

## ВІДГУК

### офіційного опонента

д.т.н., професора КУПНА Андрія Івановича

про дисертацію ЛЯШЕНКА Сергія Олексійовича

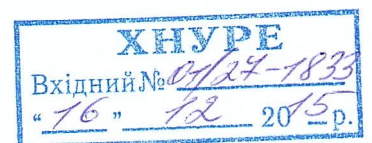
“Автоматизація процесів керування технологічними відділеннями цукрового виробництва на основі нейромережевого підходу”, яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування

### Актуальність обраної теми

Україна зараз входить у десятку найбільших світових виробників та експортерів цукру. Разом з тим конкурентоздатність цієї важливої вітчизняної галузі на світовому ринку щорічно знижується. Переважно це пояснюється застарілими технологіями та тривалою експлуатацією обладнання ще “радянської” доби. Зокрема, наприклад, лише енергоспоживання природного газу у нас складає приблизно 40% (для порівняння: в країнах Євросоюзу цей показник нижчий приблизно у 2 рази, у сусідній Біларусі – в 1,5 разу). Отже, найбільш перспективними шляхами вирішення цієї проблеми є модернізація та/або комплексна автоматизація всіх етапів виробництва.

Потреби автоматизації процесів керування технологічними відділеннями цукрового виробництва обумовлюють необхідність застосування комплексного підходу до вирішення цієї задачі. Слід відзначити, що на сучасному етапі цукрові заводи характеризуються наявністю роз’єднаних, різнорідних автоматизованих та інформаційних систем, оснащених технічною базою від різних виробників, що обумовлено неоднотимчасною автоматизацією різних відділень виробництва. Крім того, внаслідок багатомірності технологічних процесів цукрового виробництва, їх різнотипності, інерційності, нестационарності характеристик та неповноти інформації щодо їх властивостей навіть використання досить розвинутого адаптивного підходу для синтезу систем керування цими процесами не дає необхідного ефекту. В цих умовах перспективним є застосування інтелектуального підходу.

Отже, можна стверджувати, що проблема використання технологій обчислювального інтелекту, зокрема штучних нейронних мереж для ідентифікації, нейрокерування та оптимізації технологічних процесів (ТП) цукрового виробництва, вирішенню якої присвячене дисертаційне дослідження Ляшенка С.О., є актуальною для теорії та практики розвитку новітніх систем керування. Зокрема, це стосується розробки вдосконалених моделей основних ТП цукрового виробництва; методів адаптивної ідентифікації для роботи у контурах автоматизованих систем керування (АСК) з метою підтримки необхідної якості вихідних параметрів; алгоритмів інтелектуального керування з урахуванням різних типів збурень, що діють на об’єкти керування; методів прогнозування із застосуванням нейромережевого підходу, призначених для отримання ефективних сигналів керування в умовах неповної інформації.



Вивчення та детальний аналіз змісту дисертаційної роботи показав, що вона виконана здобувачем у Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. П. Василенка відповідно до тематичного плану цілої низки науково-дослідних робіт університету в межах держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт (НДР). При цьому здобувач особисто був керівником та/або відповідальним виконавцем усіх зазначених НДР. У ході цих досліджень автор дисертаційної роботи удосконалив існуючі, розробив та дослідив нові математичні моделі, методи та програмні засоби побудови інтелектуальних систем керування технологічними процесами (ТП), які застосував при вирішенні практичних завдань на різних підприємствах.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій**

Розроблені у дисертаційній роботі методи синтезу моделей ТП та систем керування на основі нейронних мереж обґрунтовано шляхом проведення аналітичних та експериментальних досліджень. Автором здійснено коректну постановку завдання дослідження та обрано перспективні підходи до його вирішення.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним застосуванням методів теорії експерименту – для проведення статистичного аналізу і отримання статистичних характеристик процесів, що досліджувались; теорії систем керування – для синтезу структури адаптивних систем автоматизованого керування ТП цукрового виробництва; теорії ідентифікації – для синтезу моделей об'єктів керування; побудови штучних нейронних мереж – для синтезу процедур інтелектуальної ідентифікації та керування ТП цукрового виробництва; імітаційного моделювання – для підтвердження вірогідності отриманих теоретичних результатів.

Крім того, достовірність результатів підтверджується експериментальними дослідженнями технічних об'єктів та відповідністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Наукові положення дисертації мають належне теоретичне обґрунтування. Матеріали дисертаційної роботи апробовані на багатьох міжнародних наукових конференціях і семінарах.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність загалом і зауваження до оформлення**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, 9 додатків. Повний обсяг роботи складає 417 сторінок, що включає в основній частині роботи 102 рисунки, з них 27 на окремих сторінках та 19 таблиць, з них 10 на окремих сторінках, список використаних джерел із 269 найменувань на 29 сторінках та 9 додатків на 71 сторінці.

У **вступі** наведено наукові та практичні задачі, їх стан, актуальність, сформульовано об'єкт, предмет та методи досліджень, наведено наукову

новизну та практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача у публікації, які виконано у співавторстві, апробацію роботи, кількість та якість публікацій.

Формулювання головної наукової проблеми роботи задекларовано достатньо узагальнено. На підставі отриманих автором наукових результатів та предмету досліджень це перш за все низка нових або вдосконалених методів та математичних моделей. Крім того, у п'ятому пункті наукової новизни не конкретизовані корисні наслідки отриманого результату. Також при декларації практичного значення отриманих результатів наводяться поруч прикладні та наукові результати.

У **першому розділі** дисертаційної роботи здобувач виконав критичний аналіз стану автоматизації керування ТП цукрового виробництва.

Як відомо, при побудові систем керування локальними технологічними процесами в даний час переважно використовуються пропорційно-інтегральні і пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (ПІ- і ПІД-регулятори). Розглянуто переваги даних регуляторів і їхні недоліки, що з'явилися причиною розвитку адаптивного та інтелектуального керування.

Значну увагу в даному розділі приділено аналізу проблеми побудови адекватної математичної моделі об'єкта, яка є основою синтезу будь-якої системи керування, і розглянуто різні моделі, що використовуються в адаптивних системах. Аналіз особливостей таких систем та їх недоліків дозволив обґрунтувати використання для автоматизації ТП цукрового виробництва інтелектуальних технологій, зокрема штучних нейронних мереж (ШНМ).

У результаті проведеного аналізу дисертантом науково обґрунтовано використання нейромережевого підходу як базису для створення систем керування ТП цукрового виробництва. У зв'язку з цим дисертантом запропоновано удосконалити існуючі та створити нові методи побудови систем керування на основі нейронних мереж для підвищення якості, рівня автоматизації та ефективності створюваних АСК ТП цукрового виробництва.

Разом з тим слід зазначити, що структуру цього розділу можливо було зробити більш раціональною з урахуванням поставлених завдань дослідження, отриманих наукових результатів та змісту основних розділів. Крім того, при розгляді сучасних напрямів теорії керування автором розглянуті не всі можливі альтернативні напрями допустимих рішень подібних завдань (наприклад, на основі синергетики, робастного керування, нелінійної динаміки тощо).

У **другому розділі** дисертації викладена вдосконалена концепція автоматизованого керування комплексом ТП типового цукрового виробництва.

Наведений аналіз типової технологічної схеми цукрового виробництва ТОВ «Кириківський цукровий завод» дозволив систематизувати і представити локальні технологічні процеси як об'єкти керування, на основі чого було визначено завдання керування окремими ТП, а також необхідні для опису інформаційні і керуючі параметри сигналів. Вивчено особливості систем автоматизації відділень цукрового виробництва та визначено головні вимоги до систем автоматизації основних відділень, що забезпечує отримання

максимального виходу продукції та досягнення економічного ефекту.

Значну увагу приділено аналізу одного із найбільш відповідальних етапів досліджень – вибору та обґрунтуванню критерію оптимальності. Докладно розглянуті технічні (продуктивність, надійність, вихід продукції, якість сировини тощо) та економічні (прибуток, рентабельність, собівартість, матеріальні витрати на одиницю продукції тощо) критерії оптимізації виробництва. Для оптимізації роботи цукрового виробництва визначені основні критеріальні параметри, які найбільшою мірою впливають на ефективність виробництва.

Визначено критеріальні залежності між раціональними діагностичними та регулювальними параметрами ТП (дифузії, дефекосатурації, випарювання і кристалізації), що здійснюються при тепло- і гідротехнічних процесах, які відбуваються при переробці цукрової продукції на заводі.

Розроблені у другому розділі методи дозволяють обґрунтовано вибрати критерій оптимізації для підвищення ефективності виробництва за рахунок збільшення рівня автоматизації ТП цукрового виробництва.

При цьому, на думку опонента, цей основний розділ дещо перевантажений достатньо відомою інформацією технологічного характеру, яка зазвичай властива першому розділу. Наприклад, це стосується схеми загальної технології виробництва цукру та її опису, добре відомих раніше підходів до побудови АСК локальними ТП тощо. Важливі відмінності та конкурентні переваги вдосконаленої концепції (застосування інтелектуальних методів керування на підставі вдосконалених критеріїв), не зважаючи на їх актуальність, не акцентовані автором окремо.

**Третій розділ** присвячено питанням синтезу адаптивного керування ТП на основі лінійних моделей.

У результаті статистичного аналізу та використання кореляційних методів були встановлені зв'язки між вхідними та вихідними параметрами ТП, а застосування методу найменших квадратів (МНК) дозволило побудувати регресійні моделі всіх відділень заводу. Розрахунок статистичних критеріїв згоди Фішера, Ст'юдента підтвердив адекватність отриманих моделей ТП. У зв'язку з тим, що аналіз цих моделей показав їх обмежені властивості в задачах керування, здобувач розглянув питання побудови моделей ТП цукрового виробництва, які засновані на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів, що відображають динаміку процесів.

Через те, що динамічні моделі можуть бути приведені до моделей у просторі станів, для керування ними можуть використовуватися багатовимірні оптимальні регулятори. Однак, для синтезу таких регуляторів потрібно мати досить великий обсяг апріорної інформації про властивості самого об'єкта, а також про статистичні властивості корисних сигналів і завад. Крім того, рішення даної проблеми вимагає рішення алгебраїчних рівнянь типу Рікатті, що пов'язано зі значними обчислювальними труднощами. Усе вищевказане обумовлює використання спрощень, зокрема лінеаризації моделей, що й стало основою для дослідження можливості керування динамічними об'єктами за

допомогою їх статичних моделей. У роботі отримано оцінки втрат, які супроводжують такі спрощення для різного вибору критеріїв оптимізації.

Урахування нестационарності параметрів ТП призводить до необхідності використання адаптивного підходу при керуванні цими процесами, однією з реалізацій якого є введення в контур керування ідентифікатора, що працює за відповідним адаптивним алгоритмом. З цією метою здобувачем запропоновано та досліджено алгоритм прискореної ідентифікації, використання якого разом з розробленим алгоритмом керування виявилось досить ефективним.

Загалом слід зазначити, що аналогічно до попереднього розділу, на початку також багато опису класичної методики статистичного аналізу даних. Інтервал дискретизації лінійних динамічних моделей та регуляторів представлений лише в узагальненому вигляді. Крім того, зазначені математичні моделі та регулятори фактично застосовуються в подальших дослідженнях лише для обґрунтування використання більш складних нелінійних, адаптивних та інтелектуальних підходів.

У **четвертому розділі** розглянуто питання інтелектуальної ідентифікації ТП цукрового виробництва на основі нейромережевого підходу.

Здобувачем простежено особливості побудови нейромережевих моделей нелінійних динамічних об'єктів та запропоновано підхід, який дозволяє формалізувати опис складних нелінійних технологічних об'єктів з метою їх ідентифікації. У зв'язку з тим, що при моделюванні складних ТП досить широко використовуються нелінійні моделі Вольтерра і її окремі випадки - моделі Вінера і Гаммерштейна, у даному розділі значну увагу приділено побудові нейромережевих аналогів цих моделей на основі багат шарового перцептронну (БШП) та радіально-базисної мережі (РБМ). Побудова нейромережевих моделей потребує визначення структури мережі та процедури її навчання. З метою зменшення кількості параметрів, що впливають на час навчання, слід застосовувати ортонормовані базисні функції.

На основі отриманих одновимірних моделей Гаммерштейна в роботі розроблено багатовимірні адитивні і мультиплікативні нейромережеві моделі, що описують об'єкти з багатьма входами. Використання при цьому еквівалентного опису у вигляді рівняння псевдолінійної регресії дозволяє використовувати для навчання мереж (оцінки невідомих параметрів) алгоритм МНК.

Комп'ютерне моделювання роботи нейромережевих моделей ТП цукрового виробництва, заснованих на БШП та РБМ, підтвердило ефективність підходу, що розвивається.

Підсумовуючи все вищезазначене, треба також зауважити, що з опису цього розділу не вдалося з'ясувати питання вибору оптимального інтервалу дискретизації, глибини регресії (конкретної кількості затриманих сигналів на вході та виході) для моделей типу  $xARX$ , їх параметризації (навчання) в умовах суттєвої нестационарності. Крім того, вважаю, що застосування математичних моделей Вольтерра, Гаммерштейна та Вінера вимагає більшого обґрунтування. Продуктивність параметризації нейроструктур залежить не тільки від архітектури ШНМ, кількості шарів і нейронів, алгоритму навчання, а й від

архітектури обчислювача (CPU, nCore, RAM) і типу реалізації (наприклад, нейросимулятори, нейрочипи, графічні процесори, кластери тощо).

**П'ятий розділ** присвячено питанням синтезу інтелектуальних систем (схем регуляторів) для автоматизованого керування локальними ТП цукрового виробництва на основі нейромережевого підходу.

Здобувач розглядає два принципово різних методи адаптивного керування об'єктами зі змінними параметрами: пряме і непряме (з ідентифікатором) адаптивне керування. Якщо при прямому адаптивному керуванні застосовується одна штучна нейронна мережа (ШНМ), що реалізує нейроконтролер, то в разі непрямого адаптивного нейромережевого керування - дві ШНМ, одна з яких реалізує нейроконтролер, а інша - ідентифікатор.

Одним із варіантів застосування нейронних мереж у задачах керування є використання схем нейрокерування з самостійним налаштуванням. Здобувач синтезував такі схеми нейрокерування для ПД-регулятора на базі БШП та РБМ і показав, що реалізація даних схем є досить простою і не вимагає будь-якої додаткової інформації про властивості об'єкта і завади. При цьому отримано умови збіжності процесу керування при використанні РБМ загального вигляду.

Одним з найбільш ефективних шляхів вирішення задачі підвищення ефективності роботи системи керування є використання предикторного керування, коли на основі поточної інформації предиктор здійснює прогнозування значення вихідних сигналів об'єкта, яке і служить основою для пошуку оптимальних законів керування. У зв'язку з цим розроблено нові процедури предикторного нейро-ПД-керування.

З метою підвищення точності прогнозування ходу технологічного процесу в роботі використано локально-рекуррентний перцептрон, при побудові якого застосовуються динамічні нейрони, що містять БХ-фільтри, а для навчання мережі запропоновано алгоритм, який є однією з модифікацій методу зворотного розповсюдження помилки, реалізація якого утруднень не викликає.

Проведено імітаційне моделювання розроблених схем нейромережевого керування з використанням ПЗ Neural Network Toolbox. Досліджено процес вирішення завдань адаптивного нейромережевого керування нелінійними динамічними об'єктами в різних умовах і показана ефективність використання для цього алгоритму Левенберга-Марквардта. За результатами моделювання зроблено висновок щодо доцільності використання при керуванні ТП цукрового виробництва NARMA - L2 Controller.

У підсумку, враховуючі схожість та взаємодоповнення завдань інтелектуальної ідентифікації та нейрокерування, основні зауваження до цього розділу аналогічні попередньому. Крім того, у розділі присутні певні відомі абстрактні схеми з нейрокерування та загальні висновки у вигляді простих анотацій (за виключенням п'ятого) без прив'язки до конкретних локальних ТП.

У **шостому розділі** здобувачем розглянуто питання розробки організації інформаційного та програмно-алгоритмічного забезпечення комп'ютерного тренажера для підготовки диспетчерського персоналу - операторів технологічних систем (ТС).

В основі всіх завдань, що вирішуються на тренажері, лежить імітаційна навчальна модель, яка орієнтована як на навчання, так і на перепідготовку (підтримання на постійно високому рівні знань і навичок) диспетчерського персоналу. Розроблена блокова функціональна структура модульного тренажера, що забезпечує виконання всіх завдань навчання, яка включає в себе основну керуючу програму, редактор, інтерпретатор введення-виведення, базу даних, імітатор і програму управління навчанням, що реалізує алгоритм навчання для різних режимів функціонування автоматизованого навчального комплексу.

Центральне місце в тренажері займає досить універсальний алгоритм навчання диспетчерського персоналу, який реалізовано у вигляді компонента, керуючого діалогом між учнем та імітаційною моделлю. Розроблено структуру організації інформаційного забезпечення імітаційної навчальної моделі, основою якого є дворівнева база даних (БД), що уможлиблює реалізацію імітаційних моделей у вигляді цілісної системи самостійних завдань (автономних програм).

Для здійснення імітаційного моделювання обраної архітектури ШНМ та алгоритму навчання мережі розглянуто питання вибору ефективного нейросимулятора. Здобувачем проведено аналіз поширених на цей час нейросимуляторів. Разом з тим у розділі не вдалося знайти інформацію про дослідження адекватності запропонованої імітаційної моделі на практиці в умовах реальних ТП.

Отже, проведені у роботі дослідження та комп'ютерне моделювання довели принципову можливість застосування інтелектуального підходу для побудови математичних моделей та оптимізації ТП цукрового виробництва. Відповідно до результатів, отриманих у дисертації, розроблено загальні принципи та структурна схема інтелектуального керування станціями головного корпусу Кириківського цукрового заводу та схеми локальних АСК ТП дифузійного, сокоочищувального, випарного та кристалізаційного відділень цукрового заводу.

Наведено економічне обґрунтування створення АСК ТП у ТОВ «Кириківський цукровий завод». Розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів дисертаційної роботи на даному підприємстві показує, що економічний ефект становить 1081435 грн., а термін окупності складає 0,95 року.

У **загальних висновках** здобувач навів одержані в роботі нові наукові та практичні результати, визначив їх новизну та практичну значущість. Треба лише зауважити доволі узагальнене формулювання вирішеної наукової проблеми у преамбулі (аналогічно вступу), а також відсутність у висновках найбільш важливих аналітичних показників, які, між іншим, достатньо широко представлені у попередніх розділах та висновках до них.

У **додатках** наведено таблиці та рисунки, що доповнюють та ілюструють матеріал основної частини дисертації, деякі допоміжні теоретичні результати, результати експериментальних досліджень розроблених методів і програмних

засобів щодо їх вирішення, а також копії документів про впровадження результатів дисертаційної роботи.

Підсумовуючи сказане, можна відмітити, що зміст дисертації загалом відрізняється необхідною повнотою, основні його положення, висновки і рекомендації в достатній мірі обґрунтовані, робота є завершеною науковою працею й оформлена відповідно до вимог МОН України. Матеріали захищеної раніше дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук не повторюються.

### **Основні наукові результати досліджень та їх наукова новизна**

Наукова новизна результатів досліджень Ляшенка С.О. полягає в такому:

- вперше запропоновано новий метод синтезу моделей ТП цукрового виробництва на основі адаптивного підходу з урахуванням нестационарності розглянутих процесів, який автоматично налаштовує параметри моделей, що дозволяє спростити їх структуру, підвищити рівень узагальнення і збільшити швидкість роботи системи керування;

- вперше запропоновано новий метод побудови нейромоделей ТП, що описані нелінійними різницевиими або диференціальними рівняннями, який на основі статичних ШНМ прямого поширення автоматично, за вибіркою даних, будує модель, яка адекватно відображає властивості об'єкта, що дозволяє підвищити ефективність процесу керування та рівень достовірності прогнозування ходу ТП;

- вперше запропоновано новий метод синтезу нейромережевого та нейромережевого предикторного ПД-регуляторів, в яких на основі розробленого алгоритму керування в автоматичному режимі визначаються параметри цих регуляторів, що дозволяє спростити їх реалізацію та підвищити ефективність керування;

- вперше запропоновано нову нейромережеву модель прогнозування ходу ТП на основі динамічного перцептрона, яка дозволяє більш адекватно відображати динамічні властивості досліджуваних ТП, що сприяє підвищенню точності прогнозування;

- удосконалено рекурентний метод побудови нестационарної регресійної моделі, призначений для роботи у контурі ідентифікації адаптивної системи керування в умовах, коли параметри об'єкта змінюються у часі, а корисні сигнали вимірюються із завадами, що дає можливість підвищити ефективність керування;

- удосконалено організацію інформаційного та програмного забезпечення комп'ютерного тренажера за рахунок використання запропонованих методів щодо побудови блоків керування, оптимізації та синтезу моделей ТП, що дозволяє моделювати різні технологічні режими і забезпечує підвищення ефективності підготовки операторів ТП цукрового виробництва;

- отримав подальший розвиток метод керування динамічними об'єктами за допомогою їх статичних моделей, що дозволяє спростити процес побудови загальної моделі та її використання для оптимізації режимів роботи відділень цукрового виробництва;



– отримали подальший розвиток нейромережеві методи побудови традиційних нелінійних моделей Вінера та Гаммерштейна, які удосконалено шляхом застосування ШНМ прямого поширення з використанням простих процедур навчання, що дозволяє підвищити рівень автоматизації і швидкість процесу побудови моделей, а також поліпшити їх інтерпретованість;

– отримали подальший розвиток адаптивні моделі нестационарних ТП цукрового виробництва, які модифіковано шляхом використання для їх побудови рекурентних алгоритмів з підвищеною швидкістю збіжності, що дозволяє скоротити час побудови математичних моделей керованих процесів.

### **Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Прикладна цінність результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблені алгоритми синтезу, а також відповідні програмні засоби є достатньо універсальними і дають можливість вирішувати задачі контролю та автоматизованого керування динамічними нестационарними процесами, які характерні для ТП цукрового виробництва, в умовах відсутності повної інформації про статистичні властивості зовнішніх збурень.

Значний практичний інтерес становлять також отримані у роботі результати експериментальних досліджень властивостей і характеристик ТП, які показали, що запропоновані нейромережеві підходи за рахунок використання додаткової інформації про об'єкт дозволяють скоротити процес створення АСК, а також забезпечити урахування вимог користувача щодо їхніх властивостей. Надане у роботі економічне обґрунтування та розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів дисертаційної роботи для ТОВ «Кириківський цукровий завод» дозволяють рекомендувати запропоновані методи для використання на практиці при вирішенні завдань створення систем керування ТП.

Синтезовані в дисертації структури, моделі та алгоритми можуть бути використані при розробці систем керування об'єктами з безперервними технологічними процесами, а також при створенні тренажерних систем для професійної підготовки операторів, які здійснюють керування різними об'єктами.

Достовірність теоретичних та практичних положень дисертації підтверджено впровадженням отриманих результатів у ТОВ «Кириківський цукровий завод», у ТОВ «Сільськогосподарське підприємство «Білий колодязь»», у ТДВ «Новоіванівський цукровий завод». Крім того, на цих підприємствах було втілено методику проведення інтелектуальної ідентифікації параметрів технологічних процесів цукрового виробництва на базі нейромережевого підходу.

Важливо, що всі вищезазначені результати, висновки й рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, використані у навчальному процесі у Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. П. Василенка (відповідні документи наведено автором у додатках до дисертації).

## **Рекомендації щодо використання результатів дисертації**

Виходячи із важливості, актуальності та якості одержаних наукових та практичних результатів, дослідження доцільно розвивати і використовувати в наукових та проектних організаціях, де виконуються роботи з розробки, дослідження, впровадження та експлуатації інтелектуальних систем керування у різних галузях промисловості, у навчальному процесі вищих навчальних закладів України при підготовці фахівців напрямів “Комп’ютерні науки”, “Програмна інженерія”, “Комп’ютерна інженерія”, “Системна інженерія”.

Бажано б продовжити дослідження з розробки та використання інтелектуальних методів обробки інформації у Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. П. Василенка. Запропоновані здобувачем методи та програмні засоби можуть бути використані в роботах, пов’язаних із необхідністю побудови моделей складних нелінійних об’єктів та процесів, що характеризуються невизначеністю, неточністю, відсутністю або недостатнім рівнем експертних знань.

## **Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях**

Основні положення та результати дисертації надруковані в 58 друкованих роботах, де 34 статті, з яких 32 статті у фахових виданнях України з технічних наук (14 одноосібних), серед яких 7 - у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз і 4 статті в закордонних наукових спеціалізованих виданнях, 2 статті в інших виданнях та 24 публікації у збірниках праць наукових конференцій, форумів та семінарів. Отже, за кількістю та якістю публікацій робота повністю відповідає встановленим вимогам.

## **Зауваження**

Відзначаючи достатньо високу якість та повноту одержаних наукових та практичних результатів, їх новизну та актуальність, треба також вказати на найбільш важливі зауваження, до яких слід віднести такі:

1. У першому розділі дисертації забагато уваги приділено загальним питанням побудови систем керування. Слід було більше уваги приділити аналізу існуючих альтернативних сучасних методів побудови моделей та їх використанню в системах керування (зокрема, синергетики, нелінійної динаміки, робастних підходів тощо).

2. У другому розділі отримано критеріальне рівняння (2.23), яке далі не використовується. Цей результат був би корисним, якби здобувач на прикладах продемонстрував необхідність його використання.

3. Наприкінці другого розділу не вистачає відокремленого чіткого формулювання найбільш важливих відмінностей та конкурентних переваг вдосконаленої концепції інтелектуального керування комплексом ТП цукрового виробництва, що пропонується автором роботи.

4. У підрозділі 3.5 при дослідженні можливості використання статичних моделей при керуванні динамічними об'єктами здобувачем отримано результати, які мають скоріше теоретичну, ніж практичну цінність, тому що перевірити виконання отриманих нерівностей не уявляється можливим.

5. У підрозділі 3.6.2 отримано та досліджено властивості алгоритму (3.124). Результати дослідження являють собою теж скоріше теоретичний інтерес, тому що вони отримані за умов відсутності завад. Крім того, незрозуміло, для якого класу нестационарностей слід застосовувати запропонований алгоритм. Слід було б оцінити обчислювальні витрати для його реалізації.

6. У четвертому розділі здобувач зосередив увагу на побудові нейромережових моделей моделі Вольтерра і Гаммерштейна. Застосування цих математичних моделей як і підходу Вінера вимагає більшого обґрунтування. Тому слід було б більше зосередитися на інших нейромережових моделях, зокрема на нелінійних моделях, які можна описати регресійними залежностями і які є більш зручними для використання в інтелектуальних системах керування.

7. Спільним зауваженням для четвертого та п'ятого розділів є те, що автор залишив поза увагою питання вибору оптимального інтервалу дискретизації, обсягів вибірки для навчання та принципів її формування в умовах реальних ТП, глибини регресії (кількості затриманих сигналів на вході та виході) для авторегресійних моделей нелінійних ідентифікаторів, особливостей їх параметризації в умовах суттєвої нестационарності.

8. У п'ятому розділі досліджено можливість використання динамічного перцептронну для побудови динамічних моделей ТП, але порівняльного аналізу зі статичними нейромережами не проведено. Слід було б додатково розробити методику, яка б дозволяла вибирати ту чи іншу нейромережу для конкретної задачі синтезу системи керування.

9. Деякі матеріали п'ятого розділу дисертації слід було б винести у додатки, а більше уваги приділити особливостям адаптивних нейромережових систем керування, які розробляються в роботі. Зокрема, слід було б дослідити властивості алгоритму налаштування параметрів нейромережового ПІД-регулятора за умов нестационарності та завад. Крім того, незрозуміло, як слід вибирати параметр  $\lambda$ , який входить в алгоритм керування (5.39), (5.40).

10. У шостому розділі досить слабким уявляється аналіз існуючих нейроемулаторів, з якого важко зробити висновок щодо ефективності використання того чи іншого емулятора. Також зовсім не розглядалися високопродуктивні підходи щодо апаратної реалізації нейроструктур (наприклад, на основі нейрочипів, графічних прискорювачів, CUDA тощо).

11. Відповідно до актів впровадження, наведених у додатку І, та результатів експериментів здобувач підтверджує практичну значимість одержаних результатів, але у шостому розділі висвітленню даного важливого аспекту дисертаційної роботи приділено недостатню увагу. Немає також достатньої інформації щодо перевірки адекватності отриманої імітаційної моделі в межах розробленого тренажера.

12. Робота загалом не позбавлена незначних вад в оформленні, є друкарські, стилістичні, синтаксичні і редакторські помилки. Так, в авторефераті відсутнє визначення формул для норми в описі методів побудови нейромережових моделей та алгоритмів керування. Рис.1, на думку опонента, там є зайвим (технологія добре відома), якість рис.3 та рис.4 є недостатньою, а необхідної інформації у підписах бракує. У дисертації, наприклад, зустрічається відсутність одиниць вимірювання для окремих технологічних показників у формулах та на рисунках, одночасне використання термінів “управління” та “керування”, застосування морально застарілих версій ПЗ (типу Windows’95) тощо.

Підсумовуючи все вищезазначене вважаю, що наведені зауваження не впливають на загальну високу позитивну характеристику дисертаційної роботи здобувача, не зменшують її актуальності, наукової новизни та практичної значущості дисертаційних досліджень.

### **Висновок**

У дисертаційній роботі здобувача Ляшенка Сергія Олексійовича, відповідно до поставленої мети, наведено нове розв’язання важливої науково-практичної проблеми створення теоретичних основ автоматизації процесів керування технологічними лініями цукрового виробництва, що функціонують в умовах суттєвої поточної невизначеності, на основі нейромережового підходу шляхом розробки вдосконалених моделей основних ТП цукрового виробництва; методів адаптивної ідентифікації для роботи у контурах автоматизованих систем керування (АСК) з метою підтримки необхідної якості вихідних параметрів; алгоритмів інтелектуального керування з урахуванням різних типів збурень, що діють на об’єкти керування; методів нейромережового предикторного прогнозування, призначених для отримання ефективних сигналів керування в умовах неповної інформації.

У порівнянні з наявними методами та моделями, одержані наукові та практичні результати дозволяють будувати адаптивні системи керування на основі нейромереж, які характеризуються більш високими рівнями узагальнення та інтерпретованості, мають меншу структурну та параметричну складність, а самі методи характеризуються високим рівнем автоматизації та дозволяють підвищити швидкість обчислень. Одержані автором нові результати мають важливе наукове та практичне значення для розвитку теорії інтелектуальних систем керування, а також для розвитку теорії штучних нейронних мереж.

Враховуючи якість одержаних нових наукових результатів, їх значення для теорії та практики, вважаю: дисертаційна робота здобувача Ляшенка Сергія Олексійовича є завершеним важливим науковим дослідженням, присвяченим розробці методів побудови інтелектуальних систем керування технологічними процесами на основі нейромереж для підвищення ефективності цукрового виробництва.

Дисертаційна робота здобувача Ляшенка Сергія Олексійовича відповідає спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування (пункти паспорту: 1-“Методи створення АСК процесами та комплексами різного призначення”, 3-“Моделювання об’єктів і систем керування (статичні та динамічні, стохастичні й імітаційні логіко-динамічні моделі тощо”, 4 - “Інформаційне та програмне забезпечення АСК організаційно-технічними об’єктами та комплексами”, 5 - “Ідентифікація та контроль параметрів об’єктів керування в різних галузях народного господарства”, 7 - “Системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності при керуванні організаційно-технічними об’єктами і комплексами різного призначення”).

Усі результати дисертаційної роботи здобувачем одержано особисто, опубліковано у науково-технічних виданнях та апробовано на міжнародних наукових конференціях і семінарах. Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. У роботі здобувача немає перетинань з його дисертацією на здобуття наукового ступеня кандидата наук.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні і відповідає усім вимогам (пп. 10-14) «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567.

Вважаю, що Ляшенко Сергій Олексійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Завідувач кафедри комп’ютерних систем та мереж  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,  
доктор технічних наук, професор



А.І. Купін

