

**AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEXES:
MODERN METHODS AND PROBLEMS
OF ANALYSIS AND SYNTHESIS.
PART 1. ANALYSIS OF THE PROBLEM**

A. Ladanyuk, L. Vlasenko, N. Lutska, Y. Smityuh, R. Boyko
National University of Food Technologies

Key words:

*Automated technological
complex
System analysis
System engineering
Efficiency*

Article history:

Received 15.04.2020
Received in revised form
30.04.2020
Accepted 14.05.2020

Corresponding author:

A. Ladanyuk
E-mail:
ladanyuk@ukr.net

ABSTRACT

The article explores traditional and modern approaches of the development of automated technological complexes of food industry. Particularly, the requirements for the system under development, including reliability, security, sensitivity, and robustness, are analyzed. Approaches to the design of the system, which features are multidimensionality, non-linearity and uncertainty of operating conditions, are shown.

The main criteria for the synthesis of efficient automated technological complexes are determined and the modern methods of optimization of these criteria are analyzed. It is noted that due to the multicriteria and complexity of the criterion, new methods are needed for the operational optimization of production, such as multi-step dimensionality reduction, global Peano's curve search; coverage of rectangular parallelepiped equal cubes, global search using stochastic automaton and others.

Particular attention is paid to the formation of generalized conclusions on the synthesis of automated technological complexes, which generally include formation of requirements, development of alternative structures of the system, optimization of the parameters of the selected structure of the technological complex and the verification of the developed system.

Authors point out the necessity and expediency of using systems' engineering methods in the design and creation of modern automated technological complexes, which is connected to the objective need to take into account a large amount of information for processing, system requirements, conditions and uncertainties of functioning and risks, as well as interconnections hardware and software components of the system.

Research is divided into two parts (two articles): the first is devoted to the analysis of the problem and definition of modern approaches of the development of automated technological complexes; the second is about successful results of the development and implementation of such systems in specific food industries.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ: СУЧАСНІ МЕТОДИ, ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ. ЧАСТИНА 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

А. П. Ладанюк, Л. О. Власенко, Н. М. Луцька, Я. В. Смітюх, Р. О. Бойко
Національний університет харчових технологій

У статті досліджено традиційні та сучасні підходи до розробки автоматизованих технологічних комплексів харчової промисловості, зокрема проаналізовано вимоги до системи, яка розробляється, що включають надійність, безпечність, чутливість і стійкість. Показано підходи до проектування системи, особливостями якого є багатовимірність, нелінійність і невизначеність умов функціонування.

Визначено основні критерії синтезу ефективних автоматизованих технологічних комплексів і проаналізовано сучасні методи оптимізації цих критеріїв. Зазначено, що внаслідок багатокритеріальності та складності критерію необхідні нові методи для оперативної оптимізації виробництва: багатокрокової редуції розмірності, глобального пошуку за кривою Пеано, покриття прямокутного паралелепіпеда рівними кубами, глобального пошуку за допомогою стохастичного автомата тощо.

Особливу увагу приділено формуванню узагальнених висновків щодо синтезу автоматизованих технологічних комплексів, що в загальному включають формування вимог, розробку альтернативних структур системи, оптимізацію параметрів обраної структури технологічного комплексу та перевірку розробленої системи.

Окремо авторами вказується на необхідність і доцільність використання методів системної інженерії при проектуванні та створенні сучасних автоматизованих технологічних комплексів, що пов'язано з об'єктивною потребою враховувати велику кількість інформації для обробки, вимог до системи, умов і невизначеностей функціонування та ризиків, а також взаємозв'язки апаратних і програмних складових системи.

Дослідження розділено на дві частини (дві статті): перша присвячена аналізу проблеми та визначенню сучасних підходів до розробки автоматизованих технологічних комплексів; друга — аналізу результатів розробки та впровадженню таких систем на конкретних харчових виробництвах.

Ключові слова: *автоматизований технологічний комплекс, системний аналіз, системна інженерія, ефективність.*

Постановка проблеми. Автоматизовані технологічні комплекси (АТК) є основою виробництва різних видів готової продукції та джерелом забезпечення високих техніко-економічних показників підприємства. В технічній літературі

використовується також термін «хіміко-технологічні системи» (ХТС) [1]. Створення та експлуатація АТК та ХТС передбачає комплекс задач, які розв'язуються сучасними методами стосовно технологій виробництва, технологічного обладнання, ефективного керування (систем автоматизації різного рівня та призначення), забезпечення високих ресурсо- та енергоефективних показників.

У Національному університеті харчових технологій протягом багатьох років виконувались науково-технічні роботи з розробки та впровадження ефективних АТК для різних підприємств; в короткій бібліографії наведено посилання на дисертації, статті, монографії, підручники та навчальні посібники [2—14].

У статті викладено основні підходи до створення АТК різних виробництв на основі методів сучасної теорії управління, розробки мікропроцесорних систем автоматизації різного рівня та призначення, використання багаторівневих систем з необхідним забезпеченням (інформаційним, програмним, технічним, організаційним). Основні задачі керування розв'язуються також методами системної інженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. АТК — технологічний об'єкт та система автоматизації, які функціонують сумісно та розв'язують задачі ефективного керування на основі комплексу показників і загальних критеріїв техніко-економічного характеру [1; 2]. Важливою особливістю АТК є можливість розв'язання оптимізаційних задач на різних рівнях ієрархії. Загальні процедури аналізу та синтезу АТК показані на рис. 1 [12].

Технологічні комплекси (ТК) або окремо виділені ХТС мають ряд основних властивостей як об'єктів автоматизації одного класу [1; 8; 14]: надійність, безпечність, чутливість, перешкодостійкість, керованість, емерджентність і складність. При розробці систем автоматизації враховуються також багатовимірність, нелінійність, розподіленість координат, багатокритеріальність тощо [4; 5; 7; 9; 11]. Крім цього, необхідно враховувати перехресні зв'язки між координатами, особливості процесів тепло- та масообміну, гідродинаміки, фазових перетворень тощо [3; 10; 13].

Кожен ТК має особливості, які визначаються його умовами функціонування та призначенням. Так, для харчової та переробної промисловості необхідно враховувати зміну в досить широких діапазонах якісних показників сировини, наприклад, цукрових буряків (цукрові заводи), інтенсивне зменшення умов теплопередачі в теплообмінниках тощо [4—7; 13].

Не слід забувати, що АТК — це апаратно-програмний комплекс, тому його можна розглядати з точки зору системної інженерії, а при розробці можна використати сучасні досягнення в цій галузі та міжнародні стандарти [15—17].

Ці та інші обставини потребують застосування методів сучасної теорії керування та системної інженерії для досягнення потрібних показників функціонування АТК.

Метою статті є узагальнення та аналіз традиційних і сучасних підходів, розроблених також у НУХТ, до розробки АТК харчових виробництв.

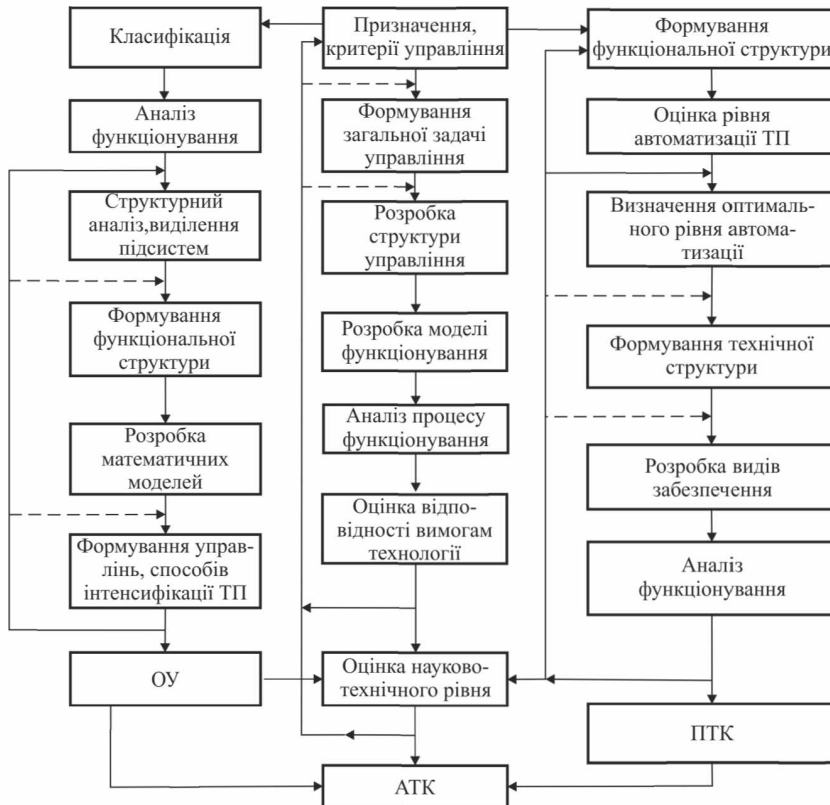


Рис. 1. Загальна структура процедур при створенні АТК

Викладення основних результатів дослідження. Існує два шляхи для розв'язання задачі синтезу АТК:

- розробляється система автоматизації для існуючого ТК;
- паралельно розробляються задачі створення ТК та системи автоматизації.

Перший варіант реалізується частіше, але часом виникає об'єктивна необхідність модернізації технології й технологічного обладнання, наприклад, для забезпечення додаткових вимог до АТК, зокрема для зменшення матеріальних та енергетичних ресурсів або підвищення якості процесу функціонування чи надійності тощо.

При розробці АТК приділяють увагу забезпеченню таких вимог:

- *надійності* як властивості виконувати необхідні функції при забезпеченні показників функціонування (продуктивність, якість продукції, витрат ресурсів тощо) у заданих межах згідно з технологічним регламентом, що реалізується комплексом організаційно-технічних засобів, у тому числі й технічними характеристиками системи автоматизації. Надійність є комплексним показником, який включає частинні оцінки — безвідмовність, ремонтпридатність, тривалість тощо. В цьому разі доцільно керуватись комплексними показниками надійності: ведуча функція потоку відмов, інтенсивність, функція розподілу, параметр потоку відмов, функція і коефіцієнт готовності і простою;

- *безпечності* як здатності підтримувати такий стан, при якому виключається можливість відмов, аварій, різних відхилень від заданого режиму функціонування, які є небезпечними для людини та зовнішнього середовища. Наприклад, розрахунком коефіцієнта ефективності (1) або оцінюванням терміну збережаності, протягом якого відбувається збереження системи в певних умовах, що забезпечує встановлені показники її якості:

$$K_e = \frac{E_1}{E_2}, \quad (1)$$

де E_1 — показник ефективності роботи АТК з урахуванням відмов; E_2 — показник ефективності роботи АТК з припущенням, що відмов за цей період не виникне;

- *чутливості* як відхилення змінних стану, вихідних змінних, показників техніко-економічного функціонування під впливом зміни параметрів об'єкта від заданих значень і технологічного регламенту. Врахування цих відхилень потребує створення системи керування з властивостями адаптації та робастності, що є складною науково-технічною задачею;

- *стійкості* як гарантованої здатності зберігати необхідні властивості, насамперед збіжні перехідні процеси, які виникають під дією збурень, характер яких не завжди відомий, що відповідає стаціонарним режимам. Оцінки та забезпечення стійкості потребують додаткового вивчення характеристик можливих збурень — детермінованість, стохастичність, величина відхилень тощо. Особливого значення набуває можливість реалізації статистичного керування з прогнозом, що забезпечує як показники стійкості, так і якості. При порушенні показників стійкості значно погіршується техніко-економічні показники функціонування об'єкта.

В ієрархічних системах керування доводиться враховувати розподіл критеріїв оптимальності (критеріїв економічності) за рівнями. Так, глобальний критерій керування в складних АТК оцінюється показником:

$$I = \int_0^t \left(ВЦ - \sum_{i=1}^n Z_i \right) dt \rightarrow \max, \quad (2)$$

де $В$ — обсяг готової продукції; $Ц$ — її ціна; Z_i — затрати на випуск продукції, $i = \overline{1, n}$. Кожна зі складових в (2) може залежати від параметрів, що оптимізується.

Цьому критерію відповідають частинні показники, наприклад, якості перехідних процесів (нижній рівень) та узагальнені оцінки: питомі витрати матеріальних та енергетичних ресурсів, собівартість та якість продукції тощо.

Для розробки ефективних АТК використовуються системи автоматизованого проектування, програмне забезпечення яких враховує ряд особливостей та суперечливих вимог щодо вартості та інформаційного і технічного забезпечення. В будь-якому варіанті ТК розглядається як множина взаємозв'язаних статичних і динамічних об'єктів, кожен з яких має свої критерії ефективності, математичні моделі та обмеження. Потoki інформації між підсистемами ТК постійно зростають, тому розв'язати комплекс динамічних задач оптимального

керування на основі математичних моделей у вигляді диференціальних рівнянь неможливо.

Сучасний підхід до створення АТК передбачає непослідовне нарощування нових моделей і залежностей, створення баз даних і знань на основі науково-дослідних робіт, удосконалення інформаційного забезпечення зі своїми програмними модулями, які враховують: наявність значної кількості підсистем ТК, багатовимірність системи, багатокритеріальність для оцінки процесу функціонування, різноманітність структури, особливості технологічних процесів.

При використанні комп'ютерних технологій, створенні автоматизованих робочих місць (АРМ) з орієнтацією на підтримку прийняття управлінських рішень виникає необхідність оцінки критерію якості при невизначеності вектора параметрів технологічного процесу:

$$Q_j = f(x), \quad x \in \Omega, \quad j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Область значень Ω параметрів $x_i, i=1, \dots, n$ повинна бути такою, щоб гарантувати стійкість системи, а в області Ω відхилення від заданих значень при допустимих збуреннях має не перевищувати заданих оцінок. Необхідно враховувати, що техніко-економічні показники системи залежать від параметрів, які також мають обмеження.

У загальному випадку формується вектор локальних критеріїв $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ таким чином, щоб між глобальним критерієм I в (2) та сукупністю локальних критеріїв Q_j в (3) був окремий або опосередкований зв'язок, тоді оптимізацію I можна здійснювати на основі послідовної оптимізації локальних критеріїв Q_j .

Головна особливість функції якості Q_j полягає в тому, що частина функцій Q_j має кілька екстремумів і неаналітичний характер, тому отримати частинні похідні $\partial Q_j / \partial x_i$ неможливо у вигляді формул, тобто пошук глобального мінімуму функції якості неможливий.

При використанні комп'ютерних технологій доцільно розглядати різні варіанти здійснення технологічних процесів у різних технологічних агрегатах, що приводить до збільшення варіантів АТК. У реальних умовах розглядається ієрархічна структура, а при переході на наступний рівень прийняття проектних рішень кожен із можливих варіантів породжує нові варіанти реалізації підсистем АТК.

Достовірна оцінка оптимальності системи можлива лише після закінчення її реалізації у зв'язку з тим, що не всі фактори можна врахувати на етапі проектування. Виходом із цієї ситуації може бути лише максимально можливе урахування невизначеностей, які проявляються в процесі функціонування АТК. Тож процес створення АТК передбачає послідовність рівнів, на кожному з яких проводиться аналіз варіантів як реалізації технологічних процесів, так і систем автоматизації, насамперед інформаційного та програмного забезпечення. Отже, створення АТК — передбачає комплекс процедур (рис. 1), які виконуються ітеративно для складових АТК, що приводить до бажаного результату.

Труднощі створення ефективних АТК пов'язані також із тим, що існує кілька варіантів, серед яких необхідно обрати найкращий (оптимальний), що пов'язано

часто з суб'єктивними рішеннями та перевагами. Насамперед необхідно так обрати та розрахувати властивості технологічного об'єкта, щоб невизначеності не впливали на остаточний варіант, у тому числі програмне та інформаційне забезпечення в рамках обраної структури АТК та конкретних технічних засобів.

Відбір ефективних варіантів АТК пов'язаний з пошуком екстремуму цільових функцій, які розробляються для кожного рівня ієрархії системи. В технічній літературі описано багато методів глобальної мінімізації багатопараметричних функцій, наприклад, методи:

- багатокрокової редукції розмірності;
- глобального пошуку за кривою Пеано;
- покриття прямокутного паралелепіеда рівними кубами;
- глобального пошуку за допомогою стохастичного автомата;
- глобального пошуку за допомогою колективу незалежних автоматів.

Для вибору варіантів АТК часто використовується метод багатокрокової редукції розмірності, який заснований на згортці послідовно вкладених одновимірних задач глобальної мінімізації (багатоекстремального пошуку). Тож прийняття рішень на фінальній стадії вибору передбачає оцінку відносної переваги кожного рішення порівняно з іншими варіантами.

Для умов харчової промисловості часто технологічні комплекси складаються з підсистем, з'єднаних послідовно за матеріальним потоком з можливими ре-циклами, наприклад, ТК цукрових заводів. Показано, що при керуванні в реальному часі коректними є задачі квазістатичної оптимізації на основі припущення про малу тривалість перехідних процесів порівняно з періодом зміни збурень, насамперед щодо якості сировини. Це надає можливість виконати декомпозицію загального показника ефективності (2) на ряд локальних задач з техніко-економічними показниками. Тоді задача оперативної оптимізації для окремої установки або технологічного процесу формулюється як визначення режимних параметрів в області допустимих обмежень:

$$F(x) \rightarrow \max, x \in E^n, \quad (4)$$

де F — функція ефективності технологічного процесу, отримана на основі (2); x — вектор координат стану, що характеризує технологічний режим; E^n — n -вимірний евклідовий простір.

Оптимізація режимних параметрів (координат стану) набуває вигляду:

$$x^{opt} = \arg \max F(x), x \in E^n. \quad (5)$$

З урахуванням якісних показників процесу (вихідних змінних для підсистеми):

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}. \quad (6)$$

Коректність задачі щодо існування розв'язку, його єдності та стійкості розглядалась для ряду установок [13], при цьому застосовувались такі методи оптимізації: комплексний метод Бокса, деформованого багатогранника Нелдера-Міда тощо. Ієрархічна структура АТК базується на ієрархії підзадач керування деревовидної форми, які впорядковуються за ознакою складності, моделями підсистем і технічного забезпечення з необхідними програмними засобами. Функціональна структура системи оптимізації в АТК повинна передбачати

координацію роботи підсистеми, можливості застосування таких методів сучасної теорії керування, як адаптація, робастність, компенсація збурень і запізнь, керування з прогнозом, аналіз часових рядів тощо.

Останнім часом для розв'язання актуальної проблеми створення ефективних АТК все більше залучаються методи системної інженерії [15], яка з'явилась у результаті того, що передові технології з урахуванням підвищення рівня автоматизації спричинили ризики та зростання складності. Крім того, в ринковій економіці розробники АТК йдуть на певний ризик з урахуванням можливих наслідків, а підвищення спеціалізації фахівців викликає необхідність міждисциплінарних зв'язків і побудови зручних інтерфейсів. Також збільшується кількість публікацій у технічній літературі, присвячених використанню методів системного проектування та комплексування методів сучасної теорії керування при розробці АТК [15—17].

Висновки

1. Для створення ефективних АТК в сучасних умовах науково-технічного прогресу об'єктивно необхідними умовами для досягнення бажаного результату є системний підхід, відповідні математичні методи, положення сучасної теорії керування, комплексування прогресивних технологій, що в комплексі забезпечуються формуванням системного мислення, системної інженерії та системного проектування з використанням міжнародних стандартів і вимог сучасних технологій.

2. Зважаючи на особливості ТК харчової промисловості як об'єкта автоматизації, доцільно використовувати такі правила системної інженерії при створенні ефективних АТК:

- якщо оптимізувати лише одну з підсистем ТК, то для АТК загальний показник ефективності не буде максимальним і тоді в ієрархічній структурі АТК необхідно виділити підзадачу координації підсистем та розробити відповідні інтерфейси для обміну інформацією між підсистемами;

- у системі керування необхідно передбачити відповідні технології для можливості зміни параметрів та (чи) структури на тривалому періоді функціонування (життєвого циклу);

- при проектуванні АТК повинні бути певні інтервали для забезпечення стійкості, якості та надійності функціонування при суттєвих невизначеностях, що викликає необхідність застосування методів адаптації та робастності. В технічній літературі використовуються різні підходи, наприклад, управління інцидентами, управління проблемами, управління зверненнями тощо, що формально пов'язують різні наслідки (інциденти) з однією причиною (проблемою). Сюди варто додати також управління проектами та управління ризиками.

3. Системна інженерія як один із напрямів науково-технічного прогресу зі своїми формалізованими правилами будується на гарантованій основі класичного спрощення до конкретних проблем з певними рішеннями (розв'язками). На сьогодні вона є невід'ємною частиною формалізації вимог, процесу проектування, перевірки якості та точності виконання задач АТК. Тому важливо враховувати, що в процесі створення АТК бере участь ОПР (особа, яка приймає

рішення), що відповідає за такі показники, як рівень автоматизації, рівень формалізації, рівень деталізації опису системи.

4. Системна інженерія відрізняється від інших дисциплін тим, що розглядається система в цілому, максимально враховуються вимоги замовника та умови експлуатації; створюється та контролюється розробка концепції системи; враховуються існуючі зв'язки між традиційними інженерними дисциплінами; зменшується непорозуміння між фахівцями різних спеціальностей. Система розглядається в цілому, але в різних задачах проводять процедури декомпозиції (розбиття на окремі підсистеми) та агрегування (для утворення об'єкта з потрібними властивостями).

5. Показано, що для ієрархічних структур важливим є досягнення емерджентності за рахунок таких властивостей, яких не має жоден з елементів системи [14]. Першочергового значення набувають інтелектуальні методи, що надає можливість отримувати або оцінювати властивості системи в широкому діапазоні програмним, а не апаратним шляхом, насамперед для окремих підсистем.

6. Загальна методологія створення ефективних АТК в класі складних систем передбачає необхідність:

- виділити вимоги високого рівня та прецедентів, які з'єднують підсистеми та описують функції системи в цілому. Саме прецеденти покажуть, як буде функціонувати система, та дадуть змогу оцінити архітектуру щодо можливості підтримки найбільш імовірних сценаріїв використання;

- оцінити та забезпечити найкраще розбиття та ізоляцію функціональних можливостей у системі на основі об'єктної технології: інкапсуляції та приховування інформації, інтерфейс за контрактом, обмін повідомленнями замість сумісного використання даних;

- розробити, якщо є можливість, програмне забезпечення АТК, а не окремих частин, кожна з яких пов'язана з окремою фізичною підсистемою. Система (програма) повинна реконструювати стан ключових елементів для прийняття рішень, розміщення (на відміну від апаратного забезпечення) вимог на обох сторонах;

- забезпечити синхронізацію станів: повинен використовуватись однаковий код для усунення впливу незначних варіацій, які є завжди в системі. При нечіткій області між двома фізичними підсистемами виникають труднощі з'єднання різних частин програмного забезпечення;

- задавати такі специфікації інтерфейсів, які здатні виконувати більше умов, ніж кількість наперед заданих (збільшується смуга частот, розробляється додатковий порт вводу-вводу тощо, інтелектуальні засоби для забезпечення простору для розширення).

Література

1. Кафаров В. В. Анализ и синтез химико-технологических систем: учебник для вузов. М.: Химия, 1991. 432 с.
2. Ладанюк А. П. Основи розробки автоматизованих технологічних комплексів в харчовій промисловості: дис. ... д-ра техн. наук (наукова доповідь): 05.13.07. Київ, НУХТ, 1993. 51с.

3. Ладанюк А. П., Трегуб В. Г., Кишенько В. Д. Управление технологическими комплексами в компьютерно-интегрированных системах. *Проблемы управления и информатики*. 2000. № С. 72—79.
4. Ладанюк А. П., Українець А. І., Кишенько В. Д. Управління автоматизованими комплексами харчових виробництв на основі сценарного підходу. *Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси і системи*. 2008. № 2. С. 187—196.
5. Власенко Л. О., Ладанюк А. П. Підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу за рахунок використання методів діагностики та прогнозування. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2010. № 2/3(44). С. 57—62.
6. Ладанюк А. П., Шумыгай Д. А., Бойко Р. О. Ситуационное координирование подсистем технологических комплексов непрерывного типа. *Международный научно-технический журнал. Проблемы управления и информатики*. 2013. № 4. С. 117—123.
7. Ладанюк А. П., Луцька Н. М., Кишенько В. Д., Власенко Л. О., Іващук В. В. Методи сучасної теорії управління: підручник. К.: Ліра-К, 2018. 368 с.
8. Ладанюк А. П., Заєць Н. А., Власенко Л. О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування): монографія. К.: Ліра-К, 2016. 312 с.
9. Ладанюк А. П., Решетюк В. М., Кишенько В. Д., Смітюх Я. В. Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу: монографія. К.: Центр учбової літератури, 2014. 280 с.
10. Прокопенко Т. О., Ладанюк А. П. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами: монографія. Черкаси: Вертикаль, 2015. 224 с.
11. Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами: монографія. К.: Ліра-К, 2015. 288 с.
12. Ладанюк А. П., Смітюх Я. В., Власенко Л. О. та ін. Системний аналіз складних систем управління: навчальний підручник. К.: НУХТ, 2013. 274 с.
13. Ладанюк А. П., Перепечаєнко В. Г. Оперативное управление технологическими процессами в пищевой промышленности. К.: Урожай, 1987. 160 с.
14. Ладанюк А. П., Луцька Н. М., Кишенько В. Д., Смітюх Я. В., Шумыгай Д. А. Комплексування методів теорії керування в системах автоматизації технологічних об'єктів. Частина 1. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 4. С. 8—16.
15. Рассуждения вокруг системотехники и комментарии «Ричард Хэмминг: Глава 28. Системная Инженерия». URL: <https://habr.com/ru/post/346610/>.
16. Левенчук А. И. Системное мышление. М.: Издательские решения, 2018, 466 с.
17. OMG SysML Website. URL: <http://www.omgsysml.org/>.