, то алгоритм пошуку енергозберігаючих значень керуючих параметрів для певної виробничої ситуації необхідно продовжити.

9. Необхідно провести зміну значення параметра X_{4i+1} в напрямку до середнього значення відповідного класу з відповідним кроком. Так як зміна значення X_4 відбувається не широких межах, то крок можна вибрати невеликим – $\pm 0,001$.

10. Далі відповідно п.4-п.9 відбувається пошук необхідних значень $X_2^{**}, X_3^{**}, X_4^{**}$, що би відповідали необхідному класу K_{i+1}^* .

Даний алгоритм представлений на рис. 4.2.

В переліку показників енергоефективності згідно із ДСТУ 3755-98 приведено показник електромісткості та тепломісткості продукції (сушенки). Згідно із ДСТУ 2804, електромісткість продукції – відношення всієї електроенергії (в натурному вираженні), що споживається за рік, до річного обсягу продукції (в натурному, умовному або вартісному вираженні), яка виробляється підприємством. Тепломісткість продукції – відношення всієї теплоти (в натурному вираженні), що споживається за рік, до річного обсягу продукції (в натурному, умовному або вартісному вираженні), яка виробляється підприємством.

Згідно з додатком Н, економія електричної енергії за 8 годин роботи торфозаводу при управлінні процесом сушіння з використанням процедури класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій становить – 38,97 кВт·год. За одну годину в середньому економія буде на рівні $E_{er}=4,87$ кВт·год. Продуктивність сушарної установки на заводі «Сойне» становить $\Pi=18$ т/год. Енергомісткість продукції згідно із даними результатів вимірювання та знаходження оптимальних згідно процедури класифікації та розпізнавання

виробничих ситуацій контролюємих параметрів та параметрів енергоспоживання процесом сушіння торфу (додаток Н), зменшиться на – $E_e = \frac{E_{ег}}{\Pi} = \frac{4,87}{18} = 0,27$ кВт·год/т сушенки. За даними додатку Н, за одну годину в середньому економія теплової енергії становитиме $E_{тг}=453,24$ кДж, а тепломісткість виготовлення зменшиться на $E_t = \frac{E_{тг}}{\Pi} = \frac{453,2}{18} = 25,2$ кДж/т сушенки.

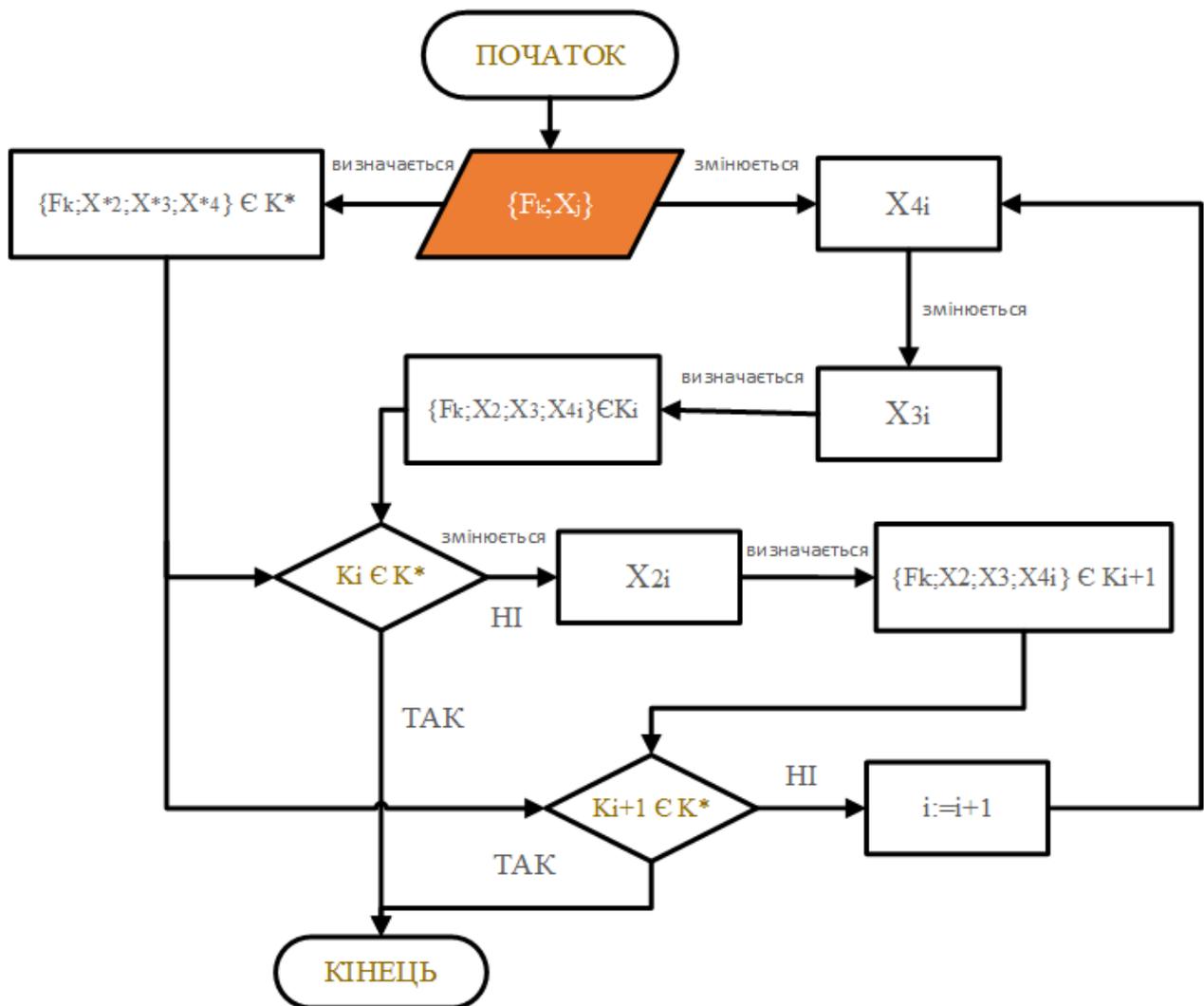


Рисунок 4.2 – Метод проведення регулювання процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці торфу в енергоефективних режимах

Наведений алгоритм пошуку плавно змінює умови сушіння торфу, що дозволяє контролювати отримання сушенки в певних допустимих межах,

зменшити вихід бракованої продукції, а сам процес відбуватиметься в енергозберігаючих режимах сушіння і відповідатиме нормам пожежобезпеки.

4.5 Аналіз структури системи автоматичного управління процесом сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах

Схеми регулювання енерготехнологічного процесу сушіння будуються переважно за параметрами сушильного агента або за параметрами матеріалу [160, 161]. Параметрами сушильного агента може бути температура або вологість повітря, а також середнє значення параметрів повітря в декількох точках простору сушарки [162]. Можливо також побудова схем регулювання з комплексним параметром, що враховує температуру теплоносія і його відносну вологість [163]. Вибір регульованого параметра визначається ступенем зв'язку останнього з вологістю матеріалу. Зміна витрати повітря через сушарку також може бути використана під час управління процесом, так як температурний режим в деякій мірі визначається витратою сушильного агента. Відомо декілька схем регулювання процесу сушіння торфу за непрямими параметрами (параметрами сушильного агента) [164].

В попередніх розділах було розглянуто завдання визначення енергозберігаючих режимів роботи за необхідної продуктивності сушарки по сушенці, тобто встановленій необхідній загрузці сушарки торфом. Крім того, управління завантаженням сушарки залежить від насипної щільності сушенки і кількості працюючих пресів. Тому зміну завантаження для системи стабілізації температурного режиму слід розглядати як збурюючий вплив, а не керуючий параметр.

З інших методів регулювань, застосованих для конвективних сушарок і для даного класу систем, слід зазначити комплексне регулювання шляхом зміни температури повітря на вході в сушарку [165] і подачі матеріалу. Для зміни температури повітря перед сушаркою встановлюється калорифер. Під час підвищення температури виконавчий механізм забезпечує збільшення кількості

подаваного вологого матеріалу. При зниженні температури датчик температури подає сигнал на збільшення кількості подаваного в калорифер теплоносія. Управління перемикачем каналів виробляються за знаком зміни температури. Цей метод, на думку авторів [166], дозволяє інтенсифікувати процес сушіння і підвищити продуктивність сушарок.

В якості вихідних (контрольованих) параметрів можуть бути використані параметри матеріалу (вологість і температура) [167], сушильного агента на виході з сушарки (температура й вологість) і комплексний параметр. Більшість систем працюють за вологістю кінцевого продукту, тому що остання є безпосереднім показником що характеризує якість продукції.

На торфобрикетному заводу "Усвік-Бук" (Республіка Білорусь) свого часу була створена більш проста схема регулювання енерготехнологічного процесу сушіння торфу в сушарці аналогічного типу [168]. За основу під час побудови системи було прийнято два фактори: температура пари та час перебування торфу в трубках сушильних корпусів. Основним з них, на думку автора, є теплове напруження трубок сушарок, так як час перебування торфу в останніх практично є незмінним. Для підтримки стабільного теплового напруження необхідно подавати в сушарку таку кількість теплоти, яка забирається торфом, що проходить через сушарку. Подача кількості теплоти в сушарку залежить від витрати, тиску і тепловмісту пари, що подається в сушарку, оскільки його температура є постійною і становить 160°C.

Для мінімізації витрат енергії на процес сушіння потрібно визначити необхідну кількість теплоти (кДж) для сушіння торфу певних фізико-механічних властивостей до якісної характеристики сушенки і подавати в сушарку насичену пару з необхідним тиском і температурою.

Фактичне значення витрат теплової енергії повинно бути в межах мінімального та максимального значення, методика визначення яких представлено в п.3 розділу 3. Якщо у разі зміни збурюючих впливів (температури, вологості, зольності торфу тощо) витрати теплової енергії менші за мінімальне або більші за максимальне значення, то необхідно збільшити або

зменшити подачу теплової енергії в сушарку та (або) витрату повітря через сушарку. Якщо в сушарку подається необхідна тепла енергія, то подальшу компенсацію впливів збурюючих впливів можна компенсувати зміною частоти обертання барабана.

Згідно з проведеним аналізом можливих каналів управління енерготехнологічного процесу сушіння торфу вихідну структуру САР сушарки Цемаг можна представити у вигляді двох контурів – контур контролю і регулювання витрат теплової енергії та контур регулювання швидкості обертання барабана сушарки. Схема представлена на рис. 4.3.

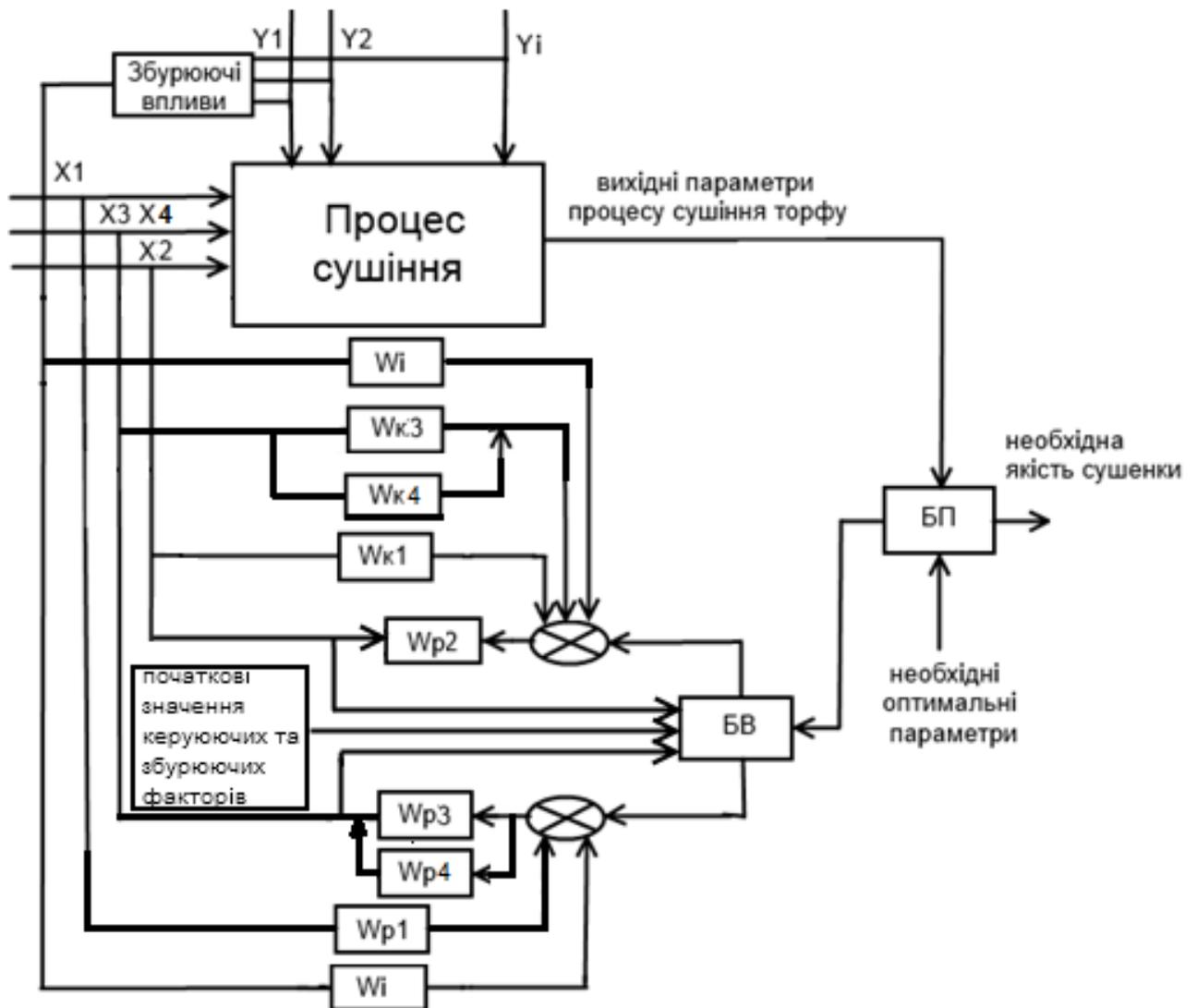


Рисунок 4.3 – Структурна схема САР енерготехнологічного процесу сушіння торфу в сушарці Цемаг, де X_1 – швидкість обертання шнека завантаження торфу в барабан сушарки, X_3 – витрата пари через сушарку, X_4 –

витрата пари через сушарку, X_2 – швидкість обертання барабана сушарки, $Y_1, Y_2 \dots Y_i$ – значення збурюючих впливів процесу сушіння торфу (вологість, температура, вологорізниця, насипна щільність торфу тощо), W_{p1} – регулятор швидкості обертання шнека завантаження торфу в барабан сушарки, W_{p3} – регулятор витрати пари через сушарку, W_{p4} – регулятор витрати повітря через сушарку, W_{p2} – регулятор швидкості обертання барабана сушарки, W_i – передаточні функції i -тої кількості збурюючих впливів, W_{k1} – коректуюча функція швидкості обертання шнека завантаження торфу в барабан сушарки в каналі регулювання швидкості обертання барабана сушарки, W_{k3} , W_{k4} – коректуючі функції витрати пари та витрати повітря через сушарку відповідно в каналі регулювання швидкості обертання барабана сушарки, БП – блок порівняння, БВ – блок вибору.

Виміряні дані характеристик торфу (вологість, зольність, насипна щільність, температура) та керуючих впливів подаються на вхід блоку вибору (БВ) каналу регулювання енерготехнологічного процесу сушіння. Якщо обчислене значення витрат теплової енергії не лежить в межах максимальної та мінімальної витрат теплоти, то сигнал управління процесом сушіння направляється на канал керування витрати пари.

Нове значення витрат пари (X_3) та витрати повітря (X_4) направляється в БВ і якщо воно задовольняє умові необхідної кількості теплоти для сушіння торфу, то БВ переключає сигнал на управління швидкістю обертання барабана. Управління завантаженням сушарки (X_1) визначається необхідною продуктивністю заводу і як вказувалось вище в системі автоматичного управління процесом сушіння є збурюючим впливом. Канал управління швидкістю обертання барабана встановлює необхідну швидкість оборотів (X_2) для отримання енергоефективного режиму сушіння, що задовольняє вимогам по якості сушенки та пожежобезпеці згідно з мінімальними показниками математичної моделі енерготехнологічного процесу сушіння отриманої за допомогою методу індуктивного моделювання [19]. Вихідні параметри процесу сушіння в системі управління можна порівняти із необхідними оптимальними

значеннями в блоці порівняння (БП). Якщо вихідні значення процесу сушіння торфу відповідають розрахованим оптимальним (згідно з алгоритмом визначенням значень керуючих параметрів під час розпізнавання виробничих ситуацій), то процес сушіння і надалі відбувається з встановленими значеннями керуючих впливів, якщо ні, то сигнал керування подається на вхід БВ, після чого відбувається зміна керуючих впливів відповідно до наведеного вище алгоритму [169].

Отже, керуючими факторами енерготехнологічного процесу сушіння які можуть бути використані для побудови САР процесу сушіння за комплексним параметром енергоефективності та якості отриманої на виході із сушарки сушенки є витрати пари та витрата повітря через сушарку, а також швидкість обертання барабана. Розроблена структура та алгоритм САР процесу сушіння торфу дозволить реалізувати енергоефективні режими роботи сушарки Цемаг, що полягає у підтриманні подачі теплоти в сушарку на необхідному рівні і компенсацію інших збурюючих впливів зміною швидкістю обертання барабана за мінімальних витрат електричної енергії.

4.6. Апаратна реалізація процесу регулювання роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу в енергоефективних режимах

Систему регулювання процесом сушіння торфу в парових трубчастих сушарках з використання нейронних мереж в режимі реального часу можна реалізувати як в програмованих логічних контролерах, так і в нейрообчислювальних системах. Найбільш важкою в реалізації системи регулювання є нейронна мережа, так як при їх реалізації необхідно створити механізм реалізації функцій активації та методів навчання.

Елементною базою нейрообчислювальних систем є кристали (ASIC), вбудовувані мікроконтролери, процесори загального призначення (ПЗП), програмована логіка (FPGA — ПЛІС (програмовані логічні інтегральні схеми), трансп'ютери, цифрові сигнальні процесори (DSP) і нейрочіпи [170-173]. Використання будь-яких з них дозволяє сьогодні реалізувати

нейрообчислювачі, що функціонують в реальному масштабі часу, проте найбільше використання при реалізації нейрообчислювачів знайшли ПЛІС, DSP, нейрочіпи [174]. Під час розробки нейромережевого алгоритму, як і будь-якого іншого обчислювального алгоритму, головними факторами оцінки його ефективності є його точність і час за який він виконується. Останній фактор не завжди важливий при вирішенні простих завдань, однак при орієнтації на складні завдання реального часу швидкість обчислення стає критичною. Використання універсальних процесорів для виконання нейромережевого алгоритму неефективно з точки зору порівняння продуктивності та вартості, оскільки для складних завдань розміри нейронної мережі значні, а розрядність вхідних сигналів і ваг, як правило, не збігається зі стандартом універсального процесору (на даний момент це 32 біт).

До основних переваг апаратної реалізації ШНМ перед програмним виконанням можна віднести швидкість (збільшується за рахунок апаратної реалізації паралельних обчислень), надійність (ймовірність відмови апаратури менше вірогідності збою програми), безпеку (в плані захисту авторських прав) і додаткові режими експлуатації. Що стосується апаратної реалізації нейронних мереж на ПЛІС, то вона відрізняється від реалізації на спеціальних DSP-процесорах (оскільки вони випускаються серійно) і від реалізації на ASIC-мікросхемах (оскільки вони не підлягають переконфігурації). Аналіз засобів реалізації нейрочіпів показав перспективність їх реалізації на базі ПЛІС, що зумовлено високою інтеграцією, можливістю модифікації структури, значною кількістю виводів ПЛІС, розвинутою структурою взаємозв'язків, підвищеною швидкістю обміну між кристалами [175]. В [176] показано, що програмована логічна інтегральна схема володіє значною гнучкістю щодо перепрограмування та високою швидкодією завдяки паралельній виконання даних алгоритмів. ПЛІС найбільш точно реалізовує паралельну архітектуру нейронів і надає можливість гнучкої реконфігурації всієї нейронної мережі і її складових – штучних нейронів. Так само ПЛІС – це порівняно доступні схеми невеликої

вартості, що дозволяє швидко і недорого реалізувати всю систему. Крім того, конфігурацію побудовану на ПЛІС нейронних мереж легко змінити.

Велика кількість вентилів ПЛІС дозволяє реалізувати багато фізично паралельно працюючих нейронів, обмін даними між якими може здійснюється всередині ПЛІС. Канали зв'язку між логічними елементами та внутрішньою пам'яттю ПЛІС мають хорошу швидкісну характеристику. Висока тактова частота роботи ПЛІС, паралельність функціонування логіки з хорошими внутрішніми і зовнішніми каналами передачі даних сприяє високій швидкості обчислень для безлічі реалізованих паралельно функціонуючих нейронів [177, 178]. Все це у сукупності дозволяє створити на базі ПЛІС закінчений, досить регулярний фрагмент нейронної мережі, побудувати нейронні мережі довільної конфігурації і складності та реалізувати алгоритм дискримінантного аналізу, що застосовується для класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій.

Для реалізації моделі MLP на пристроях FPGA було використано нейрон за допомогою таблиці відповідності з паралельною архітектурою реалізації зворотного поширення на мові програмування VHDL. Число бітів на входах та виходах сигмоподібної функції повинно бути в одному діапазоні, щоб легко керувати кількома шарами обробки (зазвичай 8 і 16 біт). Входи для функції активації визначає LUT, що зберігає необхідні значення. Всі входи, виходи і пов'язані з ними ваги зберігаються в модулях пам'яті (RAM).

Функціональна структура системи управління енерготехнологічним процесом сушіння торфу в енергоефективних режимах зображена на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Функціональна структура системи управління енерготехнологічним процесом сушіння торфу в енергоефективних режимах

Реалізація MLP та процедури класифікації та розпізнавання виробничих ситуації процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках була здійснена на чіпі FPGA фірми Altera Cyclone IV (рис 4.5).

В подальшому для покращення контролю регулювання енерготехнологічного процесу сушіння в енергоефективних режимах система автоматичного управління може бути реалізована з використанням програмованого логічного контролера (ПЛК) SIEMENS SIMATIC та чіпа FPGA фірми Altera Cyclone IV, що реалізує принцип роботи перцептрона та процедуру класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій.



Рисунок 4.5 – Апаратна платформа з чіпом FPGA фірми Altera Cyclone IV на якій реалізовано принцип роботи перцептрона та процедура класифікації та розпізнавання виробничих ситуації процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

Поєднання використання нейронної мережі та ПЛК може бути описано блок-схемою, що показано на рис. 4.6, де ПЛК здійснює функції вимірювання та контролю параметрів роботи парової трубчатої сушарки. Основні дані про характер ведення процесу можуть бути передані до чіпа (платформі FPGA), що реалізує процедуру проведення регулювання процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці торфу в енергоефективних режимах.

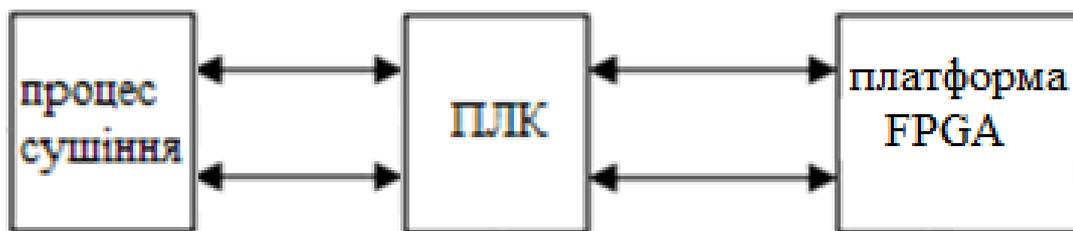


Рисунок 4.6– Структурна блок-схема взаємодії ПЛК та чіпа на платформі FPGA

Функціональна схема керуванням енерготехнологічним процесом сушіння торфу в енергоефективних режимах зображена на рис. 4.7.

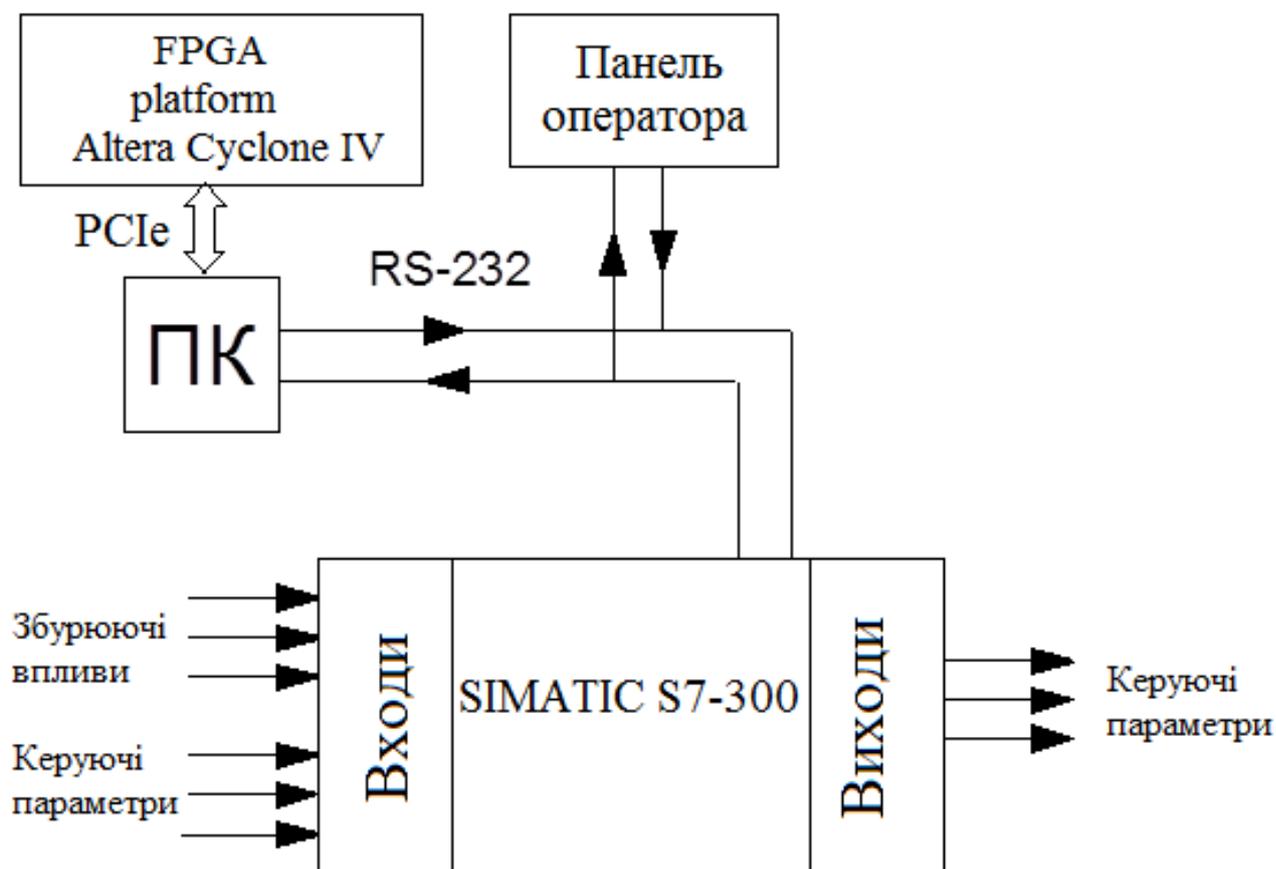


Рисунок 4.7 – Функціональна схема керуванням енерготехнологічним процесом сушіння торфу в енергоефективних режимах

Основною функцією ПЛК буде збір даних по збурюючим впливам та керуючим параметрам, встановленні та контролюванні на необхідному, визначеному за допомогою програмованих логічних інтегральних схем

значеннях контрольних параметрів. Значення передавальних функцій та коефіцієнтів ПІД-контролера безпосередньо для енерготехнологічного процесу сушіння торфу в сушарках на заводі «Сойне» не досліджувались та не визначались. В подальшому необхідно здійснити визначення значення параметрів передатних функцій та встановити коефіцієнти ПІД-контролера для роботи енерготехнологічного комплексу процесу сушіння торфу в енергоефективних режимах, що визначаються за допомогою програмованих інтегральних схем.

До складу програмованого контролера SIMATIC S7-300 для керування значень параметрів енерготехнологічного процесу сушіння торфу в енергоефективних режимах повинні ввійти:

CPU – модуль центрального процесору;

PS – блоки живлення контролера від мережі змінного або постійного струму;

SM – сигнальні модулі, призначені для вводу та виводу дискретних і аналогових сигналів і модулі з вбудованими Е_x-бар'єрами;

CP – комунікаційні процесори, що виконують автономну обробку завдань в мережах PROFIBUS;

FM – функціональні модулі для організації модемного зв'язку, оснащені вбудованим мікропроцесором і можуть виконувати завдання автоматичного регулювання та швидкісного рахунку. У разі зупинки ЦП, функціональні модулі здатні продовжувати виконання завдань;

IM – інтерфейсні модулі для підключення стійок розширення до базового блоку контролера.

Логіка виконання алгоритмів системи регулювання процесу сушіння торфу в енергоефективних режимах, що реалізує принцип роботи структурної схеми САР процесу, зображеної на рисунку 4.3, може бути реалізована в програмному середовищі SIMATIC STEP 7 на мові програмування ST.

Отже, процедура регулювання процесу сушіння торфу в паровій трубчастій сушарці торфу в енергоефективних режимах реалізована за рахунок

програмування чіпа Altera Cyclone IV з програмованою вентиляційною матрицею (FPGA) на мові VHDL, а автоматична система може бути побудована – з використанням ПЛК SIEMENS SIMATIC, що контролює перебіг процесу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Розроблено алгоритм пошуку випадкових величин збурюючих факторів для збільшення кількості набору даних, необхідних для тренування нейронних мереж за допомогою методу Монте Карло, що дозволив отримати набір зі 100 даних збурюючих впливів та відповідних їм оптимальних значень керуючих впливів, що, в свою чергу, дозволяє здійснювати регулювання процесу в енергоефективних режимах та отримати сушенку необхідної якості.

2. Запропоновано структуру та проведено навчання нейронних мереж з найкращою якістю відтворення даних на тренувальній та тестовій вибірці моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу, де як вхідні параметри застосовано значення збурюючих впливів, а як вихідні – оптимальні енергоефективні значення керуючих параметрів та проведено їх навчання. Для нейронної мережі процесу сушіння торфу при значенні керуючого впливу $X_1=3,5$ вихідною функцією активації нейронів вибрати логістичну функцію; при $X_1=2,5$ – експоненціальну, а при $X_1=4,5$ – лінійну, а в прихованих шарах для всіх нейронних мереж вибрано логістичну функцію.

3. Розроблено класифікацію та знайдено дискримінантні функції для розпізнавання виробничих ситуацій з метою визначення меж регулювання кожного з керуючих параметрів у межах знайденої групи. Регулювання керуючих параметрів у межах відповідно до класу ситуації, до якої вони належать, дозволило зменшити вплив різкої зміни збурюючих впливів на енерготехнологічний процес сушіння і збільшити вихід сушенки з високими якісними показниками.

4. Розроблений ітераційний алгоритм пошуку значень керуючих параметрів з найменшою їх зміною, що відповідають необхідним класам виробничих ситуацій дозволив здійснити плавний перехідити від одного класу виробничих ситуацій до іншого.

Основні положення даного розділу опубліковані автором дисертаційної роботи в [15, 21, 22, 167].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу розроблення методу підвищення ефективності використання енергоресурсів комплексу сушіння торфу шляхом регулювання процесу в певних енерготехнологічних режимах за мінімальної витрати теплової та електричної енергії з обмеженнями щодо якості сушенки та пожежобезпеки виробництва.

Основні висновки і результати полягають у наступному:

1. Аналіз факторного поля енерготехнологічного комплексу сушіння торфу, що є складовою процесу оптимізації виробництва, який впливає на режим роботи, показав, що існує понад 30 факторів, які впливають на процес сушіння та дозволив виділити вектори регульованих, збурюючих впливів і цільових параметрів моделі процесу. Для зменшення числа факторів та виділення найбільш вагомих з них, що впливають на техніко-економічні показники процесу, застосовано метод експертного оцінювання.

2. Розроблений план активних виробничих експериментів забезпечив проведення мінімально-необхідної кількості дослідів в умовах торфобрикетного виробництва, з урахуванням меж змін факторів, встановлених відповідно до режимної карти процесу сушіння, що дозволило отримати достатню кількість даних для побудови математичної моделі енерготехнологічного процесу сушіння торфу.

3. У роботі отримано цільові функції математичної моделі роботи енерготехнологічного комплексу сушіння торфу за допомогою методів індуктивного моделювання, що дозволило виключити з кожної із функцій фактори, що практично не спричинюють впливу на вихідний параметр. Відбір факторів для математичної моделі дозволив знайти модель оптимальної складності, для якої перенавчання мінімальне, та дозволив зменшити загальну похибку моделі, оскільки кожна ознака має свою вимірювальну похибку. Для вирішення задачі розроблено процедуру вибору адекватної математичної моделі процесу, знайденої за певним алгоритмом навчання методу еволюції груп адаптивних моделей штучного інтелекту, що дозволяє знайти оптимальні

значення керуючих параметрів процесу сушіння для забезпечення роботи сушарної установки в енергоефективних режимах.

4. Розроблено багатомірну оптимізаційну модель споживання енергії, що дозволяє здійснювати знаходження енергоефективних режимів сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою за фактичних фізико-механічних властивостей торфу, з дотриманням вимог щодо якості сушенки та забезпечення пожежобезпеки. Для мінімізації споживання енергії в процесі сушіння запропоновано спочатку здійснювати визначення мінімальної необхідної кількості теплоти для сушіння торфу певних фізичних і механічних властивостей, а потім знаходити оптимальні за критерієм енергоефективності значення регульованих параметрів із використанням електроспоживання в якості цільової функції, а функції теплоспоживання, якості сушенки та забезпечення пожежобезпеки як обмежень до даної функції.

5. Розроблена нейронна мережа знаходження енергоефективних значень керуючих параметрів процесу сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою, що дає можливість оперативного визначення оптимальних за енергоефективністю значень всіх регульованих параметрів у режимі реального часу. Знайдені мережі моделей мають найменші середньоквадратичні похибки на контрольній, тестовій та тренувальних вибірках та оптимальні значення продуктивностей. введено класифікацію виробничих ситуацій за значеннями мінімального споживання електричної енергії, визначено дискримінантні функції для розпізнавання існуючої в певний момент сушіння ситуації та віднесення її до необхідного класу і запропоновано алгоритм здійснення керування процесом сушіння торфу в енерготехнологічному комплексі сушіння з паровою трубчастою сушаркою в енергоефективних режимах в межах відповідного класу, що дозволило зменшити кількість неякісної сушенки на виході процесу сушіння. Керування за розробленим алгоритмом дозволило зменшити електромісткість сушенки на понад 0,3 кВт·год/т сушенки, а тепломісткість на 25 кДж/т сушенки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковалко М. П. Енергосбереження – пріоритетний напрямок державної політики України [Текст] / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк. – К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
2. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс]: [Затверджено Розпорядженням Кабінета Міністрів України від 15.03.2006 р. № 145-р.]. – К., 2006. – 129 с. – Режим доступу: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/archive/docview?typeId=44577>. – Назва з екрана.
3. Микитенко В. В. Енергоефективність промислового виробництва / В. В. Микитенко – К.: Об'єднаний інститут економіки НАН України, 2004. – 282 с.
4. Енергетична стратегія України: реалії та перспективи. Матеріали круглого столу. – Верховна Рада України. Комітет з питань паливно-енергетичного комплексу, ядерної політики та ядерної безпеки, 2004. – 68 с.
5. Васильченко В. В. Екологічні аспекти енергозбереження в Україні [Текст] / В. В. Васильченко. // Енергозбереження в Україні. – 1997. – С. 7–8.
6. Голубець М. А. Фундаментальні проблеми екології в контексті сталого розвитку [Текст] / М. А. Голубець. // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1997. – С. 6-9.
7. Резолюцією про виклики, потенційній і новій участі у співпраці з питань енергетичної ефективності та поновлюваних джерел енергії в «Східному партнерстві» [Електронний ресурс]: [Затверджено Парламентською асамблеєю «Євронест» від 17.03.2015]. – 11 с. – Режим доступу: http://www.euronest.europarl.europa.eu/euronest/webdav/site/mySite/shared/general_documents/fourth_ordinary_session_2015/resolutions/ENERGY_4thEuronestPA_RU.pdf. – Назва з екрана.
8. EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) [Електронний ресурс]: Second edition with revisions in the introduction, checklist, chapters I.2-I.5, section

II.1.2, chapter II.6 and Annex A. – Brussels, May 2013 – P. 107 – Режим доступу: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf>. – Назва з екрана.

9. Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки [Електронний ресурс]: [Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 (№243)]. – 38 с. – <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF>. – Назва з екрана.

10. Словник української мови: в 11 т. / [ред. колег. І. К. Білодід (голова) та ін.]. – К.: Наукова думка, 1970 – 1980.

11. Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы. – Сборник под редакцией д.т.н. Л.В. Лысенко. – М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 190 с.

12. Гнеушев В. О. Брикетування торфу [Текст]: монографія / В. О. Гнеушев. – Рівне: НУВГП, 2010. – 167 с.

13. Розен В. П. Розробка алгоритму побудови факторного поля процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках / В. П. Розен, Л. Я. Кулаковський. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – Вип. 3 – С. 63-68.

14. Чернявський А. В. Виділення сукупності факторів впливу на енергетичні та якісні показники процесу сушіння піску в сушарці барабанного типу / А. В. Чернявський, О. М. Проскуріна, Л. Я. Кулаковський. // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк. – 2014. – Вип. №1 (16). – С.231-238.

15. Кулаковский Л. Я. Повышение энергоэффективности процесса сушки торфа в паровых трубчатых сушилках с помощью распознавания и классификация производственных ситуаций / Л. Я. Кулаковский, Е. И. Алтухов, В. П. Розен. // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции. Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. – С. 228-230.

16. Кулаковський Л. Я. Формування факторного поля для експериментальних досліджень парової трубчатої сушарки торфу / Л. Я. Кулаковський, Є. І. Алтухов. // Вісник НТУУ «КПІ». – 2014. – Вип. 1. – С. 34–41. – (Серія : Гірництво).

17. Кулаковський Л. Я. Планування виробничих експериментів для багатофакторного дослідження технології сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / Л. Я. Кулаковський, Є. І. Алтухов. // Енергетика та системи керування : матеріали III Міжнар. наук. конф. молодих вчених ERECS-2013. – Львів : Львівська політехніка, 2013. – С. 70-72.

18. Розен В.П. Розробка методики визначення факторного поля процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / В. П. Розен, Л. Я. Кулаковський. // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції “Енергетична безпека навколишнього середовища” – Луцьк: РВВ Луцького національного технічного університету, 2013. – С. 24-26.

19. Кулаковський Л. Я. Знаходження за допомогою МГУА математичної моделі процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / Л. Я. Кулаковський, В. П. Розен. // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об’єктів. Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів: 17-18 жовтня 2013 р., м. Донецьк: «ДВНЗ» ДонНТУ, 2013. – С. 131-134.

20. Розен В. П. Алгоритм вибору методу навчання нейромереж типу GAME для побудови математичної моделі процесу сушіння торфу в сушарках Цемаг / В. П. Розен, Л. Я. Кулаковський. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – Вип. №. 4. – С. 53-60.

21. Kulakovskiy L. Optimal Operation of the Peat Drying Process in Steam Tube Dryers / Leonid Kulakovskiy, Victor Rosen, Roshan Sharma, Carlos Pfeiffer, Bernt Lie // Linkoping University Press. – 2015. – P.31-41.

22. Кулаковський Л. Я. Побудова нейронної мережі моделі процесу сушіння торфу в парових сушарках в енергозберігаючих режимах / Л. Я.

Кулаковський, В. П. Розен. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – Вип. 3 (41). – С.55-58.

23. Равич М. Б. Эффективность использования топлива / М. Б. Равич. – М.: «Наука», 1977. – 344 с.

24. Гелетуха Г. Г. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная, Е. Н. Олейник. // Пром. теплотехника, т. 35, №5 – 2013. – С. 48–57.

25. Лыков А. В. Теория сушки [Текст] : учебное пособие для студентов теплотехнических и химико-технологических специальностей высших учебных заведений / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

26. Халуга А. К. О выборе типа сушильных установок для торфобрикетных заводов [Текст] / А. К. Халуга. // Торфяная промышленность, 1970. – №12 – С. 15-17.

27. Наумович В. М. Основные вопросы развития торфобрикетного производства [Текст] / В. М. Наумович, М. Г. Булышко, А. К. Халуга. // Торфяная промышленность. – 1963. – №5. – С. 15-19.

28. Антонов В. Я. Технология и комплексная механизация торфяного производства [Текст] / В. Я. Антонов, В. Д. Копенкин. – М.: Недра, 1983. – 288 с.

29. Втюрин Ю.Н. Разработка и исследование технологий и оборудования подготовки, подачи топлива в разомкнутых пылесистемах и новых установках экологически чистого сжигания угля : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.14.14 "Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты." / Ю.Н. Втюрин. – Иваново, 2003.

30. Втюрин Ю.Н. Опыт эксплуатации, исследование и перспективы развития централизованных систем подготовки и подачи топлива на ТЭС / Ю.Н. Втюрин. // Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях. – М.: ВТИ, 1996. – С. 177-192.

31. Нови В.О. Испытание котла Бабкок-Вилькокс на Штеровской ГРЭС с порошковой топкой французского типа на антрацитовом штыбе / В.О. Нови, Б.К. Липпе. // Известия теплотехнического института, № 3. – М.: Госэнергоиздат, 1929. – С. 32.
32. Кореньков Г. Л. Основное технологическое оборудование химической промышленности США / Г. Л. Кореньков. – М.: Научно-исследовательский институт технико-экономических исследований, 1970. – 235 с.
33. Сучасні розробки Інституту вугільних енерготехнологій НАН України для теплової енергетики / [О. Ю. Майстренко, Ю. П. Корчевой, О. І. Топал та ін.]. – К.: ГНОЗІС, 2014. – 224 с.
34. Корчевой Ю. П. Экологически чистые угольные энерготехнологии / Ю. П. Корчевой, А. Ю. Майстренко, А. И. Топал. – К.: Наукова думка, 2004. – 185 с.
35. Hnyeushev V. Peat in the Ukraine: Reflections on the Threshold of a New Millennium. – Peatland international, Finland, 2000. Vol. 1. – P. 54-57.
36. Корінчук Д. М. Розробка композиційного палива на основі торфу і рослинної біомаси для використання в теплоенергетичних установках: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.06 / Д.М. Корнійчук. – К. 2010. – 20 с.
37. Стріха В. А. Обґрунтування і розробка пошарового валкування фрезерного торфу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.15.03 "Відкрита розробка родовищ корисних копалин" / Стріха Володимир Андрійович. – Кривий Ріг, 2008. – 30 с.
38. Гнеушев В. А. Удельные энергозатраты как критерий прогрессивности технических решений [Текст] / В. А. Гнеушев, В. А. Стриха. // Уголь Украины. – 2007. – №2. – С. 21-23.
39. Концепція розвитку торф'яної промисловості України до 2030 року. – Міністерство вугільної промисловості України. Український концерн торф'яної промисловості «Укрторф», Київ, 2006. – 54 с.

40. Регіональна програма розвитку торф'яної галузі. Стан реалізації та основні показники розвитку торф'яної галузі області. – Режим доступу до ресурсу: <http://bal.znaimo.com.ua/docs/33173/index-6605.html>. – Назва з екрана.

41. Аналіз стану мінерально-сировинної бази України, облік родовищ і складання державних балансів запасів торфу і сапропелю станом на 01.01.2003-2005 років. / Звіт про наук.-досл. роботу. Титул 24/03, Державне науково-виробниче підприємство, Державний інформаційний геологічний фонд України – К.: “Геоінформ України”, 2005. – 45 с.

42. План реалізації стратегії розвитку рівненської області на період 2015-2017 рр. / Схвалений розпорядженням голови Рівненської облдержадміністрації від 27 травня 2015 року № 273. – 128 с.

43. Державний баланс запасів корисних копалин України на 01.01.2008 р. / Вип. 92. Торф. – К.: 2008. – 32 с.

44. Сивий М. Я. Торфові ресурси України: сучасний стан, перспективи використання / М. Я. Сивий // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія, 2012. – №. 1. – С. 81-86.

45. Мельник Л. В. Аналіз забезпеченості енергетичними ресурсами економічно однорідного регіону на прикладі Рівненської та Хмельницької областей / Л. В. Мельник, О. А. Пашечко // Вісник ЖНАЕУ, 2012. – № 1, т. 2. – С. 348-355.

46. Мельник Л. В. Порівняльний аналіз забезпеченості енергетичними ресурсами регіону / Л. В. Мельник, О. А. Пашечко // Проблеми раціонального використання соціально-економічного та природно-ресурсного потенціалу регіону: фінансова політика та інвестиції. – 2013. – №. 19, № 4. – С. 263-272.

47. Гнеушев В. А. Логика сооружения и обеспечения биотопливом мини-ТЭЦ в Украине / В. А. Гнеушев, А. С. Стадник, Ю. А. Крохмалюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012. – №. 7 (101). – С. 44-52.

48. Опман Я. С. Энергетическая эффективность тепловых установок торфобрикетного производства [Текст] / Я. С. Опман. // Под ред. Пекелиса Г. Б. – Минск : Наука и техника, 1973. – 91 с.

49. Парков В. Г. К вопросу о схемах технологического процесса на торфобрикетных заводах [Текст] / В. Г. Парков. // Тр. Украинского НИИ местной и топливной пром-сти. – 1955. – №8. – С. 68-79.

50. Наумович В. М. Работы Калининского политехнического института по совершенствованию торфобрикетного производства [Текст] / В. М. Наумович. // Интенсификация производства торфяных брикетов. – Минск, 1975. – С. 13–31. – (Белгипроторф. Научн.-техн. сборник).

51. Наумович В. М. Комбинированная газо-паровая сушка фрезерного торфа для брикетов [Текст] / В. М. Наумович. – В кн. : Брикетирование торфа. – Минск, 1953. – С. 79-92.

52. Бандин М. М. Обзор состояния торфобрикетного производства и перспективы его развития [Текст] / М. М. Бандин, Е. Е. Петровский. – Л. : [б. и.], 1968. – 73 с.

53. Булышко М. Г. Развитие торфобрикетного производства [Текст] / М. Г. Булышко, М. М. Бандин, Е. Е. Петровский. // Торфяные месторождения и их комплексное использование в народном хозяйстве. – 1970. – №30. – С. 126-135. – (Тр./ВНИИ торф. пром-сти).

54. Наумович В. М. Стабилизация влажности сушёнки – надёжный способ повышения качества торфяных брикетов [Текст] / В. М. Наумович. // Торфяная промышленность. – 1976. – №10. – С. 9-12.

55. Некраш Б.А. Совершенствование работы оборудования торфобрикетного производства „Лукское” с пневмопароводяными сушилками. – В кн.: Повышение качества и снижение себестоимости бытового торфяного топлива: Тез. Докл. Науч.-техн. совещ. 17, 18 ноября, 1965 г. , Минск, 1965, с. 58-61. – (Ин-т НТИ и пропаг. Госплана БССР, М-во торфяной промышленности БССР, Белорус. НТО энерг. пром-сти)

56. Опман Н. С. Интенсификация производства торфяных брикетов [Текст] / Н. С. Опман. – Минск: Наука и техника, 1975. – 132 с.
57. Сушильный комплекс на базе агрегата АВМ 1,5 [Электронный ресурс] // Flagma. Харьков. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://harkov.flagma.ua/sushilny-kompleks-baze-agregata-avm-1-5-o1951221.html>.
58. Сушильный комплекс на базе агрегата АВМ 1,5 [Электронный ресурс] // Biolux. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://toplevo-pelleta.in.ua/sushilnyj-kompleks-na-baze-agregata-avm-15.html>.
59. Булышко М. Г. Технология торфобрикетного производства [Текст] / М. Г. Булышко, Е. Е. Петровский. – М.: Недра, 1968 – 312 с.
60. Наумович В. М. Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов [Текст] / В. М. Наумович. – М.: Недра, 1968. – 310 с.
61. Антонов В. Я. Технология и комплексная механизация торфяного производства [Текст] / В. Я. Антонов, В. Д. Копенкин. – М.: Недра, 1983. – 288 с.
62. Технология производства топливных брикетов из торфа низкой насыпной плотности [Текст] / ЦБНТИ МТП РСФСР. – 1986. – 12 с.
63. Ian H. Witten, Eibe Frank and Mark A. Hall. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. – 3rd Edition. – Morgan Kaufmann, 2011. – 664 p.
64. Isabelle Guyon, Andr'e Elisseeff. An Introduction to Variable and Feature Selection. – Journal of Machine Learning, 2003. – Research №3. – P. 57-118.
65. Blum A. and Langley P. Selection of relevant features and examples in machine learning. – Artificial Intelligence, 1997. – P. 245-271.
66. Markovitch S. & Rosenstein D. Feature Generation Using General Constructor Functions, Machine Learning. – Kluwer Academic Publishers, 2002 – No. 49. – P. 59-98.
67. Langley P. Selection of relevant features in machine learning. – In: Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Relevance, 1994. – P. 2-5.

68. Cormen, Leiserson, Rivest, and Stein. Introduction to Algorithms. – Chapter 16 «Greedy Algorithms», 2001. – 130 p.
69. Меерков С. М. Свойство замедления в задаче поиска глобального экстремума функций [Текст] / С. М. Меерков. // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 12. – С. 129-139.
70. Andreani R., Martínez J. M., Schuverdt M. L. On the relation between constant positive linear dependence condition and quasinormality constraint qualification. – Journal of Optimization Theory and Applications, 2005. – Vol. 125, No. 2. – P. 473-485.
71. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем [Текст] / А. Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1981 – 296 с.
72. Ivakhnenko A.G. and Ivakhnenko G.A. The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling. – Pattern Recognition and Image Analysis, 1995. – Vol. 5, No. 4. – P. 527-535.
73. Mitchell Melanie. An Introduction to Genetic Algorithms. – First MIT Press paperback edition, London, England, 1998. – 321 p.
74. Bell D. and Wang H. A Formalism for Relevance and its Application in Feature Subset Selection. – Machine Learning, 2000. – Vol. 41(2). – P. 175–195.
75. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Изд-во «Наука», 1971. – 287 с.
76. Красовский Г. И. Планирование эксперимента. [Текст] / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Воронеж: ВГУ, 1982. – 137 с.
77. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии [Текст] / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К.: “Вища школа”, 1976. – 184 с.
78. Saridakis K. M., Dentsoras A. J. Soft computing in engineering design. –Advanced Engineering Informatics, 2008. – Vol. 22. – P. 202-221.

79. Chandrasekaran M., Muralidhar M., Murali Krishna C. Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review.
80. Hazelrigg G. A. Validation of engineering design alternative selection methods. – *Engineering Optimization*, 2003. – No. 35 (2). – P. 103-120.
81. Суровцев И. С. Нейронные сети [Текст] / И. С. Суровцев, В. И. Ключкин, Р. П. Пивоварова. – Воронеж: ВГУ, 1994. – 224 с.
82. Elbeltagi E., Hegazy T., Grierson D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. – *Advanced Engineering Informatics*, 2005. – Vol. 19. – P. 43-53.
83. Hansen L. and Salamon P. Neural network ensembles. – *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence*, 1990. – Vol. 12(10). – P. 993-1001.
84. Muller B., Reinhardt J. *Neural Networks. An introduction.* – Berlin: Springer Verlag, 1991. – 266 p.
85. Liepins G. E. and Vose M. D. Representational issues in genetic optimization. – *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 1990. – No 2. – P. 101-115.
86. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным [Текст] / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987 – 119 с.
87. Madala H.R., Ivakhnenko A.G. *Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling.* – CRC Press, 1994. – 368 p.
88. Bishop C. *Neural Networks for Pattern Recognition.* – Oxford: University Press, 1995.
89. Broomhead D. S. and Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks. – *Complex System*, 1988. – No 2. – P. 321-355.
90. Каллан Р. Нейронные сети Пер. с англ. – М.: Горячая линия – Телеком. 2000. - 280 с.
91. Moody J. and Darkin C. J. Fast Learning in networks of locally-tuned processing units. – *Neural Computation*, 1989. – Vol. 1(2). – P. 281-294.

92. Spekt D. F. Second – Order Methods for Neural Networks. – New York: Springer, 1990. – 213 p.
93. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – New York: Macmillan Publishing, 1994 – 262 p.
94. Находов, В. Ф. Энергосбережение и проблема контроля эффективности энергоиспользования / В. Ф. Находов // Промелектро. – 2007. – № 1. – С. 34-42.
95. Лазарев А. В. Новая техника и технология производства торфяных брикетов [Текст] / А. В. Лазарев, Ю. Х. Закон, В. Г. Лыкин. // Торфяная промышленность. – 1974. – №11. – С. 17-19.
96. Осадчий Е. А. Опыт работы по интенсификации процессов добычи в переработки торфа [Текст] / Е. А. Осадчий, В. Ф. Климов, Н. И. Ерастов, В. Е. Емельяничик. – Минск: Высшая школа, 1960 – 45 с.
97. Наумович В. М. Искусственная сушка торфа [Текст] : учебное пособие для вузов по специальностям "Торфяные машины и комплексы" и "Технология и комплексная механизация разработки торфяных месторождений" / В. М. Наумович. – М.: Недра, 1984. – 222 с.
98. Гурвич Л. Л. Автоматизация подготовительного отделения торфобрикетного завода с усредняющей установкой [Текст] / Л. Л. Гурвич, В. В. Русаков, А. М. Мягков. // Машины и технология торфяного производства. – Минск, 1976 – С. 72-78 (Респ. межведомств. сб. / Белорус. политехн. ин-т, вып. 6).
99. Фройштетер Г. Б. Исследование процесса сушки фрезерного торфа в пневмопаровой сушилке [Текст] / Г. Б. Фройштетер, Г. В. Александрович. // Тр. НИИ местной и топливной пром-сти. – 1962. – №17. – С. 135-170.
100. Лазарев А. В. Пути технического прогресса в торфобрикетном производстве [Текст] / А. В. Лазарев. // Тр. ВНИИ торф. пром-сти. – 1976. – №36. – С. 115-123.

101. Иванов Б. Н. Влияние качества подготовки и сушки торфа на процесс брикетирования [Текст] / Б. Н. Иванов, В. А. Завьялов, Л. И. Медведев. // Торфяная промышленность. – 1956. – №1. – С. 11-14.
102. Ямпольский Н. Г. Исследования брикетируемости фрезерного торфа малого насыпного веса на оборудовании Ерковской буроугольной брикетной фабрики [Текст] / Н. Г. Ямпольский. – М.: Тр. НИИ местной и топливной пром-сти (Госплан УССР), 1961. – вып. 16 – С. 29-36.
103. Цай А. Л. Зависимость плотности торфа от влагосодержания и степени разложения [Текст] / А. Л. Цай. // Сб. «Исследование физико-механических свойств торфа», Труды ВНИИТП – 1991. – вып. 66 – С. 72-75.
104. Зверев Д. П. Пути усовершенствования торфобрикетного производства [Текст] / Д. П. Зверев. // Механическая переработка и транспорт торфа – 1964. – С. 3-11 (Тр. /ВНИИ торф. пром-сти, вып. 22).
105. Лиштван И. И. Физико-механические основы технологии торфяного производства [Текст] / И.И. Лиштван, А.А. Терентьев, Е.Т. Базин, А.А. Головач. – Мн.: Наука и техника, 1983 – 232 с.
106. Sá Joaquim. Applied Statistics Using Spss, STATISTICA, Matlab – Berlin: Springer, 2007. [ISBN 3-540-71971-7](#).
107. Свешнікова А. А. Збірка завдань по теорії ймовірностей, математичній статистиці та теорії випадкових величин / А. А. Свешнікова. – М.: Наука, 1970 – 304 с.
108. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования [Текст] / Д. И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
109. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
110. Ivakhnenko A. Polynomial Theory of Complex Systems. – IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-1, 1971. – P. 45-56.

111. Ivakhnenko A., Krotov G. and Cheberkus V. Multilayer Algorithm for Self organization of Long Term Predictions (Illustrated by the Example of the Lake Baikal Ecological System). – Soviet Automatic Control, 1980 – Vol. 4, No. 13.
112. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. Помехоустойчивость моделирования [Текст] / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко. – К.: «Наук. думка», 1985. – 218 с.
113. Kordík P. GAME – Hybrid Self-Organizing Modeling System based on GMDH. – Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, Czech Technical University in Prague, FEE, Dep. of Comp. Sci. and Computers, 2009 – 132 p.
114. Barron R. L., Mucciardi A. N., Cook F. J., Craig J. N. and Barron A. R. Adaptive Learning Networks: Development and Application in the United States of Algorithms Related to GMDH. – New York: Marcel Dekker, s.j. farlow edition, 1984. – Self-Organizing Methods in Modeling: GMDH Type Algorithms. – P. 25-65.
115. Ivakhnenko A. G., Ivakhnenko G., and Muller J. Self-organization of neural networks with active neurons. – Pattern Recognition and Image Analysis, 1997 Vol. 4(2). – P. 185-196.
116. Drchal J., Kucerova A., and Nemecek J. Using a genetic algorithm for optimizing synaptic weights of neural networks. – Technical Report, Czech Technical University in Prague, FEE, CTU Prague, Czech Republic, 2003. – No 7(1). – P. 161-172
117. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. – 348 с.
118. Schnabel R., Koontz J., and Weiss B. A modular system of algorithms for unconstrained minimization. – Technical Report CU-CS-240-82, Comp. Sci. Dept., University of Colorado at Boulder, 1982. – P. 134-152.
119. Жалдак М. І. Основи теорії і методів оптимізації [Текст] : Навчальний посібник / М. І. Жалдак, Ю. В. Триус. – Черкаси: Брама-Україна, 2005. – С. 376-383.
120. Schittkowsk K. and Zillober C. Nonlinear programming. – Technical report, D-95440 Bayreuth, Germany. – 168 p.

121. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л. Рутковский. – М. : Горячая линия-Телеком, 2010. – С. 520.
122. Ratnaweera, A. Halgamuge, S.K. Watson, H.C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients. – IEEE transaction on Evolutionary Computation, 2004.
123. Tzeng F.-Y. and Ma K.-L. Opening the black box – data driven visualization of neural networks. – In Proceedings of IEEE Visualization '05 Conference, Minneapolis, USA, October 2005. – P. 23-28.
124. Blum C. and Socha K. Training feed-forward neural networks with ant colony optimization: An application to pattern classification. – In Proceedings of Hybrid Intelligent Systems Conference, HIS-2005, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society, 2005. – P. 233-238.
125. Kuhn L. Ant Colony Optimization for Continuous Spaces. PhD thesis. - The University of Queensland: The Department of Information Technology and Electrical Engineering, October 2002. – 145 p.
126. Bilchev G. and Parmee I. C. The ant colony metaphor for searching continuous design spaces. – In Selected Papers from AISB Workshop on Evolutionary Computing, London, UK, 1995. Springer-Verlag. – P. 25-39.
127. Nikolayev N. and Slavov V. Concepts of inductive genetic programming. – In P. R. Banzhaf W., editor, EuroGP'98: First European Workshop on Genetic Programming, LNCS-1391, Berlin, 1998. Springer. – P. 49-59.
128. Storn R. and Price K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. – Journal of Global Optimization, 1997. – Vol. 11. – P. 341–359.
129. Vesterstrom J. and Thomsen R. A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems. – In Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004. – Vol. 2 – P. 980-987.

130. Hrstka O. and Kucerova A. Improvements of real coded genetic algorithms based on differential operators preventing premature convergence. – *Advances in Engineering Software*, March-April 2004. – Vol. 35(3-4). – P. 237-246.

131. Juille H. and Pollack J. B. Semantic niching and coevolution in optimization problems.

132. Juang C.-F. and Liou Y.-C. On the hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for evolving recurrent neural network. – In *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Dept. of Electr. Eng., Nat. Chung-Hsing Univ., Taichung, Taiwan, 25-29 July 2004. – Volume 3 – P. 2285-2289.

133. Kaufman, L. *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis* / L. Kaufman, P.J. Rousseeuw.- New York:Wiley.- 1990.- P.368.

134. Kordik P. Selecting Subset of Relevant Variables by Means of Niching Genetic Algorithm. – In *Poster 2004*, Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2004. – 1021 p.

135. Kordik, P., Naplava, P., Snorek, M., Genyk-Berezovskyj, M. The Modified GMDH Method Applied to Model Complex Systems. – In: *International Conference on Inductive Modeling, ICIM 2002*, Lviv: State Scientific and Research Institute of Information Infrastructure, 2002 – P. 150-155.

136. Находов, В. Ф. Вибір необхідного складу критеріїв адекватності математичних моделей енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко, Д. О. Іванько // *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. – 2013. – № 3(34). – С. 68-77.

137. Находов В.Ф. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В.Ф. Находов, Д.О. Іванько, А.В. Головка // *Енергетика: економіка, технології, екологія. Спецвипуск. Матеріали аспірантських читань пам'яті А.В. Праховника* – 2013. – С. 20-27.

138. Kaufman, L. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis / L. Kaufman, P.J. Rousseeuw. – New York: Wiley. – 1990. – P.368.
139. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
140. Kass, R. and Raftery, A. Bayes Factors. – Journal of the American Statistical Association, 1995. – Vol. 90. – P. 773-795.
141. Розен В. П. Энергетический мониторинг программ энергосбережения учреждений бюджетной сферы / В. П. Розен, А. В. Чернявский, Е. А. Ячник, В. И. Литвин. // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип.3 (56), Ч. 2. – С. 190-194.
142. Ганеева Ж. Г. Определение понятия «мониторинг» в различных сферах его применения [Текст] / Ж. Г. Ганеева. // Экономика. Финансы. Рынок, 2006. – С. 18-26.
143. Находов, В. Ф. Вибір необхідного складу критеріїв адекватності математичних моделей енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко, Д. О. Іванько // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2013. – № 3(34). – С. 68-77.
144. Находов В.Ф. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В.Ф. Находов, Д.О. Іванько, А.В. Головка // Енергетика: економіка, технології, екологія. Спецвипуск. Матеріали аспірантських читань пам'яті А.В. Праховника – 2013. – С. 20-27.
145. Рухля И. Е. Технология переработки и обогащения полезных ископаемых. Часть 2. Производство топливных брикетов из фрезерного торфа [Текст] : Учебное издание / И. Е. Рухля. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2010. – 21 с.
146. Войтышек А. В. Основы методов Монте-Карло в алгоритмах и задачах [Текст] / А. В. Войтышек. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 1999. – 79 с.

147. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Пер. с англ. – М. : Горячая линия – Телеком, 2000. – 182 с.
148. Tollenaere T. Supersab: Fast adaptive back propagation with good scaling properties. – Neural Networks, 1990. – Vol. 3. – P. 561-573.
149. Moller M. F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. – Neural Networks, 1993 – Vol. 6. – P. 525-533.
150. Heermann P.P. Neural network techniques for stable learning control of nonlinear systems. – Dissertation D.S. University of Texas at Austin, 1992. – 194 p.
151. Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. – Quaterly Journal of Applied Mathematics, 1944. – Vol. 2. – P.164-168.
152. Chella A., Gentile A., Sorbello F., and Tarantino A. Supervised learning for feed-forward neural networks: a new minimax approach for fast convergence. – Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1993. – Vol. 1. – P. 605-609.
153. Структурно-аналітичні моделі, алгоритми і програмні засоби для розпізнавання виробничих ситуацій за різнотипними ознаками 2002 года. – Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Л.О. Філіпковська; Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського "Харк. авіац. ін-т". – Х., 2002. – 19 с.
154. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ./Дж.-О. Ким, Ч. У. Мюллер, У. Р. Клекка и др.; под ред. И. С. Енюкова. – Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
155. Горелик А. Л. Методы распознавания [Текст] / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 2004. – 4-е изд. – 262 с.
156. Stevens J. Applied multivariate statistics for the social sciences. – Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1986.
157. Методы дискриминантного анализа. Информационно-образовательный портал Veni, Vidi, Vici. Режим доступа: <http://www.vevivi.ru/best/Metody-diskriminantnogo-analiza-ref108246.html>. – Назва з екрана.

158. De Maesschalck R., Jouan-Rimbaud D., Massart D.L. The Mahalanobis distance. – Chemom. Intellig. Lab. Syst., 2000 – No. 50.

159. StatSoft. Дискриминантный анализ. Режим доступа: http://www.statsoft.ru/products/STATISTICA_Advanced/the-discriminant-analysis.php?sphrase_id=28946#toc. – Назва з екрана.

160. Смирнов С. М. Пути автоматизации процесса сушки в конвективных сушилках [Текст] / С. М. Смирнов. – В кн.: Автоматизация процесса сушки в сельском хозяйстве. – М.: ГосНТИМАШЛИТ, 1963. – С. 23-25.

161. Хрулев В. Ф. Автоматическое регулирование сушки фрезерного торфа в пневмопароводяной сушилке по заданному режиму [Текст] / В. Ф. Хрулев. – В кн.: Развитие торфобрикетного производства. – Минск, 1969. – С. 95-98.

162. А.с. №355463 (СССР). Способ автоматического регулирования процесса сушки/ Береза В. Ю., Эстрин А. С., Высоцкий В. А. – Оpubл. в Б.И.И., 1972. – № 31.

163. Смирнов С. М. Автоматизация процесса сушки в промышленности и сельском хозяйстве [Текст] / С. М. Смирнов. – М.: Машгиз, 1963. – 256 с.

164. Войтович Б. В. Система автоматического регулирования процесса сушки торфа на брикетном заводе с пневмогазовой сушилкой [Текст] / Б. В. Войтович, В. А. Прохоров, М. А. Гатих, Н. С. Панкратов. // Торфяная промышленность. – №5. – 1979. – С. 20-22.

165. Гинзбург Е. М. Автоматическое управление процессом сушки на торфобрикетном заводе «Березинский» [Текст] / Е. М. Гинзбург, А. И. Шемятовцев, В. Ф. Брыкалин. // Торфяная промышленность. – №5. – 1975. – С. 15-16.

166. Кричевский Е. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е. С. Кричевский, А. Г. Волченко, С. С. Галушкин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 143 с.

167. Алешин А. П. Температура сушенки – исходный параметр для автоматизации сушильного процесса / А. П. Алешин. – Торфяная промышленность. – №8. – 1962. – С. 13-14.

168. Федченко П. В. Система автоматического регулирования паровых трубчатых сушилок углебрикетной фабрики / П. В. Федченко – В кн.: Автоматизация процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве. – М.: Машгиз, 1963. – С. 110-115.

169. Кулаковський Л. Я. Енергоефективна система автоматичного управління процесом сушіння торфу в парових трубчатих сушарках / Л. Я. Кулаковський // Вісник інженерної академії України. – 2015. – Вип. №2. – С. 29-33.

170. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссермен; пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – 240 с.

171. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3: учеб. пособие для вузов / общ. ред. А. И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 528 с. (Нейрокомпьютеры и их применение). – ISBN 5-93108-007-4.

172. Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень / [В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, О. І. Суприган та ін.]. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 126 с. – ISBN 978-966-641-219-8.

173. Basak J. On edge and line linking in graylevel images with connectionist models / J. Basak, B. Chanda, D. D. Majumder. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1994. – Vol. 24 (3) – P. 413-428.

174. Апаратна реалізація персептрона як базового вузла нейромереж / [В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко та ін.]. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2014. – №2. – С. 48-55.

175. Гонтаренко Б. В. Проблемы реализации искусственных нейронных сетей на FPGA. – «Информатика и компьютерные технологии-2011» - 2011. – С. 15-18.

176. Hauck S. The Roles of FPGAs in Reprogrammable Systems. – Proceedings of the IEEE. – No. 86(4). – April 1998. – P. 615-638.

177. Лозович О. Н. Применение нейронных сетей на основе ПЛИС для решения задач надежности коммуникационных информационных систем / О. Н. Лозович, А. Л. Максимов // Штучний інтелект. – 2011. - №3 – С. 506-513.

178. Nichols K. Feasibility of Floating-Point arithmetic in FPGA based artificial neural networks / K. Nichols, M. Moussa and S. Areibi // In Proceedings of the 15th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering. – 2002.

Додаток А

Методика проведення експертного оцінювання за допомогою анкетування спеціалістів торф'яної галузі.

Кожному параметру, який здійснює вплив на технологію сушіння, відповідно з його значимістю ставився бал від 1 до N, де N – число параметрів у кожній з трьох груп, тобто для збудуючих від 1 до 12, а для вихідних техніко-економічних показників від 1 до 14, при чому більш важливішому фактору ставився менший бал.

Таблиця А.1 – Результати анкетування по вихідним показникам

Спеціаліст №	Вихідні параметри													
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄
1.	1	2	6	3	5	12	8	4	11	13	14	10	9	7
2.	2	3	5	1	4	11	7	6	10	14	13	12	8	9
3.	2	1	5	4	8	12	6	3	13	7	14	9	10	11
4.	1	4	7	2	6	10	5	3	13	9	14	12	8	11
5.	2	3	8	5	4	13	9	1	12	10	14	6	7	11
6.	3	1	6	2	7	14	10	4	12	9	13	11	8	5
7.	3	4	7	1	8	12	5	2	9	11	14	10	13	6
8.	2	4	6	1	5	11	7	3	13	10	14	12	8	9
9.	1	5	4	6	2	10	3	7	12	9	14	11	13	8
10.	2	3	7	1	5	9	10	4	11	12	14	13	8	6
$\sum x_{ij}$	19	30	61	26	54	114	70	37	116	104	138	106	92	83
D	56	45	14	49	20	-39	8	38	-41	-29	-63	-31	-19	-8
d^2	3136	2025	196	2401	400	1521	64	1444	1681	841	3969	961	361	64

Продовження табл. А.1

R_{vi}	12,1	11	7,9	11,4	8,5	2,6	7,3	10,3	2,4	3,6	0,2	3,4	4,6	5,7
k_i	0,131	0,12 5	0,09	0,12	0,09	0,02	0,07	0,11	0,02	0,04	0,00 2	0,03 6	0,05 1	0,06 1
W	0,838													
χ^2	108,94													

Таблиця А.2 – Результати анкетування по збурюючим впливам

Спеціаліст №	Збурюючі впливи											
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₉	F ₆	F ₇	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₈
1.	1	2	7	6	8	9	3	4	11	12	10	5
2.	2	4	8	7	9	10	1	3	12	11	6	5
3.	1	4	8	2	10	5	7	6	9	11	12	3
4.	1	2	8	3	4	10	7	6	11	9	12	5
5.	2	3	8	7	1	10	5	6	11	12	9	4
6.	2	1	9	4	12	8	6	3	11	7	10	5
7.	3	2	8	5	10	6	4	1	12	11	7	9
8.	1	3	4	5	9	10	2	7	8	11	12	6
9.	1	3	9	2	6	10	8	5	11	11	12	4
10.	2	1	7	8	9	4	3	5	11	12	10	6
$\sum x_{ij}$	16	25	76	49	78	82	46	46	107	107	100	52
D	54	45	-6	21	-8	-12	24	24	-52	-52	-40	18
d^2	291	2025	36	441	64	144	576	576	2704	2704	1600	324
R_{vi}	11,4	10,5	5,4	8,1	5,2	4,8	8,4	8,4	0,8	2	4,3	7,8
k_i	0,147	0,135	0,07	0,104	0,069	0,055	0,106	0,106	0,031	0,031	0,038	0,1
W	0,8											
χ^2	96											

Будь-який рядок таблиць результатів експерименту (табл. А.1, табл. А.2, табл. А.3) має натуральний ряд чисел, розміщених в різному порядку. Оскільки середнє арифметичне натурального ряду чисел рівне $0,5(k+1)$, то середнє для всієї таблиці буде

$$a = \frac{1}{2}n(k+1), \quad (\text{A.1})$$

де n – кількість експертів, k – кількість факторів

звідки сума квадратів відхилень

$$\sum_{j=1}^n d^2 = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n x_{ij} - a \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

де $\sum_{i=1}^n x_{ij}$ - сума оцінок всіх спеціалістів поставленого кожному фактору.

При повній узгодженості думок спеціалістів найбільша і найменша суми оцінок будуть максимально відрізнятись від величини a і, відповідно, сума квадратів відхилень буде максимальною $\sum d^2 = \max$. Квадрат максимального відхилення може бути визначений за наступною формулою

$$\sum_{j=1}^k d_{\max}^2 = \frac{1}{12}n^2(k^3 - k) \quad (\text{A.3})$$

В якості характеристики ступеня узгодженості думок спеціалістів доцільно застосувати коефіцієнт конкордації

$$W = \frac{\sum_{j=1}^k d^2}{\sum_{j=1}^k d_{\max}^2} = \frac{12 \sum_{j=1}^k d^2}{n^2(k^3 - k)} \quad (\text{A.4})$$

Повній узгодженості думок експертів відповідає $W = 1$, повна відсутність $W = 0$. Для виявлення ступеня узгодженості думок найчастіше застосовують χ^2 - розподіл. Якщо $\chi^2 = n(k-1)W > \chi_{\text{кр}}^2$, то вважається, що думки спеціалістів узгоджені. Для χ^2 - розподілу число ступеню свободи $f=k-1$. Як помітно з результатів розрахунку (табл. А.1, А.2, А.3) гіпотеза про наявність узгодженості думок спеціалістів приймається.

Ранг ваги кожного показника обчислювався за формулою:

$$R_{v_i} = N - \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (\text{A.5})$$

де N - кількість показників кожної групи.

Коефіцієнти ваги k_i кожного показника процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках визначалися за формулою:

$$k_i = \frac{Rv_i}{\sum_{i=1}^n Rv_i} \quad (\text{A.6})$$

Коефіцієнт ваги k_i знаходиться в діапазоні від 0 до 1 [17], причому їхня сума у кожній з груп дорівнює 1 ($\sum_{i=1}^n k_i$). Результати обчислення коефіцієнтів ваги також представлені в таблицях А.1, А.2, А.3.

Додаток Б

Результати активних виробничих експериментів технології сушки торфу
в паровій трубчастій сушарці торфу.

Таблиця Б.1 – Результати активних виробничих експериментів по
збурюючим впливам

№ досл.	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
1	43,6	417	23	24,7	28	41,1	1,49	3,50
2	42,6	385	22	26,6	28,5	41,4	1,58	5,82
3	41,9	377	16,9	24,7	27	42,9	1,58	4,39
4	41,4	341	17,1	27,6	27	42	1,74	3,49
5	40,9	305	16,8	28	26	43,8	1,66	2,53
6	41,2	333	16,1	26,1	26	43,7	1,54	2,66
7	45,4	358	15,5	26,6	26	43,9	1,61	1,95
8	44,9	367	15,3	24,7	25	43,5	1,45	2,69
9	45,2	369	15,7	26,1	25	43,3	1,44	2,52
10	45	399	15,9	27,1	25,5	41,4	1,52	2,12
11	45,1	407	16	28	26	40,5	1,6	1,67
12	42,9	425	15,9	26,6	26	39	1,54	2,09
13	47,1	376	18	28	25,5	43,4	1,55	4,19
14	43,5	372	17,1	26,4	26,2	42,3	1,56	3,00

Таблиця Б.2 – Результати активних виробничих експериментів по
вхідним параметрам

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	3,81	9,63	128	27,6
2	3,76	9,58	129	27,58
3	3,72	9,5	123	27,62
4	3,7	9,4	124	27,8
5	3,71	9,32	119	27,8
6	3,73	9,33	126	27,84
7	3,77	9,3	112	27,84
8	3,77	9,1	118	28,16
9	3,7	10,06	117	28,02
10	4,1	10	124	28
11	4,03	10,06	128	27,9
12	3,2	8,7	130	27,94
13	4,3	10,04	132	27,82
14	3,8	9,4	119,3	27,5

Таблиця Б.3 – Результати активних виробничих експериментів по вихідним параметрам

№	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₈
1	14,7	5	72,6	67,303	96,7	18471,65
2	17,9	7,2	70,4	66,606	102,75	14517,05
3	15,8	5,1	59,4	66,818	97,2	15794,82
4	14,7	8,5	57,2	67,166	94,8	19158,18
5	14	4,2	55	66,679	93,7	14028,38
6	14,6	3,1	58,85	66,929	96	15197,17
7	16,1	4,6	55	66,826	88,5	15466,22
8	17,6	6,1	57,2	68,894	91,5	17954,45
9	16,4	4,8	60,5	73,823	91	17930,4
10	16,3	4,9	63,8	75,034	96,5	18695,49
11	17,1	5,1	63,25	73,272	100	18756,48
12	16,6	2,9	61,6	65,367	103,1	17206,55
13	19,8	6,2	63,8	71,286	102,5	17076,68
14	17,6	6,1	60,1	68,453	98,7	1687,54

Додаток В

Таблиця В.1 – Статистичні характеристики результатів активного експерименту

	\bar{X}	доверит-	доверит+	$\bar{X}_{ГЕОМ}$	\tilde{x}	MIN	MAX	S	σ	γ_1	γ_2
F ₁	43,63	42,44	44,82	43,59	43,60	40,90	47,10	1,962	0,5442	0,084	-1,164
F ₂	373,77	353,01	394,53	372,27	376,00	305,00	425,00	34,349	9,5267	-0,396	-0,127
F ₃	17,25	15,76	18,73	17,10	16,10	15,30	23,00	2,455	0,6809	1,822	2,324
F ₄	26,52	25,78	27,27	26,50	26,60	24,70	28,00	1,238	0,3433	-0,375	-1,053
F ₅	26,27	25,62	26,92	26,25	26,00	25,00	28,50	1,073	0,2975	0,955	0,262
F ₆	42,30	41,38	43,22	42,27	42,90	39,00	43,90	1,529	0,4241	-0,84	-0,079
F ₇	1,56	1,51	1,61	1,56	1,55	1,44	1,74	0,082	0,0228	0,563	0,65
F ₈	3,05	2,33	3,77	2,86	2,66	1,67	5,82	1,188	0,3295	1,143	1,009
Y ₁	16,28	15,31	17,25	16,21	16,30	14,00	19,80	1,603	0,4445	0,633	0,498
Y ₂	5,21	4,28	6,13	5,00	5,00	2,90	8,50	1,529	0,4242	0,613	0,713
Y ₃	61,43	58,17	64,69	61,22	60,50	55,00	72,60	5,400	1,4977	0,899	0,326
Y ₄	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,003	0,0009	0,957	-0,693
Y ₅	96,48	93,66	99,30	96,38	96,50	88,50	103,10	4,669	1,2950	-0,024	-0,86
Y ₈	16942,58	15886,99	17998,17	16857,03	17206,55	14028,38	19158,18	1746,817	484,4798	-0,392	-1,346
X ₁	3,79	3,64	3,95	3,78	3,76	3,20	4,30	0,257	0,0714	-0,215	2,415
X ₂	9,54	9,29	9,79	9,53	9,50	8,70	10,06	0,417	0,1155	-0,286	-0,279
X ₃	1,11	0,84	1,37	1,01	1,20	0,40	1,70	0,437	0,1213	-0,252	-1,4
X ₄	27,84	27,74	27,94	27,84	27,84	27,58	28,16	0,171	0,0474	0,034	-0,299

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Значення коефіцієнтів кореляції показників процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
F ₁	1,00	0,43	-0,14	0,10	-0,47	0,04	-0,48	-0,20	0,58	0,51	0,02	0,42
F ₂	0,43	1,00	0,29	-0,23	0,19	-0,79	-0,44	-0,00	-0,01	0,14	0,59	-0,03
F ₃	-0,14	0,29	1,00	-0,20	0,84	-0,26	-0,01	0,70	0,10	0,15	0,50	-0,77
F ₄	0,10	-0,23	-0,20	1,00	-0,19	-0,09	0,59	-0,19	0,32	0,29	0,09	0,09
F ₅	-0,47	0,19	0,84	-0,19	1,00	-0,34	0,34	0,68	-0,15	-0,09	0,45	-0,89
F ₇	0,04	-0,79	-0,26	-0,09	-0,34	1,00	-0,00	0,06	0,30	0,11	-0,57	0,10
F ₈	-0,48	-0,44	-0,01	0,59	0,34	-0,00	1,00	0,10	-0,04	-0,15	0,02	-0,39
F ₁₂	-0,20	-0,00	0,70	-0,19	0,68	0,06	0,10	1,00	0,13	0,10	0,50	-0,69
X ₁	0,58	-0,01	0,10	0,32	-0,15	0,30	-0,04	0,13	1,00	0,80	0,18	-0,00
X ₂	0,51	0,14	0,15	0,29	-0,09	0,11	-0,15	0,10	0,80	1,00	0,24	-0,05
X ₃	0,02	0,59	0,50	0,09	0,45	-0,57	0,02	0,50	0,18	0,24	1,00	-0,52
X ₄	0,42	-0,03	-0,77	0,09	-0,89	0,10	-0,39	-0,69	-0,00	-0,05	-0,52	1,00
Y ₁	0,74	0,41	0,01	0,15	-0,21	-0,08	-0,33	0,28	0,44	0,31	0,37	0,21
Y ₂	0,07	-0,10	0,33	0,14	0,35	0,06	0,36	0,57	0,35	0,27	0,06	-0,20
Y ₃	0,18	0,69	0,82	-0,17	0,59	-0,55	-0,34	0,48	-0,22	-0,37	0,67	-0,17
Y ₄	0,66	0,24	-0,28	0,27	-0,52	-0,01	-0,37	-0,32	0,64	0,82	0,02	0,50
Y ₅	-0,03	0,52	0,41	0,27	0,38	-0,65	0,07	0,43	0,06	0,07	0,90	0,36
Y ₈	0,42	0,51	-0,10	-0,02	-0,22	-0,42	-0,20	-0,32	0,51	0,32	0,71	0,37

Додаток Д

Результати моделювання процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках комбінаторним та БіА алгоритмами МГУА Y_2, Y_3, Y_5 .

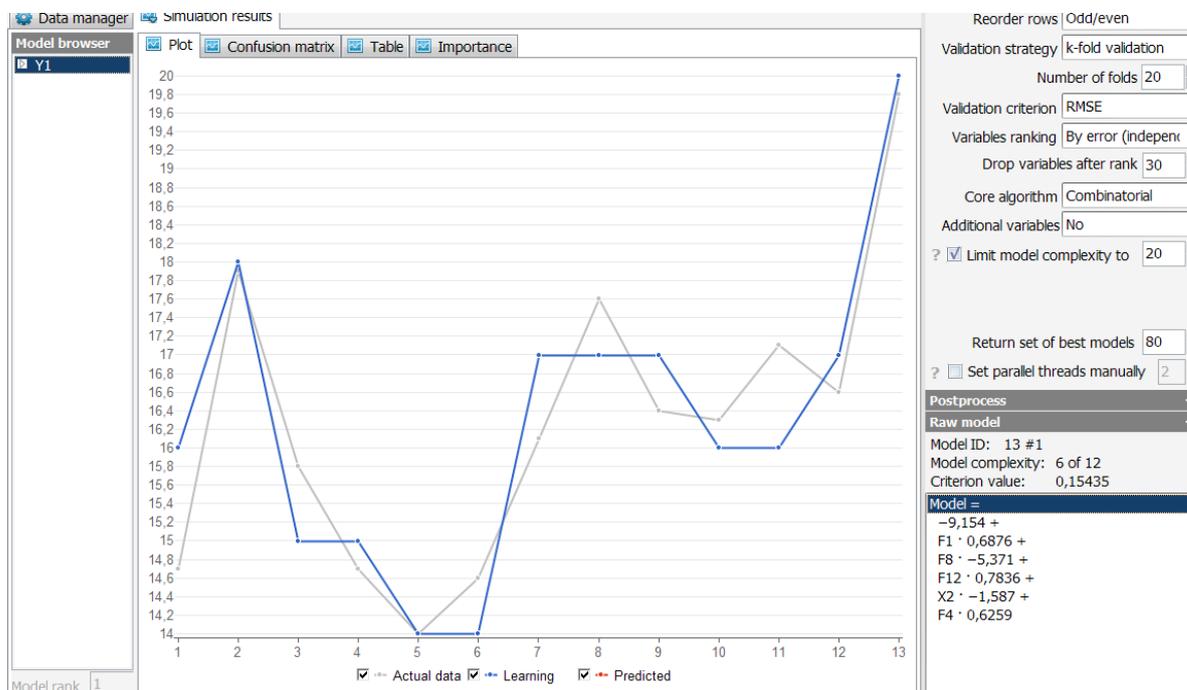


Рисунок Д.1– Графік цільової функцій Y_1 отриманий БіА алгоритмом

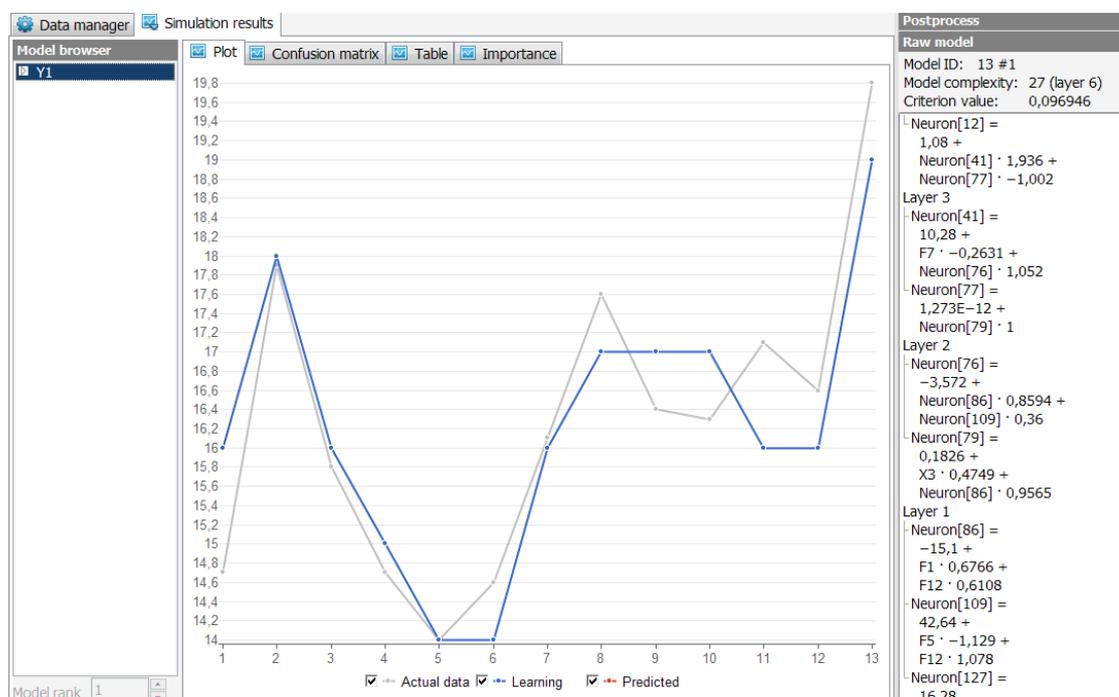
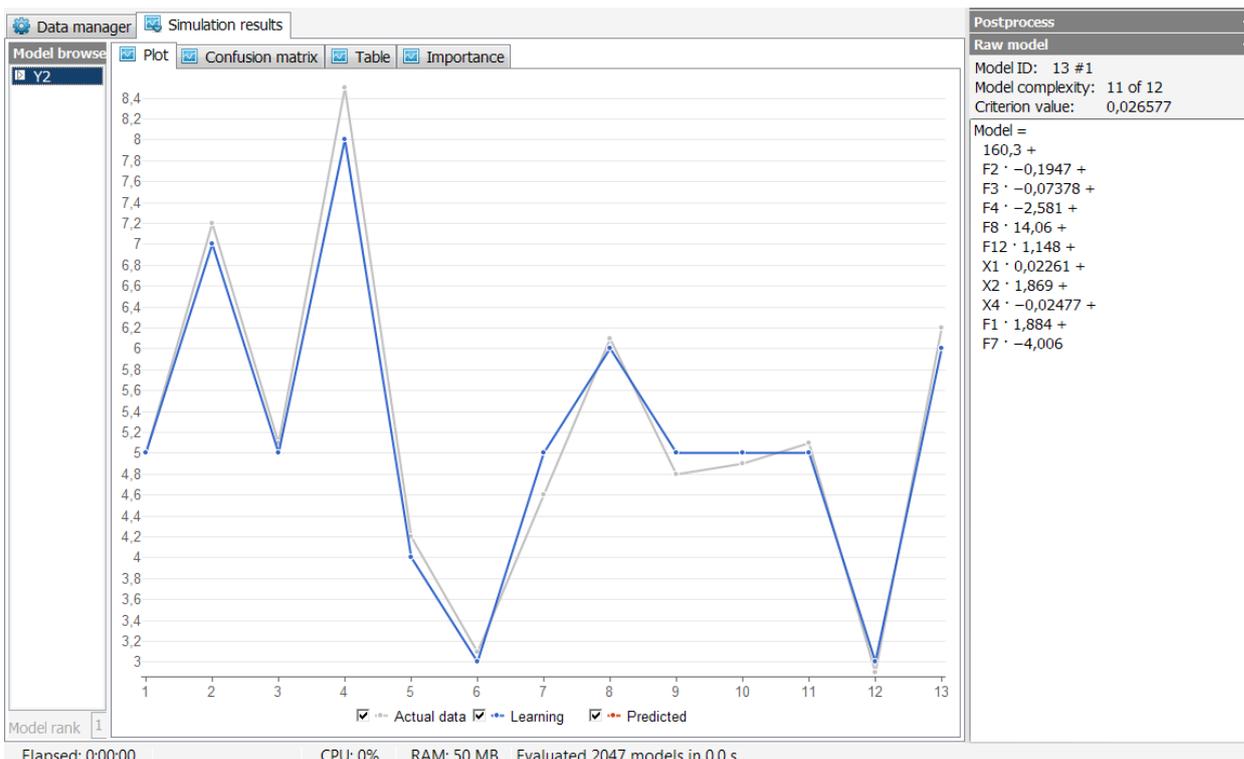
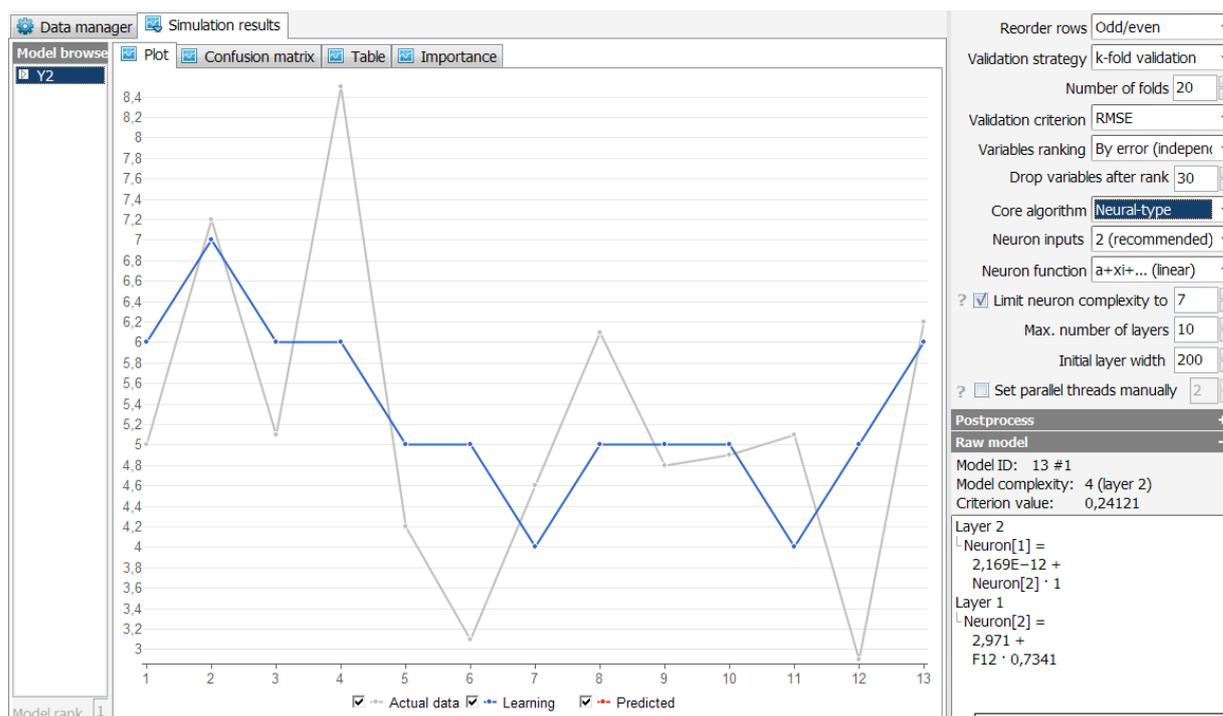


Рисунок Д.2 – Графік цільової функцій Y_1 отриманий комбінаторним алгоритмом

Рисунок Д.3– Графік цільової функції Y_2 отриманий БіА алгоритмомРисунок Д.4– Графік цільової функції Y_2 отриманий комбінаторним алгоритмом

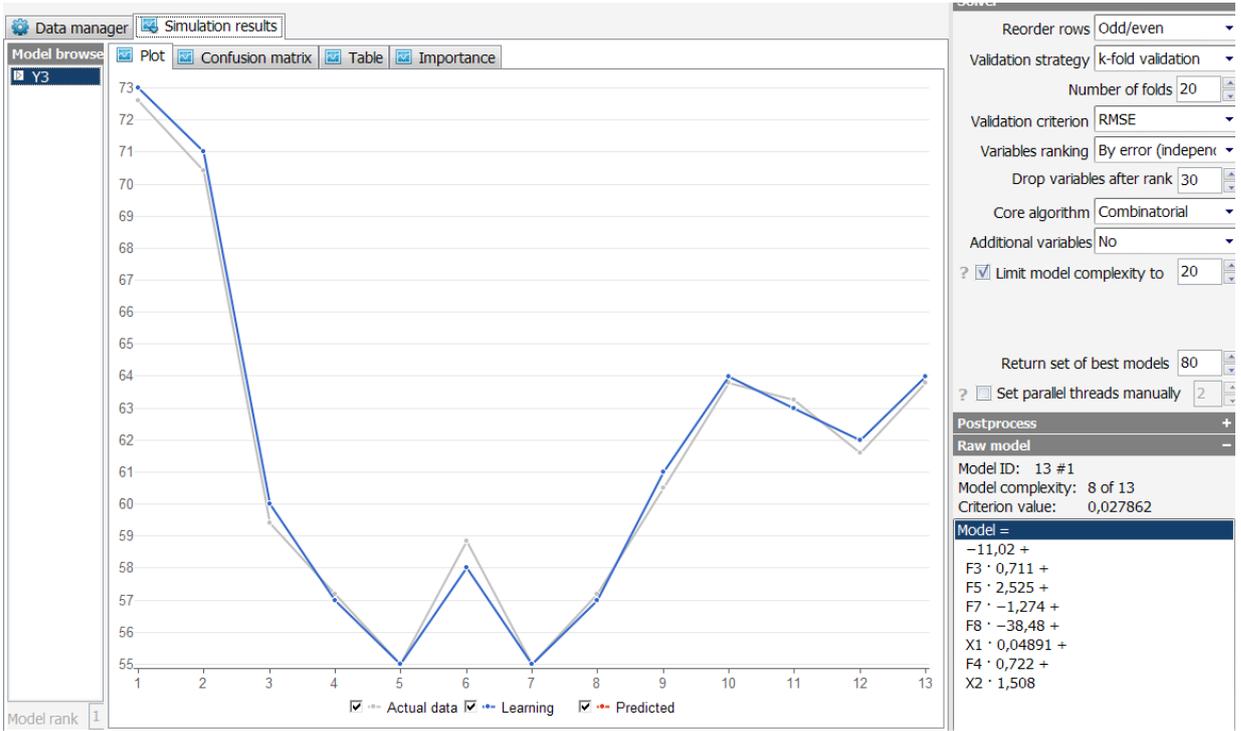


Рисунок Д.5– Графік цільової функції Y_3 отриманий БіА алгоритмом

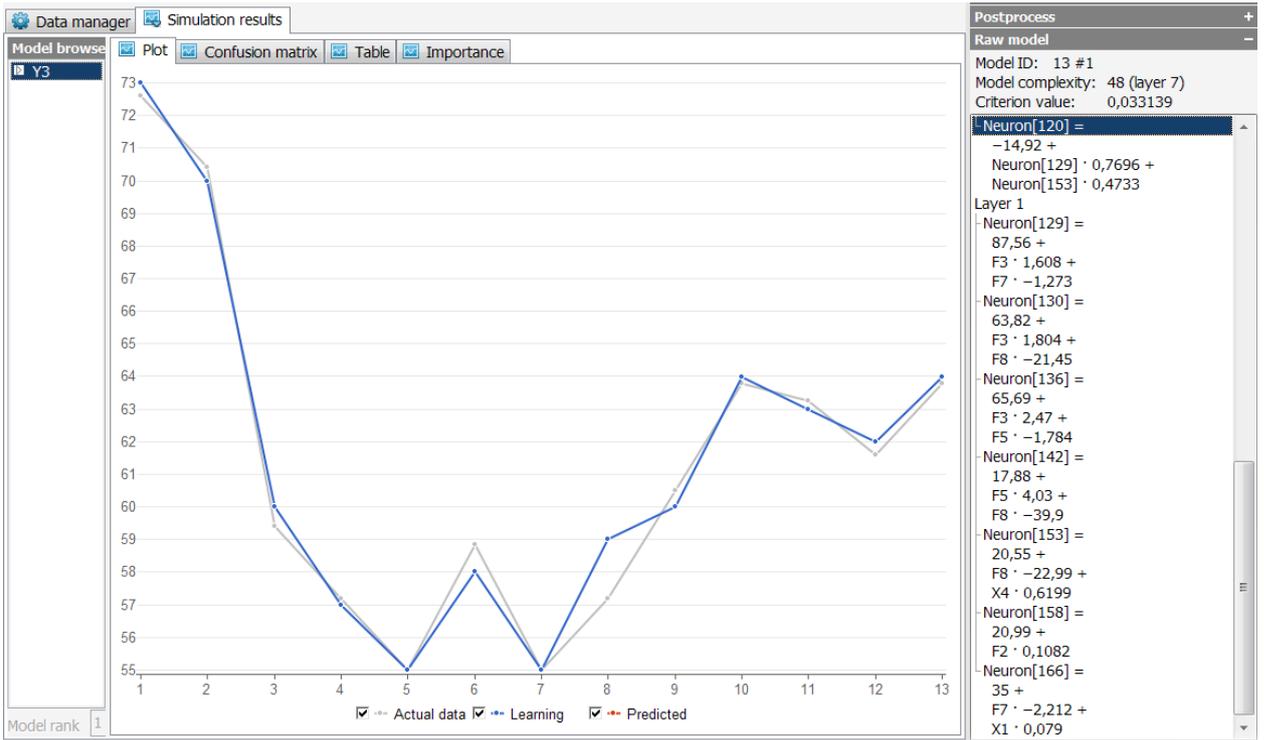
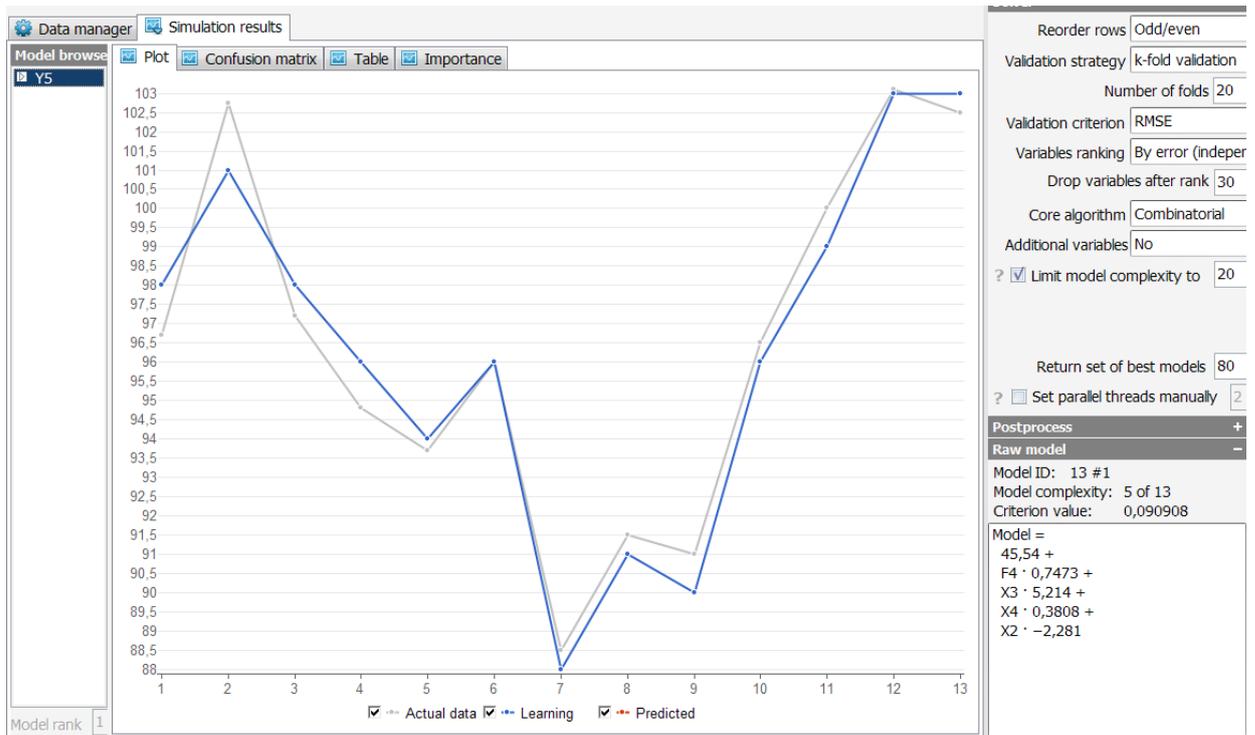
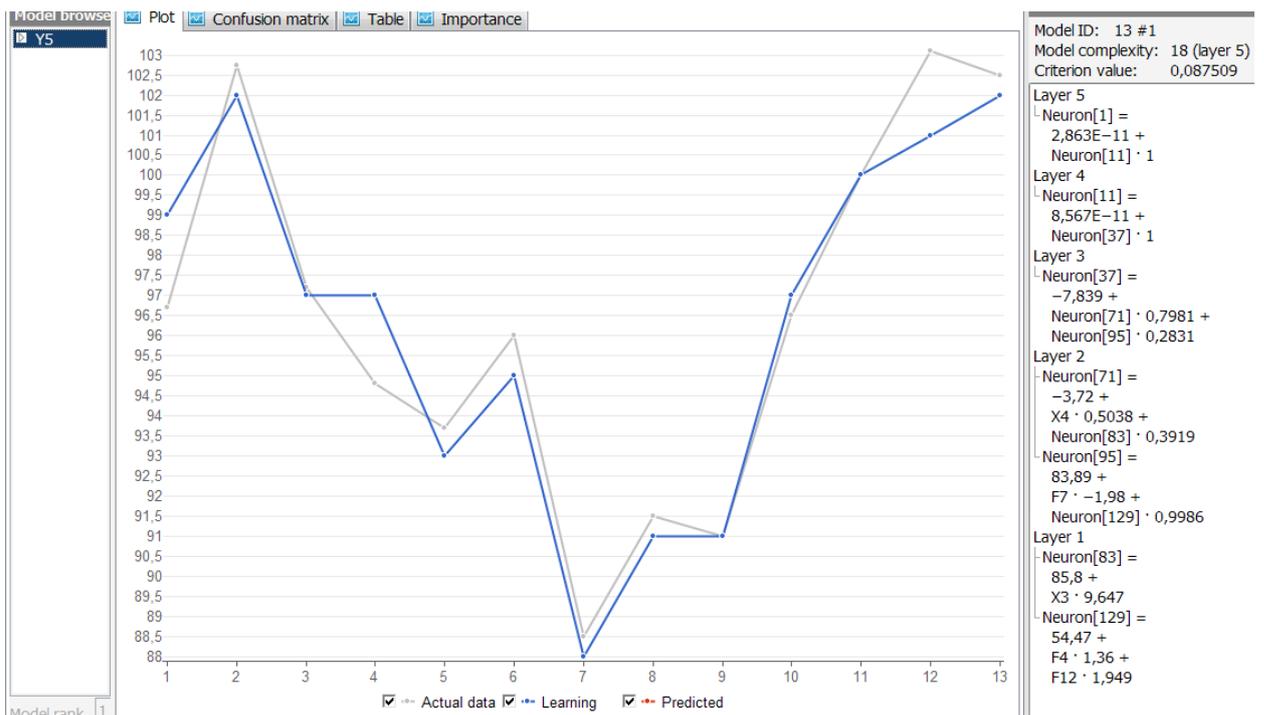


Рисунок Д.6 – Графік цільової функції Y_3 отриманий комбінаторним алгоритмом

Рисунок Д.7 – Графік цільової функції Y_5 отриманий БіА алгоритмомРисунок Д.8 – Графік цільової функції Y_5 отриманий комбінаторним алгоритмом

Додаток Е

Структура зв'язків параметрів досліджуваних цільових функцій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках методом GAME з вибраними методами навчання.

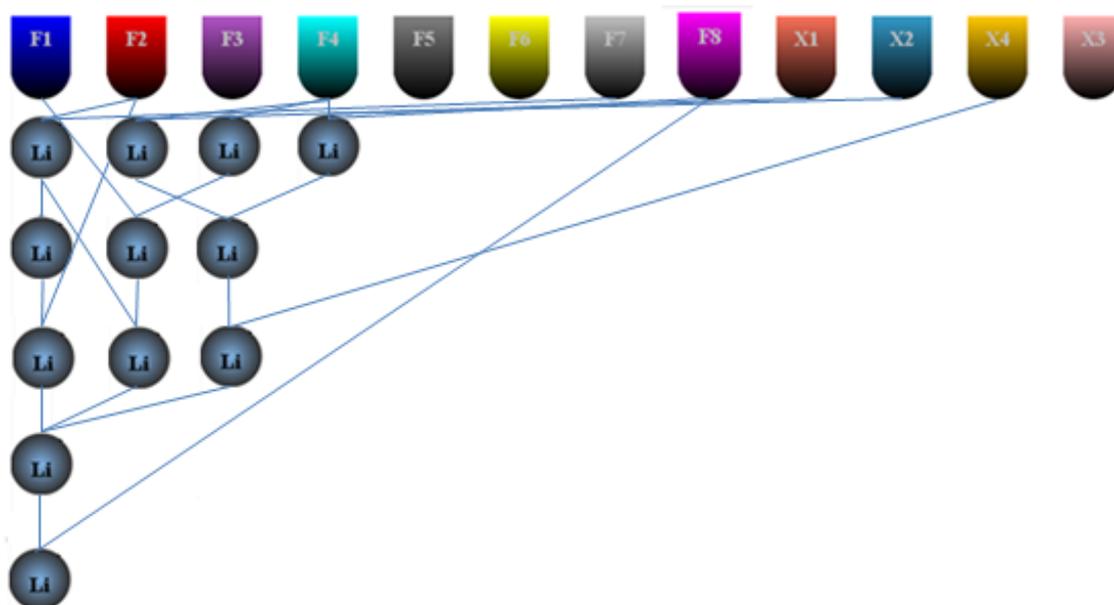


Рисунок Е.1 – Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_2 отриманої GAME методом



Рисунок Е.2 – Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_3 отриманої GAME методом

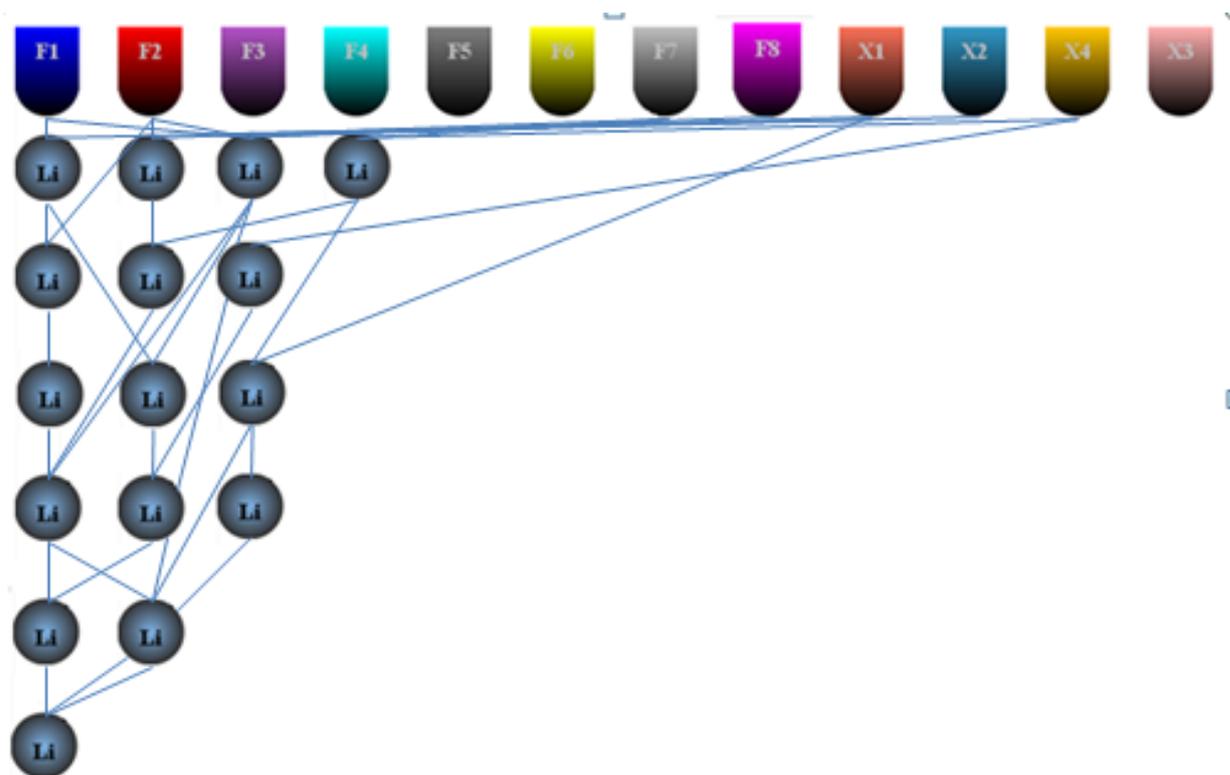


Рисунок Е.3 – Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_4 отриманої GAME методом

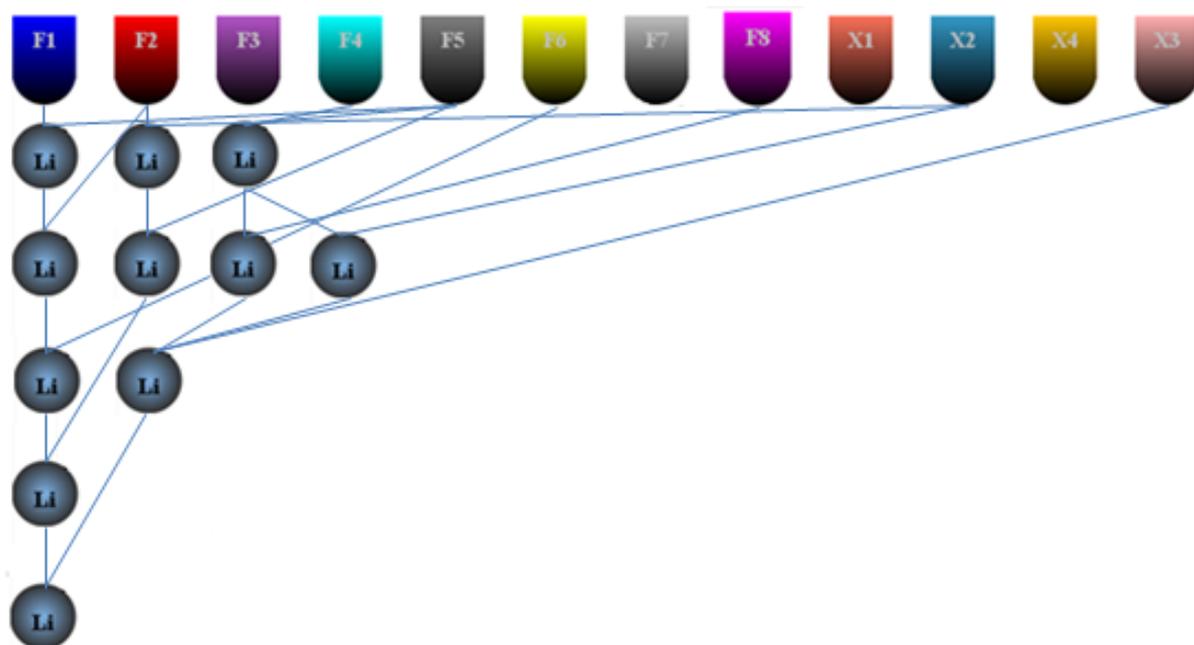


Рисунок Е.4 – Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_5 отриманої GAME методом

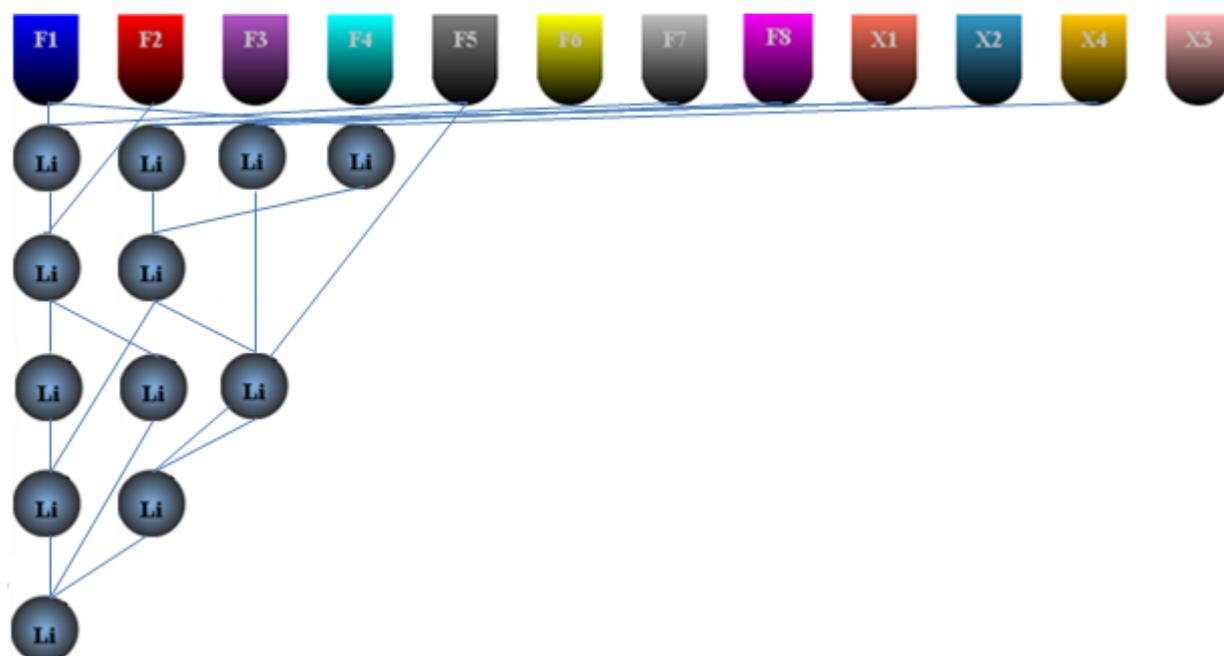


Рисунок Е.5 – Структура зв'язків параметрів цільової функції Y_8 отриманої GAME методом

Додаток Ж

Результати знаходження оптимальних значень керуючих впливів
симплекс методом.

Таблиця Ж.1 – Результати знаходження оптимальних значень керуючих впливів симплекс методом при значенні параметру $X_1=2,5$ по даним виробничих експериментів

№ дослідю	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_4
4	2,5	9,85	117	26,1	32,31254
6	2,5	9,8	114	25,91	29,66135
1	2,5	9,9	113	26,2	32,89964
5	2,5	9,6	119	26,5	35,88263
12	2,5	9,5	116	26,43	34,33346
2	2,5	9,9	118	26,56	36,84986
10	2,5	10,11	111	26,52	36,14575
11	2,5	10,2	113	26,67	38,13489
7	2,5	9,9	108	26,71	38,02185
13	2,5	10,2	117	26,9	41,46816
9	2,5	10,22	103	27,09	42,53513
3	2,5	9,87	110	27,11	43,53418
14	2,5	9,86	112	27,12	43,67323
8	2,5	9,85	106	27,52	47,69739

Таблиця Ж.2 – Результати знаходження оптимальних значень керуючих впливів симплекс методом при значенні параметру $X_1=3,5$ по даним виробничих експериментів

№ дослідю	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_4
5	3,5	9	122	26,3	46,28281
6	3,5	9	119	26,1	44,30988
7	3,5	8,7	127	26,8	51,95222
1	3,5	9,2	126	26,5	49,05103
2	3,5	9,3	127	26,5	48,65472
4	3,5	9,1	130	26,7	50,92479
12	3,5	9,6	129	27,1	55,77569

Продовження таблиці Ж.2

9	3,5	9,5	122	26,8	52,26998
10	3,5	9,7	119	27	54,86701
11	3,5	9,8	126	26,8	53,48933
3	3,5	9,4	125	26,9	54,17096
8	3,5	9,3	128	27,3	59,47953
14	3,5	9,2	122	27,1	56,34221
13	3,5	9,1	128	27,6	60,29512

Таблиця Ж.3 – Результати знаходження оптимальних значень керуючих впливів симплекс методом при значенні параметру $X_1=4,5$ по даним виробничих експериментів

№ дослідю	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_4
5	4,5	8,2	134	26,4	52,71324
6	4,5	8,25	132	26,5	53,87623
12	4,5	8	138	26,6	53,43906
7	4,5	8,3	134	26,8	55,84493
1	4,5	9	142	26,7	59,7747
2	4,5	9	138	26,7	59,06677
4	4,5	8,4	139	26,9	57,4672
9	4,5	9	134	27,1	65,0173
10	4,5	9,2	140	27	65,10608
11	4,5	8,9	140	27,2	66,03072
3	4,5	8,7	139	27,4	66,1489
8	4,5	8,6	141	27,7	70,46477
14	4,5	8,5	142	27,5	67,45465
13	4,5	8,9	143	27,5	68,46321

Додаток 3

Результати проведення генерації випадкових чисел збурюючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках та знаходження оптимальних значень керуючих параметрів процесу при знайдених значеннях збурюючих впливів.

Таблиця 3.1 – Набір випадкових чисел збурюючих впливів та оптимальних значень керуючих впливів для процесу сушіння торфу при значенні $X_1=2,5$

F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄
44,17146	382,171	17,80396	26,96023	26,64041	42,2264	1,58139	3,232747	8,947453	123,422	27,06175	41,03915
43,90389	378,0132	17,52792	26,74389	26,45661	42,26282	1,571566	3,141167	9,098489	121,3019	27,16605	42,4925
43,69714	374,8005	17,31462	26,57674	26,31459	42,29097	1,563975	3,070406	9,213164	119,7076	27,21146	43,20835
44,07398	380,6562	17,70339	26,88141	26,57344	42,23967	1,577811	3,199383	9,00282	122,6422	27,1057	41,63746
43,3577	369,526	16,96443	26,3023	26,08143	42,33717	1,551512	2,954229	9,397608	117,1728	27,21951	43,61398
44,16974	382,1442	17,80218	26,95883	26,63922	42,22663	1,581327	3,232158	8,948435	123,4081	27,06259	41,05041
43,42454	370,5645	17,03338	26,35634	26,12734	42,32807	1,553966	2,977104	9,361667	117,6637	27,22446	43,60975
43,44801	370,9293	17,0576	26,37531	26,14346	42,32488	1,554828	2,985138	9,349	117,8371	27,22544	43,59946
43,24331	367,7485	16,84642	26,20981	26,00285	42,35274	1,547313	2,915078	9,458691	116,3418	27,2036	43,53516
44,08627	380,8473	17,71608	26,89135	26,58189	42,23799	1,578263	3,203592	8,995858	122,7401	27,10053	41,56635
44,18604	382,3975	17,819	26,97201	26,65042	42,22441	1,581926	3,237737	8,939139	123,5393	27,05459	40,9429
43,31918	368,9274	16,9247	26,27116	26,05497	42,34242	1,550098	2,941046	9,418237	116,8917	27,2152	43,59957
43,20018	367,0783	16,80193	26,17495	25,97323	42,35862	1,545729	2,900317	9,481582	116,0315	27,19516	43,47724
43,49743	371,6972	17,10858	26,41527	26,1774	42,31815	1,556643	3,002051	9,32226	118,2037	27,2262	43,56285
43,20018	367,0783	16,80193	26,17495	25,97323	42,35862	1,545729	2,900317	9,481582	116,0315	27,19516	43,47724
43,49743	371,6972	17,10858	26,41527	26,1774	42,31815	1,556643	3,002051	9,32226	118,2037	27,2262	43,56285
42,80602	360,9534	16,39528	25,85626	25,70247	42,41227	1,531257	2,765409	9,687222	113,2727	27,05624	42,23233
44,0301	379,9745	17,65813	26,84594	26,54331	42,24564	1,5762	3,184367	9,027611	122,294	27,12325	41,881
44,09605	380,9993	17,72617	26,89926	26,58861	42,23666	1,578622	3,206939	8,990316	122,818	27,09634	41,50888

Продовження таблиці 3.1.

43,37163	369,7424	16,9788	26,31356	26,09099	42,33528	1,552024	2,958995	9,390134	117,2748	27,2208	43,61616
44,46823	386,7826	18,11014	27,20017	26,84426	42,186	1,592287	3,334323	8,776473	125,8482	26,88599	38,73189
43,82964	376,8595	17,45132	26,68387	26,40561	42,27293	1,56884	3,115757	9,13987	120,725	27,18588	42,79039
43,27312	368,2117	16,87717	26,23391	26,02333	42,34869	1,548407	2,92528	9,442826	116,5572	27,20865	43,56617
43,62718	373,7135	17,24245	26,52018	26,26654	42,30049	1,561407	3,046463	9,251566	119,1767	27,21988	43,37021
42,89055	362,267	16,48249	25,92461	25,76054	42,40077	1,534361	2,794342	9,643661	113,8526	27,09542	42,60798
43,67287	374,4235	17,28959	26,55712	26,29792	42,29427	1,563084	3,062101	9,226507	119,5229	27,21478	43,2691
44,22735	383,0395	17,86162	27,00542	26,6788	42,21879	1,583443	3,251876	8,915531	123,8729	27,03348	40,66053
44,97464	394,6517	18,63258	27,60961	27,19212	42,11706	1,61088	3,507648	8,476313	130,1701	26,44018	33,10627
43,37195	369,7474	16,97914	26,31382	26,09122	42,33523	1,552036	2,959107	9,389959	117,2771	27,22083	43,61619
43,5827	373,0223	17,19656	26,48422	26,23598	42,30654	1,559774	3,031239	9,275877	118,8415	27,22341	43,45199
43,39333	370,0796	17,00119	26,33111	26,1059	42,33232	1,552821	2,966424	9,378471	117,434	27,22255	43,61634
43,91679	378,2136	17,54123	26,75432	26,46547	42,26106	1,57204	3,145583	9,091274	121,4026	27,1622	42,43606
44,04473	380,2017	17,67322	26,85777	26,55335	42,24365	1,576737	3,189372	9,019357	122,4099	27,11755	41,8016
44,04808	380,2538	17,67668	26,86048	26,55566	42,24319	1,576861	3,19052	9,017462	122,4365	27,11623	41,78314
43,64698	374,0211	17,26287	26,53618	26,28013	42,29779	1,562134	3,053237	9,24072	119,3265	27,21785	43,32853
43,90165	377,9784	17,52561	26,74209	26,45507	42,26313	1,571484	3,140402	9,099738	121,2844	27,1667	42,50214
44,33256	384,6744	17,97017	27,09048	26,75107	42,20447	1,587306	3,287887	8,855089	124,7293	26,97418	39,87741
43,81907	376,6952	17,44042	26,67532	26,39835	42,27437	1,568452	3,112139	9,145745	120,6432	27,18839	42,82909
43,84902	377,1606	17,47131	26,69953	26,41892	42,27029	1,569552	3,122389	9,129093	120,8751	27,18109	42,71706
44,00873	379,6423	17,63608	26,82866	26,52862	42,24855	1,575416	3,17705	9,039662	122,1249	27,1313	41,99388
43,88251	377,681	17,50586	26,72661	26,44192	42,26573	1,570781	3,13385	9,110428	121,1353	27,17217	42,58297
43,07518	365,1358	16,67296	26,07388	25,88736	42,37563	1,541139	2,857532	9,547495	115,1415	27,16317	43,22211
42,99754	363,9294	16,59286	26,0111	25,83403	42,3862	1,538289	2,830958	9,588108	114,5958	27,13766	42,99833
43,82485	376,785	17,44637	26,67999	26,40231	42,27358	1,568664	3,114116	9,142537	120,6879	27,18703	42,80807
43,87082	377,4993	17,4938	26,71716	26,43389	42,26732	1,570352	3,129849	9,116949	121,0443	27,17537	42,63084
44,11622	381,3126	17,74698	26,91557	26,60246	42,23392	1,579362	3,213842	8,978875	122,9791	27,08749	41,38787
44,50722	387,3884	18,15035	27,23169	26,87104	42,18069	1,593718	3,347665	8,753743	126,1728	26,85821	38,37448

Продовження таблиці 3.1.

43,1116	365,7018	16,71054	26,10332	25,91238	42,37067	1,542477	2,869997	9,528357	115,3994	27,17365	43,30984
43,92787	378,3859	17,55266	26,76329	26,47308	42,25956	1,572447	3,149377	9,08507	121,4893	27,1588	42,38647
44,31375	384,382	17,95076	27,07527	26,73814	42,20703	1,586615	3,281447	8,865932	124,5754	26,98537	40,02421
43,50613	371,8325	17,11757	26,42231	26,18339	42,31697	1,556962	3,005032	9,317537	118,2686	27,22616	43,5543
43,35029	369,4109	16,95679	26,29631	26,07634	42,33818	1,551241	2,951694	9,401579	117,1186	27,21876	43,61217
43,60413	373,3552	17,21867	26,50154	26,2507	42,30363	1,56056	3,038572	9,264177	119,0028	27,22189	43,41465
44,32674	384,5839	17,96416	27,08577	26,74707	42,20526	1,587092	3,285894	8,858445	124,6816	26,97767	39,92314
43,23428	367,6081	16,8371	26,20251	25,99664	42,35397	1,546981	2,911985	9,463493	116,2766	27,20194	43,52431
43,29706	368,5837	16,90187	26,25327	26,03977	42,34543	1,549286	2,933474	9,430057	116,7308	27,21224	43,58573
42,78548	360,6342	16,37409	25,83965	25,68836	42,41507	1,530503	2,758379	9,697762	113,1327	27,04594	42,1321
43,97496	379,1176	17,60124	26,80136	26,50543	42,25315	1,574176	3,165493	9,058659	121,8588	27,14336	42,16444
43,76006	375,7783	17,37954	26,62761	26,35781	42,2824	1,566286	3,091942	9,178449	120,1887	27,20088	43,02805
43,42454	370,5645	17,03338	26,35634	26,12734	42,32807	1,553966	2,977104	9,361667	117,6637	27,22446	43,60975
44,41565	385,9655	18,05589	27,15766	26,80814	42,19315	1,590356	3,316325	8,807032	125,4126	26,92174	39,194
43,04877	364,7255	16,64572	26,05253	25,86922	42,37923	1,54017	2,848493	9,561337	114,9553	27,15498	43,15161
43,6351	373,8365	17,25062	26,52658	26,27198	42,29941	1,561697	3,049173	9,247229	119,2366	27,2191	43,35393
43,39505	370,1064	17,00297	26,3325	26,10708	42,33209	1,552884	2,967013	9,377544	117,4467	27,22267	43,61619
43,42556	370,5804	17,03444	26,35716	26,12804	42,32794	1,554004	2,977455	9,361115	117,6713	27,22451	43,60939
44,14561	381,7693	17,77729	26,93933	26,62265	42,22991	1,580441	3,2239	8,962173	123,2144	27,07407	41,20549
44,02959	379,9665	17,6576	26,84553	26,54295	42,24571	1,576182	3,184192	9,0279	122,2899	27,12345	41,88375
44,18049	382,3114	17,81328	26,96753	26,64661	42,22517	1,581722	3,23584	8,942301	123,4947	27,05733	40,9797
43,50334	371,7891	17,11469	26,42005	26,18147	42,31735	1,55686	3,004076	9,319053	118,2477	27,22618	43,55711
43,6779	374,5016	17,29478	26,56119	26,30138	42,29358	1,563269	3,063822	9,223743	119,5612	27,21412	43,2569
44,70227	390,4193	18,35159	27,3894	27,00503	42,15414	1,60088	3,414425	8,63907	127,8171	26,70283	36,39662
43,17946	366,7563	16,78055	26,15819	25,95899	42,36144	1,544968	2,893223	9,492555	115,883	27,19063	43,44391
43,06605	364,994	16,66354	26,0665	25,88109	42,37688	1,540804	2,854407	9,552283	115,0771	27,1604	43,19839
43,72946	375,3028	17,34797	26,60287	26,33679	42,28657	1,565162	3,081469	9,195352	119,9543	27,20638	43,11984
43,55825	372,6424	17,17134	26,46445	26,21919	42,30987	1,558876	3,02287	9,289207	118,658	27,22474	43,48995

Продовження таблиці 3.1.

43,53608	372,2979	17,14846	26,44652	26,20396	42,31289	1,558062	3,015282	9,301272	118,492	27,22558	43,52008
44,20071	382,6255	17,83414	26,98388	26,6605	42,22241	1,582464	3,242758	8,930763	123,6576	27,04724	40,84424
43,0891	365,3522	16,68733	26,08514	25,89692	42,37374	1,541651	2,862298	9,540184	115,24	27,16729	43,25695
43,63231	373,7931	17,24774	26,52432	26,27006	42,29979	1,561595	3,048216	9,24876	119,2155	27,21938	43,35973
44,13508	381,6057	17,76644	26,93082	26,61542	42,23135	1,580055	3,220298	8,968159	123,13	27,07895	41,27164
42,99893	363,9511	16,5943	26,01223	25,83498	42,38601	1,53834	2,831436	9,587379	114,6056	27,13816	43,0028
43,33055	369,104	16,93642	26,28035	26,06277	42,34087	1,550515	2,944935	9,412157	116,9745	27,21658	43,6051
43,59207	373,1678	17,20622	26,49178	26,24241	42,30527	1,560117	3,034443	9,270767	118,9119	27,22278	43,43614
44,27565	383,79	17,91145	27,04446	26,71197	42,21221	1,585216	3,268407	8,887842	124,2648	27,00725	40,31245
42,94859	363,1687	16,54236	25,97153	25,8004	42,39287	1,536491	2,814204	9,613585	114,2545	27,11935	42,83152
43,05398	364,8065	16,6511	26,05674	25,8728	42,37852	1,540361	2,850278	9,558605	114,992	27,15664	43,16599
43,56948	372,8168	17,18292	26,47352	26,2269	42,30834	1,559288	3,026712	9,283091	118,7422	27,22418	43,47314
44,67871	390,0531	18,32728	27,37034	26,98884	42,15734	1,600015	3,406359	8,653008	127,6166	26,72305	36,65237
44,91158	393,6718	18,56753	27,55862	27,1488	42,12564	1,608565	3,486064	8,514269	129,6194	26,50573	33,92289
45,14446	397,2904	18,80778	27,7469	27,30877	42,09394	1,617115	3,565768	8,373289	131,6706	26,24949	30,74314
45,37733	400,9091	19,04803	27,93518	27,46873	42,06224	1,625665	3,645472	8,230068	133,7702	25,95436	27,11312
42,58283	357,4853	16,16503	25,67581	25,54916	42,44266	1,523062	2,689021	9,800815	111,7721	26,92815	40,95542
42,34996	353,8666	15,92478	25,48753	25,3892	42,47436	1,514512	2,609316	9,917145	110,2538	26,75641	39,18218
42,11708	350,248	15,68453	25,29925	25,22923	42,50606	1,505962	2,529612	10,03123	108,784	26,54575	36,95866
41,88421	346,6293	15,44428	25,11097	25,06927	42,53776	1,497412	2,449908	10,14308	107,3626	26,29619	34,28488
41,65133	343,0107	15,20403	24,92269	24,9093	42,56946	1,488861	2,370204	10,25269	105,9897	26,00773	31,16082
41,41846	339,392	14,96378	24,73441	24,74934	42,60116	1,480311	2,290499	10,36005	104,6652	25,68035	27,58649

Таблиця 3.2 – Набір випадкових чисел збурюючих впливів та оптимальних значень керуючих впливів для процесу сушіння торфу при значенні $X_1=3,5$

F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄
43,72415	375,2203	17,34249	26,59858	26,33315	42,28729	1,564967	3,079651	9,16879	117,619915	26,93422	53,81889
44,17146	382,171	17,80396	26,96023	26,64041	42,2264	1,58139	3,232747	8,995727	114,12228	26,90639	53,20922
43,90389	378,0132	17,52792	26,74389	26,45661	42,26282	1,571566	3,141167	9,106947	116,241234	26,92585	53,61963
43,69714	374,8005	17,31462	26,57674	26,31459	42,29097	1,563975	3,070406	9,177191	117,824026	26,93515	53,84353
44,07398	380,6562	17,70339	26,88141	26,57344	42,23967	1,577811	3,199383	9,0389	114,903459	26,91445	53,3745
43,3577	369,526	16,96443	26,3023	26,08143	42,33717	1,551512	2,954229	9,26285	120,319706	26,93958	54,03492
44,16974	382,1442	17,80218	26,95883	26,63922	42,22663	1,581327	3,232158	8,996516	114,136181	26,90654	53,2123
43,42454	370,5645	17,03338	26,35634	26,12734	42,32807	1,553966	2,977104	9,248899	119,838428	26,93978	54,01455
43,44801	370,9293	17,0576	26,37531	26,14346	42,32488	1,554828	2,985138	9,24366	119,668216	26,93972	54,00539
43,24331	367,7485	16,84642	26,20981	26,00285	42,35274	1,547313	2,915078	9,283409	121,131899	26,93804	54,05008
44,08627	380,8473	17,71608	26,89135	26,58189	42,23799	1,578263	3,203592	9,033622	114,805507	26,91349	53,35465
44,18604	382,3975	17,819	26,97201	26,65042	42,22441	1,581926	3,237737	8,989009	114,00455	26,90509	53,18295
43,31918	368,9274	16,9247	26,27116	26,05497	42,34242	1,550098	2,941046	9,27024	120,594815	26,93924	54,0428
43,20018	367,0783	16,80193	26,17495	25,97323	42,35862	1,545729	2,900317	9,290073	121,434351	26,93707	54,04933
43,49743	371,6972	17,10858	26,41527	26,1774	42,31815	1,556643	3,002051	9,232055	119,307893	26,93939	53,98266
43,20018	367,0783	16,80193	26,17495	25,97323	42,35862	1,545729	2,900317	9,290073	121,434351	26,93707	54,04933
43,49743	371,6972	17,10858	26,41527	26,1774	42,31815	1,556643	3,002051	9,232055	119,307893	26,93939	53,98266
42,80602	360,9534	16,39528	25,85626	25,70247	42,41227	1,531257	2,765409	9,323397	124,102832	26,91806	53,87871
44,0301	379,9745	17,65813	26,84594	26,54331	42,24564	1,5762	3,184367	9,057338	115,251601	26,91771	53,44299
44,09605	380,9993	17,72617	26,89926	26,58861	42,23666	1,578622	3,206939	9,029389	114,72747	26,91272	53,33865
43,37163	369,7424	16,9788	26,31356	26,09099	42,33528	1,552024	2,958995	9,260061	120,219835	26,93967	54,03138
44,46823	386,7826	18,11014	27,20017	26,84426	42,186	1,592287	3,334323	8,845566	111,679046	26,87502	52,59483
43,82964	376,8595	17,45132	26,68387	26,40561	42,27293	1,56884	3,115757	9,133745	116,815062	26,92976	53,70938
43,27312	368,2117	16,87717	26,23391	26,02333	42,34869	1,548407	2,92528	9,278455	120,921652	26,93859	54,04852
43,62718	373,7135	17,24245	26,52018	26,26654	42,30049	1,561407	3,046463	9,197861	118,348836	26,93717	53,90089
42,89055	362,267	16,48249	25,92461	25,76054	42,40077	1,534361	2,794342	9,320439	123,545079	26,92366	53,94018

Продовження таблиці 3.2.

43,67287	374,4235	17,28959	26,55712	26,29792	42,29427	1,563084	3,062101	9,184538	118,006683	26,93591	53,86448
44,22735	383,0395	17,86162	27,00542	26,6788	42,21879	1,583443	3,251876	8,969602	113,669638	26,90127	53,10631
44,97464	394,6517	18,63258	27,60961	27,19212	42,11706	1,61088	3,507648	8,524246	107,284083	26,79771	51,15985
43,37195	369,7474	16,97914	26,31382	26,09122	42,33523	1,552036	2,959107	9,259995	120,217494	26,93967	54,03129
43,5827	373,0223	17,19656	26,48422	26,23598	42,30654	1,559774	3,031239	9,21019	118,679694	26,93815	53,93253
43,39333	370,0796	17,00119	26,33111	26,1059	42,33232	1,552821	2,966424	9,255591	120,063753	26,93975	54,02512
43,91679	378,2136	17,54123	26,75432	26,46547	42,26106	1,57204	3,145583	9,10211	116,140891	26,9251	53,60296
44,04473	380,2017	17,67322	26,85777	26,55335	42,24365	1,576737	3,189372	9,05126	115,135791	26,91665	53,42057
44,04808	380,2538	17,67668	26,86048	26,55566	42,24319	1,576861	3,19052	9,049857	115,109203	26,9164	53,41537
43,64698	374,0211	17,26287	26,53618	26,28013	42,29779	1,562134	3,053237	9,192171	118,20089	26,93665	53,88561
43,90165	377,9784	17,52561	26,74209	26,45507	42,26313	1,571484	3,140402	9,10778	116,258603	26,92597	53,62249
44,33256	384,6744	17,97017	27,09048	26,75107	42,20447	1,587306	3,287887	8,917711	112,808125	26,89064	52,89648
43,81907	376,6952	17,44042	26,67532	26,39835	42,27437	1,568452	3,112139	9,137418	116,896282	26,93027	53,72131
43,84902	377,1606	17,47131	26,69953	26,41892	42,27029	1,569552	3,122389	9,126922	116,665895	26,9288	53,68697
44,00873	379,6423	17,63608	26,82866	26,52862	42,24855	1,575416	3,17705	9,066099	115,420463	26,91922	53,47504
43,88251	377,681	17,50586	26,72661	26,44192	42,26573	1,570781	3,13385	9,114845	116,407098	26,92704	53,64655
43,07518	365,1358	16,67296	26,07388	25,88736	42,37563	1,541139	2,857532	9,306026	122,299334	26,933	54,0272
42,99754	363,9294	16,59286	26,0111	25,83403	42,3862	1,538289	2,830958	9,313416	122,827826	26,92956	53,9985
43,82485	376,785	17,44637	26,67999	26,40231	42,27358	1,568664	3,114116	9,135416	116,851931	26,92999	53,71482
43,87082	377,4993	17,4938	26,71716	26,43389	42,26732	1,570352	3,129849	9,119101	116,497585	26,92767	53,6609
44,11622	381,3126	17,74698	26,91557	26,60246	42,23392	1,579362	3,213842	9,020564	114,566231	26,91109	53,30509
44,50722	387,3884	18,15035	27,23169	26,87104	42,18069	1,593718	3,347665	8,823747	111,350844	26,87013	52,50169
43,1116	365,7018	16,71054	26,10332	25,91238	42,37067	1,542477	2,869997	9,301894	122,049108	26,93438	54,03672
43,92787	378,3859	17,55266	26,76329	26,47308	42,25956	1,572447	3,149377	9,097912	116,054529	26,92444	53,58839
44,31375	384,382	17,95076	27,07527	26,73814	42,20703	1,586615	3,281447	8,927251	112,963101	26,89263	52,93555
43,50613	371,8325	17,11757	26,42231	26,18339	42,31697	1,556962	3,005032	9,229929	119,244106	26,9393	53,97818
43,35029	369,4109	16,95679	26,29631	26,07634	42,33818	1,551241	2,951694	9,264307	120,372726	26,93953	54,03666
43,60413	373,3552	17,21867	26,50154	26,2507	42,30363	1,56056	3,038572	9,20433	118,520602	26,9377	53,91776

Продовження таблиці 3.2.

44,32674	384,5839	17,96416	27,08577	26,74707	42,20526	1,587092	3,285894	8,920675	112,856118	26,89126	52,90864
43,23428	367,6081	16,8371	26,20251	25,99664	42,35397	1,546981	2,911985	9,284854	121,195435	26,93786	54,05021
43,29706	368,5837	16,90187	26,25327	26,03977	42,34543	1,549286	2,933474	9,27427	120,752084	26,93896	54,04605
42,78548	360,6342	16,37409	25,83965	25,68836	42,41507	1,530503	2,758379	9,32377	124,237154	26,91657	53,86173
43,97496	379,1176	17,60124	26,80136	26,50543	42,25315	1,574176	3,165493	9,07964	115,686149	26,9215	53,52389
43,76006	375,7783	17,37954	26,62761	26,35781	42,2824	1,566286	3,091942	9,157261	117,347333	26,93285	53,78399
43,42454	370,5645	17,03338	26,35634	26,12734	42,32807	1,553966	2,977104	9,248899	119,838428	26,93978	54,01455
44,41565	385,9655	18,05589	27,15766	26,80814	42,19315	1,590356	3,316325	8,874226	112,119073	26,88133	52,71589
43,04877	364,7255	16,64572	26,05253	25,86922	42,37923	1,54017	2,848493	9,308756	122,479843	26,93191	54,01873
43,6351	373,8365	17,25062	26,52658	26,27198	42,29941	1,561697	3,049173	9,1956	118,28971	26,93697	53,89487
43,39505	370,1064	17,00297	26,3325	26,10708	42,33209	1,552884	2,967013	9,255229	120,051338	26,93976	54,02459
43,42556	370,5804	17,03444	26,35716	26,12804	42,32794	1,554004	2,977455	9,248674	119,831011	26,93977	54,01418
44,14561	381,7693	17,77729	26,93933	26,62265	42,22991	1,580441	3,2239	9,007471	114,330453	26,90864	53,25481
44,02959	379,9665	17,6576	26,84553	26,54295	42,24571	1,576182	3,184192	9,05755	115,255654	26,91775	53,44377
44,18049	382,3114	17,81328	26,96753	26,64661	42,22517	1,581722	3,23584	8,991571	114,049338	26,90559	53,19299
43,50334	371,7891	17,11469	26,42005	26,18147	42,31735	1,55686	3,004076	9,230614	119,264581	26,93933	53,97963
43,6779	374,5016	17,29478	26,56119	26,30138	42,29358	1,563269	3,063822	9,183031	117,968873	26,93576	53,86023
44,70227	390,4193	18,35159	27,3894	27,00503	42,15414	1,60088	3,414425	8,707268	109,6833	26,84302	51,99224
43,17946	366,7563	16,78055	26,15819	25,95899	42,36144	1,544968	2,893223	9,293064	121,578964	26,93652	54,04772
43,06605	364,994	16,66354	26,0665	25,88109	42,37688	1,540804	2,854407	9,306995	122,36182	26,93264	54,02442
43,72946	375,3028	17,34797	26,60287	26,33679	42,28657	1,565162	3,081469	9,167111	117,579701	26,93402	53,81389
43,55825	372,6424	17,17134	26,46445	26,21919	42,30987	1,558876	3,02287	9,216697	118,860643	26,93859	53,94832
43,53608	372,2979	17,14846	26,44652	26,20396	42,31289	1,558062	3,015282	9,222432	119,024129	26,93893	53,96165
44,20071	382,6255	17,83414	26,98388	26,6605	42,22241	1,582464	3,242758	8,98218	113,88583	26,90376	53,15611
43,0891	365,3522	16,68733	26,08514	25,89692	42,37374	1,541651	2,862298	9,304496	122,203834	26,93355	54,03114
43,63231	373,7931	17,24774	26,52432	26,27006	42,29979	1,561595	3,048216	9,196401	118,310586	26,93704	53,89701
44,13508	381,6057	17,76644	26,93082	26,61542	42,23135	1,580055	3,220298	9,012192	114,41501	26,90953	53,27301
42,99893	363,9511	16,5943	26,01223	25,83498	42,38601	1,53834	2,831436	9,3133	122,818375	26,92963	53,99912

Продовження таблиці 3.2.

43,33055	369,104	16,93642	26,28035	26,06277	42,34087	1,550515	2,944935	9,268109	120,513818	26,93936	54,04077
43,59207	373,1678	17,20622	26,49178	26,24241	42,30527	1,560117	3,034443	9,207647	118,61024	26,93796	53,92618
44,27565	383,79	17,91145	27,04446	26,71197	42,21221	1,585216	3,268407	8,946221	113,275685	26,89655	53,0126
42,94859	363,1687	16,54236	25,97153	25,8004	42,39287	1,536491	2,814204	9,317084	123,157585	26,92703	53,97452
43,05398	364,8065	16,6511	26,05674	25,8728	42,37852	1,540361	2,850278	9,308234	122,444248	26,93213	54,02051

Таблиця 3.3 – Набір випадкових чисел збурюючих впливів та оптимальних значень керуючих впливів для процесу сушіння торфу при значенні $X_1=4,5$

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	X2	X3	X4	Y4
42,80602	360,9534	16,39528	25,85626	25,70247	42,41227	1,531257	2,765409	8,52402	138,3873	26,6581	63,36633
42,89055	362,267	16,48249	25,92461	25,76054	42,40077	1,534361	2,794342	8,603733	138,2272	26,65018	63,4172
42,99754	363,9294	16,59286	26,0111	25,83403	42,3862	1,538289	2,830958	8,702476	138,0582	26,64094	63,48679
42,78548	360,6342	16,37409	25,83965	25,68836	42,41507	1,530503	2,758379	8,504427	138,4297	26,66011	63,35452
42,94859	363,1687	16,54236	25,97153	25,8004	42,39287	1,536491	2,814204	8,657592	138,1309	26,64506	63,45423
42,69927	359,2946	16,28515	25,76995	25,62914	42,4268	1,527337	2,728873	8,421225	138,6227	26,66888	63,3073
42,93214	362,9133	16,5254	25,95823	25,78911	42,3951	1,535888	2,808577	8,642405	138,1571	26,64648	63,44356
42,46639	355,676	16,0449	25,58167	25,46918	42,45851	1,518787	2,649169	8,188716	139,2658	26,69542	63,19866
42,23352	352,0573	15,80465	25,39339	25,30921	42,49021	1,510237	2,569464	7,944879	140,0862	26,72608	63,11764
42,00064	348,4387	15,5644	25,20511	25,14925	42,52191	1,501687	2,48976	7,689713	141,084	26,76089	63,06425
41,53489	341,2014	15,0839	24,82855	24,82932	42,58531	1,484586	2,330351	7,145396	143,6118	26,8429	63,04034
41,06914	333,9641	14,6034	24,45199	24,50939	42,64871	1,467486	2,170943	6,555766	146,8492	26,94145	63,12693
41,30202	337,5827	14,84365	24,64027	24,66936	42,61701	1,476036	2,250647	6,856245	145,1418	26,89011	63,06983
42,58283	357,4853	16,16503	25,67581	25,54916	42,44266	1,523062	2,689021	8,306387	138,9221	26,68163	63,24953
42,34996	353,8666	15,92478	25,48753	25,3892	42,47436	1,514512	2,609316	8,068214	139,6538	26,71023	63,1547
42,11708	350,248	15,68453	25,29925	25,22923	42,50606	1,505962	2,529612	7,818712	140,5629	26,74297	63,0875
41,88421	346,6293	15,44428	25,11097	25,06927	42,53776	1,497412	2,449908	7,557882	141,6494	26,77984	63,04792

Продовження таблиці 3.3.

41,65133	343,0107	15,20403	24,92269	24,9093	42,56946	1,488861	2,370204	7,285724	142,9133	26,82085	63,03596
41,41846	339,392	14,96378	24,73441	24,74934	42,60116	1,480311	2,290499	7,002237	144,3546	26,86599	63,05163
41,18558	335,7734	14,72353	24,54613	24,58938	42,63286	1,471761	2,210795	6,707422	145,9733	26,91526	63,09493
43,72415	375,2203	17,34249	26,59858	26,33315	42,28729	1,564967	3,079651	9,309859	137,901	26,60125	64,11374
44,17146	382,171	17,80396	26,96023	26,64041	42,2264	1,58139	3,232747	9,62892	138,6631	26,59684	64,63342
43,90389	378,0132	17,52792	26,74389	26,45661	42,26282	1,571566	3,141167	9,443084	138,1286	26,59765	64,3103
43,69714	374,8005	17,31462	26,57674	26,31459	42,29097	1,563975	3,070406	9,289252	137,876	26,60201	64,08561
44,07398	380,6562	17,70339	26,88141	26,57344	42,23967	1,577811	3,199383	9,562948	138,4412	26,5965	64,51148
43,3577	369,526	16,96443	26,3023	26,08143	42,33717	1,551512	2,954229	9,017324	137,7644	26,61623	63,76394
44,16974	382,1442	17,80218	26,95883	26,63922	42,22663	1,581327	3,232158	9,627771	138,6589	26,59683	64,63122
43,42454	370,5645	17,03338	26,35634	26,12734	42,32807	1,553966	2,977104	9,07277	137,7566	26,61274	63,82263
43,44801	370,9293	17,0576	26,37531	26,14346	42,32488	1,554828	2,985138	9,092022	137,7573	26,61159	63,84379
43,24331	367,7485	16,84642	26,20981	26,00285	42,35274	1,547313	2,915078	8,920265	137,8118	26,62301	63,66876
44,08627	380,8473	17,71608	26,89135	26,58189	42,23799	1,578263	3,203592	9,571379	138,4675	26,5965	64,5266
44,50722	387,3884	18,15035	27,23169	26,87104	42,18069	1,593718	3,347665	9,840953	139,6651	26,60355	65,09048
43,1116	365,7018	16,71054	26,10332	25,91238	42,37067	1,542477	2,869997	8,805118	137,9193	26,63204	63,56741
43,92787	378,3859	17,55266	26,76329	26,47308	42,25956	1,572447	3,149377	9,460353	138,1669	26,59735	64,33778
44,31375	384,382	17,95076	27,07527	26,73814	42,20703	1,586615	3,281447	9,72165	139,0427	26,59864	64,8201
43,50613	371,8325	17,11757	26,42231	26,18339	42,31697	1,556962	3,005032	9,139198	137,7668	26,60893	63,89738
43,35029	369,4109	16,95679	26,29631	26,07634	42,33818	1,551241	2,951694	9,011124	137,7662	26,61664	63,75757
43,60413	373,3552	17,21867	26,50154	26,2507	42,30363	1,56056	3,038572	9,217134	137,8079	26,60503	63,99163
44,32674	384,5839	17,96416	27,08577	26,74707	42,20526	1,587092	3,285894	9,729907	139,0806	26,59888	64,83766
43,23428	367,6081	16,8371	26,20251	25,99664	42,35397	1,546981	2,911985	8,912482	137,8173	26,62359	63,66152
43,29706	368,5837	16,90187	26,25327	26,03977	42,34543	1,549286	2,933474	8,966211	137,7842	26,6197	63,71265
43,97496	379,1176	17,60124	26,80136	26,50543	42,25315	1,574176	3,165493	9,493905	138,2477	26,5969	64,39257
43,76006	375,7783	17,37954	26,62761	26,35781	42,2824	1,566286	3,091942	9,337016	137,938	26,60033	64,15169
43,42454	370,5645	17,03338	26,35634	26,12734	42,32807	1,553966	2,977104	9,07277	137,7566	26,61274	63,82263
44,41565	385,9655	18,05589	27,15766	26,80814	42,19315	1,590356	3,316325	9,785464	139,3552	26,60087	64,96014

Продовження таблиці 3.3.

43,04877	364,7255	16,64572	26,05253	25,86922	42,37923	1,54017	2,848493	8,748915	137,9906	26,63682	63,52219
43,6351	373,8365	17,25062	26,52658	26,27198	42,29941	1,561697	3,049173	9,24135	137,8274	26,60395	64,02244
43,39505	370,1064	17,00297	26,3325	26,10708	42,33209	1,552884	2,967013	9,048427	137,7583	26,61424	63,79646
43,42556	370,5804	17,03444	26,35716	26,12804	42,32794	1,554004	2,977455	9,073612	137,7566	26,61269	63,82355
44,14561	381,7693	17,77729	26,93933	26,62265	42,22991	1,580441	3,2239	9,611619	138,6012	26,59668	64,60062
44,02959	379,9665	17,6576	26,84553	26,54295	42,24571	1,576182	3,184192	9,532252	138,3505	26,59659	64,45756
44,18049	382,3114	17,81328	26,96753	26,64661	42,22517	1,581722	3,23584	9,634934	138,6852	26,59691	64,64497
43,50334	371,7891	17,11469	26,42005	26,18147	42,31735	1,55686	3,004076	9,136946	137,7661	26,60905	63,89477
43,6779	374,5016	17,29478	26,56119	26,30138	42,29358	1,563269	3,063822	9,274486	137,8596	26,60258	64,06582
44,70227	390,4193	18,35159	27,3894	27,00503	42,15414	1,60088	3,414425	9,953318	140,4165	26,6114	65,38237
43,17946	366,7563	16,78055	26,15819	25,95899	42,36144	1,544968	2,893223	8,864895	137,8568	26,62722	63,61852
43,06605	364,994	16,66354	26,0665	25,88109	42,37688	1,540804	2,854407	8,764454	137,9697	26,63548	63,53442
43,72946	375,3028	17,34797	26,60287	26,33679	42,28657	1,565162	3,081469	9,313891	137,9062	26,60111	64,11931
43,55825	372,6424	17,17134	26,46445	26,21919	42,30987	1,558876	3,02287	9,180898	137,7848	26,60677	63,9469
43,53608	372,2979	17,14846	26,44652	26,20396	42,31289	1,558062	3,015282	9,163229	137,7761	26,60766	63,92567
44,20071	382,6255	17,83414	26,98388	26,6605	42,22241	1,582464	3,242758	9,648327	138,7357	26,59708	64,67095
43,0891	365,3522	16,68733	26,08514	25,89692	42,37374	1,541651	2,862298	8,78509	137,9433	26,63372	63,55099
43,63231	373,7931	17,24774	26,52432	26,27006	42,29979	1,561595	3,048216	9,239174	137,8255	26,60405	64,01964
44,13508	381,6057	17,76644	26,93082	26,61542	42,23135	1,580055	3,220298	9,604535	138,5766	26,59663	64,58735
42,99893	363,9511	16,5943	26,01223	25,83498	42,38601	1,53834	2,831436	8,703749	138,0563	26,64082	63,48774
43,33055	369,104	16,93642	26,28035	26,06277	42,34087	1,550515	2,944935	8,994532	137,7718	26,61775	63,74074
43,59207	373,1678	17,20622	26,49178	26,24241	42,30527	1,560117	3,034443	9,207649	137,8012	26,60547	63,97977
44,27565	383,79	17,91145	27,04446	26,71197	42,21221	1,585216	3,268407	9,697235	138,9345	26,598	64,7691
43,05398	364,8065	16,6511	26,05674	25,8728	42,37852	1,540361	2,850278	8,753613	137,9841	26,63641	63,52586
43,56948	372,8168	17,18292	26,47352	26,2269	42,30834	1,559288	3,026712	9,189804	137,7898	26,60633	63,95775
43,3046	368,7009	16,90966	26,25937	26,04495	42,3444	1,549563	2,936056	8,972612	137,7811	26,61925	63,71893
44,50638	387,3753	18,14949	27,23101	26,87047	42,1808	1,593687	3,347378	9,840453	139,6621	26,60352	65,08926
44,56227	388,2438	18,20715	27,2762	26,90886	42,1732	1,59574	3,366507	9,873471	139,8645	26,60547	65,17089

Продовження таблиці 3.3.

44,32939	384,6252	17,9669	27,08792	26,74889	42,2049	1,587189	3,286803	9,73159	139,0885	26,59893	64,84126
44,79514	391,8625	18,4474	27,46448	27,06882	42,14149	1,60429	3,446211	10,00402	140,818	26,61615	65,52815
45,02802	395,4811	18,68765	27,65276	27,22879	42,10979	1,61284	3,525916	10,12325	141,9489	26,63097	65,91304
44,67871	390,0531	18,32728	27,37034	26,98884	42,15734	1,600015	3,406359	9,940164	140,3191	26,6103	65,34607
44,91158	393,6718	18,56753	27,55862	27,1488	42,12564	1,608565	3,486064	10,06505	141,3613	26,62305	65,71714
39,90477	315,8708	13,40215	23,51058	23,70957	42,80722	1,424734	1,772421	4,883442	158,047	27,26019	63,82683
43,55825	372,6424	17,17134	26,46445	26,21919	42,30987	1,558876	3,02287	9,180898	137,7848	26,60677	63,9469
45,26089	399,0998	18,9279	27,84104	27,38875	42,07809	1,62139	3,60562	10,23114	143,2572	26,64992	66,32555
45,49377	402,7184	19,16815	28,02933	27,54871	42,04639	1,629941	3,685324	10,32771	144,7429	26,67301	66,76568
45,95952	409,9557	19,64865	28,40589	27,86864	41,98299	1,647041	3,844733	10,48686	148,2464	26,73159	67,72882
45,14446	397,2904	18,80778	27,7469	27,30877	42,09394	1,617115	3,565768	10,17861	142,5809	26,63993	66,11584
45,37733	400,9091	19,04803	27,93518	27,46873	42,06224	1,625665	3,645472	10,28084	143,9778	26,66095	66,54216
45,61021	404,5277	19,28828	28,12347	27,6287	42,03054	1,634216	3,725176	10,37175	145,5522	26,6861	66,9961
45,84308	408,1464	19,52853	28,31175	27,78866	41,99884	1,642766	3,804881	10,45132	147,304	26,71539	67,47767
46,07596	411,765	19,76878	28,50003	27,94862	41,96714	1,651316	3,884585	10,51957	149,2331	26,74881	67,98687
43,6779	374,5016	17,29478	26,56119	26,30138	42,29358	1,563269	3,063822	9,274486	137,8596	26,60258	64,06582
44,70227	390,4193	18,35159	27,3894	27,00503	42,15414	1,60088	3,414425	9,953318	140,4165	26,6114	65,38237
43,17946	366,7563	16,78055	26,15819	25,95899	42,36144	1,544968	2,893223	8,864895	137,8568	26,62722	63,61852
43,06605	364,994	16,66354	26,0665	25,88109	42,37688	1,540804	2,854407	8,764454	137,9697	26,63548	63,53442
43,72946	375,3028	17,34797	26,60287	26,33679	42,28657	1,565162	3,081469	9,313891	137,9062	26,60111	64,11931
44,18604	382,3975	17,819	26,97201	26,65042	42,22441	1,581926	3,237737	9,638615	138,6989	26,59695	64,65207
43,31918	368,9274	16,9247	26,27116	26,05497	42,34242	1,550098	2,941046	8,984947	137,7756	26,6184	63,73114
43,20018	367,0783	16,80193	26,17495	25,97323	42,35862	1,545729	2,900317	8,88296	137,8407	26,62582	63,6346
43,49743	371,6972	17,10858	26,41527	26,1774	42,31815	1,556643	3,002051	9,132174	137,7647	26,60931	63,88924
43,20018	367,0783	16,80193	26,17495	25,97323	42,35862	1,545729	2,900317	8,88296	137,8407	26,62582	63,6346

Додаток И

Аналіз залишків, що вказують на відхилення по абсолютним значенням виходів моделей отриманих нейронними мережами від цільових значень виходів.

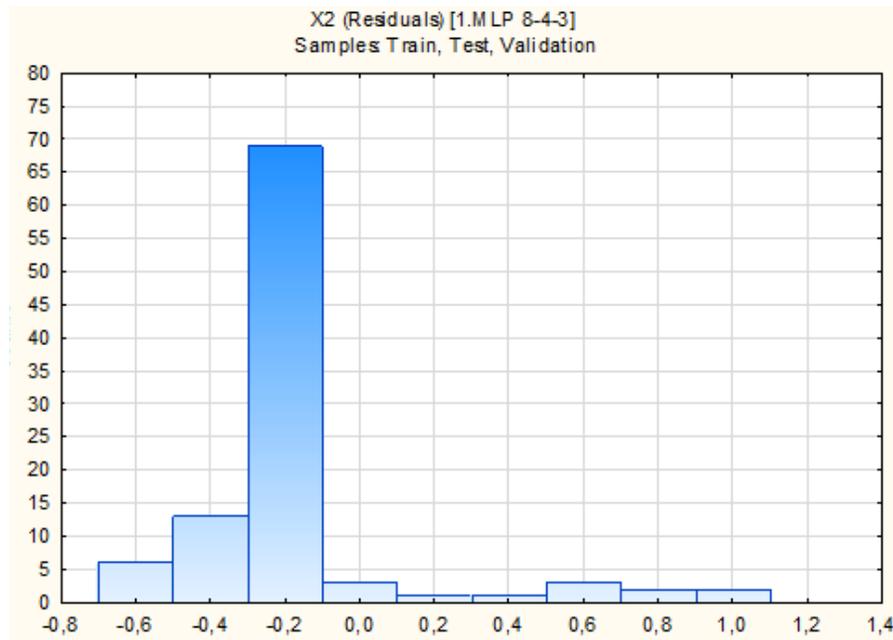


Рисунок И.1 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-4-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

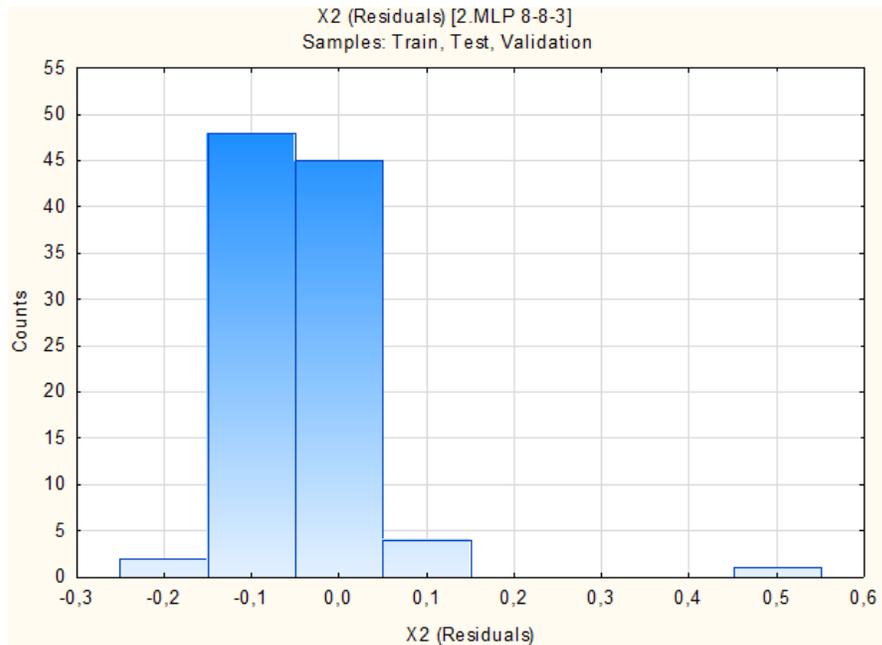


Рисунок И.2 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-8-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

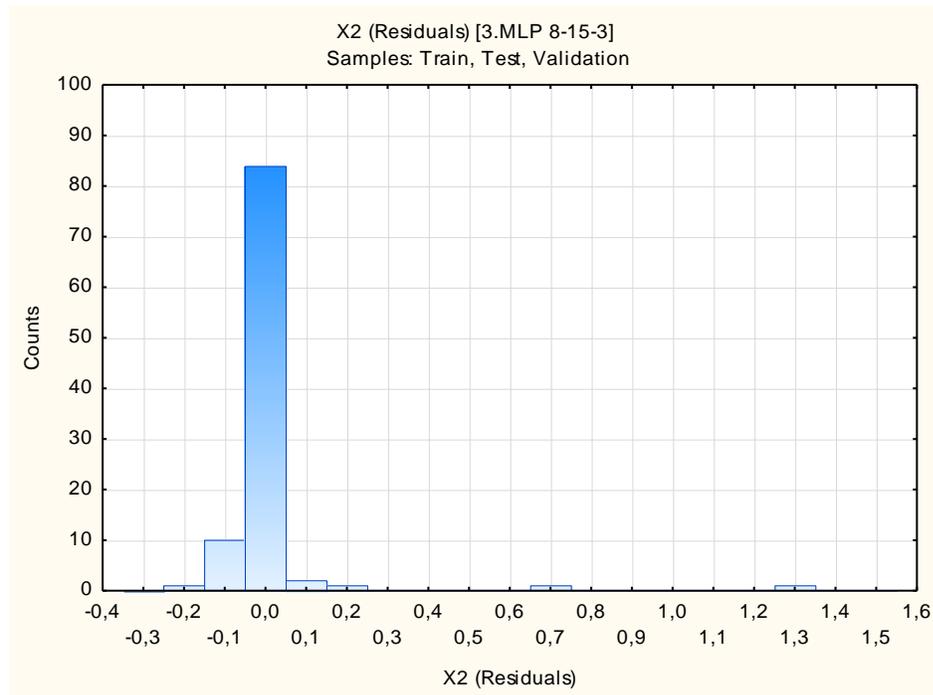


Рисунок И.3 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-15-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

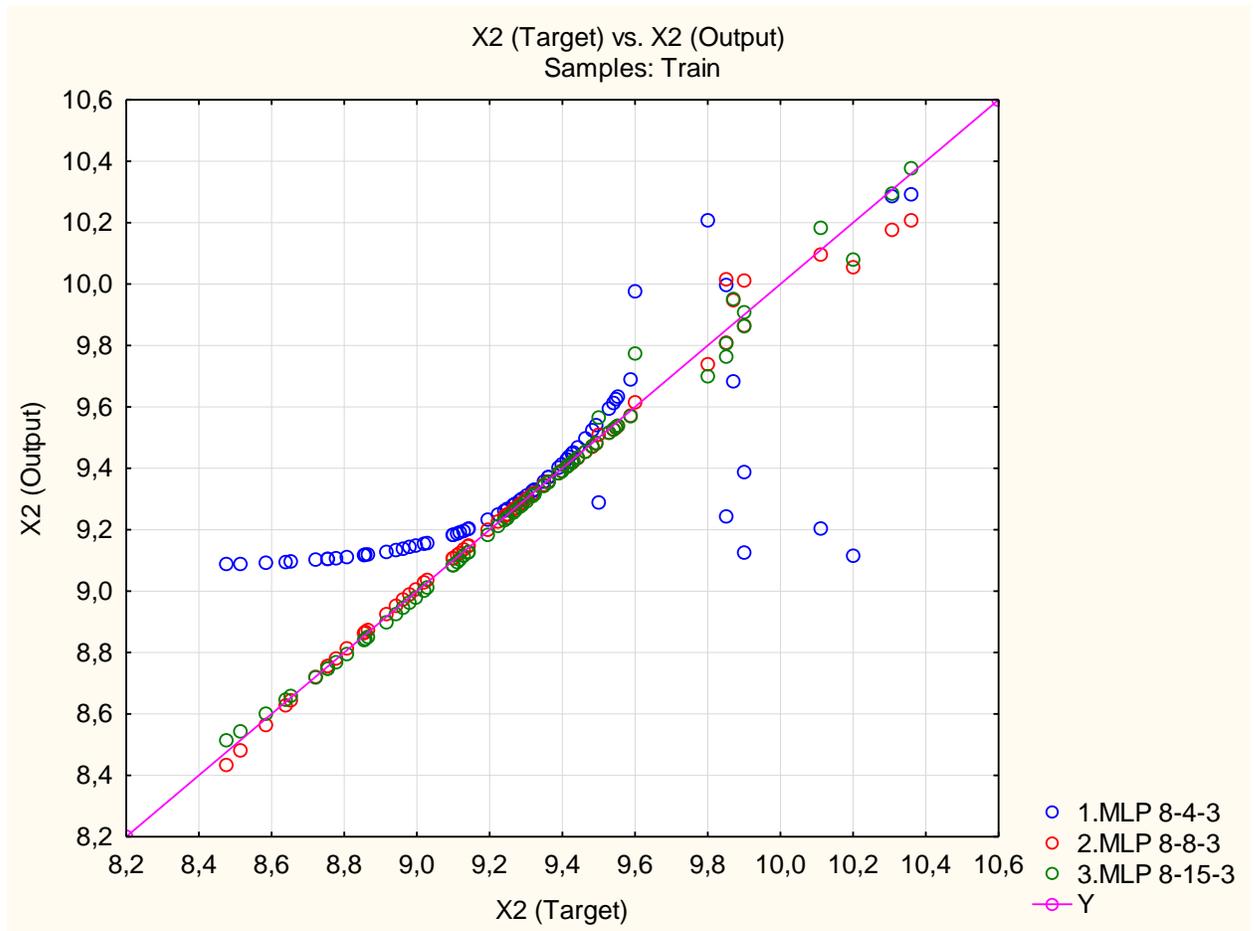


Рисунок И.4 – Графік значень параметра X_2 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

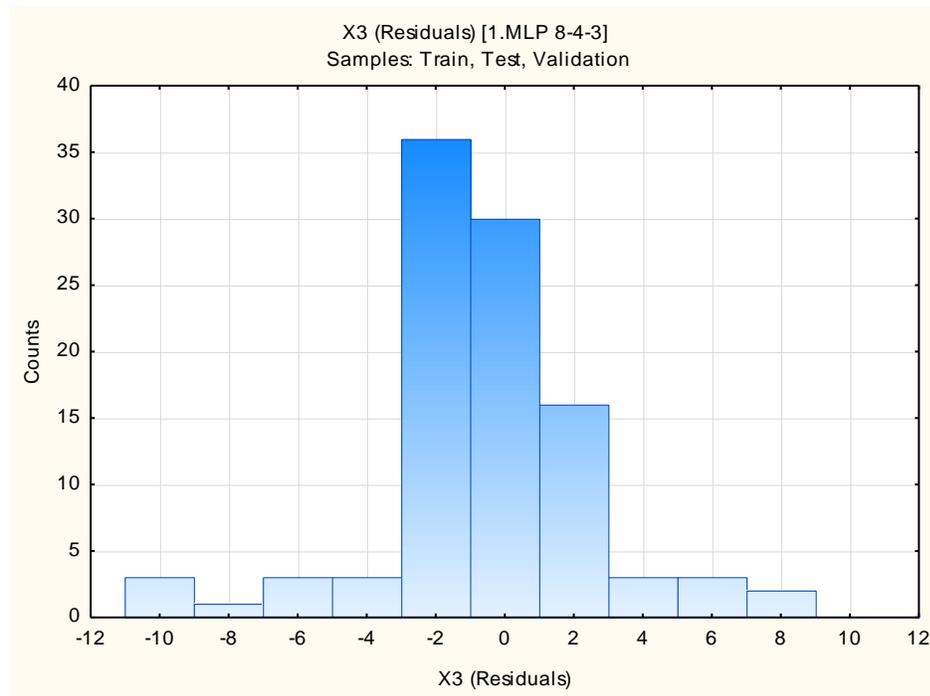


Рисунок И.5 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-4-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

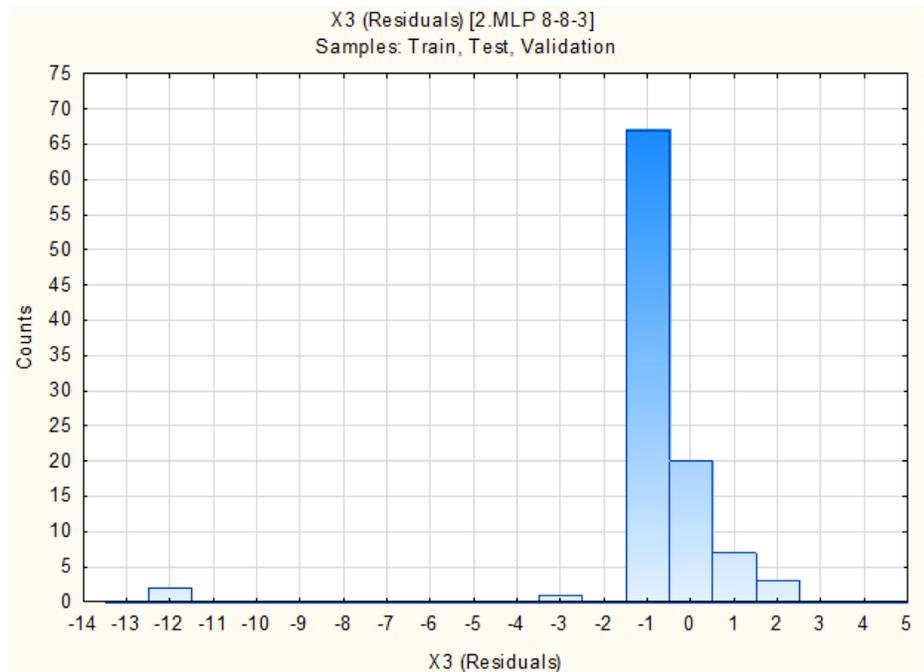


Рисунок И.6 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-8-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

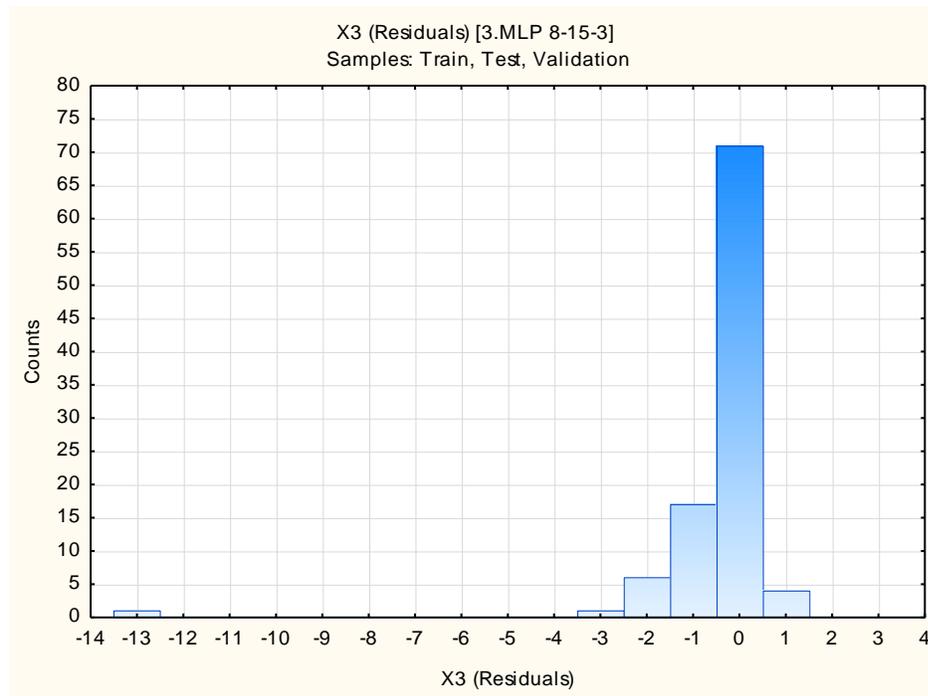


Рисунок И.7 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-15-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

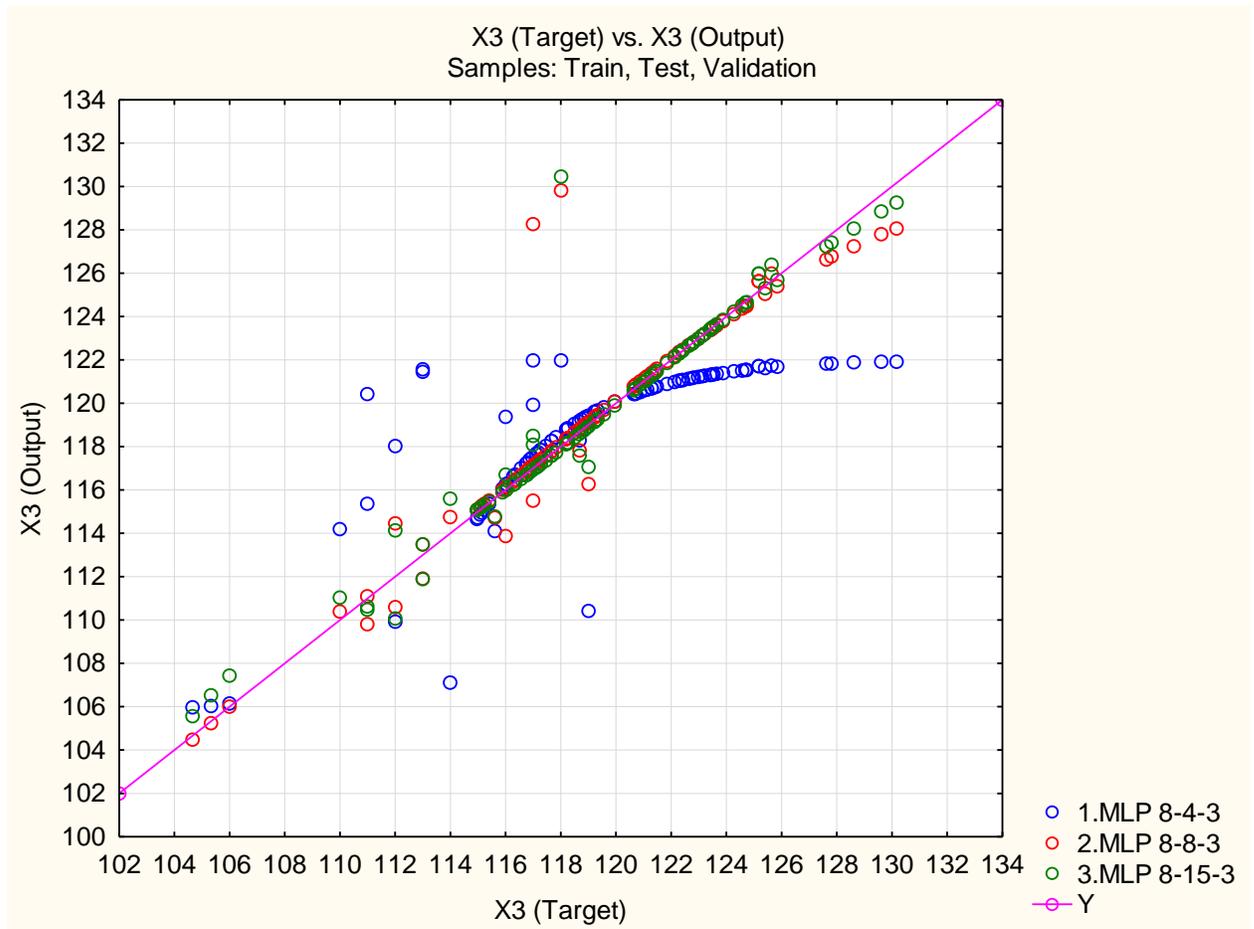


Рисунок И.8 – Графік значень параметра X_3 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

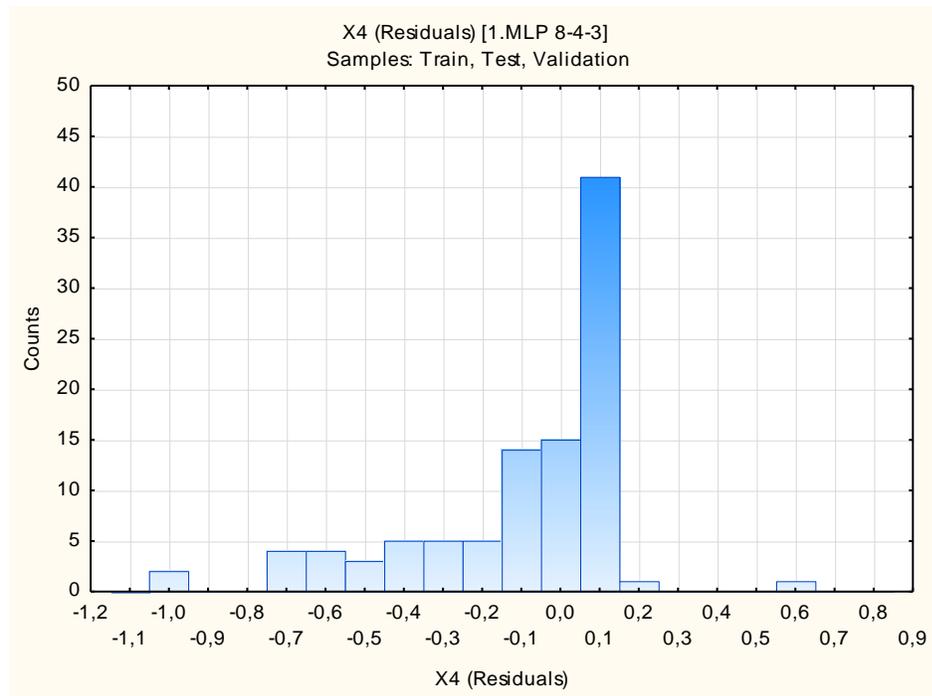


Рисунок И.9 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-4-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

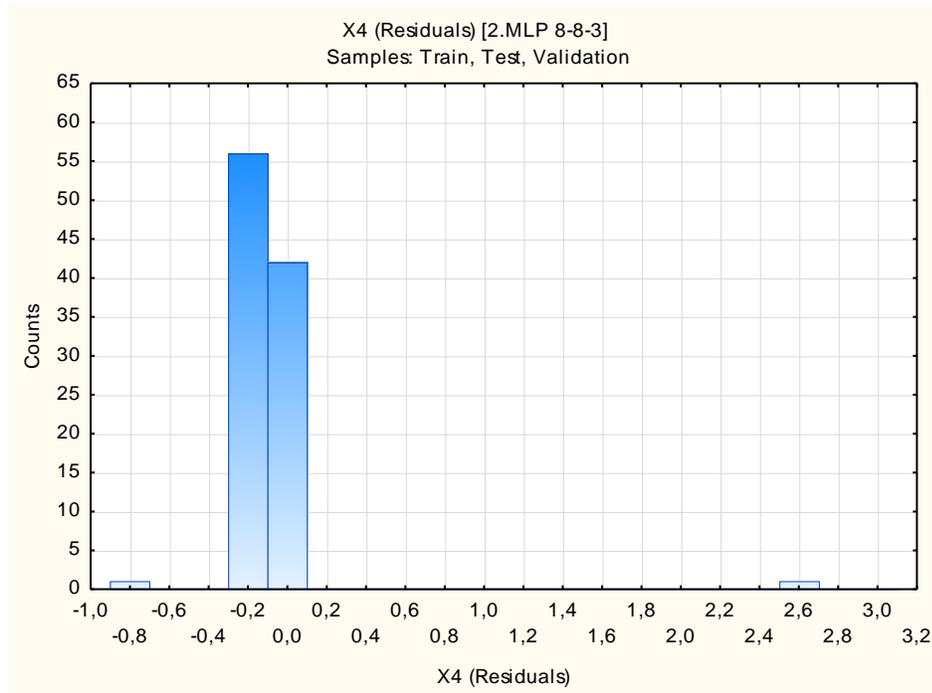


Рисунок И.10 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-4-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

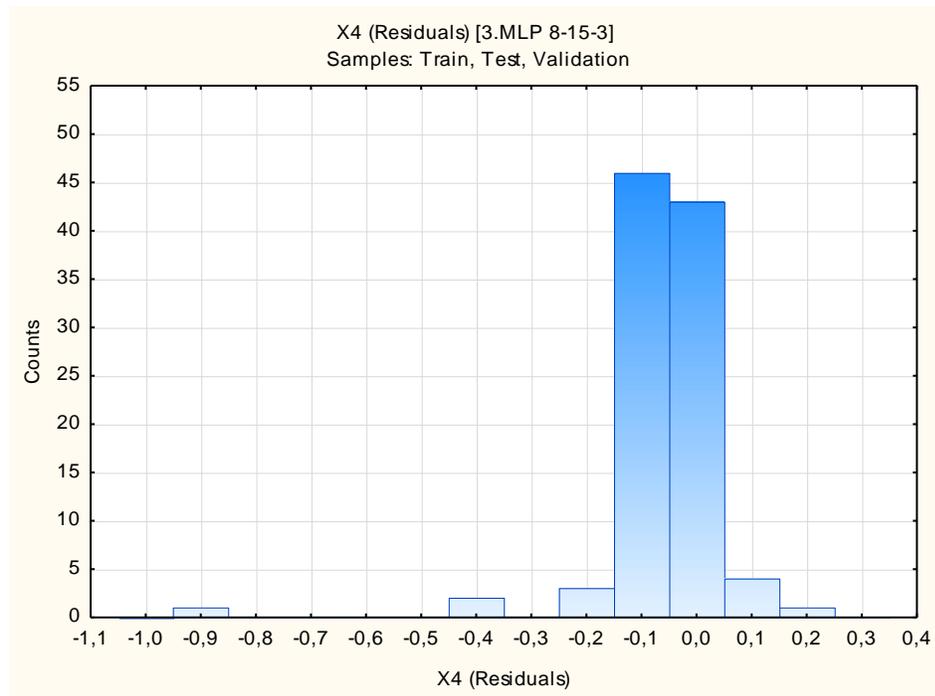


Рисунок И.11 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-15-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

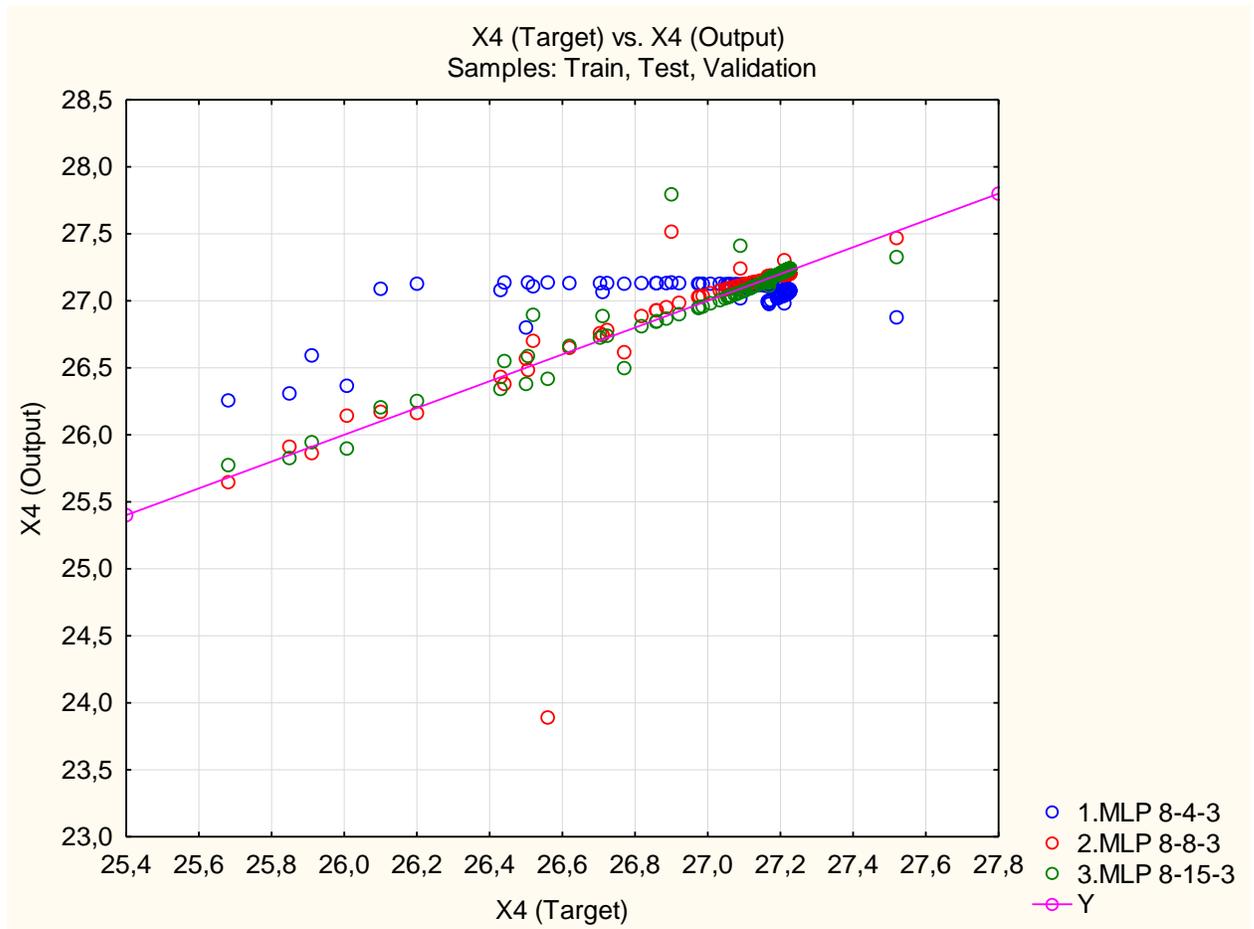


Рисунок И.13 – Графік значень параметра X_4 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=2,5$

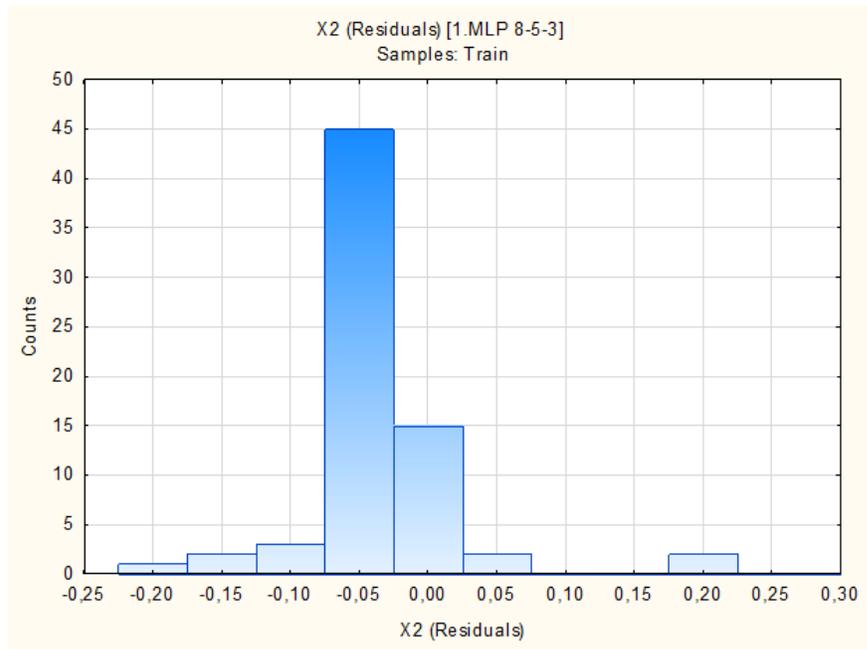


Рисунок И.14 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-5-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

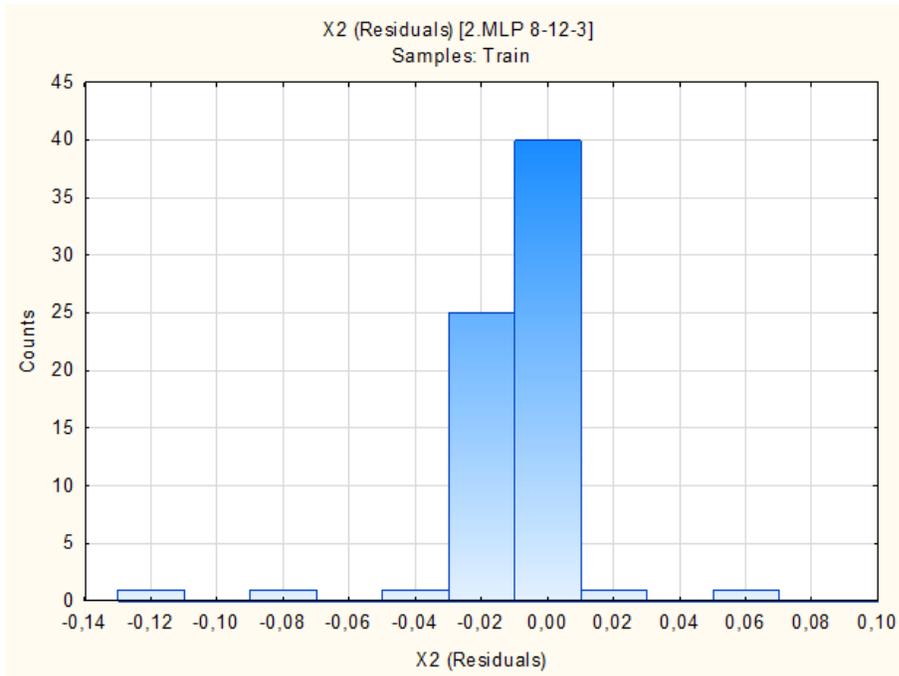


Рисунок И.15 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-12-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

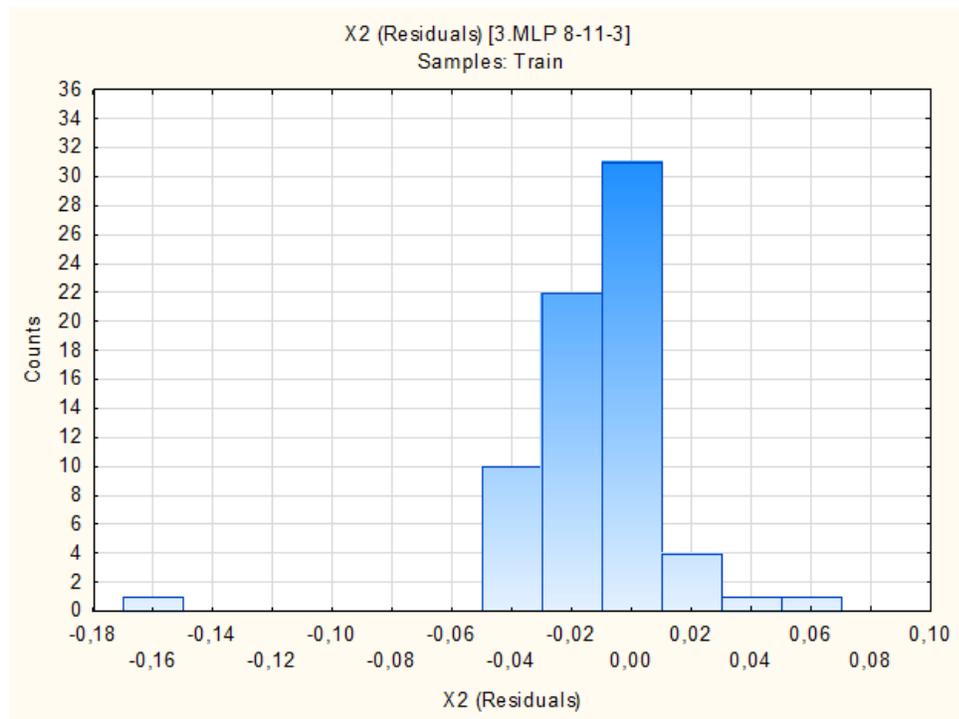


Рисунок И.16 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-11-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

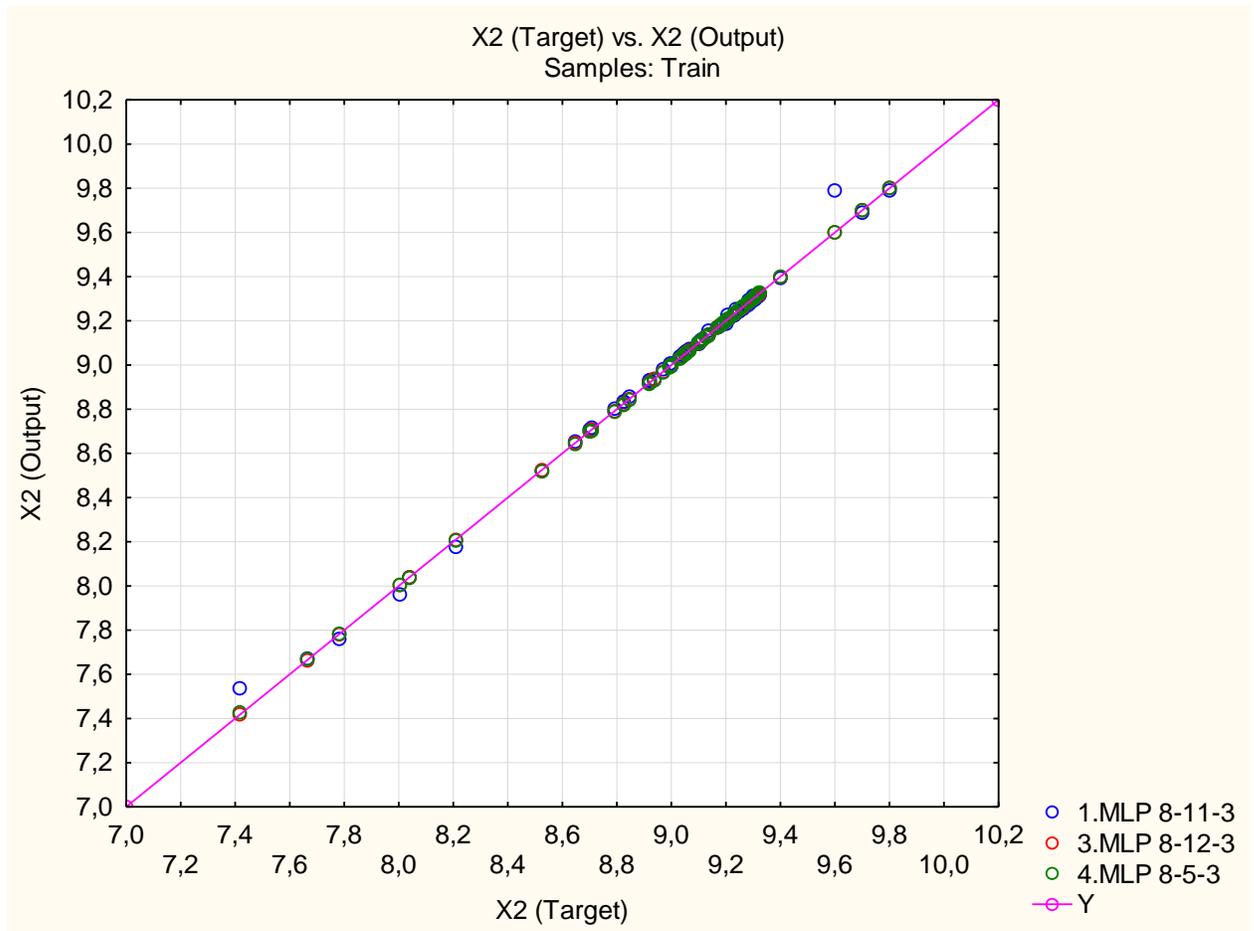


Рисунок И.17 – Графік значень параметра X_2 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

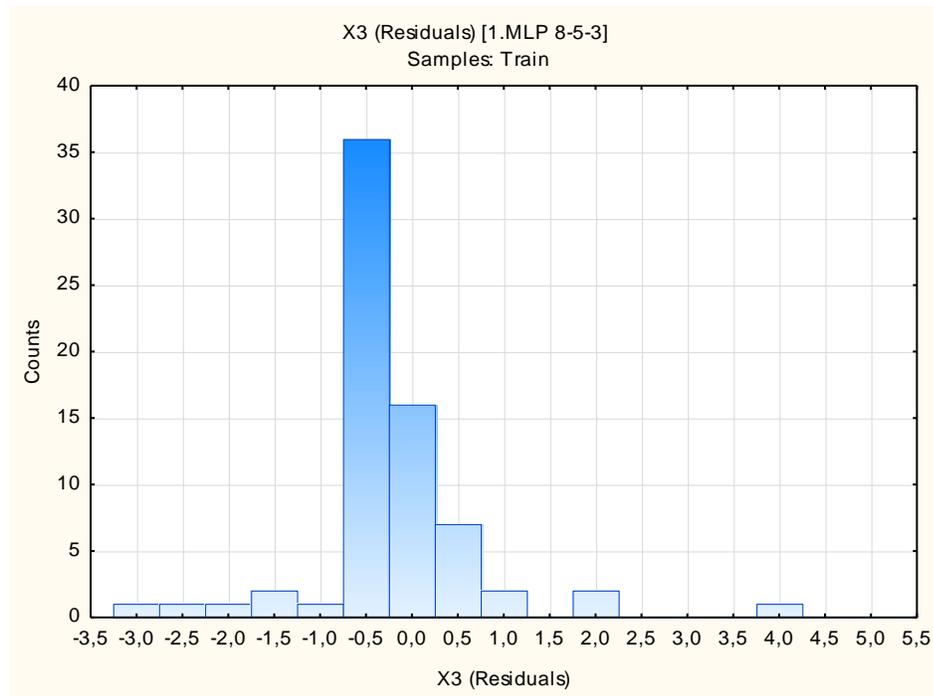


Рисунок И.18 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-5-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

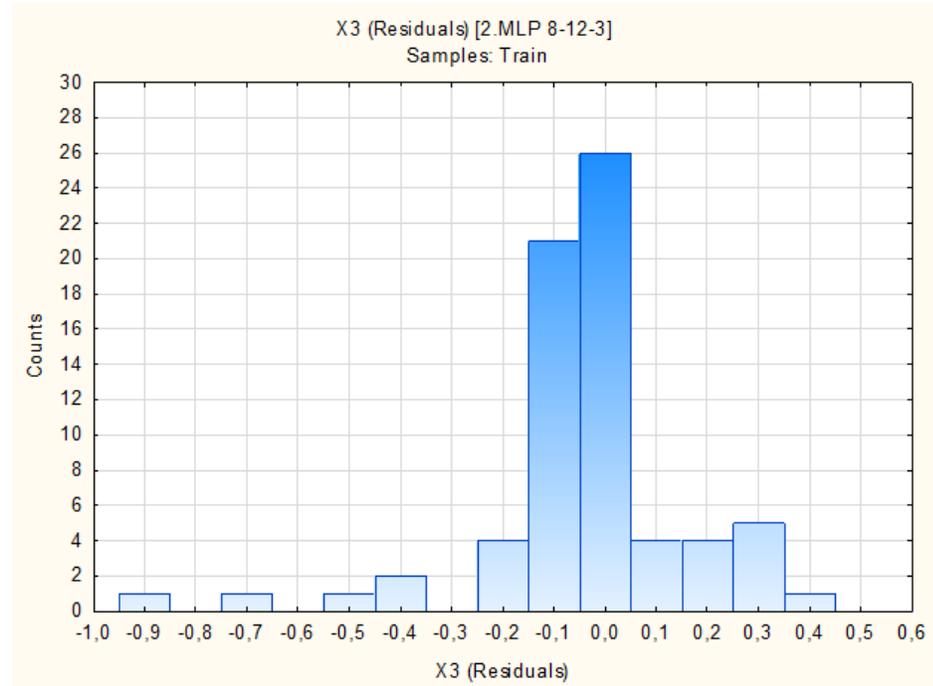


Рисунок И.19 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-12-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

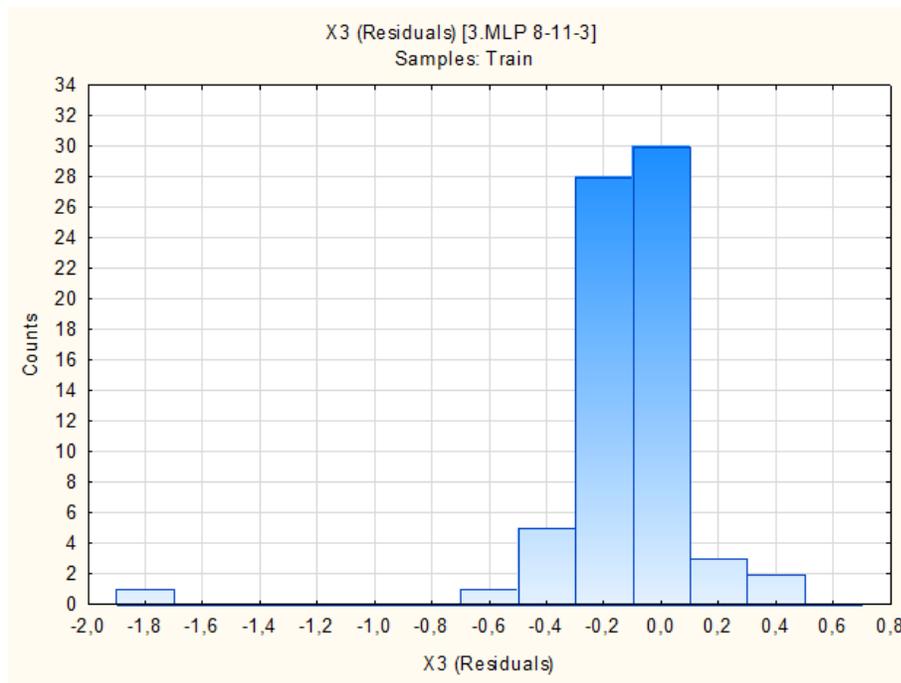


Рисунок И.20 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-11-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

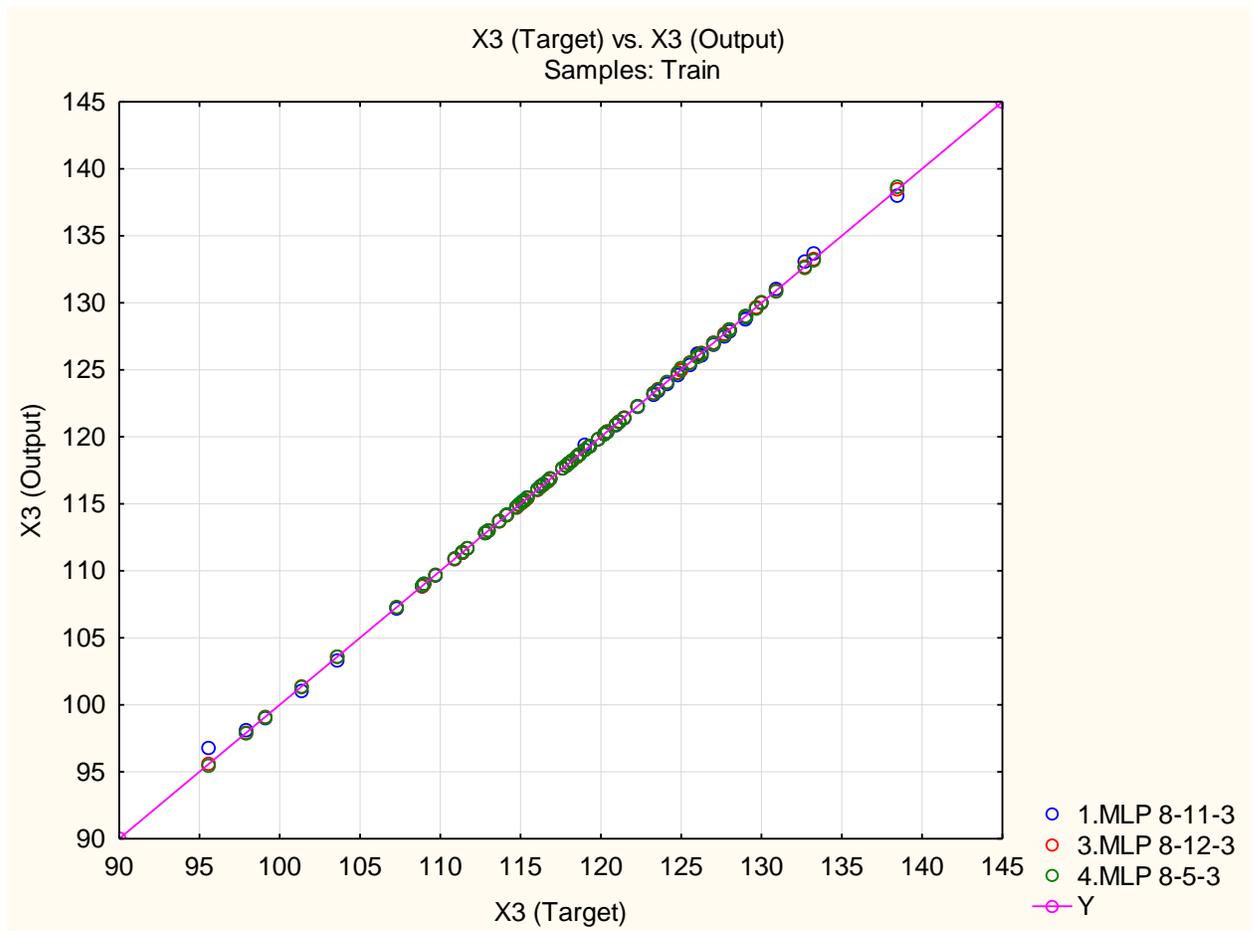


Рисунок И.21 – Графік значень параметра X_3 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

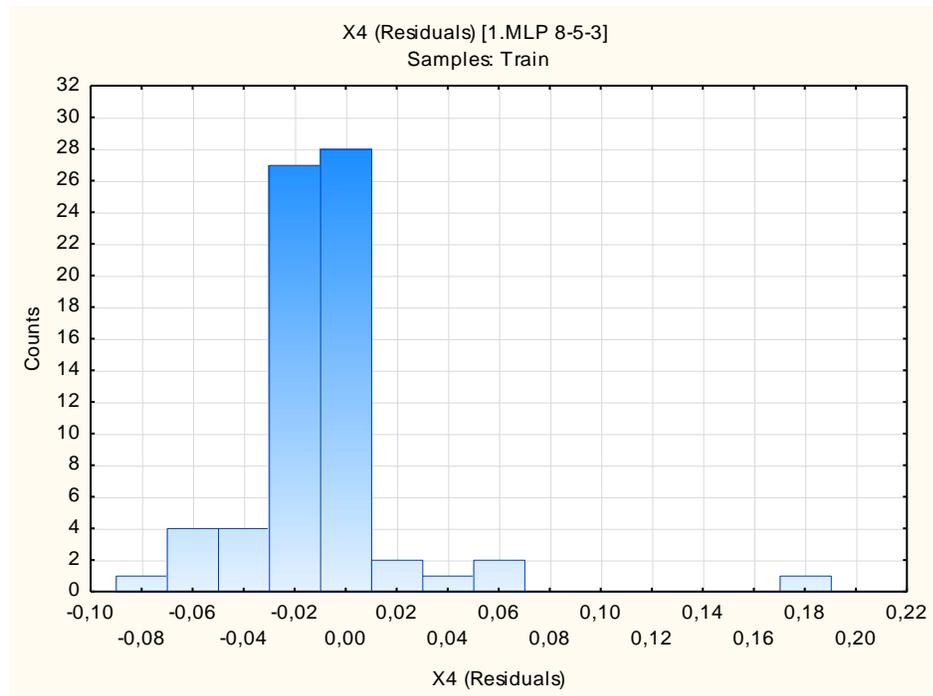


Рисунок И.22 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-5-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

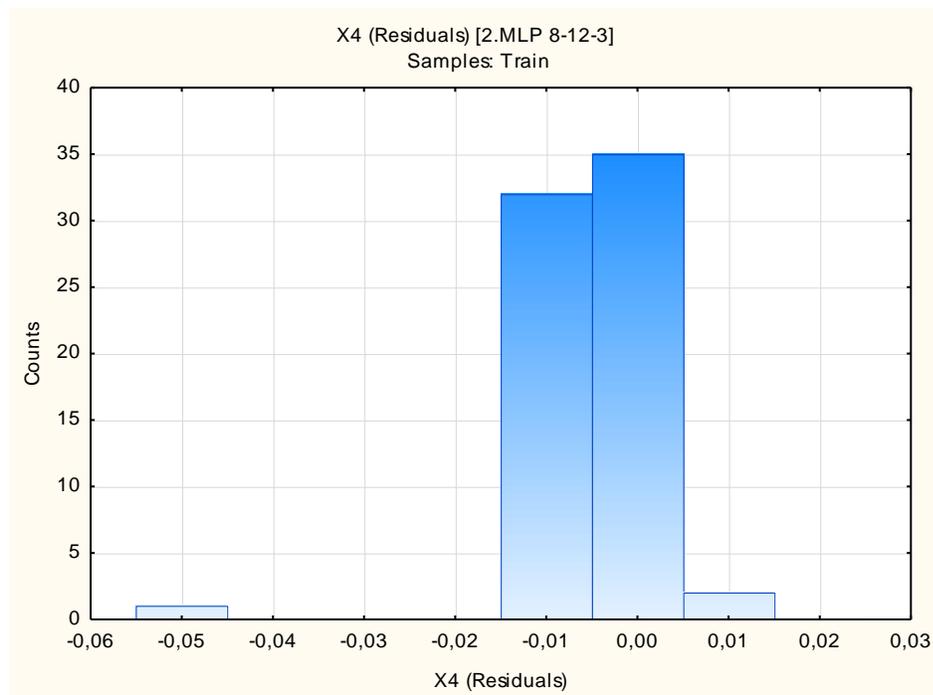


Рисунок И.23 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-12-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

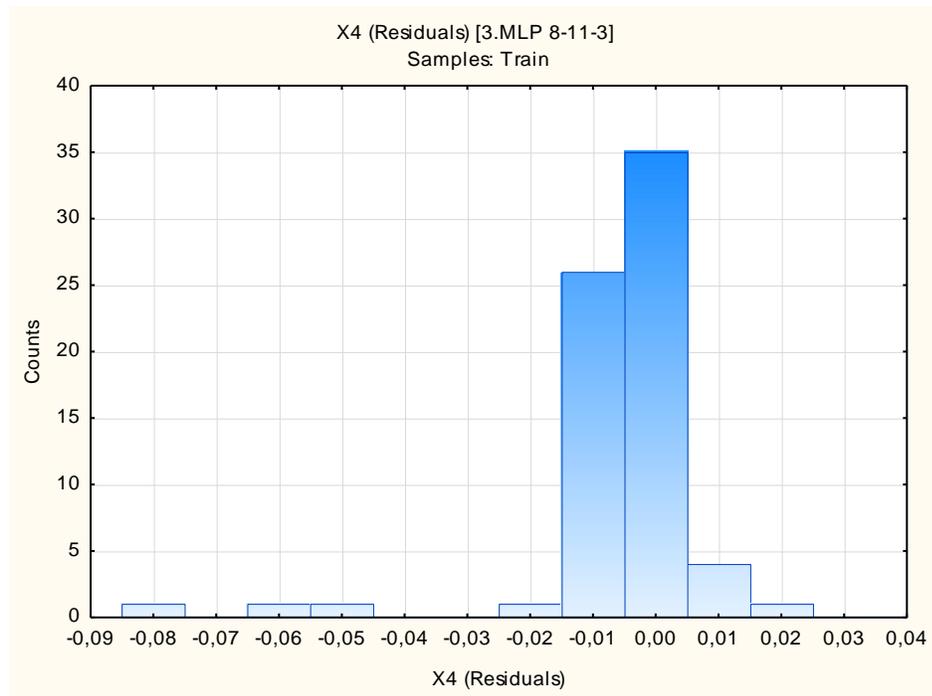


Рисунок И.24 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-11-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

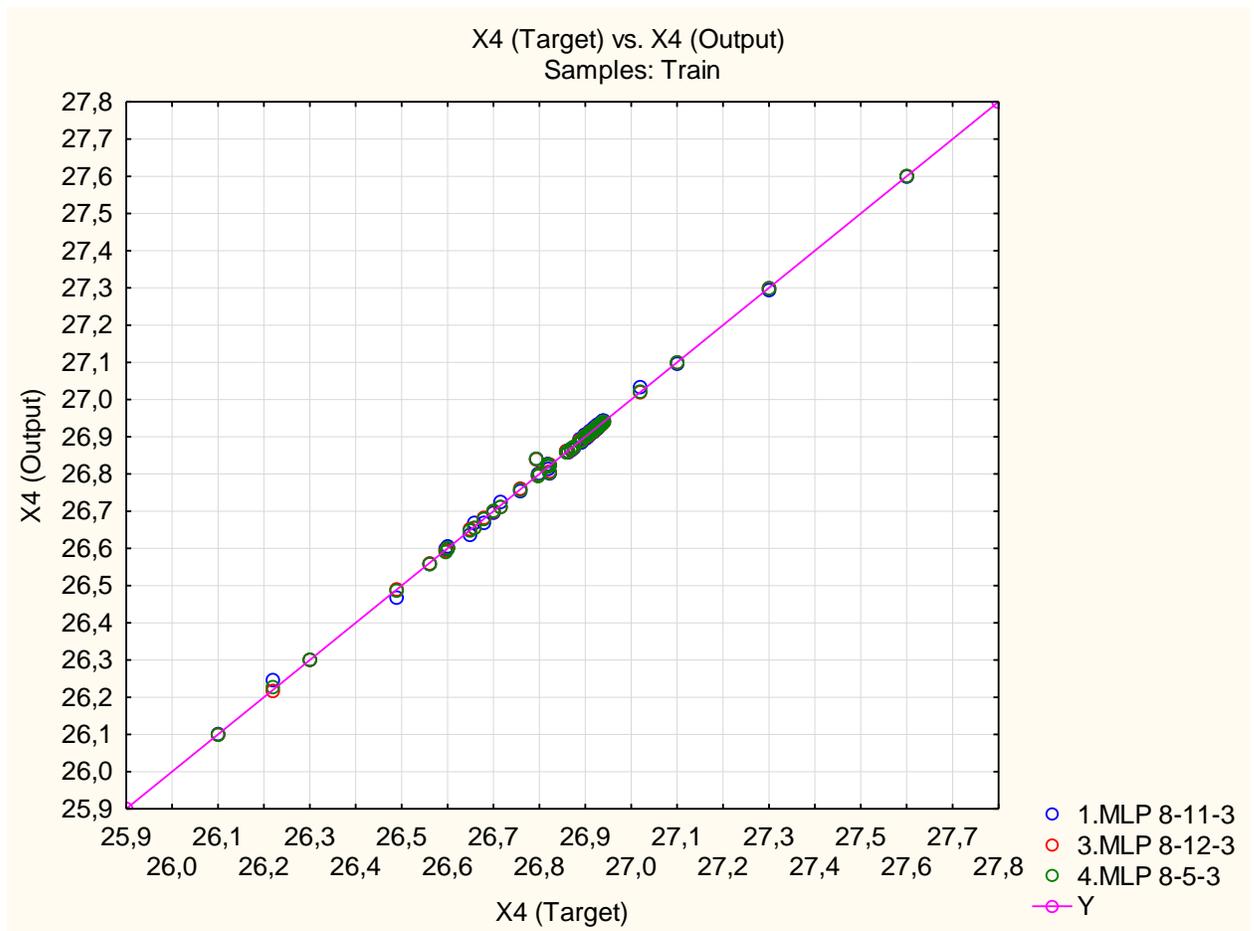


Рисунок И.25 – Графік значень параметра X_4 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=3,5$

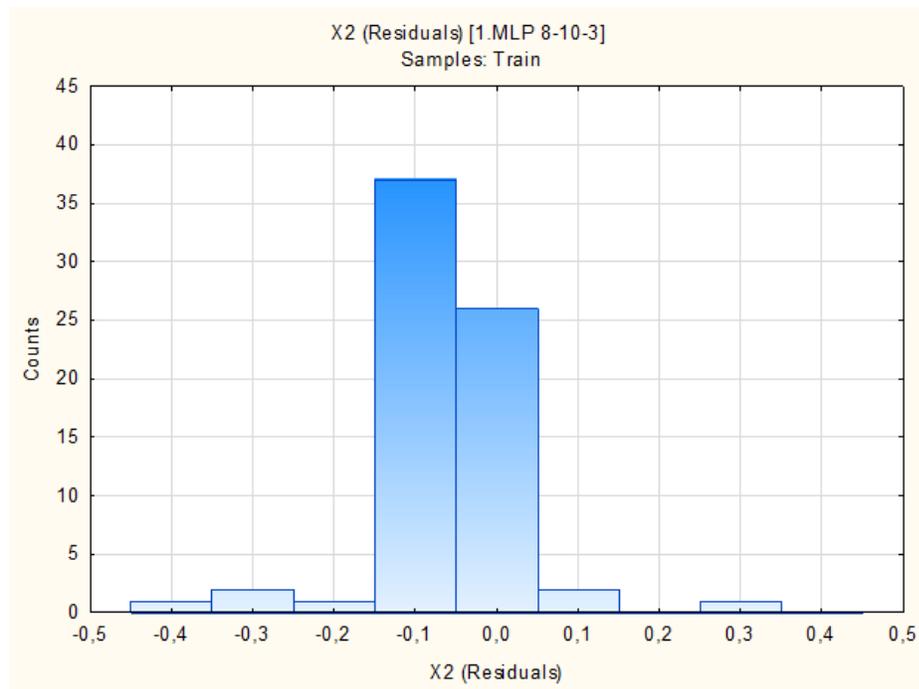


Рисунок И.26 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-10-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

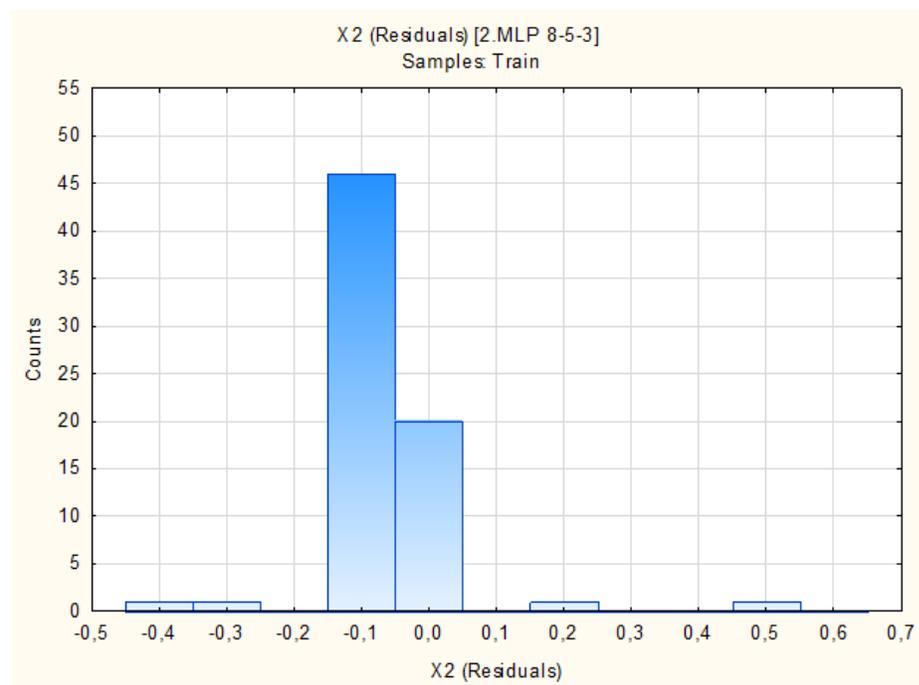


Рисунок И.27 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-6-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

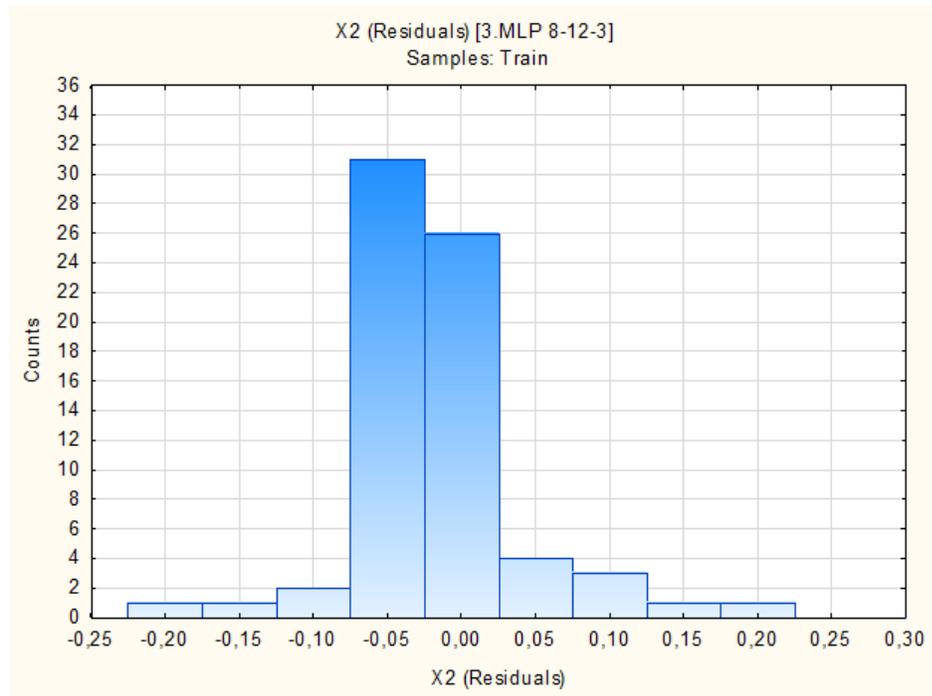


Рисунок И.28 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-12-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

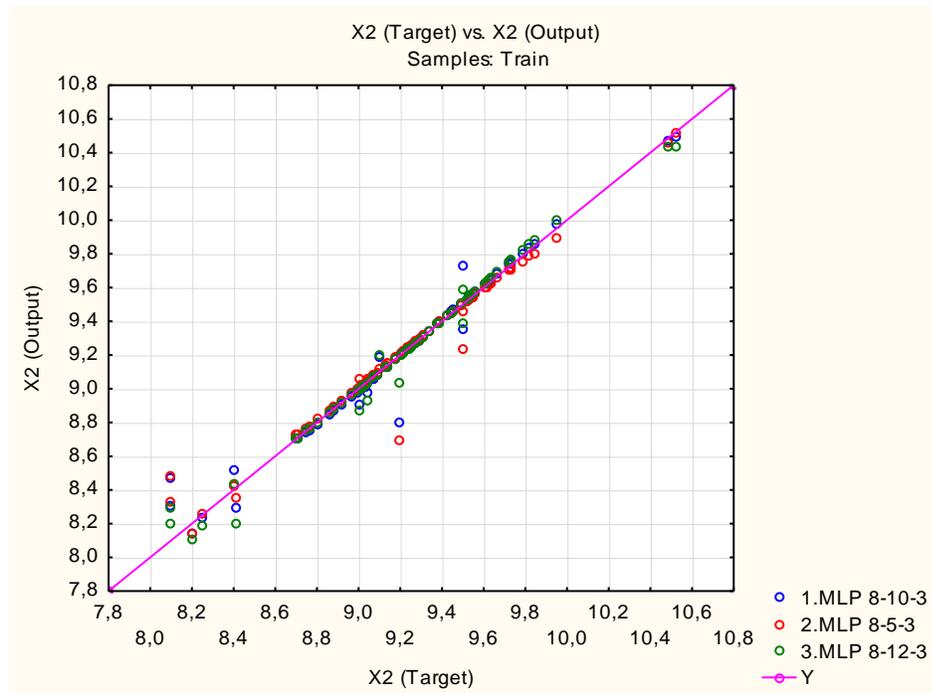


Рисунок И.29 – Графік значень параметра X_2 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

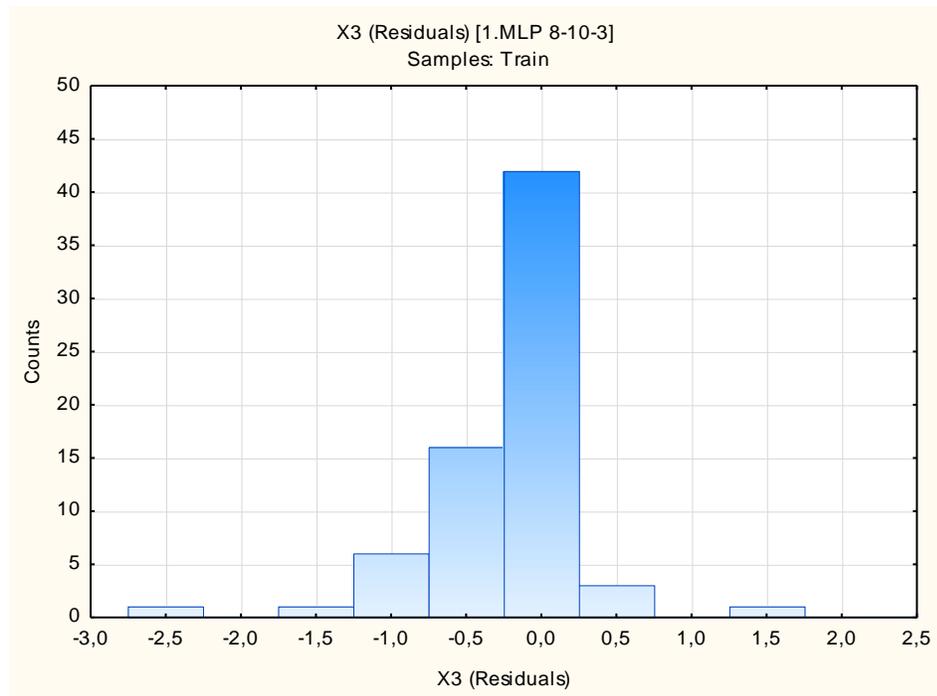


Рисунок И.30 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-10-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

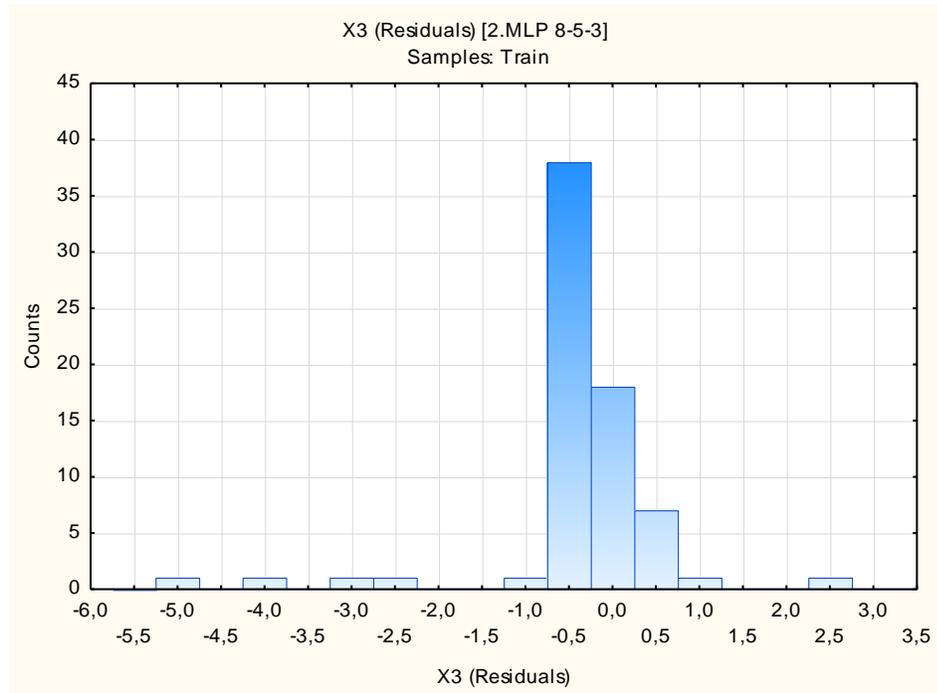


Рисунок И.31 – Діаграма залишків значень параметра X_3 виходу нейронних мереж типу MLP-8-5-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

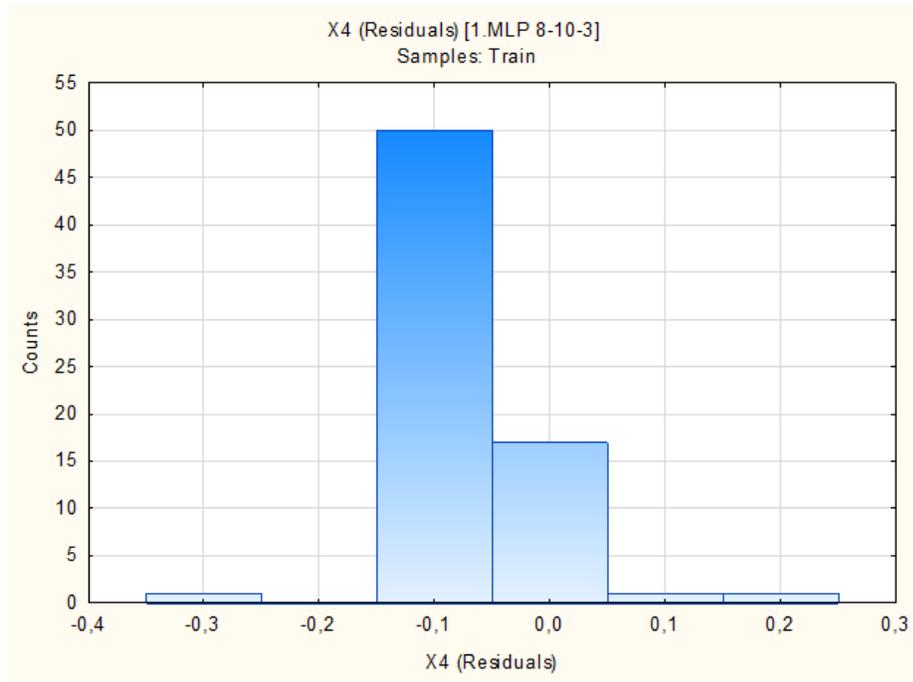


Рисунок И.34 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-10-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

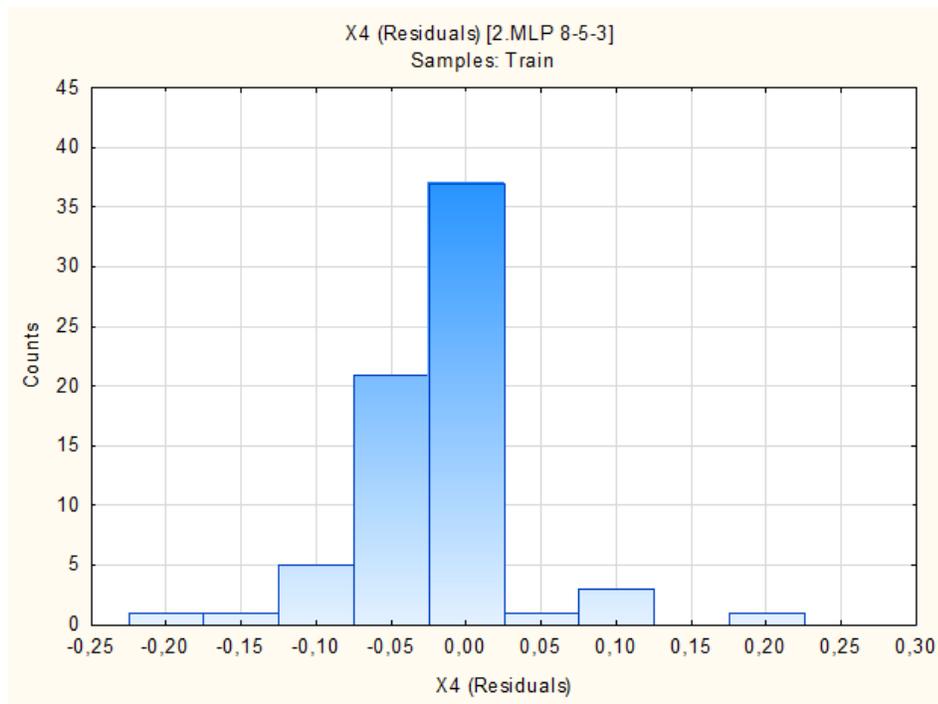


Рисунок И.35 – Діаграма залишків значень параметра X_2 виходу нейронних мереж типу MLP-8-6-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

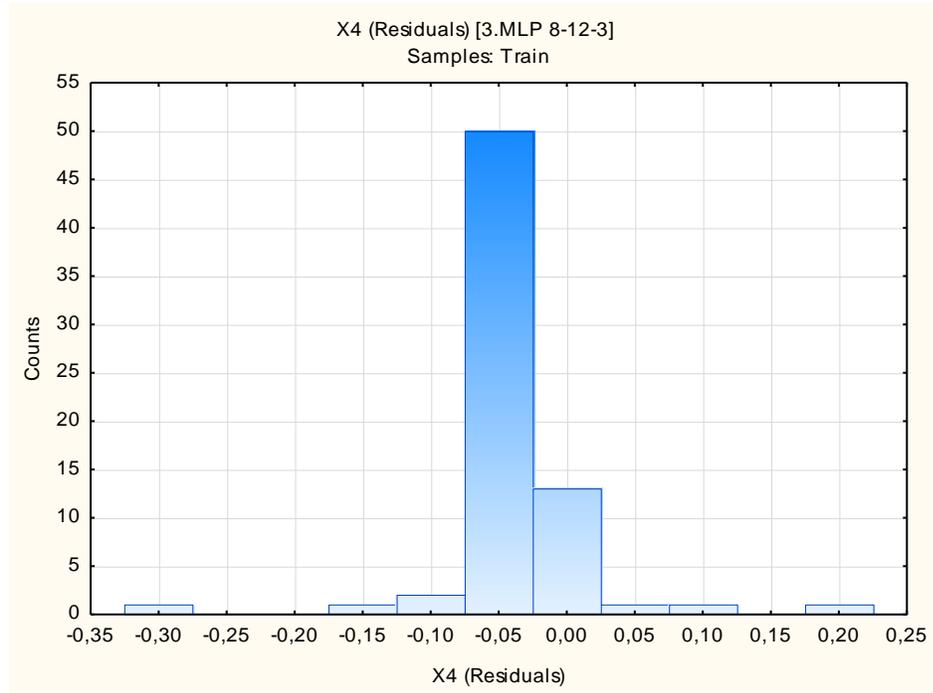


Рисунок И.36 – Діаграма залишків значень параметра X_4 виходу нейронних мереж типу MLP-8-12-3 від цільових значень за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

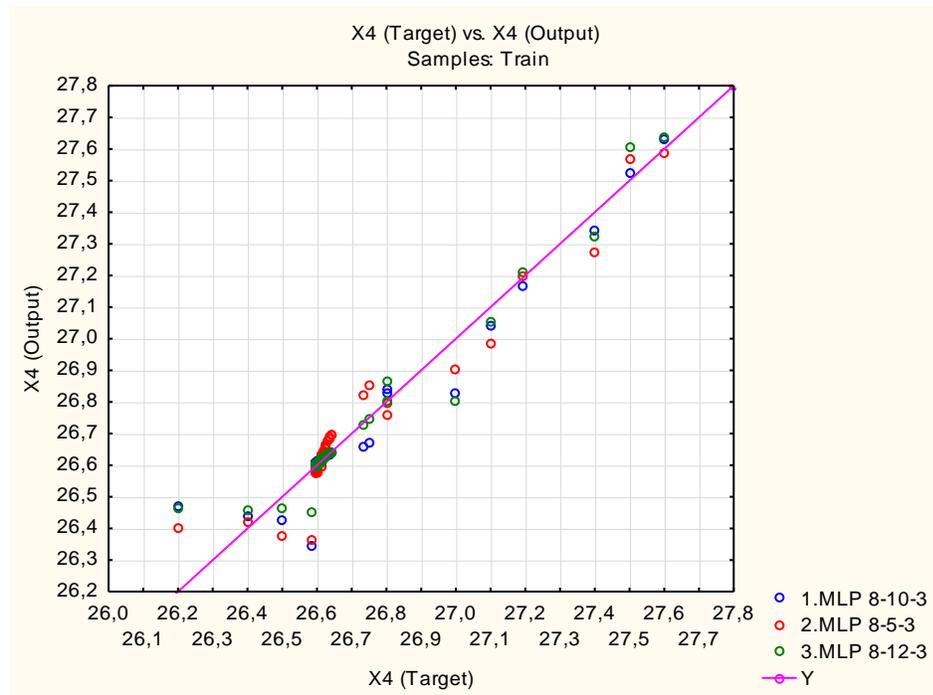


Рисунок И.37 – Графік значень параметра X_4 на тренувальній вибірці нейронних мереж за умови встановлення значення параметра $X_1=4,5$

Додаток К

Результати класифікації виробничих ситуацій за значеннями мінімальної витрати електричної енергії в процесі сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

Таблиця К.1 – Результати класифікації виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=2,5$

№п/п	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄	Клас
1	41,40	341,00	17,10	27,60	27,00	42,00	1,74	3,49	2,50	8,93	127,00	26,10	32,31	1
2	41,20	333,00	16,10	26,10	26,00	43,70	1,54	2,66	2,50	8,97	128,10	25,91	29,66	1
3	43,60	417,00	23,00	24,70	28,00	41,10	1,49	3,50	2,50	8,89	118,30	26,20	32,90	1
4	41,53	341,20	15,08	24,83	24,83	42,59	1,48	2,33	2,50	8,75	125,70	25,85	29,43	1
5	41,65	343,01	15,20	24,92	24,91	42,57	1,49	2,37	2,50	8,72	124,99	26,01	31,16	1
6	41,42	339,39	14,96	24,73	24,75	42,60	1,48	2,29	2,50	8,86	124,67	25,68	27,59	1
7	40,90	305,00	16,80	28,00	26,00	43,80	1,66	2,53	2,50	9,87	119,00	26,50	32,88	1
мінімальне значення										8,72	118,30	25,68	27,59	
максимальне значення										9,87	128,10	26,50	32,90	
середнє значення										9,00	123,96	26,04	30,85	
8	42,90	425,00	15,90	26,60	26,00	39,00	1,54	2,09	2,50	9,50	116,00	26,49	34,33	2
9	42,60	385,00	22,00	26,60	28,50	41,40	1,58	5,82	2,50	9,90	118,00	26,56	36,85	2
10	45,00	399,00	15,90	27,10	25,50	41,40	1,52	2,12	2,50	10,11	111,00	26,52	36,15	2
11	44,97	394,65	18,63	27,61	27,19	42,12	1,61	3,51	2,50	8,48	130,17	26,54	33,11	2
12	44,70	390,42	18,35	27,39	27,01	42,15	1,60	3,41	2,50	8,64	127,82	26,70	36,40	2
13	44,80	391,86	18,45	27,46	27,07	42,14	1,60	3,45	2,50	8,58	128,61	26,62	35,34	2
14	44,68	390,05	18,33	27,37	26,99	42,16	1,60	3,41	2,50	8,65	127,62	26,72	36,65	2
15	44,91	393,67	18,57	27,56	27,15	42,13	1,61	3,49	2,50	8,51	129,62	26,51	33,92	2
16	45,10	407,00	16,00	28,00	26,00	40,50	1,60	1,67	2,50	9,20	113,00	26,72	37,13	2
мінімальне значення										8,48	111,00	26,49	33,11	
максимальне значення										10,11	130,17	26,72	37,13	

Продовження таблиці К.1.

середнє значення										9,11	122,09	26,60	35,47	
17	45,40	358,00	15,50	26,60	26,00	43,90	1,61	1,95	2,50	9,90	112,00	26,71	38,02	3
18	47,10	376,00	18,00	28,00	25,50	43,40	1,55	4,19	2,50	10,20	117,00	26,90	41,47	3
19	45,20	369,00	15,70	26,10	25,00	43,30	1,44	2,52	2,50	10,22	111,00	27,09	42,54	3
20	44,17	382,17	17,80	26,96	26,64	42,23	1,58	3,23	2,50	8,95	123,42	27,06	41,04	3
21	43,90	378,01	17,53	26,74	26,46	42,26	1,57	3,14	2,50	9,10	121,30	27,17	42,49	3
22	44,07	380,66	17,70	26,88	26,57	42,24	1,58	3,20	2,50	9,00	122,64	27,11	41,64	3
23	44,17	382,14	17,80	26,96	26,64	42,23	1,58	3,23	2,50	8,95	123,41	27,06	41,05	3
24	44,09	380,85	17,72	26,89	26,58	42,24	1,58	3,20	2,50	9,00	122,74	27,10	41,57	3
25	44,19	382,40	17,82	26,97	26,65	42,22	1,58	3,24	2,50	8,94	123,54	27,05	40,94	3
26	44,03	379,97	17,66	26,85	26,54	42,25	1,58	3,18	2,50	9,03	122,29	27,12	41,88	3
27	44,10	381,00	17,73	26,90	26,59	42,24	1,58	3,21	2,50	8,99	122,82	27,10	41,51	3
28	44,47	386,78	18,11	27,20	26,84	42,19	1,59	3,33	2,50	9,78	125,85	26,89	38,73	3
29	43,83	376,86	17,45	26,68	26,41	42,27	1,57	3,12	2,50	9,14	120,72	27,18	42,79	3
30	44,23	383,04	17,86	27,01	26,68	42,22	1,58	3,25	2,50	8,92	123,87	27,03	40,66	3
31	43,92	378,21	17,54	26,75	26,47	42,26	1,57	3,15	2,50	9,09	121,40	27,16	42,44	3
32	44,04	380,20	17,67	26,86	26,55	42,24	1,58	3,19	2,50	9,02	122,41	27,12	41,80	3
33	44,05	380,25	17,68	26,86	26,56	42,24	1,58	3,19	2,50	9,02	122,44	27,12	41,78	3
34	43,90	377,98	17,53	26,74	26,46	42,26	1,57	3,14	2,50	9,10	121,28	27,17	42,50	3
35	44,33	384,67	17,97	27,09	26,75	42,20	1,59	3,29	2,50	8,86	124,73	26,97	39,88	3
36	43,82	376,70	17,44	26,68	26,40	42,27	1,57	3,11	2,50	9,15	120,64	27,18	42,78	3
37	43,85	377,16	17,47	26,70	26,42	42,27	1,57	3,12	2,50	9,13	120,88	27,17	42,66	3
38	44,01	379,64	17,64	26,83	26,53	42,25	1,58	3,18	2,50	9,04	122,12	27,13	41,99	3
39	43,88	377,68	17,51	26,73	26,44	42,27	1,57	3,13	2,50	9,11	121,14	27,17	42,58	3
40	43,82	376,78	17,45	26,68	26,40	42,27	1,57	3,11	2,50	9,14	120,69	27,18	42,79	3
41	43,87	377,50	17,49	26,72	26,43	42,27	1,57	3,13	2,50	9,12	121,04	27,18	42,63	3
42	44,12	381,31	17,75	26,92	26,60	42,23	1,58	3,21	2,50	8,98	122,98	27,09	41,39	3
43	44,51	387,39	18,15	27,23	26,87	42,18	1,59	3,35	2,50	8,75	125,17	26,86	38,37	3

Продовження таблиці К.1.

44	43,93	378,39	17,55	26,76	26,47	42,26	1,57	3,15	2,50	9,09	121,49	27,16	42,39	3
45	44,31	384,38	17,95	27,08	26,74	42,21	1,59	3,28	2,50	8,87	124,58	26,99	40,02	3
46	44,33	384,58	17,96	27,09	26,75	42,21	1,59	3,29	2,50	8,86	124,68	26,98	39,92	3
47	43,97	379,12	17,60	26,80	26,51	42,25	1,57	3,17	2,50	9,06	121,86	27,14	42,16	3
48	44,42	385,97	18,06	27,16	26,81	42,19	1,59	3,32	2,50	8,81	125,41	26,92	39,19	3
49	44,15	381,77	17,78	26,94	26,62	42,23	1,58	3,22	2,50	8,96	123,21	27,07	41,21	3
50	44,03	379,97	17,66	26,85	26,54	42,25	1,58	3,18	2,50	9,03	122,29	27,12	41,88	3
51	44,18	382,31	17,81	26,97	26,65	42,23	1,58	3,24	2,50	8,94	123,49	27,06	40,98	3
52	44,20	382,63	17,83	26,98	26,66	42,22	1,58	3,24	2,50	10,13	123,66	27,05	40,84	3
53	44,14	381,61	17,77	26,93	26,62	42,23	1,58	3,22	2,50	9,97	123,13	27,08	41,27	3
54	44,28	383,79	17,91	27,04	26,71	42,21	1,59	3,27	2,50	9,89	124,26	27,01	40,31	3
55	44,51	387,38	18,15	27,23	26,87	42,18	1,59	3,35	2,50	9,75	125,17	26,86	38,38	3
56	44,56	388,24	18,21	27,28	26,91	42,17	1,60	3,37	2,50	9,72	125,63	26,82	37,85	3
57	44,33	384,63	17,97	27,09	26,75	42,20	1,59	3,29	2,50	9,86	124,70	26,98	39,90	3
58	41,90	377,00	16,90	24,70	27,00	42,90	1,58	4,39	2,50	9,87	110,00	27,18	43,53	3
мінімальне значення										8,75	111,00	26,71	37,85	
максимальне значення										10,22	125,85	27,18	43,53	
середнє значення										9,26	121,82	27,06	41,16	
59	44,90	367,00	15,30	24,70	25,00	43,50	1,45	2,69	2,50	9,85	112,00	27,52	47,70	4
60	43,36	369,53	16,96	26,30	26,08	42,34	1,55	2,95	2,50	9,40	117,17	27,22	43,61	4
61	43,42	370,56	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	2,50	9,36	117,66	27,22	43,61	4
62	43,45	370,93	17,06	26,38	26,14	42,32	1,55	2,99	2,50	9,35	117,84	27,23	43,60	4
63	43,24	367,75	16,85	26,21	26,00	42,35	1,55	2,92	2,50	9,46	116,34	27,20	43,54	4
64	43,32	368,93	16,92	26,27	26,05	42,34	1,55	2,94	2,50	9,42	116,89	27,22	43,60	4
65	43,20	367,08	16,80	26,17	25,97	42,36	1,55	2,90	2,50	9,48	116,03	27,20	43,48	4
66	43,50	371,70	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	2,50	9,32	118,20	27,23	43,56	4
67	43,20	367,08	16,80	26,17	25,97	42,36	1,55	2,90	2,50	9,48	116,03	27,20	43,48	4
68	43,50	371,70	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	2,50	9,32	118,20	27,23	43,56	4

Продовження таблиці К.1.

69	43,37	369,74	16,98	26,31	26,09	42,34	1,55	2,96	2,50	9,39	117,27	27,22	43,62	4
70	43,27	368,21	16,88	26,23	26,02	42,35	1,55	2,93	2,50	9,44	116,56	27,21	43,57	4
71	43,37	369,75	16,98	26,31	26,09	42,34	1,55	2,96	2,50	9,39	117,28	27,22	43,62	4
72	43,58	373,02	17,20	26,48	26,24	42,31	1,56	3,03	2,50	9,28	118,84	27,22	43,45	4
73	43,65	374,02	17,26	26,54	26,28	42,30	1,56	3,05	2,50	9,24	119,33	27,22	43,33	4
74	43,08	365,14	16,67	26,07	25,89	42,38	1,54	2,86	2,50	9,55	115,14	27,17	43,23	4
75	43,11	365,70	16,71	26,10	25,91	42,37	1,54	2,87	2,50	9,53	115,40	27,17	43,31	4
76	43,51	371,83	17,12	26,42	26,18	42,32	1,56	3,01	2,50	9,32	118,27	27,23	43,55	4
77	43,35	369,41	16,96	26,30	26,08	42,34	1,55	2,95	2,50	9,40	117,12	27,22	43,61	4
78	43,60	373,36	17,22	26,50	26,25	42,30	1,56	3,04	2,50	9,26	119,00	27,22	43,41	4
79	43,23	367,61	16,84	26,20	26,00	42,35	1,55	2,91	2,50	9,46	116,28	27,20	43,52	4
80	43,30	368,58	16,90	26,25	26,04	42,35	1,55	2,93	2,50	9,43	116,73	27,21	43,59	4
81	43,42	370,56	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	2,50	9,36	117,66	27,22	43,61	4
82	43,05	364,73	16,65	26,05	25,87	42,38	1,54	2,85	2,50	9,56	114,96	27,17	43,36	4
83	43,64	373,84	17,25	26,53	26,27	42,30	1,56	3,05	2,50	9,25	119,24	27,22	43,35	4
84	43,40	370,11	17,00	26,33	26,11	42,33	1,55	2,97	2,50	9,38	117,45	27,22	43,62	4
85	43,43	370,58	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	2,50	9,36	118,67	27,22	43,61	4
86	43,50	371,79	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	2,50	9,32	118,25	27,23	43,56	4
87	43,18	366,76	16,78	26,16	25,96	42,36	1,54	2,89	2,50	9,49	115,88	27,19	43,44	4
88	43,07	364,99	16,66	26,07	25,88	42,38	1,54	2,85	2,50	9,55	115,08	27,17	43,21	4
89	43,73	375,30	17,35	26,60	26,34	42,29	1,57	3,08	2,50	9,20	119,95	27,21	43,12	4
90	43,56	372,64	17,17	26,46	26,22	42,31	1,56	3,02	2,50	9,29	118,66	27,22	43,49	4
91	43,54	372,30	17,15	26,45	26,20	42,31	1,56	3,02	2,50	9,30	118,49	27,23	43,52	4
92	43,09	365,35	16,69	26,09	25,90	42,37	1,54	2,86	2,50	9,54	115,24	27,17	43,26	4
93	43,00	363,95	16,59	26,01	25,83	42,39	1,54	2,83	2,50	9,59	115,61	27,17	43,00	4
94	43,33	369,10	16,94	26,28	26,06	42,34	1,55	2,94	2,50	9,41	116,97	27,22	43,61	4
95	43,59	373,17	17,21	26,49	26,24	42,31	1,56	3,03	2,50	9,27	118,91	27,22	43,44	4
96	43,05	364,81	16,65	26,06	25,87	42,38	1,54	2,85	2,50	9,56	114,99	27,17	43,19	4

Продовження таблиці К.1.

97	43,57	372,82	17,18	26,47	26,23	42,31	1,56	3,03	2,50	9,28	118,74	27,22	43,47	4
98	43,30	368,70	16,91	26,26	26,04	42,34	1,55	2,94	2,50	9,43	116,79	27,21	43,59	4
99	43,63	373,79	17,25	26,52	26,27	42,30	1,56	3,05	2,50	9,25	119,22	27,22	43,36	4
100	43,68	374,50	17,29	26,56	26,30	42,29	1,56	3,06	2,50	9,22	119,56	27,21	43,26	4
мінімальне значення										9,20	112,00	27,17	43,00	
максимальне значення										9,85	119,95	27,52	47,70	
середнє значення										9,40	117,24	27,22	43,56	

Таблиця К.2 – Результати класифікації виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=3,5$

№п/ п	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄	група
1	40,90	305,00	16,80	28,00	26,00	43,80	1,66	2,53	3,5	9,000	109,000	26,300	46,283	1
2	41,20	333,00	16,10	26,10	26,00	43,70	1,54	2,66	3,5	9,000	113,000	26,100	44,310	1
3	45,96	409,96	19,65	28,41	27,87	41,98	1,65	3,84	3,5	7,664	127,921	26,562	46,973	1
4	45,84	408,15	19,53	28,31	27,79	42,00	1,64	3,80	3,5	7,782	119,084	26,595	47,564	1
5	46,08	411,77	19,77	28,50	27,95	41,97	1,65	3,88	3,5	7,542	126,743	26,526	46,356	1
6	39,90	315,87	13,40	23,51	23,71	42,81	1,42	1,77	3,5	8,039	138,434	26,219	43,535	1
7	46,19	413,57	19,89	28,59	28,03	41,95	1,66	3,92	3,5	7,416	115,550	26,489	45,714	1
8	42,60	385,00	22,00	26,60	28,50	41,40	1,58	5,82	3,5	9,300	127,000	26,600	49,655	1
9	45,49	402,72	19,17	28,03	27,55	42,05	1,63	3,69	3,5	8,110	106,483	26,677	49,183	1
10	45,38	400,91	19,05	27,94	27,47	42,06	1,63	3,65	3,5	8,210	108,586	26,685	49,671	1
11	45,61	404,53	19,29	28,12	27,63	42,03	1,63	3,73	3,5	8,005	118,365	26,658	48,669	1
максимальне значення										9,300	138,434	26,685	49,671	
мінімальне значення										7,416	106,483	26,100	43,535	
середнє значення										8,188	119,106	26,492	47,083	
12	45,40	358,00	15,50	26,60	26,00	43,90	1,61	1,95	3,5	8,700	127,000	26,800	51,952	2

Продовження таблиці К.2.

13	43,60	417,00	23,00	24,70	28,00	41,10	1,49	3,50	3,5	9,200	126,000	26,650	50,051	2
14	41,40	341,00	17,10	27,60	27,00	42,00	1,74	3,49	3,5	9,100	130,000	26,700	50,925	2
15	44,97	394,65	18,63	27,61	27,19	42,12	1,61	3,51	3,5	8,524	120,373	26,798	51,160	2
16	44,70	390,42	18,35	27,39	27,01	42,15	1,60	3,41	3,5	8,707	118,521	26,793	51,592	2
17	44,80	391,86	18,45	27,46	27,07	42,14	1,60	3,45	3,5	8,648	124,796	26,819	51,714	2
18	45,03	395,48	18,69	27,65	27,23	42,11	1,61	3,53	3,5	8,486	123,268	26,788	50,980	2
19	45,26	399,10	18,93	27,84	27,39	42,08	1,62	3,61	3,5	8,306	126,264	26,741	50,133	2
20	41,53	341,20	15,08	24,83	24,83	42,59	1,48	2,33	3,5	9,092	127,671	26,733	51,317	2
21	41,30	337,58	14,84	24,64	24,67	42,62	1,48	2,25	3,5	8,994	125,537	26,679	50,514	2
22	44,91	393,67	18,57	27,56	27,15	42,13	1,61	3,49	3,5	8,569	126,975	26,809	51,365	2
23	45,14	397,29	18,81	27,75	27,31	42,09	1,62	3,57	3,5	8,398	125,747	26,765	50,570	2
24	41,65	343,01	15,20	24,92	24,91	42,57	1,49	2,37	3,5	9,135	130,927	26,758	51,679	2
25	41,42	339,39	14,96	24,73	24,75	42,60	1,48	2,29	3,5	9,045	132,124	26,707	50,928	2
26	41,19	335,77	14,72	24,55	24,59	42,63	1,47	2,21	3,5	8,938	133,260	26,649	50,074	2
27	45,20	369,00	15,70	26,10	25,00	43,30	1,44	2,52	3,5	9,500	122,000	26,820	52,300	2
28	44,47	386,78	18,11	27,20	26,84	42,19	1,59	3,33	3,5	8,846	111,679	26,875	52,595	2
29	44,33	384,67	17,97	27,09	26,75	42,20	1,59	3,29	3,5	8,918	112,808	26,891	52,896	2
30	44,51	387,39	18,15	27,23	26,87	42,18	1,59	3,35	3,5	8,824	111,351	26,870	52,502	2
31	44,31	384,38	17,95	27,08	26,74	42,21	1,59	3,28	3,5	8,927	112,963	26,893	52,936	2
32	44,33	384,58	17,96	27,09	26,75	42,21	1,59	3,29	3,5	8,921	112,856	26,891	52,909	2
33	44,42	385,97	18,06	27,16	26,81	42,19	1,59	3,32	3,5	8,874	112,119	26,881	52,716	2
34	44,51	387,38	18,15	27,23	26,87	42,18	1,59	3,35	3,5	8,824	111,358	26,870	52,504	2
35	44,56	388,24	18,21	27,28	26,91	42,17	1,60	3,37	3,5	8,792	110,884	26,863	52,365	2
36	44,33	384,63	17,97	27,09	26,75	42,20	1,59	3,29	3,5	8,919	112,834	26,891	52,903	2
37	42,00	348,44	15,56	25,21	25,15	42,52	1,50	2,49	3,5	9,237	129,019	26,823	52,612	2
38	42,12	350,25	15,68	25,30	25,23	42,51	1,51	2,53	3,5	9,262	128,352	26,841	52,871	2
39	41,88	346,63	15,44	25,11	25,07	42,54	1,50	2,45	3,5	9,207	129,670	26,823	52,527	2
	мінімальне значення									8,306	110,884	26,649	50,051	

Продовження таблиці К.2.

	максимальне значення									9,500	133,260	26,893	52,936	
	середнє значення									8,890	122,013	26,801	51,771	
40	45,10	407,00	16,00	28,00	26,00	40,50	1,60	1,67	3,5	9,800	126,000	26,890	53,529	3
41	41,90	377,00	16,90	24,70	27,00	42,90	1,58	4,39	3,5	9,400	125,000	26,900	54,171	3
42	43,72	375,22	17,34	26,60	26,33	42,29	1,56	3,08	3,5	9,169	117,620	26,934	53,819	3
43	44,17	382,17	17,80	26,96	26,64	42,23	1,58	3,23	3,5	8,996	114,122	26,906	53,209	3
44	43,90	378,01	17,53	26,74	26,46	42,26	1,57	3,14	3,5	9,107	116,241	26,926	53,620	3
45	43,70	374,80	17,31	26,58	26,31	42,29	1,56	3,07	3,5	9,177	117,824	26,935	53,844	3
46	44,07	380,66	17,70	26,88	26,57	42,24	1,58	3,20	3,5	9,039	114,903	26,914	53,375	3
47	43,36	369,53	16,96	26,30	26,08	42,34	1,55	2,95	3,5	9,263	120,320	26,940	54,035	3
48	44,17	382,14	17,80	26,96	26,64	42,23	1,58	3,23	3,5	8,997	114,136	26,907	53,212	3
49	43,42	370,56	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	3,5	9,249	119,838	26,940	54,015	3
50	43,45	370,93	17,06	26,38	26,14	42,32	1,55	2,99	3,5	9,244	119,668	26,940	54,005	3
51	43,24	367,75	16,85	26,21	26,00	42,35	1,55	2,92	3,5	9,283	121,132	26,938	54,050	3
52	44,09	380,85	17,72	26,89	26,58	42,24	1,58	3,20	3,5	9,034	114,806	26,913	53,355	3
53	44,19	382,40	17,82	26,97	26,65	42,22	1,58	3,24	3,5	8,989	114,005	26,905	53,183	3
54	43,32	368,93	16,92	26,27	26,05	42,34	1,55	2,94	3,5	9,270	120,595	26,939	54,043	3
55	43,20	367,08	16,80	26,17	25,97	42,36	1,55	2,90	3,5	9,290	121,434	26,937	54,049	3
56	43,50	371,70	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	3,5	9,232	119,308	26,939	53,983	3
57	43,20	367,08	16,80	26,17	25,97	42,36	1,55	2,90	3,5	9,290	121,434	26,937	54,049	3
58	43,50	371,70	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	3,5	9,232	119,308	26,939	53,983	3
59	42,81	360,95	16,40	25,86	25,70	42,41	1,53	2,77	3,5	9,323	124,103	26,918	53,879	3
60	44,03	379,97	17,66	26,85	26,54	42,25	1,58	3,18	3,5	9,057	115,252	26,918	53,443	3
61	44,10	381,00	17,73	26,90	26,59	42,24	1,58	3,21	3,5	9,029	114,727	26,913	53,339	3
62	43,37	369,74	16,98	26,31	26,09	42,34	1,55	2,96	3,5	9,260	120,220	26,940	54,031	3
63	43,83	376,86	17,45	26,68	26,41	42,27	1,57	3,12	3,5	9,134	116,815	26,930	53,709	3
64	43,27	368,21	16,88	26,23	26,02	42,35	1,55	2,93	3,5	9,278	120,922	26,939	54,049	3
65	43,63	373,71	17,24	26,52	26,27	42,30	1,56	3,05	3,5	9,198	118,349	26,937	53,901	3

Продовження таблиці К.2.

66	42,89	362,27	16,48	25,92	25,76	42,40	1,53	2,79	3,5	9,320	123,545	26,924	53,940	3
67	43,67	374,42	17,29	26,56	26,30	42,29	1,56	3,06	3,5	9,185	118,007	26,936	53,864	3
68	44,23	383,04	17,86	27,01	26,68	42,22	1,58	3,25	3,5	8,970	113,670	26,901	53,106	3
69	43,37	369,75	16,98	26,31	26,09	42,34	1,55	2,96	3,5	9,260	120,217	26,940	54,031	3
70	43,58	373,02	17,20	26,48	26,24	42,31	1,56	3,03	3,5	9,210	118,680	26,938	53,933	3
71	43,39	370,08	17,00	26,33	26,11	42,33	1,55	2,97	3,5	9,256	120,064	26,940	54,025	3
72	43,92	378,21	17,54	26,75	26,47	42,26	1,57	3,15	3,5	9,102	116,141	26,925	53,603	3
73	44,04	380,20	17,67	26,86	26,55	42,24	1,58	3,19	3,5	9,051	115,136	26,917	53,421	3
74	44,05	380,25	17,68	26,86	26,56	42,24	1,58	3,19	3,5	9,050	115,109	26,916	53,415	3
75	43,65	374,02	17,26	26,54	26,28	42,30	1,56	3,05	3,5	9,192	118,201	26,937	53,886	3
76	43,90	377,98	17,53	26,74	26,46	42,26	1,57	3,14	3,5	9,108	116,259	26,926	53,622	3
77	43,82	376,70	17,44	26,68	26,40	42,27	1,57	3,11	3,5	9,137	116,896	26,930	53,721	3
78	43,85	377,16	17,47	26,70	26,42	42,27	1,57	3,12	3,5	9,127	116,666	26,929	53,687	3
79	44,01	379,64	17,64	26,83	26,53	42,25	1,58	3,18	3,5	9,066	115,420	26,919	53,475	3
80	43,88	377,68	17,51	26,73	26,44	42,27	1,57	3,13	3,5	9,115	116,407	26,927	53,647	3
81	43,08	365,14	16,67	26,07	25,89	42,38	1,54	2,86	3,5	9,306	122,299	26,933	54,027	3
82	43,00	363,93	16,59	26,01	25,83	42,39	1,54	2,83	3,5	9,313	122,828	26,930	53,999	3
83	43,82	376,78	17,45	26,68	26,40	42,27	1,57	3,11	3,5	9,135	116,852	26,930	53,715	3
84	43,87	377,50	17,49	26,72	26,43	42,27	1,57	3,13	3,5	9,119	116,498	26,928	53,661	3
85	44,12	381,31	17,75	26,92	26,60	42,23	1,58	3,21	3,5	9,021	114,566	26,911	53,305	3
86	43,11	365,70	16,71	26,10	25,91	42,37	1,54	2,87	3,5	9,302	122,049	26,934	54,037	3
87	43,93	378,39	17,55	26,76	26,47	42,26	1,57	3,15	3,5	9,098	116,055	26,924	53,588	3
88	43,51	371,83	17,12	26,42	26,18	42,32	1,56	3,01	3,5	9,230	119,244	26,939	53,978	3
89	43,35	369,41	16,96	26,30	26,08	42,34	1,55	2,95	3,5	9,264	120,123	26,940	54,037	3
90	43,60	373,36	17,22	26,50	26,25	42,30	1,56	3,04	3,5	9,204	118,651	26,938	53,918	3
91	42,70	359,29	16,29	25,77	25,63	42,43	1,53	2,73	3,5	9,324	116,796	26,910	53,782	3
92	42,93	362,91	16,53	25,96	25,79	42,40	1,54	2,81	3,5	9,318	123,268	26,926	53,965	3
93	42,47	355,68	16,04	25,58	25,47	42,46	1,52	2,65	3,5	9,312	123,264	26,887	53,495	3

Продовження таблиці К.2.

94	42,23	352,06	15,80	25,39	25,31	42,49	1,51	2,57	3,5	9,283	124,671	26,898	53,105	3
95	42,58	357,49	16,17	25,68	25,55	42,44	1,52	2,69	3,5	9,320	123,837	26,899	53,651	3
96	42,35	353,87	15,92	25,49	25,39	42,47	1,51	2,61	3,5	9,300	125,975	26,893	53,313	3
	мінімальне значення									8,970	113,670	26,887	53,105	
	максимальне значення									9,800	126,000	26,940	54,171	
	середнє значення									9,158	118,901	26,924	53,731	
97	42,90	425,00	15,90	26,60	26,00	39,00	1,54	2,09	3,5	9,600	99,084	27,100	55,776	4
98	44,90	367,00	15,30	24,70	25,00	43,50	1,45	2,69	3,5	9,300	96,743	27,300	59,480	4
99	47,10	376,00	18,00	28,00	25,50	43,40	1,55	4,19	3,5	9,100	98,434	27,600	60,295	4
100	45,00	399,00	15,90	27,10	25,50	41,40	1,52	2,12	3,5	9,700	95,550	27,010	55,007	4
	мінімальне значення									9,100	95,550	27,010	55,007	
	максимальне значення									9,700	99,084	27,600	60,295	
	середнє значення									9,425	97,453	27,253	57,639	

Таблиця К.3 – Результати класифікації виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=4,5$

№п/п	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄	група
1	40,90	305,00	16,80	28,00	26,00	43,80	1,66	2,53	4,50	8,20	138,50	26,40	60,60	1
2	41,20	333,00	16,10	26,10	26,00	43,70	1,54	2,66	4,50	8,25	142,50	26,50	61,46	1
3	45,40	358,00	15,50	26,60	26,00	43,90	1,61	1,95	4,50	8,10	138,50	26,58	62,47	1
4	45,10	407,00	16,00	28,00	26,00	40,50	1,60	1,67	4,50	8,40	143,50	26,20	62,87	1
	максимальне значення									8,40	143,50	26,58	62,87	
	мінімальне значення									8,10	138,50	26,20	60,60	
	середнє значення									8,24	140,75	26,42	61,85	
5	43,60	417,00	23,00	24,70	28,00	41,10	1,49	3,50	4,50	9,09	144,00	26,70	64,86	2
6	42,60	385,00	22,00	26,60	28,50	41,40	1,58	5,82	4,50	9,04	140,00	26,72	63,15	2

Продовження таблиці К.3.

7	41,40	341,00	17,10	27,60	27,00	42,00	1,74	3,49	4,50	8,41	141,00	26,71	64,72	2
8	43,72	375,22	17,34	26,60	26,33	42,29	1,56	3,08	4,50	9,31	139,90	26,60	64,11	2
9	44,17	382,17	17,80	26,96	26,64	42,23	1,58	3,23	4,50	9,63	140,66	26,60	64,63	2
10	43,90	378,01	17,53	26,74	26,46	42,26	1,57	3,14	4,50	9,44	140,13	26,60	64,31	2
11	43,70	374,80	17,31	26,58	26,31	42,29	1,56	3,07	4,50	9,29	139,88	26,60	64,09	2
12	44,07	380,66	17,70	26,88	26,57	42,24	1,58	3,20	4,50	9,56	140,44	26,60	64,51	2
13	43,36	369,53	16,96	26,30	26,08	42,34	1,55	2,95	4,50	9,02	139,76	26,62	63,76	2
14	44,17	382,14	17,80	26,96	26,64	42,23	1,58	3,23	4,50	9,63	140,66	26,60	64,63	2
15	43,42	370,56	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	4,50	9,07	139,76	26,61	63,82	2
16	43,45	370,93	17,06	26,38	26,14	42,32	1,55	2,99	4,50	9,09	139,76	26,61	63,84	2
17	43,24	367,75	16,85	26,21	26,00	42,35	1,55	2,92	4,50	8,92	139,81	26,62	63,67	2
18	44,09	380,85	17,72	26,89	26,58	42,24	1,58	3,20	4,50	9,57	140,47	26,60	64,53	2
19	44,19	382,40	17,82	26,97	26,65	42,22	1,58	3,24	4,50	9,64	140,70	26,60	64,65	2
20	43,32	368,93	16,92	26,27	26,05	42,34	1,55	2,94	4,50	8,98	139,78	26,62	63,73	2
21	43,20	367,08	16,80	26,17	25,97	42,36	1,55	2,90	4,50	8,88	139,84	26,63	63,63	2
22	43,50	371,70	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	4,50	9,13	139,76	26,61	63,89	2
23	43,20	367,08	16,80	26,17	25,97	42,36	1,55	2,90	4,50	8,88	139,84	26,63	63,63	2
24	43,50	371,70	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	4,50	9,13	139,76	26,61	63,89	2
25	42,81	360,95	16,40	25,86	25,70	42,41	1,53	2,77	4,50	8,52	140,39	26,66	63,37	2
26	44,03	379,97	17,66	26,85	26,54	42,25	1,58	3,18	4,50	9,53	140,35	26,60	64,46	2
27	44,10	381,00	17,73	26,90	26,59	42,24	1,58	3,21	4,50	9,58	140,49	26,60	64,54	2
28	43,37	369,74	16,98	26,31	26,09	42,34	1,55	2,96	4,50	9,03	139,76	26,62	63,78	2
29	44,47	386,78	18,11	27,20	26,84	42,19	1,59	3,33	4,50	9,82	141,53	26,60	65,03	2
30	43,83	376,86	17,45	26,68	26,41	42,27	1,57	3,12	4,50	9,39	140,02	26,60	64,23	2
31	43,27	368,21	16,88	26,23	26,02	42,35	1,55	2,93	4,50	8,95	139,80	26,62	63,69	2
32	43,63	373,71	17,24	26,52	26,27	42,30	1,56	3,05	4,50	9,24	139,82	26,60	64,01	2
33	42,89	362,27	16,48	25,92	25,76	42,40	1,53	2,79	4,50	8,60	140,23	26,65	63,42	2
34	43,67	374,42	17,29	26,56	26,30	42,29	1,56	3,06	4,50	9,27	139,86	26,60	64,06	2

Продовження таблиці К.3.

35	44,23	383,04	17,86	27,01	26,68	42,22	1,58	3,25	4,50	9,67	140,80	26,60	64,71	2
36	44,97	394,65	18,63	27,61	27,19	42,12	1,61	3,51	4,50	10,10	143,67	26,63	65,82	2
37	43,37	369,75	16,98	26,31	26,09	42,34	1,55	2,96	4,50	9,03	139,76	26,62	63,78	2
38	43,58	373,02	17,20	26,48	26,24	42,31	1,56	3,03	4,50	9,20	139,80	26,61	63,97	2
39	43,39	370,08	17,00	26,33	26,11	42,33	1,55	2,97	4,50	9,05	139,76	26,61	63,79	2
40	43,92	378,21	17,54	26,75	26,47	42,26	1,57	3,15	4,50	9,45	140,15	26,60	64,33	2
41	44,04	380,20	17,67	26,86	26,55	42,24	1,58	3,19	4,50	9,54	140,38	26,60	64,48	2
42	44,05	380,25	17,68	26,86	26,56	42,24	1,58	3,19	4,50	9,55	140,39	26,60	64,48	2
43	43,65	374,02	17,26	26,54	26,28	42,30	1,56	3,05	4,50	9,25	139,84	26,60	64,03	2
44	43,90	377,98	17,53	26,74	26,46	42,26	1,57	3,14	4,50	9,44	140,13	26,60	64,31	2
45	44,33	384,67	17,97	27,09	26,75	42,20	1,59	3,29	4,50	9,73	141,10	26,60	64,85	2
46	43,82	376,70	17,44	26,68	26,40	42,27	1,57	3,11	4,50	9,38	140,01	26,60	64,22	2
47	43,85	377,16	17,47	26,70	26,42	42,27	1,57	3,12	4,50	9,40	140,05	26,60	64,25	2
48	44,01	379,64	17,64	26,83	26,53	42,25	1,58	3,18	4,50	9,52	140,31	26,60	64,43	2
49	43,88	377,68	17,51	26,73	26,44	42,27	1,57	3,13	4,50	9,43	140,10	26,60	64,29	2
50	43,08	365,14	16,67	26,07	25,89	42,38	1,54	2,86	4,50	8,77	139,96	26,63	63,54	2
51	43,00	363,93	16,59	26,01	25,83	42,39	1,54	2,83	4,50	8,70	140,06	26,64	63,49	2
52	43,82	376,78	17,45	26,68	26,40	42,27	1,57	3,11	4,50	9,39	140,02	26,60	64,22	2
53	43,87	377,50	17,49	26,72	26,43	42,27	1,57	3,13	4,50	9,42	140,08	26,60	64,27	2
54	44,12	381,31	17,75	26,92	26,60	42,23	1,58	3,21	4,50	9,59	140,53	26,60	64,56	2
55	44,51	387,39	18,15	27,23	26,87	42,18	1,59	3,35	4,50	9,84	141,67	26,60	65,09	2
56	43,11	365,70	16,71	26,10	25,91	42,37	1,54	2,87	4,50	8,81	139,92	26,63	63,57	2
57	43,93	378,39	17,55	26,76	26,47	42,26	1,57	3,15	4,50	9,46	140,17	26,60	64,34	2
58	44,31	384,38	17,95	27,08	26,74	42,21	1,59	3,28	4,50	9,72	141,04	26,60	64,82	2
59	43,51	371,83	17,12	26,42	26,18	42,32	1,56	3,01	4,50	9,14	139,77	26,61	63,90	2
60	43,35	369,41	16,96	26,30	26,08	42,34	1,55	2,95	4,50	9,01	139,77	26,62	63,76	2
61	43,60	373,36	17,22	26,50	26,25	42,30	1,56	3,04	4,50	9,22	139,81	26,61	63,99	2
62	44,33	384,58	17,96	27,09	26,75	42,21	1,59	3,29	4,50	9,73	141,08	26,60	64,84	2

Продовження таблиці К.3.

63	43,23	367,61	16,84	26,20	26,00	42,35	1,55	2,91	4,50	8,91	139,82	26,62	63,66	2
64	43,30	368,58	16,90	26,25	26,04	42,35	1,55	2,93	4,50	8,97	139,78	26,62	63,71	2
65	42,79	360,63	16,37	25,84	25,69	42,42	1,53	2,76	4,50	8,50	140,43	26,66	63,35	2
66	43,97	379,12	17,60	26,80	26,51	42,25	1,57	3,17	4,50	9,49	140,25	26,60	64,39	2
67	43,76	375,78	17,38	26,63	26,36	42,28	1,57	3,09	4,50	9,34	139,94	26,60	64,15	2
68	43,42	370,56	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	4,50	9,07	139,76	26,61	63,82	2
69	44,42	385,97	18,06	27,16	26,81	42,19	1,59	3,32	4,50	9,79	141,36	26,60	64,96	2
70	43,05	364,73	16,65	26,05	25,87	42,38	1,54	2,85	4,50	8,75	139,99	26,64	63,52	2
71	43,64	373,84	17,25	26,53	26,27	42,30	1,56	3,05	4,50	9,24	139,83	26,60	64,02	2
72	43,40	370,11	17,00	26,33	26,11	42,33	1,55	2,97	4,50	9,05	139,76	26,61	63,80	2
73	43,43	370,58	17,03	26,36	26,13	42,33	1,55	2,98	4,50	9,07	139,76	26,61	63,82	2
74	44,15	381,77	17,78	26,94	26,62	42,23	1,58	3,22	4,50	9,61	140,60	26,60	64,60	2
75	44,03	379,97	17,66	26,85	26,54	42,25	1,58	3,18	4,50	9,53	140,35	26,60	64,46	2
76	44,18	382,31	17,81	26,97	26,65	42,23	1,58	3,24	4,50	9,63	140,69	26,60	64,64	2
77	43,50	371,79	17,11	26,42	26,18	42,32	1,56	3,00	4,50	9,14	139,77	26,61	63,89	2
78	43,68	374,50	17,29	26,56	26,30	42,29	1,56	3,06	4,50	9,27	139,86	26,60	64,07	2
79	44,70	390,42	18,35	27,39	27,01	42,15	1,60	3,41	4,50	9,95	142,42	26,61	65,38	2
80	43,18	366,76	16,78	26,16	25,96	42,36	1,54	2,89	4,50	8,86	139,86	26,63	63,62	2
81	43,07	364,99	16,66	26,07	25,88	42,38	1,54	2,85	4,50	8,76	139,97	26,64	63,53	2
82	43,73	375,30	17,35	26,60	26,34	42,29	1,57	3,08	4,50	9,31	139,91	26,60	64,12	2
83	43,56	372,64	17,17	26,46	26,22	42,31	1,56	3,02	4,50	9,18	139,78	26,61	63,95	2
84	43,54	372,30	17,15	26,45	26,20	42,31	1,56	3,02	4,50	9,16	139,78	26,61	63,93	2
85	44,20	382,63	17,83	26,98	26,66	42,22	1,58	3,24	4,50	9,65	140,74	26,60	64,67	2
86	43,09	365,35	16,69	26,09	25,90	42,37	1,54	2,86	4,50	8,79	139,94	26,63	63,55	2
87	43,63	373,79	17,25	26,52	26,27	42,30	1,56	3,05	4,50	9,24	139,83	26,60	64,02	2
88	44,14	381,61	17,77	26,93	26,62	42,23	1,58	3,22	4,50	9,60	140,58	26,60	64,59	2
89	43,00	363,95	16,59	26,01	25,83	42,39	1,54	2,83	4,50	8,70	140,06	26,64	63,49	2
90	43,33	369,10	16,94	26,28	26,06	42,34	1,55	2,94	4,50	8,99	139,77	26,62	63,74	2

Продовження таблиці К.3.

91	43,59	373,17	17,21	26,49	26,24	42,31	1,56	3,03	4,50	9,21	139,80	26,61	63,98	2	
	максимальне значення										10,10	144,00	26,72	65,82	
	мінімальне значення										8,41	139,76	26,60	63,15	
	середнє значення										9,25	140,26	26,61	64,14	
92	45,20	369,00	15,70	26,10	25,00	43,30	1,44	2,52	4,50	9,00	132,00	27,10	68,71	3	
93	45,00	399,00	15,90	27,10	25,50	41,40	1,52	2,12	4,50	9,20	138,00	27,00	67,86	3	
94	42,90	425,00	15,90	26,60	26,00	39,00	1,54	2,09	4,50	8,10	141,00	27,19	67,94	3	
95	45,96	409,96	19,65	28,41	27,87	41,98	1,65	3,84	4,50	10,09	146,25	26,73	67,73	3	
96	45,84	408,15	19,53	28,31	27,79	42,00	1,64	3,80	4,50	10,41	145,30	26,72	67,48	3	
97	46,08	411,77	19,77	28,50	27,95	41,97	1,65	3,88	4,50	10,12	147,23	26,75	67,99	3	
	максимальне значення										10,41	147,23	27,19	68,71	
	мінімальне значення										8,10	132,00	26,72	67,48	
	середнє значення										9,49	141,63	26,91	67,95	
98	41,90	377,00	16,90	24,70	27,00	42,90	1,58	4,39	4,50	9,80	138,00	27,30	72,55	4	
99	44,90	367,00	15,30	24,70	25,00	43,50	1,45	2,69	4,50	9,26	141,00	27,50	74,71	4	
100	47,10	376,00	18,00	28,00	25,50	43,40	1,55	4,19	4,50	9,50	142,00	27,60	74,67	4	
	максимальне значення										9,80	142,00	27,60	74,71	
	мінімальне значення										9,26	138,00	27,30	72,55	
	середнє значення										9,52	140,33	27,47	73,98	

Додаток Л

Аналіз результатів проведення дискримінантного аналізу виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках.

Таблиця Л.1 – Результати проведення дискримінантного аналізу виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=2,5$

№ п/п	observed	Squared Mahanalobis distances				Posterior probabilities				Classification			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1	57,709	310,459	447,046	445,974	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	4	3
2	1	48,789	393,739	554,244	557,391	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	3	4
3	1	80,835	420,439	553,377	545,070	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	4	3
4	1	13,292	342,415	466,612	452,524	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	4	3
5	1	17,319	274,063	377,331	362,562	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	4	3
6	1	19,986	425,079	571,482	558,231	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	4	3
7	1	52,354	436,384	541,231	521,803	1,000	0,000	0,000	0,000	1	2	4	3
8	2	336,279	48,610	132,193	155,416	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
9	2	366,883	79,631	135,600	154,921	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
10	2	350,070	19,213	56,554	78,083	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
11	2	305,575	9,975	54,990	86,086	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
12	2	368,926	8,574	19,177	41,766	0,000	0,977	0,023	0,000	2	3	4	1
13	2	347,457	6,977	28,527	53,922	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
14	2	374,275	9,244	17,198	39,092	0,000	0,920	0,080	0,000	2	3	4	1
15	2	320,195	7,855	44,280	73,331	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
16	2	436,382	43,016	85,810	109,950	0,000	1,000	0,000	0,000	2	3	4	1
17	3	377,976	98,438	78,864	83,847	0,000	0,000	0,924	0,076	3	4	2	1
18	3	482,843	106,735	85,841	99,735	0,000	0,000	0,999	0,001	3	4	2	1
19	3	578,944	86,460	44,863	53,070	0,000	0,000	0,984	0,016	3	4	2	1
20	3	466,724	36,627	0,269	8,716	0,000	0,000	0,986	0,014	3	4	2	1
21	3	488,285	51,314	1,358	3,896	0,000	0,000	0,781	0,219	3	4	2	1
22	3	477,212	42,415	0,322	6,521	0,000	0,000	0,957	0,043	3	4	2	1

Продовження таблиці Л.1.

23	3	466,934	36,732	0,265	8,671	0,000	0,000	0,985	0,015	3	4	2	1
24	3	476,049	41,707	0,287	6,764	0,000	0,000	0,962	0,038	3	4	2	1
25	3	464,913	35,734	0,311	9,103	0,000	0,000	0,988	0,012	3	4	2	1
26	3	480,973	44,882	0,499	5,722	0,000	0,000	0,932	0,068	3	4	2	1
27	3	475,091	41,138	0,265	6,963	0,000	0,000	0,966	0,034	3	4	2	1
28	3	418,932	18,633	5,256	21,213	0,000	0,000	0,999	0,000	3	4	2	1
29	3	485,063	53,063	1,767	2,963	0,000	0,000	0,645	0,355	3	4	2	1
30	3	459,450	33,182	0,517	10,301	0,000	0,000	0,993	0,007	3	4	2	1
31	3	487,782	50,708	1,253	4,057	0,000	0,000	0,803	0,197	3	4	2	1
32	3	479,787	44,071	0,431	5,978	0,000	0,000	0,941	0,059	3	4	2	1
33	3	479,506	43,884	0,417	6,038	0,000	0,000	0,943	0,057	3	4	2	1
34	3	488,366	51,417	1,377	3,869	0,000	0,000	0,777	0,223	3	4	2	1
35	3	443,460	26,645	1,731	14,130	0,000	0,000	0,998	0,002	3	4	2	1
36	3	485,157	53,483	1,862	2,851	0,000	0,000	0,621	0,379	3	4	2	1
37	3	484,789	52,269	1,596	3,176	0,000	0,000	0,688	0,312	3	4	2	1
38	3	482,581	46,045	0,612	5,368	0,000	0,000	0,915	0,085	3	4	2	1
39	3	488,992	52,290	1,539	3,641	0,000	0,000	0,741	0,259	3	4	2	1
40	3	485,110	53,254	1,810	2,912	0,000	0,000	0,634	0,366	3	4	2	1
41	3	489,313	52,809	1,641	3,506	0,000	0,000	0,718	0,282	3	4	2	1
42	3	473,021	39,952	0,234	7,394	0,000	0,000	0,973	0,027	3	4	2	1
43	3	451,430	28,029	5,817	22,118	0,000	0,000	1,000	0,000	3	4	2	1
44	3	487,305	50,177	1,165	4,199	0,000	0,000	0,820	0,180	3	4	2	1
45	3	446,529	27,807	1,431	13,352	0,000	0,000	0,997	0,003	3	4	2	1
46	3	444,419	27,004	1,634	13,884	0,000	0,000	0,998	0,002	3	4	2	1
47	3	484,818	47,824	0,822	4,849	0,000	0,000	0,882	0,118	3	4	2	1
48	3	428,913	21,634	3,579	18,132	0,000	0,000	0,999	0,001	3	4	2	1
49	3	469,784	38,195	0,229	8,069	0,000	0,000	0,981	0,019	3	4	2	1
50	3	481,013	44,910	0,502	5,714	0,000	0,000	0,931	0,069	3	4	2	1
51	3	465,609	36,074	0,294	8,954	0,000	0,000	0,987	0,013	3	4	2	1
52	3	463,028	34,831	0,369	9,512	0,000	0,000	0,990	0,010	3	4	2	1

Продовження таблиці Л.1.

53	3	470,973	38,828	0,225	7,820	0,000	0,000	0,978	0,022	3	4	2	1
54	3	452,468	30,175	0,939	11,908	0,000	0,000	0,996	0,004	3	4	2	1
55	3	451,613	28,086	5,794	22,072	0,000	0,000	1,000	0,000	3	4	2	1
56	3	439,147	24,407	7,573	25,402	0,000	0,000	1,000	0,000	3	4	2	1
57	3	443,983	26,840	1,678	13,996	0,000	0,000	0,998	0,002	3	4	2	1
58	3	383,202	98,980	38,025	15,151	0,000	0,000	0,000	1,000	4	3	2	1
59	4	548,756	172,825	105,063	87,414	0,000	0,000	0,000	1,000	4	3	2	1
60	4	613,238	135,339	56,718	50,918	0,000	0,000	0,052	0,948	4	3	2	1
61	4	454,324	62,961	6,934	0,096	0,000	0,000	0,032	0,968	4	3	2	1
62	4	464,568	63,246	6,169	0,230	0,000	0,000	0,049	0,951	4	3	2	1
63	4	471,360	66,375	7,460	1,479	0,000	0,000	0,048	0,952	4	3	2	1
64	4	437,404	63,331	8,756	0,279	0,000	0,000	0,014	0,986	4	3	2	1
65	4	447,575	64,289	8,302	0,697	0,000	0,000	0,022	0,978	4	3	2	1
66	4	425,937	61,582	10,136	1,540	0,000	0,000	0,013	0,987	4	3	2	1
67	4	479,094	67,753	8,021	2,648	0,000	0,000	0,064	0,936	4	3	2	1
68	4	425,937	61,582	10,136	1,540	0,000	0,000	0,013	0,987	4	3	2	1
69	4	479,995	65,914	6,342	1,135	0,000	0,000	0,069	0,931	4	3	2	1
70	4	458,477	64,819	7,460	0,541	0,000	0,000	0,030	0,970	4	3	2	1
71	4	441,847	63,073	8,217	0,200	0,000	0,000	0,018	0,982	4	3	2	1
72	4	446,658	59,643	6,711	0,597	0,000	0,000	0,045	0,955	4	3	2	1
73	4	474,995	59,380	4,074	0,904	0,000	0,000	0,170	0,830	4	3	2	1
74	4	454,141	65,384	9,223	2,608	0,000	0,000	0,035	0,965	4	3	2	1
75	4	402,889	62,473	12,618	2,002	0,000	0,000	0,005	0,995	4	3	2	1
76	4	412,310	62,256	12,857	3,181	0,000	0,000	0,008	0,992	4	3	2	1
77	4	481,993	66,458	6,532	1,395	0,000	0,000	0,071	0,929	4	3	2	1
78	4	441,243	59,039	7,204	0,915	0,000	0,000	0,041	0,959	4	3	2	1
79	4	499,940	70,639	8,475	4,446	0,000	0,000	0,118	0,882	4	3	2	1
80	4	435,817	63,390	8,937	0,320	0,000	0,000	0,013	0,987	4	3	2	1
81	4	444,381	62,563	7,810	0,212	0,000	0,000	0,022	0,978	4	3	2	1
82	4	462,966	67,415	9,772	3,422	0,000	0,000	0,040	0,960	4	3	2	1

Продовження таблиці Л.1.

83	4	394,308	61,805	17,310	7,391	0,000	0,000	0,007	0,993	4	3	2	1
84	4	504,415	68,894	6,666	3,232	0,000	0,000	0,152	0,848	4	3	2	1
85	4	421,470	52,999	8,671	3,021	0,000	0,000	0,056	0,944	4	3	2	1
86	4	461,609	62,022	5,965	0,213	0,000	0,000	0,053	0,947	4	3	2	1
87	4	479,391	67,977	8,289	2,994	0,000	0,000	0,066	0,934	4	3	2	1
88	4	419,198	63,010	10,903	1,545	0,000	0,000	0,009	0,991	4	3	2	1
89	4	386,887	60,061	18,818	9,634	0,000	0,000	0,010	0,990	4	3	2	1
90	4	511,055	66,318	5,195	3,457	0,000	0,000	0,295	0,705	4	3	2	1
91	4	481,983	63,014	4,921	0,951	0,000	0,000	0,121	0,879	4	3	2	1
92	4	480,386	68,890	9,722	4,906	0,000	0,000	0,083	0,917	4	3	2	1
93	4	457,756	56,525	6,070	2,883	0,000	0,000	0,169	0,831	4	3	2	1
94	4	413,386	63,520	12,238	1,845	0,000	0,000	0,006	0,994	4	3	2	1
95	4	391,143	63,438	18,619	7,874	0,000	0,000	0,005	0,995	4	3	2	1
96	4	445,182	65,072	9,665	2,174	0,000	0,000	0,023	0,977	4	3	2	1
97	4	484,977	62,512	4,581	1,168	0,000	0,000	0,154	0,846	4	3	2	1
98	4	407,933	63,793	13,146	2,279	0,000	0,000	0,004	0,996	4	3	2	1
99	4	473,978	59,617	4,231	0,820	0,000	0,000	0,154	0,846	4	3	2	1
100	4	426,079	57,037	8,698	2,255	0,000	0,000	0,038	0,962	4	3	2	1

Таблиця Л.2 – Результати проведення дискримінантного аналізу виробничих ситуацій процесу сушіння торфу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=3,5$

№ п/п	observed	Squared Mahanalobis distances				Posterior probabilities				Classification			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1	58,3884	96,8689	129,4275	279,3053	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
2	1	52,7355	132,2131	179,9087	325,1965	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
3	1	4,2734	54,7900	97,7455	219,3592	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
4	1	3,6851	43,5728	82,3305	197,7547	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
5	1	6,3009	67,8781	115,2063	243,2591	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
6	1	41,9147	112,3501	168,8021	299,7222	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4

Продовження таблиці Л.2.

7	1	9,9394	83,0090	134,8847	269,6265	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
8	1	79,4793	133,1117	172,8913	305,3670	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	2	3	4
9	1	6,1727	26,0983	56,9846	160,7792	0,999880	0,000120	0,000000	0,000000	1	2	3	4
10	1	8,9394	19,5317	46,7445	145,0989	0,987406	0,012594	0,000000	0,000000	1	2	3	4
11	1	12,5267	14,2176	37,9317	131,0957	0,477790	0,522203	0,000008	0,000000	2	1	3	4
12	2	29,3933	3,6285	16,5905	93,7291	0,000001	0,996889	0,003110	0,000000	2	3	1	4
13	2	36,1589	2,8923	13,1465	90,3330	0,000000	0,988064	0,011936	0,000000	2	3	1	4
14	2	36,6931	1,9823	11,5010	84,2975	0,000000	0,982850	0,017150	0,000000	2	3	1	4
15	2	26,8740	4,4514	18,7183	97,8094	0,000005	0,998373	0,001622	0,000000	2	3	1	4
16	2	93,5841	62,0178	75,9137	181,7183	0,000000	0,998048	0,001952	0,000000	2	3	1	4
17	2	133,4803	80,1665	93,9380	148,7805	0,000000	0,997923	0,002077	0,000000	2	3	1	4
18	2	54,5741	4,7778	11,0990	73,0824	0,000000	0,920544	0,079456	0,000000	2	3	1	4
19	2	44,7849	6,9825	18,3677	87,2023	0,000000	0,993185	0,006815	0,000000	2	3	1	4
20	2	32,4398	2,8431	14,3106	89,2101	0,000000	0,993457	0,006543	0,000000	2	3	1	4
21	2	21,6210	6,8044	24,0456	107,5779	0,000238	0,999395	0,000367	0,000000	2	3	1	4
22	2	16,7974	10,0186	30,4089	118,6321	0,013077	0,986848	0,000075	0,000000	2	1	3	4
23	2	139,8637	90,7647	103,9193	183,7999	0,000000	0,997175	0,002825	0,000000	2	3	1	4
24	2	59,5642	4,4187	8,4702	67,4026	0,000000	0,788330	0,211670	0,000000	2	3	1	4
25	2	49,6151	5,5998	14,3656	79,6498	0,000000	0,975206	0,024794	0,000000	2	3	1	4
26	2	40,1884	9,0307	23,2100	95,8449	0,000000	0,998306	0,001694	0,000000	2	3	1	4
51	2	54,6382	1,6779	4,0860	65,3118	0,000000	0,620855	0,379145	0,000000	2	3	1	4
66	2	61,2148	2,3559	2,4980	60,2629	0,000000	0,345296	0,654704	0,000000	3	2	1	4
79	2	62,1038	2,4731	2,3197	59,6314	0,000000	0,312697	0,687303	0,000000	3	2	4	1
89	2	61,3649	2,3753	2,4674	60,1555	0,000000	0,339660	0,660340	0,000000	3	2	1	4
83	2	61,4905	2,3916	2,4419	60,0658	0,000000	0,334981	0,665019	0,000000	3	2	1	4
84	2	57,2183	1,9023	3,4040	63,2482	0,000000	0,509996	0,490004	0,000000	2	3	1	4
85	2	52,7468	1,5505	4,6384	66,8983	0,000000	0,697007	0,302993	0,000000	2	3	1	4
86	2	49,9520	1,4241	5,5419	69,3654	0,000000	0,793812	0,206188	0,000000	2	3	1	4
92	2	73,8467	5,2447	3,5357	54,8136	0,000000	0,172880	0,827120	0,000000	3	2	4	1
95	2	78,1214	5,8976	2,6180	51,8439	0,000000	0,087015	0,912985	0,000000	3	2	4	1

Продовження таблиці Л.2.

96	2	73,4783	5,6738	4,3583	54,2605	0,000000	0,202849	0,797151	0,000000	3	2	4	1
27	2	92,7246	45,4340	50,8159	88,0827	0,000000	0,878692	0,121308	0,000000	2	3	4	1
28	3	174,7208	77,1388	67,8509	79,0924	0,000000	0,004702	0,995045	0,000253	3	2	4	1
29	3	190,4725	101,7871	88,5785	125,7835	0,000000	0,000665	0,999335	0,000000	3	2	4	1
30	3	85,2932	7,1923	0,0916	46,5062	0,000000	0,013909	0,986091	0,000000	3	2	4	1
31	3	68,5932	3,4915	1,2513	55,3469	0,000000	0,138121	0,861879	0,000000	3	2	4	1
32	3	79,3697	5,7261	0,2684	49,3263	0,000000	0,031077	0,968923	0,000000	3	2	4	1
33	3	86,0796	7,3978	0,0862	46,1548	0,000000	0,012534	0,987466	0,000000	3	2	4	1
34	3	72,7598	4,2821	0,7627	52,8704	0,000000	0,077951	0,922049	0,000000	3	2	4	1
35	3	93,4161	9,4150	0,2548	43,1231	0,000000	0,005012	0,994988	0,000000	3	2	4	1
36	3	68,6690	3,5050	1,2411	55,3001	0,000000	0,136717	0,863283	0,000000	3	2	4	1
37	3	92,3591	9,1152	0,2015	43,5322	0,000000	0,005666	0,994334	0,000000	3	2	4	1
38	3	91,9415	8,9973	0,1839	43,6965	0,000000	0,005955	0,994045	0,000000	3	2	4	1
39	3	94,7661	9,7992	0,3507	42,6187	0,000000	0,004342	0,995658	0,000000	3	2	4	1
40	3	72,2483	4,1798	0,8150	53,1637	0,000000	0,083690	0,916310	0,000000	3	2	4	1
41	3	67,9492	3,3784	1,3399	55,7480	0,000000	0,150577	0,849423	0,000000	3	2	4	1
42	3	93,9358	9,5629	0,2868	42,9261	0,000000	0,004731	0,995269	0,000000	3	2	4	1
43	3	95,1229	9,9000	0,3867	42,4908	0,000000	0,004204	0,995796	0,000000	3	2	4	1
44	3	90,9849	8,7290	0,1499	44,0786	0,000000	0,006690	0,993310	0,000000	3	2	4	1
45	3	95,1229	9,9000	0,3867	42,4908	0,000000	0,004204	0,995796	0,000000	3	2	4	1
46	3	90,9849	8,7290	0,1499	44,0786	0,000000	0,006690	0,993310	0,000000	3	2	4	1
47	3	94,5056	9,6886	0,6933	42,8881	0,000000	0,005440	0,994560	0,000000	3	2	4	1
48	3	74,5496	4,6512	0,5962	51,8662	0,000000	0,060747	0,939253	0,000000	3	2	4	1
49	3	71,8385	4,0988	0,8584	53,4009	0,000000	0,088584	0,911416	0,000000	3	2	4	1
50	3	93,2120	9,3569	0,2434	43,2012	0,000000	0,005129	0,994871	0,000000	3	2	4	1
52	3	81,9577	6,3483	0,1614	48,0554	0,000000	0,021790	0,978210	0,000000	3	2	4	1
53	3	94,4706	9,7152	0,3256	42,7268	0,000000	0,004471	0,995529	0,000000	3	2	4	1
54	3	87,9829	7,9046	0,0905	45,3259	0,000000	0,009777	0,990223	0,000000	3	2	4	1
55	3	95,2218	9,9010	0,6258	42,5601	0,000000	0,004733	0,995267	0,000000	3	2	4	1
56	3	86,7618	7,5780	0,0849	45,8543	0,000000	0,011460	0,988540	0,000000	3	2	4	1

Продовження таблиці Л.2.

57	3	66,0969	3,0674	1,6157	56,9301	0,000000	0,192059	0,807941	0,000000	3	2	4	1
58	3	93,2071	9,3556	0,2431	43,2031	0,000000	0,005132	0,994868	0,000000	3	2	4	1
59	3	89,0906	8,2054	0,1046	44,8572	0,000000	0,008482	0,991518	0,000000	3	2	4	1
60	3	92,8770	9,2618	0,2259	43,3304	0,000000	0,005331	0,994669	0,000000	3	2	4	1
61	3	78,9006	5,6166	0,2928	49,5634	0,000000	0,033158	0,966842	0,000000	3	2	4	1
62	3	73,9592	4,5276	0,6483	52,1936	0,000000	0,065960	0,934040	0,000000	3	2	4	1
63	3	73,8230	4,4993	0,6608	52,2697	0,000000	0,067225	0,932775	0,000000	3	2	4	1
64	3	87,4642	7,7652	0,0868	45,5489	0,000000	0,010456	0,989544	0,000000	3	2	4	1
65	3	79,4504	5,7451	0,2643	49,2858	0,000000	0,030732	0,969268	0,000000	3	2	4	1
67	3	82,3105	6,4354	0,1505	47,8869	0,000000	0,020769	0,979231	0,000000	3	2	4	1
68	3	81,3009	6,1876	0,1842	48,3721	0,000000	0,023833	0,976167	0,000000	3	2	4	1
69	3	75,4011	4,8327	0,5257	51,4004	0,000000	0,053943	0,946057	0,000000	3	2	4	1
70	3	80,1345	5,9069	0,2319	48,9442	0,000000	0,027967	0,972033	0,000000	3	2	4	1
71	3	95,6827	10,0527	0,4867	42,3098	0,000000	0,004095	0,995905	0,000000	3	2	4	1
72	3	95,6751	10,0428	0,5456	42,3389	0,000000	0,004238	0,995762	0,000000	3	2	4	1
73	3	82,1183	6,3879	0,1563	47,9785	0,000000	0,021319	0,978681	0,000000	3	2	4	1
74	3	80,5461	6,0053	0,2140	48,7409	0,000000	0,026429	0,973571	0,000000	3	2	4	1
75	3	70,9851	3,9333	0,9531	53,9008	0,000000	0,099669	0,900331	0,000000	3	2	4	1
77	3	95,5925	10,0298	0,4583	42,3335	0,000000	0,004084	0,995916	0,000000	3	2	4	1
78	3	78,4932	5,5223	0,3153	49,7711	0,000000	0,035082	0,964918	0,000000	3	2	4	1
80	3	90,8055	8,6790	0,1444	44,1511	0,000000	0,006840	0,993160	0,000000	3	2	4	1
81	3	93,5211	9,4448	0,2609	43,0830	0,000000	0,004953	0,995047	0,000000	3	2	4	1
82	3	88,5672	8,0628	0,0969	45,0775	0,000000	0,009069	0,990931	0,000000	3	2	4	1
87	3	93,1601	9,3047	0,7943	43,5062	0,000000	0,006923	0,993077	0,000000	3	2	4	1
88	3	95,4587	9,9734	0,5944	42,4488	0,000000	0,004495	0,995505	0,000000	3	2	4	1
90	3	88,6023	8,1040	1,1615	45,7298	0,000000	0,015037	0,984963	0,000000	3	2	4	1
91	3	82,0420	6,6282	1,9528	49,3764	0,000000	0,045282	0,954718	0,000000	3	2	4	1
93	3	91,1502	8,7574	0,9436	44,4588	0,000000	0,009778	0,990222	0,000000	3	2	4	1
94	3	85,5521	7,3801	1,4838	47,3549	0,000000	0,025112	0,974888	0,000000	3	2	4	1
97	4	308,1587	169,3986	137,8432	63,6166	0,000000	0,000000	0,000000	1,000000	4	3	2	1

Продовження таблиці Л.2.

98	4	229,5408	80,0152	50,6228	48,7648	0,000000	0,000000	0,849121	0,150879	3	4	2	1
99	4	324,0344	191,1704	166,1286	69,5314	0,000000	0,000000	0,000000	1,000000	4	3	2	1
100	4	183,0006	62,5648	39,5173	29,2912	0,000000	0,000000	0,078978	0,921021	4	3	2	1

Таблиця Л.3 – Класифікаційна матриця точності класифікації виробничої ситуації відповідно до необхідного класу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=2,5$

Class	percent correct	1. p=0,07	2. p=0,09	3. p=0,42	4. p=0,42
1	100,0000	7,00000	0,000000	0,00000	0,00000
2	100,0000	0,00000	9,000000	0,00000	0,00000
3	97,6190	0,00000	0,000000	41,00000	1,00000
4	100,0000	0,00000	0,000000	0,00000	42,00000
Total	99,0000	7,00000	9,000000	41,00000	43,00000

Таблиця Л.4 – Класифікаційна матриця точності класифікації виробничої ситуації відповідно до необхідного класу в парових трубчастих сушарках при значенні параметра $X_1=4,5$

Class	percent correct	1. p=0,04	2. p=0,87	3. p=0,06	4. p=0,003
1	100,0000	4,000000	0,00000	0,000000	0,000000
2	100,0000	0,000000	87,00000	0,000000	0,000000
3	100,0000	0,000000	0,00000	6,000000	0,000000
4	100,0000	0,000000	0,00000	0,000000	3,000000
Total	100,0000	4,000000	87,00000	6,000000	3,000000

Додаток М

Методика визначення економії теплової енергії на процес сушіння торфу завдяки застосуванню розробленого алгоритму регулювання процесом в енергоефективних режимах.

ККД брутто котельного агрегату (%) можна визначити згідно рівняння прямого балансу для парового котла:

$$\eta_{\text{бр}} = \frac{Q_{\text{нк}}}{Q_p^p B_{\text{нк}}} \quad (\text{M.1})$$

де $Q_{\text{нк}}$ – корисна потужність парового котла, кВт; Q_p^p – наявна теплота, кДж/кг или кКал/кг; $B_{\text{нк}}$ – витрата палива паровим котлом кг/с або м³/с.

Звідси витрата палива для спалювання в котлі:

$$B_{\text{нк}} = \frac{Q_{\text{нк}}}{Q_p^p \eta_{\text{бр}}}, \quad (\text{M.2})$$

Обчислити корисну потужність парового і водогрійного котла (кВт) можна за формулою:

$$Q_{\text{нк}} = D_{\text{н.н.}}(i_{\text{н.н.}} - i_{\text{н.с.}}) + D_{\text{н.п.}}(i_{\text{н.п.}} - i_{\text{н.с.}}) + 0,01P(D_{\text{н.н.}} + D_{\text{н.п.}})(i_{\text{кин}} - i_{\text{н.с.}}) \quad (\text{M.3})$$

$D_{\text{н.н.}}$ – витрата виробленого перегрітої пари, кг/с; $D_{\text{н.п.}}$ – витрата виробленої насиченої пари, кг/с; $i_{\text{н.н.}}$, $i_{\text{н.с.}}$, $i_{\text{н.п.}}$, $i_{\text{кин}}$ – ентальпія перегрітої пари, живильної води на вході в індивідуальний водяний економайзер, насиченого пара і киплячої води в барабані котла, кДж/кг; P – безперервна продування парового котла, %, враховується тільки при $P \geq 2\%$.

Для сушіння торфу в парових трубчастих сушарках по паропроводу надходить суха насичена пара, що подається з котельної. Витрату пара можна визначити за пропускною спроможністю трубопроводу. Для цього потрібно знати швидкість пари, питомий об'єм і щільність пари:

$$D_{\text{н.п.}} = \frac{3,14 \cdot d^2}{4} \cdot v \cdot \rho, \quad (\text{M.4})$$

де d – діаметр паропроводу, мм; v – швидкість пара, м²/с; ρ – щільність пари, кг/м³

Швидкість пари визначається із п.8.4 СНиП II-35-76 «Котельные установки». Швидкість теплоносія (насиченої пари) для діаметру труб до 200 мм не повинна бути більша 40 м/с. Для певного значення температури або тиску насиченої пари визначаються питомий об'єм або щільність пари.

Згідно із формул (М.2-М.4) при збільшенні витрат насиченої пари, а, отже, температури (тиску) пари можна визначити на скільки збільшиться витрата палива при спалюванні в котельні. Значення питомої теплоємності палива можна знайти у відповідних довідниках (для торфу вона становить – 3600÷3700 кКал/кг).

Для вирахування економії палива необхідно зафіксувати середнє значення температури теплоносія за певний період сушіння. Потім за допомогою побудованої нейронної мережі для певних значень збурюючих впливів визначити оптимальні значення керуючих впливів, включаючи параметр X_3 – оптимальне значення температури теплоносія. За значенням температури насиченої пари визначається витрата теплоносія та палива на процес сушіння торфу (ф-ла М.2).

Окрім зменшення затрат палива на процес сушіння відбувається і зменшення затрат на процес генерації теплоти – зменшення амортизаційних затрат, затрат електричної енергії на доставлення вагонеток в котельне обладнання, роботи вентиляторів котельного відділення тощо. Ці дані для кожного виробничого підприємства визначаються індивідуально.

Додаток Н

Визначення економії енергоресурсів на процес сушіння торфу завдяки застосуванню розробленого алгоритму регулювання процесом в енергоефективних режимах.

Відомо що за годину в середньому на торфобрикетному заводі завантажуються 1,5 вагонетки (одна вагонетка кожні 40 хвилин). При проведенні експерименту вимірювання параметрів необхідних для визначення економії енергоресурсу відбувалося протягом 8 годин (однієї зміни роботи). Оператор роботи вивантажувачів торфу кожної зміни фіксує кількість вагонетків торфу, що були направлені на процес виготовлення торфобрикетів і кількість, що направились для спалювання в котельні із зазначенням номерів вагонеток. Кожні 40 години оператор сушарки фіксував середні значення керуючих параметрів (X_1, X_2, X_3, X_4), які він виставляв для забезпечення якісного сушіння згідно із існуючими на заводі режимними картами та знімав покази термометра повітря F_5 . Лаборант для кожної вагонетки визначає вологість F_1 , насипну щільність F_2 , середню зольність F_3 та температуру F_4 торфу. По формулам (1.4, 2.6-2.9) можна визначити кількість теплової енергії, що була затрачена для сушіння торфу за 40 хв. За показниками лічильника та часу сушіння було визначено споживання електричної енергії на енерготехнологічному комплексі сушіння торфу, кВт·год.

Для визначення оптимальних енергоефективних значень керуючих параметрів процесу сушіння торфу необхідно на вхід нейронної мережі подати значення збурюючих впливів. Невідомі значення впливів F_6, F_7, F_8 визначалися за допомогою методу Монте Карло (див. розділ 4.1). Потім, використовуючи процедуру класифікації та розпізнавання виробничої ситуації (див. розділ 4.4), було знайдено значення керуючих впливів, що необхідно встановлювати для торфу кожної вагонетки.

Таблиця Н.1 – Результати вимірювання та знаходження оптимальних згідно процедури класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій контролюємих параметрів та параметрів енергоспоживання процесом сушіння торфу

Робочі значення						Значення отримані по процедурі класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій					
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄	Y ₈	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₄	Y ₈
08.06.2015											
3,5	9,95	119,00	28,56	60,58	14664,8	3,5	9,5	118,1	26,91	64,49	13775,3
3,5	8,51	129,62	26,51	55,90	14318,2	3,5	9,2	117,3	26,52	51	13567,3
3,5	8,82	125,7	26,98	54,55	14078,7	3,5	9,25	117,8	26,4	63,629	13587,9
3,5	9,18	121,69	27,13	59,075	14879,2	3,5	9,21	118,3	26,8	79,24	14128,3
3,5	8,98	125,21	26,87	65,89	15130,5	3,5	9,22	118,5	27,4	86,58	14236,5
3,5	9,88	124,75	26,99	64,49	15173,3	3,5	9,46	118,5	27,25	64,13	14571,1
3,5	9,39	117,27	27,22	64,41	15668,9	3,5	9,5	118,5	27,23	63,18	14632,3
3,5	9,03	114,93	26,14	63,1	15067,8	3,5	9,12	121,75	27,15	59,82	15126,2
3,5	8,92	123,87	27,03	64,23	15321,4	3,5	9,08	124,88	27,25	61,13	15210,2
3,5	9,48	119,74	29,22	64,87	15472,9	3,5	9,23	121,81	27,28	62,2	15236,3
3,5	9,15	118,22	27,22	64,24	15662,5	3,5	9,28	121,21	27,23	55,88	15243,3
3,5	9,59	119,61	27,19	64,56	15045,8	3,5	9,41	122,4	27,25	61,61	15143,1
Сумарне споживання				772,93	180483,7	Сумарне споживання				745,96	174458

Ціна на поставку 1 кВт·год електричної енергії на початок 2015 року для торфобрикетного заводу «Сойне» становила 150,98 коп./кВт·год. Згідно із таблиці Н.1, економія електричної енергії за 8 годин роботи торфозаводу при управлінні процесом сушіння з використанням процедури класифікації та розпізнавання виробничих ситуацій становить – $772,93 - 745,96 = 26,97$ кВт·год. Економія електричної енергії за 8 годин, протягом яких були проведені досліди, буде становити – $26,97$ (кВт·год) · $150,98$ (коп./кВт·год) = $4071,93$ коп. Так як торфозавод працює в 3 зміни по 8 годин, а всього кількість робочих днів в середньому в рік становить 320 (до півтора місяці проводяться планові ремонтні роботи), то річний економічний ефект від впровадження може становити – $4071,93$ (коп.) · 8 · $320 = 10424141$ коп. = **104,24 тис. грн.**

Акт виробничого експерименту енерготехнологічного процесу сушіння торфу

Ми, головний інженер Романік Віктор Миколайович, головний енергетик Хворостяний Василь Никифорович, аспірант Кулаковський Леонід Ярославович, склали акт виробничого експерименту енерготехнологічного процесу сушіння торфу.

Для вивчення енерготехнологічного процесу сушіння торфу і отримання математичних моделей цього процесу в період з 17.05.2013 по 21.06.2013 роки було проведено 14 дослідів сушіння в паровій трубчастій сушарці Цемаг за рахунок зміни керованих параметрів енерготехнологічного процесу сушіння – температури сушильного агента в сушарці, швидкості обертання барабну сушарки та швидкості обертання шнека.

Результати дослідів приведені в таблиці 1 та таблиці 2.

Таблиця 1 – Результати вимірювання збурюючих та керуючих впливів процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках

№	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F12	X1	X2	X3	X4
1	43,6	417	23	24,7	28	41,1	1,49	3,5	3,81	9,63	128	27,6
2	42,6	385	22	26,6	28,5	41,4	1,58	5,82	3,76	9,58	129	27,58
3	41,9	377	16,9	24,7	27	42,9	1,58	4,39	3,72	9,5	123	27,62
4	41,4	341	17,1	27,6	27	42	1,74	3,49	3,7	9,4	124	27,8
5	40,9	305	16,8	28	26	43,8	1,66	2,53	3,71	9,32	119	27,8
6	41,2	333	16,1	26,1	26	43,7	1,54	2,66	3,73	9,33	126	27,84
7	45,4	358	17,1	26,6	26	43,9	1,61	1,95	3,77	9,3	112	27,84
8	44,9	367	15,5	24,7	25	43,5	1,45	2,69	3,77	9,1	118	28,16
9	45,2	369	15,3	26,1	25	43,3	1,44	2,52	3,7	10,06	117	28,02
10	45	399	15,7	27,1	25,5	41,4	1,52	2,12	4,1	10	124	28
11	45,1	407	16	28	26	40,5	1,6	1,67	4,03	10,06	128	27,9
12	42,9	425	15,9	26,6	26	39	1,54	2,09	3,2	8,7	130	27,94
13	47,1	376	18	28	25,5	43,4	1,55	4,19	4,3	10,04	132	27,82
14	43,5	372	17,1	26,4	26,2	42,3	1,56	3,0	3,8	9,4	119	27,5

де F1 – вологість, F2 – насипна щільність, F3 – зольність, F4 – температура, F12 – сипучість, F6 – фракційний склад, F7 – вологорізниця торфу, F5 – температура повітря, X1 – завантаження сушарки, X2 –

частота обертання барабана сушарки, X3 – температура пари, X4 – продуктивність повітродувки

Таблиця 2 – Значення вихідних впливів в серії дослідів

№	Вологість сушенки, %	Волого-різниця сушенки, %	Температура сушенки, °С	Електро-споживання, кВт	Температура агента сушіння на виході із сушарки, °С	Теплоспоживання, тис.кДж.год
1	14,7	5	72,6	67,303	96,7	18471.65
2	17,9	7,2	70,4	66,606	102,75	14517.05
3	15,8	5,1	59,4	66,818	97,2	15794.82
4	14,7	8,5	57,2	67,166	94,8	19158.18
5	14	4,2	55	66,679	93,7	14028.38
6	14,6	3,1	58,85	66,929	96	15197.17
7	16,1	4,6	55	66,826	88,5	15466.22
8	17,6	6,1	57,2	68,894	91,5	17954.45
9	16,4	4,8	60,5	73,823	91	17930.4
10	16,3	4,9	63,8	75,034	96.5	18695.49
11	17,1	5,1	63,25	73,272	100	18756.48
12	16,6	2,9	61,6	65,367	103.1	17206.55
13	19,8	6,2	63,8	71,286	102.5	17076.68
14	17,6	6,1	60,1	68,453	98.7	1687.54

По результатам дослідів був проведений статистичний та кореляційний аналіз. Вважаємо за необхідне провести комп'ютерні розрахунки і визначити оптимальні параметри режиму сушіння, що забезпечують отримання сушенки необхідних якісних характеристик за мінімальних затрат теплової та електричної енергії на процес сушіння з подальшим розробленням рекомендації по їх практичному використанню.

Головний інженер

Головний енергетик

Аспірант

Романік Віктор Миколайович

Хворостяний Василь Никифорович

Кулаковський Леонід Ярославович



затверджую,

Директор



Акт

Впровадження результатів дисертаційної роботи Кулаковського Л.Я.

на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук. У відповідності з планом роботи по оптимізації режимів споживання теплової та електричної енергії на торфобрикетному заводі «Сойне» розроблені:

- Математичні моделі процесу сушіння торфу, щодо дозволяють мінімізувати енергоспоживання з дотриманням обмеження по якості сушенки;
- рекомендації щодо забезпечення оптимальних режимів енергоспоживання процесу сушіння торфу в парових трубчатих сушарках.

У разі впровадження перелічених вище результатів теоретично очікуваний економічний ефект може складати 60 тис. грн. в рік.

Головний інженер *[Signature]* Романік Віктор Миколайович

Головний енергетик *[Signature]* Хворостянний Василь Никифорович

АКТ**використання результатів дисертаційної роботи****Кулаковського Леоніда Ярославовича****«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ СУШІННЯ З
ВИКОРИСТАННЯМ ПАРОВОЇ ТРУБЧАТОЇ СУШАРКИ НА ПРИКЛАДІ
ТОРФОБРИКЕТНОГО ВИРОБНИЦТВА»**

у впроваджені ресурсозберігаючих режимів управління енергоспоживанням на підприємстві та в проектах по впровадженню заходів по енергозбереженню на виробництві, що виконувались спеціалістами ТОВ "НВП "ГОРИЗОНТ"

Розроблений в дисертаційній роботі метод проведення моніторингу витрат теплової енергії, що базується на аналізі витрат теплоти за 1 годину та питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи з торфу дозволяє підібрати ефективні рівні споживання паливно-енергетичних ресурсів сушарним комплексом. Окрім цього, пошук режимів роботи сушарного комплексу за мінімальних витратах енергоресурсів, а також процедура здійснення регулювання процесом сушіння матеріалу в енергоефективних режимах використовується ТОВ "НВП "ГОРИЗОНТ" для формування заходів з енергозбереження та оптимальному управлінні енергоспоживанням підприємств, що використовують енерготехнологічний комплекс сушіння з використанням парових трубчатих сушарок в технологічній стадії виробництва продукції.

Очікуване зменшення витрат на використання теплової та електричної енергії в середньому становить 90 тис. грн. на кожному із підприємств, що використовує парові трубчаті сушарки в технологічному циклі виробництва продукції.

Результати дисертаційної роботи були використані під час розроблення технічного завдання створення автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії Смижського торфобрикетного заводу.

Генеральний директор



В.А. Огороднік