

Н. В. Єрмілова, С. Г. Кислиця, Р. М. Тарасюк

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна

## РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯМ ОВОЧЕСХОВИЩА НА БАЗІ НЕЧІТКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У статті розглядаються недоліки існуючих систем автоматичного керування (САК) роботою холодильного обладнання овочесховищ та способи усунення цих недоліків. Запропоновано відмежуватися від традиційних методів керування та перейти до використання інтелектуальних методів, які дозволять системі гнучко адаптуватися при зміні внутрішніх параметрів об'єкту та збурювальних дій в широкому діапазоні змінення їх величин. Розроблено математичні моделі окремих елементів системи – повітроохолоджувача, зволожувача повітря та холодильної камери, на базі яких створено узагальнену модель САК холодильного зберігання, котра дозволила визначити температуру та вологовміст повітря в динаміці. Проведеними теоретичними дослідженнями взаємодії охолоджувального повітря з об'єктом зберігання встановлено визначальний вплив температури на динаміку втрат продукту та визначено основний параметр регулювання – зміна холодопродуктивності компресорної установки в функції температури повітря на виході камери шляхом зміни об'ємних витрат холодоагенту, яка здійснюється регулюванням частоти обертання вала компресора. Проведений синтез нейроінформаційної експертної системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора, проаналізовані графічні залежності потужності на валу компресора від вхідних параметрів. Виявилося, що мінімальна потужність компресора досягається зменшенням теплонаходжень в камеру як із зовні, так і з середини холодильної камери, а масові витрати повітря впливають тільки на швидкість охолодження. Зроблено висновок, що визначення потужності компресора за допомогою нечітких нейронних мереж відповідає поставленій задачі. Запропоновано схему для апаратної та програмної реалізації САК технологічним мікрокліматом в холодильній камері з використанням системи СКАДА.

**Ключові слова:** система керування, овочесховище, холодильна камера, математична модель, повітроохолоджувач, зволожувач повітря, нейронна мережа, стабілізація температури.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Зберігання плодово-овочевої продукції у місцях її безпосереднього виробництва дозволяє значно знизити втрати продукції після збирання. Незважаючи на прогрес у автоматизації холодильного обладнання овочесховищ, потенційні можливості її вдосконалення ще не вичерпано. Забезпечення сталості параметрів температури і вологості повітря в камерах сховища може бути ефективним тільки при використанні систем автоматичного керування роботою холодильного обладнання на базі агрегатів з регульованою холодопродуктивністю. Необхідність зміни продуктивності холодильного обладнання обумовлена тим, що холодильні агрегати, розраховані на максимальне теплове навантаження, при сезонних коливаннях температури майже не функціонують при повному навантаженні. Малі ж навантаження забезпечують застосуванням повторно-короткочасного режиму роботи компресорної установки, що призводить до перевитрат електроенергії.

При використанні сучасних підходів для максимального наближення створення оптимальної системи керування при отриманні рішення по формуванню діючого значення зміни потужності за критерієм стабілізації температури в камері доцільно відмежуватися від традиційних методів керування та перейти до використання інтелектуальних методів, які дозволять гнучко адаптуватися при зміні внутрішніх параметрів об'єкту та збурень в широкому діапазоні змінення їх величин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При аналізі відомих літературних джерел по темі [1-6] можна зробити висновок, що існуючі системи автомати-

чного регулювання температури повітря і сама система вентиляції не можуть забезпечити локальне регулювання температури в сховищах, т. я. температурний датчик зазвичай встановлюється в одному місці об'єму камери, а інші зони не контролюються. Вмикання вентиляторів відбувається автоматично для всього сховища, і температура повітря регулюється практично в одній точці, що зумовлює значну нерівномірність температурного поля насипу, і можливість ліквідації джерел самозігрівання повністю виключається.

Розробці варіантів схем компоновки повітряних систем охолодження присвячено багато робіт. Найбільш розповсюджені схеми проаналізовано в узагальнюючих роботах В. З. Жадана, П. Г. Красномоця, П. І. Дячека, Б. І. Котова, В. О. Грищенко, І. Г. Чукача та інших. Аналізом існуючих систем повітряного охолодження встановлено, що рівномірне охолодження елементів рослинної продукції та пов'язана з цим рівномірність температурно-вологісних полів в штабелях може бути тільки за умов активного вентиляції продукції. Необхідно передбачити періодичну роботу обладнання у фазі збереження, але при цьому обов'язковою умовою є автоматизація керування роботою обладнання. Таким чином, для реалізації енерго- і технологічно ефективних режимів роботи перспективних систем повітряного охолодження плодовоовочесховищ необхідне вдосконалення систем керування температурно-вологісними режимами охолодження і зберігання плодовоовочевої продукції.

### Основна частина

Технічні та експлуатаційні характеристики сучасних овочесховищ і камер дозрівання України дозволяють зменшити втрати під час зберігання в них овочів і фруктів. Автоматизація мікроклімату в ово-

чесовищах здійснюється з урахуванням агротехнічних вимог на зберігання окремих видів сільськогосподарської продукції. Основним діючим фактором є активна вентиляція, яка забезпечує видалення надмірної вологості з поверхні коренеплодів і овочів, а також сприяє вирівнюванню волого-температурних полів в об'ємі продукції, що зберігається. Підвищення енергетичної і технологічної ефективності системи створення технологічного мікроклімату в холодильних камерах відбувається шляхом реалізації енергоощадних режимів і автоматизації керування ними.

Для синтезу системи автоматичного керування (САК) температурно-вологісними режимами необхідно мати математичний опис динамічних процесів в окремих елементах обладнання, приміщення та продукції, яка охолоджується або зберігається (з урахуванням її розігріву під час відтаювання повітроохолоджувачів). Математичні моделі повинні якомога точніше відображати фізичну сутність процесів (це, в основному, процеси тепло- і масообміну), що протікають в елементах обладнання, штабелях з продукцією, в робочому приміщенні, і враховувати основні зв'язки між параметрами та збурювальними діями (як зовнішніми, так і внутрішніми), які призводять до змін температурно-вологісного режиму та, відповідно, втрат продукції [3].

Проведеними теоретичними дослідженнями взаємодії охолоджувального повітря з об'єктом зберігання встановлено визначальний вплив температури на динаміку втрат продукту та визначено основний параметр регулювання – зміна холодопродуктивності компресорної установки в функції температури повітря на виході камери (датчик температури ТЕ на виході повітроохолоджувача ПО), шляхом зміни об'ємних витрат холодоагенту (регулювання частоти обертання вала компресора К). Функціональна схема САК приведена на рис. 1.

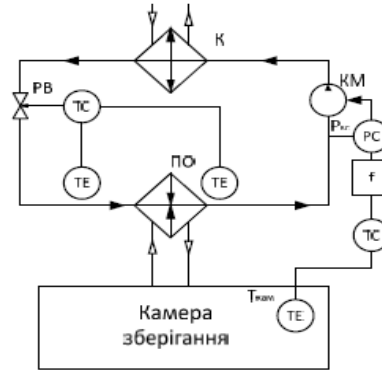


Рис. 1. Функціональна схема САК режимами холодильного зберігання плодоовочевої продукції

Запропонована САК режимом холодильного зберігання реалізує енергоефективний принцип керування, сутність якого полягає в тому, що холодозабезпечення камери відбувається в залежності від змінних в часі потреб в холоді. Тобто при збільшенні тепловитрат (наприклад добових), відповідно повинна збільшуватись і кількість холоду, який виробляється. Стабілізація (автоматичне регулювання) температури повітря на вході в камеру здійснюється шляхом регулювання заповнення об'єму випарника за допомогою терморегулюючого клапана РВ (по сигналу датчика температури повітря ТЕ на виході повітроохолоджувача). Було розроблено математичні моделі окремих елементів системи – повітроохолоджувача, зволожувача повітря та холодильної камери, на базі яких створено узагальнену модель системи автоматичного керування режимами холодильного зберігання, котра дозволила визначити температуру та вологовміст повітря в динаміці (рис. 2). Запропонована математична модель адекватна реальному процесу, і з відхиленням, що не перевищує 4 %, описує досліджуваний процес.

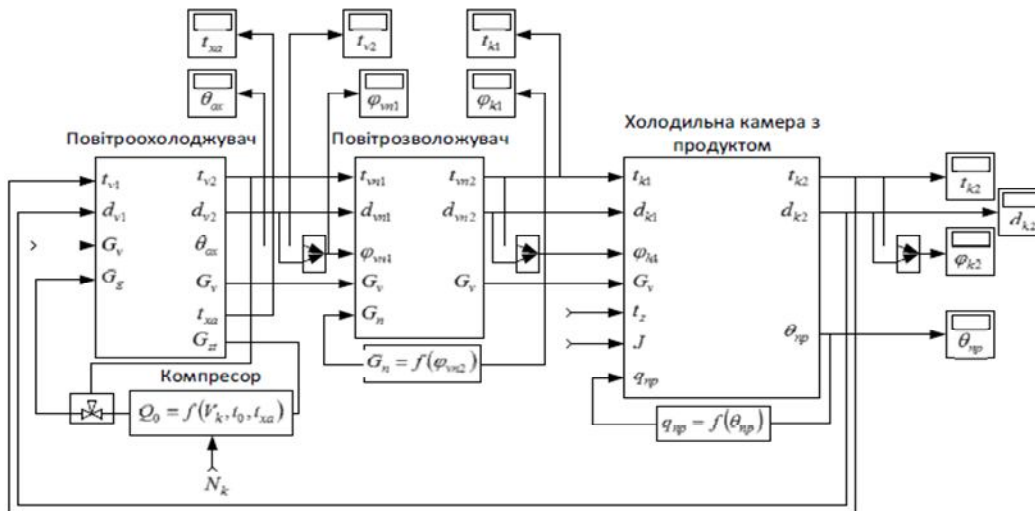


Рис. 2. Схема математичної моделі моделювання динамічних режимів холодильної установки у пакеті MATLAB/Simulink

Дослідження показали, що система з П-регулятором дає достатньо велику середньоквадратичну похибку регулювання. Враховуючи наявність коливань керованих параметрів при введенні інтегровальної складової в П-закон керування, а також погір-

шення динамічних властивостей із-за можливої втрати стійкості, застосування ПІ-регулятора небажане. В разі застосування ПД-регулятора введення похідної в П-закон керування неістотно покращує якісні показники, але значно ускладнює схему регулювання. Зна-

чна зміна параметрів атмосферного повітря в сезонні періоди "осінь-зима-весна" зумовлює суттєву нестаціонарність і нелінійність ряду характеристик технологічного обладнання плодоовочесховищ, внаслідок чого задача вибору закону регулювання та параметрів регуляторів суттєво ускладнюється. Конструктивні та теплофізичні параметри камер холодильного зберігання рослинної продукції постійно піддані збуренням (змінюється маса й об'єм продукції в період завантаження, площа теплообмінної поверхні та інші показники), що приводить до невизначеності. Цілком природно, що і найбільш ефективний ПІ-закон регулювання не може компенсувати збурення в умовах невизначеності. Відомо, що застосування системи керування температурним режимом приміщення з нечітким регулятором в умовах нестаціонарних збурень дозволяє стабілізувати температурний режим, в той час, як система з ПІ-регулятором має автоколивальний перехідний процес [4]. Система вимірює температуру повітря в приміщенні і автоматично вибирає режим роботи та потрібну холодопродуктивність компресора, причому задана температура повітря постійно коригується, виходячи з поточних значень температури та вологості повітря в приміщенні. Порівняно з ПІД-регулюванням коливання температури повітря значно зменшуються. Застосування нечітких логічних регуляторів при керуванні системою створення мікроклімату забезпечує: відсутність різких перепадів температури в приміщенні, підтримання допустимої швидкості потоку повітря, встановлення необхідної холодопродуктивності, вибір режиму роботи за параметрами температури і вологості в сховищі, мінімальний час виходу на заданий режим, зменшення витрат енергії на 20–30 %.

Проведений синтез нейроінформаційної експертної системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора (рис. 3). Алгоритм синтезу системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора у FIS-редакторі MATLAB був таким:

- вхідна температура повітря в камеру, вхідна вологість повітря, витрати повітря були заданими;
- отриманий набір даних увійшов в одну із вибірок (навчальну, тестову або контрольну) при створенні системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора (потужністю  $N_k$ ).

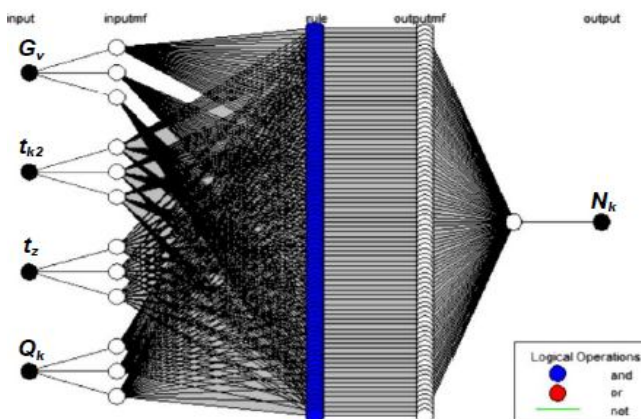


Рис. 3. Вікно середовища MATLAB/ANFIS структури нейромережевої моделі енергоефективного керування холодильним обладнанням в плодоовочесховищах

При синтезі системи автоматичного керування холодопродуктивністю компресора вхідними величинами прийняті:

1. Витрати повітря  $G_v$ , кг/с;
2. Температура на виході камери  $t_{k2}$ , °C;
3. Зовнішня температура  $t_z$ , °C;
4. Теплове навантаження в камеру  $Q_k$ , Вт.

Вихідною величиною є потужність компресора  $N_k$ .

Отримавши налаштовану нейронну мережу, були проаналізовані графічні залежності потужності на валу компресора (холодопродуктивності) від вхідних параметрів (рис. 4–6).

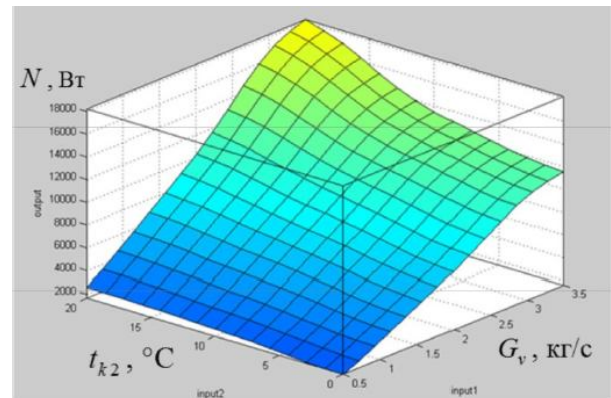


Рис. 4. Графік залежності потужності компресора від масових витрат повітря та температури на виході камери

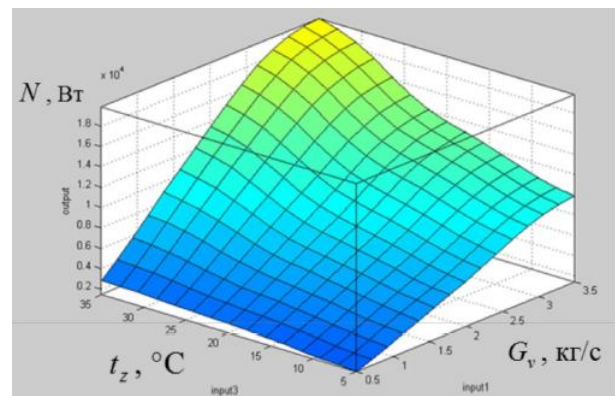


Рис. 5. Графік залежності потужності компресора від масових витрат повітря та температури навколишнього середовища

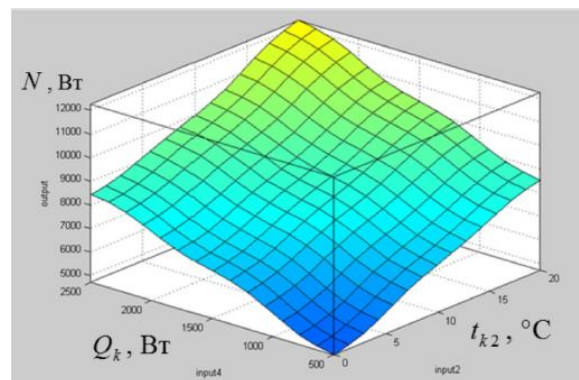


Рис. 6. Графік залежності потужності компресора від температури на виході камери та теплонадходжень

Виявилося, що якісно та кількісно ці залежності відповідають попереднім статистичним дослід-



дженням. Мінімальна потужність компресора досягається зменшенням теплонадходжень в камеру, як із зовні ( $t_2$ ), так і з середини ( $Q_k$ ) холодильної камери, а масові витрати повітря ( $G_v$ ) впливають тільки на швидкість охолодження (при рівних теплонадходженнях).

Зроблено висновок, що визначення потужності компресора за допомогою нечітких нейронних мереж відповідає поставленій задачі.

Для апаратної та програмної реалізації енергоефективного керування температурно-вологісними режимами при холодильному зберіганні рослинної продукції за основу автоматизованої системи взято принципову схему керування холодильною машиною типу MBV20x2-2-2 з компресором 5PB20-2-024 потужністю 8.8 кВт (рис. 7).

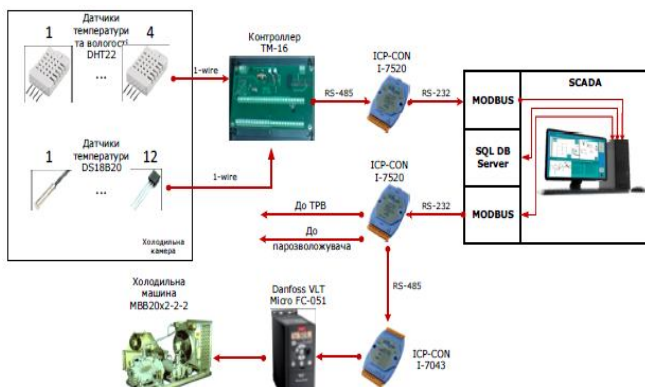


Рис. 7. Схема реалізації САК технологічним мікрокліматом в холодильній камері з використанням СКАДА

У схемі енергоефективного керування запропоновано використати два сприймаючих елементи: температури та відносної вологості повітря.

Зважаючи на технологічні аспекти – діапазони робочих температур та вологості, обрано такі сучасні датчики:

- датчик температури повітря DS18B20 в капсульному виконанні;
- датчик вологості DHT-22.

В якості вимірювального комплексу запропоновано використати мікропроцесорний блок TM-16 на базі мікропроцесора Атмел. Для керування частотою компресора холодильної машини пропонується використати частотний перетворювач типу Danfoss VLT Micro FC-051.

В якості системи автоматичного керування запропоновано використати SCADA (supervisory control and data acquisition) системи TRACE MODE, яка дозволяє реалізувати отримання інформації з датчиків температури та вологості повітря та програмно реалізувати за заданим алгоритмом нечітке керування частотою електродвигуна компресора [7]. SCADA забезпечує операторський контроль виробничих процесів в реальному часі.

Пакет програм може бути встановлений на промисловий комп'ютер. Зв'язок з об'єктом здійснюється за допомогою драйверів введення-виведення інформації або спеціальних серверів. Пакет програм TRACE MODE 6 поєднує в собі повний набір засо-

бів розробки АСУТП і керування бізнес-процесами виробництва: операторського інтерфейсу; розподілених систем керування; промислової бази даних реального часу; програм для промислових контролерів; систем керування виробництвом. TRACE MODE 6 дозволяє поступово нарощувати функціональність автоматизованої системи керування, починаючи із простого моніторингу й візуалізації технологічного процесу на одному ПК SCADA/HMI і закінчуючи реалізацією складних контурів керування, організацією розподілених обчислень, підключенням додаткових робочих місць і економічних модулів: облік і технічне обслуговування устаткування, облік і керування персоналом і керування виконанням виробництва.

Розроблена система енергоефективного керування температурно-вологісними режимами при холодильному зберіганні рослинної продукції підтримує технологічні параметри вологості і температури повітря змінням холодопродуктивності компресора холодильної машини та кількості водяної пари, яка надходить від зволожувача. Рациональні технологічні параметри обраховуються за математичною моделлю і потім вводяться в частотний перетворювач у вигляді керувальних дій за допомогою персонального комп'ютера через COM порт по протоколу MODBUS RTU.

Частотний перетворювач змінює швидкість обертання двигуна компресора і, відповідно, змінює об'ємну витрату холодоагенту.

## Висновки

1. В роботі вирішено завдання підвищення енергетичної ефективності системи забезпечення температурно-вологісного режиму в сховищі для зберігання рослинної продукції з машинним охолодженням шляхом автоматизації керування основними елементами обладнання. При цьому встановлено, що основною умовою енергоефективного керування є забезпечення відповідності холодопродуктивності установки тепловому навантаженню камери.

2. Проведеними дослідженнями визначено основний параметр регулювання – зміна холодопродуктивності компресорної установки шляхом регулювання частоти обертання вала компресора.

3. Розроблені математичні моделі для розрахунку параметрів процесу відрізняються врахуванням зв'язків між параметрами об'єкту зберігання і холодопостачання і дозволяють на базі нечітких нейронних мереж отримати лінгвістичну базу правил для нечіткої логіки.

4. Розроблено алгоритми використання нечітких нейронних мереж для визначення енергоефективних режимів функціонування холодильного обладнання плодоовочесховища, на базі яких запропоновано комплекс технічних засобів та розроблено програмне забезпечення для реалізації САК. За даними техніко-економічних розрахунків практична реалізація вдосконаленої САК зберігання плодоовочевої продукції дає змогу зменшити втрати продукції на 3 – 4 % при зменшенні затрат енергії на 20 %.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горг Мурад. Моделирование и оптимальное управление процессами холодильного хранения растительного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.04.03 "Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования" / Горг Мурад. – Одесса, 1992. – 18 с.
2. Жадан В. З. Влагообмен в плодоовощехранилищах / В. З. Жадан. – М.: Агропромиздат, 1985. – 197 с.
3. Грищенко В.О. Автоматизація процесу керування холодильним обладнанням в плодоовочесховищах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.07 "Автоматизація процесів керування" / В.О. Грищенко. – Кіровоград, 2016. – 20 с.
4. Дячек П. И. Научно-технические основы управления температурно-влажностным режимом хранения картофеля и овощей: автореф. дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук / П. И. Дячек. – Минск, 1997. – 35 с.
5. Котов Б.І. Енергозберігаючий алгоритм управління технологічним мікрокліматом / Б.І.Котов, В.О. Грищенко // Науковий вісник Нац. університету біоресурсів і природокористування України. – 2011. – Вип.166. – Ч.4. – С. 147-156.
6. Котов Б. И. Разработка системы автоматического управления системой создания микроклимата в камере плодоовощехранилища / Б. И. Котов, В. А. Грищенко // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: 9 международная научно-техническая конференция, 21–22 мая 2014 г. – М., 2014. – Ч. 5. – С. 219–223.
7. Грищенко В. О. Реалізація автоматизованої системи керування динамічними режимами камер холодильного зберігання плодоовочевої продукції / В. О. Грищенко // Науковий вісник Ніжинського агротехнічного університету. – Ніжин, 2009. – С. 196–199.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С. В. Козелков,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 15.10.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.01.2019

### Разработка автоматизированной системы управления оборудованием овощехранилища на базе нечетких нейронных сетей

Н. В. Ермилова, С. Г. Кислица, Р. М. Тарасюк

В статье рассматриваются недостатки существующих систем автоматического управления (САУ) работой холодильного оборудования овощехранилищ и способы устранения этих недостатков. Предложено отказаться от традиционных методов управления и перейти к использованию интеллектуальных методов, которые позволят системе гибко адаптироваться при изменении внутренних параметров объекта и возмущающих воздействий в широком диапазоне изменения их величин. Разработаны математические модели отдельных элементов системы – воздухоохладителя, увлажнителя воздуха и холодильной камеры, на базе которых создана обобщенная модель САУ режимами холодильного хранения, которая позволяет определять температуру и влажность воздуха в динамике. Проведенными теоретическими исследованиями взаимодействия охлаждающего воздуха с объектом хранения установлено изначальное влияние температуры на динамику потерь продукции, определен основной параметр регулирования – изменение холодопроизводительности компрессорной установки в функции температуры воздуха на выходе камеры путем изменения объемного расхода холодоагента, которое осуществляется регулированием частоты вращения вала компрессора. Осуществлен синтез нейроинформационной экспертной САУ холодопроизводительностью компрессора, проанализированы графические зависимости мощности на валу компрессора от входных параметров. Выявлено, что минимальная мощность компрессора достигается уменьшением теплопоступлений в камеру как снаружи, так и с середины холодильной камеры, а массовый расход воздуха влияет только на скорость охлаждения. Сделан вывод, что определение мощности компрессора с помощью нечетких нейронных сетей соответствует поставленной задаче. Предложена схема для аппаратной и программной реализации САК технологическим микроклиматом в холодильной камере с использованием системы СКАДА.

**Ключевые слова:** система управления, овощехранилище, холодильная камера, математическая модель, воздухоохладитель, увлажнитель воздуха, нейронная сеть, стабилизация температуры.

### Development of automated control system for equipment of a vegetable storage facility based on neuro-fuzzy systems

N. Yermilova, S. Kyslytsia, R. Tarasiuk

The article deals with the disadvantages of existing systems of automatic control (SAC) which operate the refrigeration equipment of vegetable storages and ways to eliminate these shortcomings. It is proposed to distance from traditional methods of management and switch to the use of intelligent methods that will allow the system to adapt flexibly when the internal parameters of the object change and there are disturbing actions in a wide range of changes in their values. The mathematical models of some individual elements of the system - air cooler, air humidifier and a refrigerating chamber - are developed, and on their basis a generalized model of the SAC for refrigeration modes in a storage is created. This allowed to determine the temperature and moisture content of air in the dynamics. Conducted theoretical studies of the interaction of cooling air with the object of storage showed the determinant influence of temperature on the dynamics of product losses, and the basic parameter of regulation is found – a change in the refrigeration performance of the compressor installation in the function of air temperature at the exit of the chamber by changing the volumetric flow rate of a refrigerating agent; which, in its turn, is implemented by adjusting the rotational speed of the compressor shaft. The synthesis of the expert neuroinformation SAC for the compressor cold efficiency is carried out, graphic power dependencies of the compressor shaft power from the input parameters are analyzed. It turned out that the minimum compressor power is achieved by reducing the heat input to the camera, both from the outside and from the inside of the refrigerating chamber, meanwhile the massive air flow only affects the cooling rate. It is concluded that determination of the compressor power with the help of neuro-fuzzy networks corresponds to the task. The scheme for hardware and software implementation of SAC for technological microclimate in a refrigerating chamber using the SCADA system is proposed.

**Keywords:** control system, vegetable storage, refrigerating chamber, mathematical model, air cooler, air humidifier, neural network, temperature stabilization.