

УДК 664.1.048: 004.652.3

# NETWORK MODEL IN THE TASKS OF AUTOMATED CONTROL EVAPORATOR PLANT SUGAR FACTORY

O.V. Shkolna, A.P. Ladanyuk, V.D. Kyshenko  
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
sugar production, evaporation plant, automated control, network model, Petri nets	An evaporator system is the main consumer of process steam in the sugar factory. It is an important part of the technological complex and the heat and power complex. It should be noted that the evaporation system produces secondary steam, which is used for different parts of the sugar factory and effective automated control of evaporation system is important. That's why we develop a network mathematical model of evaporator functionality at the sugar refinery plant. It allows creating effective multi-criteria control system of product quality management and thermal energy distribution between the technological units. The network model of evaporation station at the sugar refinery was created by Petri nets. The article is devoted to development and analysis of Petri network model. This model shows the distribution of thermal energy, which was created by evaporation system at the sugar refinery
<b>Article history:</b> Received 13.04.2016 Received in revised form 16.05.2016 Accepted 28.05.2016	
<b>Corresponding author:</b> evlens@ukr.net	

## МЕРЕЖЕВІ МОДЕЛІ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ВИПАРНОЮ СТАНЦІЄЮ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

О.В. Школьна, А.П. Ладанюк, д-р техн. наук,  
В.Д. Кишенько, канд. техн. наук  
Національний університет харчових технологій

*Розроблені мережеві математичні моделі функціонування випарної станції цукрового заводу, які дозволяють створити ефективні системи багатокритеріального оптимального керування якістю продукції, продуктивністю та розподілом теплової енергії між технологічними установками.*

**Ключові слова:** цукрове виробництво, випарна станція, автоматизоване керування, мережева модель, мережі Петрі.

**Вступ.** Набувають застосування нові підходи до автоматизації складних організаційно-технічних систем, зокрема принципи та методи мережецентричного керування з використанням сучасних інформаційних багатоагентних технологій [1]. Реалізація стратегій керування в рамках мережецентричного керування вимагає використання адекватних за структурою системи керування мережевих математичних моделей.

Ефективна система автоматизації випарної установки (ВУ) забезпечує високі техніко-економічні показники функціонування теплотехнічного комплексу та цукрового заводу в цілому. Здебільшого, існуючі АСУ випарними установками цукрового заводу розглядають останню, як складову технологічного комплексу, але не менш важливу роль посідає ВУ і у складі теплотехнічного комплексу, адже є головним постачальником вторинної пари не лише між корпусами ВУ (II—V корпуси), а й для споживачів за межами ВУ. Так споживачами вторинної пари різних корпусів ВУ є [2]: парові камери дифузії, підігрівники жомопресової

води, підігрівники соку перед основною гарячею дефекацією (III, IV групи), підігрівники соку I сатурації перед фільтрацією, підігрівник соку перед II сатурацією (II група), підігрівники соку перед ВУ (2—4 гр.), нагрівання сиропу, клеровки і відтоків в ящиках, вакуум-апарати I—III продуктів, тобто неналежна робота ВУ негативно вплине не лише на протікання процесу згущення сиропу, а й на процеси, що відбуваються при участі користувачів вторинної пари за межами ВУ. Тому в даній роботі проводиться аналіз ВУ як складової технологічного комплексу, так і теплотехнічного комплексу.

**Мета досліджень.** Розробка та аналіз мережевих математичних моделей функціонування комплексу випарної станції як об'єкта керування дає можливість враховувати оптимальний розподіл теплових ресурсів між технологічними споживачами цукрового заводу.

**Матеріали та методи.** З урахуванням аналізу ВУ для моделювання обрано апарат мереж Петрі (МП) [3], що дозволяє описувати паралельні процеси та динаміку поведінки систем. Існує декілька розширень мереж Петрі: часова мережа — перехід може спрацювати лише коли він був дозволений в певний момент часу; стохастична мережа — затримки є випадковими величинами; функціональна мережа — затримки визначаються, як функції деяких аргументів; кольорова мережа — мітки характеризуються складним набором атрибутів, значення яких впливає на спрацювання переходів мережі; інгібіторна мережа — спрацювання переходів забороняються, якщо в позиції, пов'язаній з переходом інгібіторної дуги знаходиться мітка; E-мережі — мережа включає декілька типів вершин, в тому числі і таких, що задають правила спрацювання переходу тощо.

В статті розглядаються можливості розв'язання поставленої задачі за допомогою розширених мереж Петрі (РМП). В ході виробничого процесу на деяких ділянках необхідно моделювати часові затримки, що відповідають, наприклад, тривалості процесу використання вторинної пари користувачем для технологічних потреб конкретного споживача вторинної пари. Час і об'єм використання вторинної пари користувачами може змінюватись під впливом різних чинників, отже необхідно передбачити спосіб представлення в моделі функції прийняття рішень з урахуванням їх пріоритетів.

З метою врахування вказаних особливостей задачі при побудові моделі апарат теорії мереж Петрі необхідно доповнити рядом елементів. В результаті РМП представляє собою дводольний орієнтований граф і може бути задана наступним чином [4]:

$$C = (P, D, T, I(T), O(T), D(T), \mu_0), \quad (1)$$

де  $P$  — множина вершин-позицій мережі (множина станів). Якщо в таку вершину поміщена фішка — то це означає, що виконується певна умова, наприклад, завершений певний етап використання вторинної пари. Дана підмножина обов'язково включає початковий стан (вершина-генератор), встановлення фішки в таку вершину відповідає події надходження пари від колектора ретурної пари, а також фінальну позицію мережі — вершину-поглинач. Фішки, що надходять в дану вершину, видаляються з моделі (ситуація передачі тепла вторинної пари на технологічні потреби певного користувача, або надходження вторинної пари в конденсатор);  $D$  — множина вирішувальних вершин-позицій. У вершини з даної підмножини фішки не можуть бути поміщені, але наявність вихідної з них дуги, спрямованої до переходу, доповнює умову спрацювання переходу деяким правилом;  $T$  — множина вершин-переходів. Кожен перехід визначений для технологічної операції і залишається збудженим протягом заданого модельного часу. В нашому випадку під  $T$ —переходом розумітимемо перехід, що в нотації керувальних E-мереж (Control E—Nat) відповідає групі X+F (один або кілька наступних процесів повинні бути запущені) [5];  $I(T)$ ,  $O(T)$  — функції прямої і зворотньої інцидентності мережі, що задають множину вхідних і вихідних дуг переходу;  $D(T)$  — функція інцидентності для дуг, що пов'язують вирішувальні вершини-позиції і вершини-переходи;  $\mu_0$  — початкова розмітка мережі. У моделі використовуються фішки двох типів: фішка першого типу відповідає деякій кількості пари на певному етапі технологічного маршруту. Фішки другого типу використовуються при організації зворотного зв'язку в моделі, наприклад, при вивільненні відпрацьованої пари, що свідчить про потребу певного користувача в новій партії вторинної пари. Поняття початкової розмітки мережі в розглянутій постановці завдання відповідає ситуації, коли всі користувачі мають потребу в такому ресурсі як вторинна пара. Користувач використовує вторинну пару, якщо перехід збуджений, а час збудження відмінний від нуля.

Для мережі справедливо:  $P \neq \emptyset$ ,  $T \neq \emptyset$ ,  $P \cap T \neq \emptyset$ . У таблиці 1 наведено визначені для РМП види позицій і переходів, їх графічне відображення і математичний запис.

Таблиця 1. Елементи розширеної мережі Петрі

Елементи розширеної мережі Петрі	Графічне зображення елемента	Математичний запис
Вершина-генератор	$\triangleright$	$\rho_1$
Вершина-поглинач	$\triangleleft$	$\rho_s$ , де $s = \overline{35, N}$
Стан (всього в мережі $M$ )	$\circ$	$\rho_i$ , де $i = \overline{2, N-14}$
Перехід (всього в мережі $T$ )	$\blacksquare$	$t_j$ , де $j = \overline{1, T}$
Вирішувальна вершина (всього в мережі $R$ )	$\square$	$d_k$ , де $k = \overline{1, R}$
Дуга	$\rightarrow$	$(\rho_i, t_j)$ або $(t_j, \rho_i)$ або $(d_k, t_j)$ де $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, T}, k = \overline{1, R}$

**Результати досліджень.** Імітаційне моделювання з використанням апарату МП здійснюється шляхом збору відомостей про переміщення фішок між вершинами графа. Період модельного часу від моменту генерації фішки у вершині-генераторі до моменту вилучення з моделі усіх згенерованих фішок в результаті поміщення їх у вершину-поглинач, в контексті розглянутої задачі відповідає інтервалу часу між надходженням пари з колектора пари перед випарною установкою на перший корпус випарної установки до моменту часу втрати вторинною парою свого потенціалу в результаті передачі тепла на технологічні потреби певного користувача, або переміщення її у конденсатор. У виробничому процесі пара з колектору надходить на I корпус ВУ для випарювання соку, в результаті чого утворюється вторинна пара I корпусу, яка надходить в гріючу камеру II корпусу та на користувачів вторинної пари I корпусу, такі як: підігрівник соку 3 гр. перед ВУ, процес нагрівання сиропу і клеровки в ящиках, процес нагрівання відтоків в ящиках. Вторинна пара II корпусу надходить на наступний третій корпус та на такі користувачі вторинної пари II корпусу: підігрівник соку 2 гр. перед ВУ, вакуум-апарати II та III продукту. Вторинна пара III к. йде відповідно на IVк. та на такі користувачі за межами ВУ: парові камери дифузії, підігрівник соку I сатурації перед фільтрацією, підігрівник соку перед II сатурацією (II група), вакуум-апарати I продукту. Вторинна пара IVк. має таких споживачів: Vк. випарної установки, пароконтактний підігрівник №2 жомпресової води, підігрівник соку перед основною гарячою дефекацією (IV гр.). Вторинну пару Vк. використовують на пароконтактний підігрівник №1 жомпресової води, підігрівники соку перед основною гарячою дефекацією (III гр.).

В контексті поставленої задачі передбачено наступну схему переміщення фішок: вершина-генератор генерує фішки першого типу, які через ряд вершин-станів переміщуються до вершини-поглинача. Кожна фішка першого типу, по аналогії з кольоровими мережами Петрі, має додатковий параметр-характеристика — питома витрата пари (кг/тону буряку). Фішки другого типу передбачені для організації зворотного зв'язку для того щоб повідомити вирішувальній вершині, що в результаті проходження технологічного процесу на певному користувачі вторинна пара втратила свій потенціал і процес потребує нової партії вторинної пари.

Під час імітаційного моделювання відбувається переміщення фішок від вершини-генератора до вершини-поглинача через ряд вершин-станів. Вирішувальні вершини не використовуються в процесі руху фішок по мережі. Включення вирішувальних вершин в модель обумовлено необхідністю управляти рухом фішок в залежності від потреб користувачів вторинної пари в певний момент часу.

На рис. 1 наведено приклад РМП для процесу розподілу вторинної пари випарної установки між користувачами. Вершина-генератор генерує фішку першого типу, яка інцидентна переходу  $t_1$  (перший корпус випарної установки); при спрацюванні переходу  $t_1$  на основі заданого у вирішувальній вершині  $d_1$  правила (якщо у всіх користувачів вторинної пари I корпусу за межами ВУ є потреба в парі) фішки поміщаються по одній у позиції вершин-станів  $\rho_3, \rho_7, \rho_9, \rho_{11}$  для спрацювання переходів відповідно  $t_2$  (II корпус випарної установки),  $t_6$  (підігрівник соку 3 гр. перед ВУ),  $t_7$  (процес нагрівання сиропу і клеровки в ящиках),  $t_8$  (процес нагрівання відтоків в ящиках). В результаті спрацювання переходів, що відповідають технологічним процесам користувачів вторинної пари за межами ВУ (наприклад  $t_6, t_7, t_8$ ), в ході яких знижується потенціал вторинної пари фішка першого типу поміщається у одну з вершин-поглиначів  $\rho_{46}, \rho_{47}, \rho_{48}$ . Як уже зазначалось раніше, поміщені фішки у вершину-поглинач видаляються з моделі. Послідовності

такі, як  $t_1, p_7, t_6, p_8, t_1; t_1, p_9, t_7, p_{10}, t_1$  та  $t_1, p_{11}, t_8, p_{12}, t_1$  дозволяють організувати зворотній зв'язок при виникненні потреби користувача в новій партії пари. Вершини  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  зв'язані функціями прямої інцидентності з переходами  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ . Це означає, що збудження переходів та розподіл фішок у вихідні позиції підпорядковується деякому вирішувальному правилу. Так вершина  $d_1$  (всі інші вирішувальні вершини в моделі працюють аналогічно) встановлює правило збудження переходу  $t_1$  та розподілу фішок у вихідні позиції з урахування зворотних зв'язків. Наприклад, якщо в позиції  $p_8$  на вході в перехід  $t_1$  міститься фішка — то при спрацюванні переходу  $t_1$  в позицію  $p_7$  необхідно помістити фішку.

Кількість пари, що надходить в гриучу камеру певного корпусу ВУ сприяє утворенню вторинної пари в такій самій кількості. В моделі це відображено наступним чином: кожна фішка першого типу в моделі має додатковий параметр-характеристика — питому витрату пари, назовемо її вагою фішки, тоді вага фішки у вершині-позиції  $p_1$  дорівнюватиме сумі ваг фішок у вершинах-позиціях  $p_3, p_7, p_9, p_{11}$ , а вага фішки у вершині-позиції  $p_3$  дорівнює сумі ваг фішок, що розташовані в позиціях  $p_4, p_{13}, p_{14}$ . Аналогічно для  $p_5, p_6$ .

При спрацюванні переходів  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ , що відповідають процесам випарювання у корпусах ВУ (I—V корпуси) фішки поміщаються у ті позиції, на які вказують зворотні зв'язки. Якщо у певну з вихідних позицій фішка поміщена не буде, то вага фішки у верхній вихідній позиції (такій як  $p_3, p_4, p_5$  або  $p_6$ ) буде збільшена на відповідне значення.

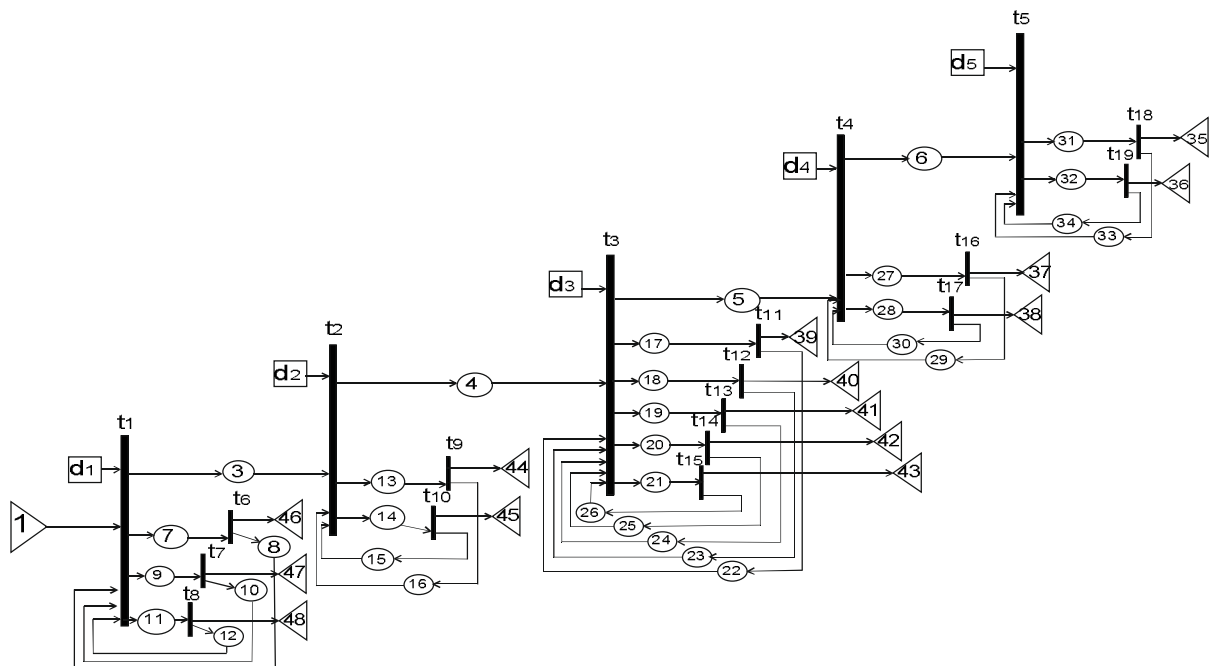


Рис. 1. РМП для процесу розподілу вторинної пари випарної установки цукрового заводу

Розглянемо імітаційну модель роботи випарної установки цукрового заводу, що розроблена на основі семантичної мережі Ван-Хао [5].

Семантична мережа Ван-Хао ( $WM$ ) визначається наступним чином:  $WM = \langle X, R \rangle$ , де  $X$  — множина сутностей (концептів),  $R$  — відношення кореляційної залежності між парою сутностей.  $R = \{ \langle x_i, \sigma_j \rangle \}$ ,  $\sigma_j = \{ +, -, 0 \}$ , «+» — пряма залежність (подія збільшення значення  $x_i$  — « $\uparrow x_i$ » пов'язана з подією збільшення значення  $x_j$  — « $\uparrow x_j$ »), «-» — зворотна залежність (подія збільшення значення  $x_i$  — « $\uparrow x_i$ » пов'язана з подією зменшення значення  $x_j$  — « $\downarrow x_j$ »), «0» — незалежність.

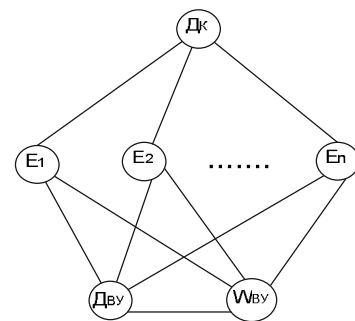


Рис. 2. Семантична мережа концептуальної моделі випарної установки цукрового заводу

$x_j$  — « $\downarrow x_j$ », а подія зменшення значення  $x_i$  — « $\downarrow x_i$ » пов'язана з подією збільшення значення  $x_j$  — « $\uparrow x_j$ », « $\emptyset$ » — зміна значень концептів між собою не пов'язані (не корелюються).

Семантична мережа концептуальної моделі випарної установки цукрового заводу представлена на рис. 2.

Таблиця 2. Матриця кореляцій подій випарної установки цукрового заводу

	1	2	3	4	5	6
1	*	$\emptyset$	$\emptyset$	+	—	+
2		*	$\emptyset$	+	—	+
3			*	+	—	+
4				*	+	+
5					*	+
6						*

Для створення імітаційної моделі на основі семантичної мережі Ван-Хао задано список сутностей (концептів) випарної установки цукрового заводу (табл.2):

- $E_1$  — зміна відбору вторинної пари з 1-го корпусу ВУ;
- $E_2$  — зміна відбору вторинної пари з 2-го корпусу ВУ;
- $E_n$  — зміна відбору вторинної пари з  $n$ -го корпусу ВУ;
- $D_{ВУ}$  — зміна витрати пари на ВУ;
- $D_K$  — зміна надходження пари в барометричний конденсатор;
- $W_{ВУ}$  — зміна продуктивності ВУ.

Детальніше розглянемо процеси, що відбуваються в 1 корпусі ВУ та взаємні зв'язки параметрів, що характеризують цей процес. Для цього використаємо модель процесу випарювання в 1 корпусі ВУ, що створена на основі розфарбованих мереж Петрі (рис. 3.).

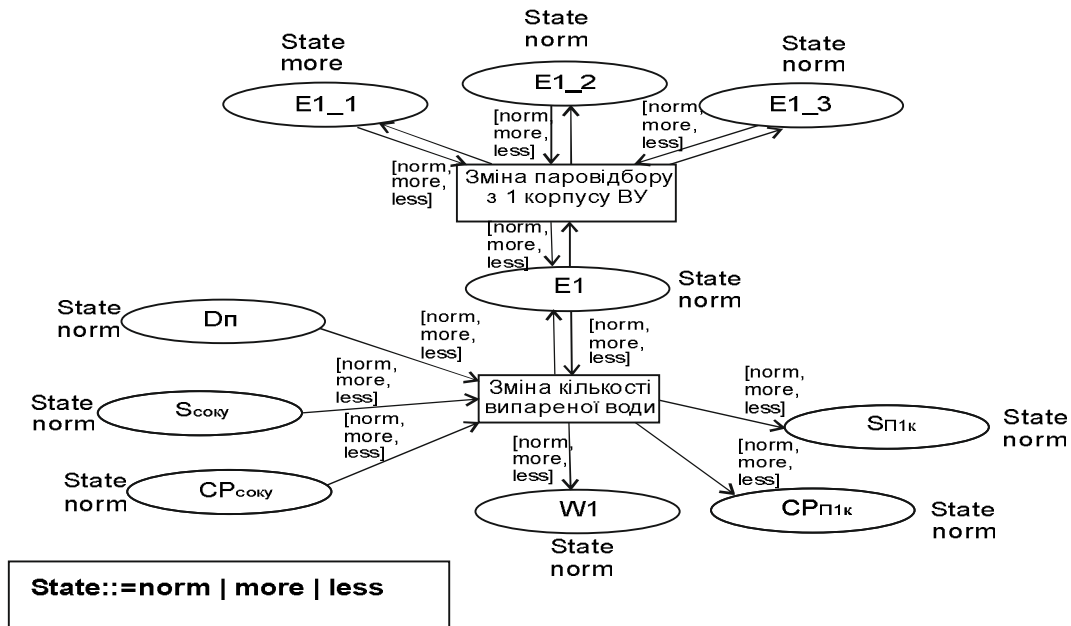


Рис. 3. Модель процесу випарювання в 1 корпусі ВУ на основі розфарбованих мереж Петрі

В цій моделі кожна позиція відповідає стану певного параметра в поточний момент часу. Виділено такі параметри:  $E_1$  — загальний паровідбір з першого корпусу ВУ;  $E_{1_1}$  — відбір вторинної пари на підігрівник соку 3 групи перед ВУ;  $E_{1_2}$  — відбір вторинної пари на нагрівання сиропу і клеровки в ящиках;  $E_{1_3}$  — відбір вторинної пари на нагрівання відтоків в ящиках;  $D_n$  — витрата ретурної пари на ВУ;  $S_{соку}$  — витрата соку на вході в 1 корпус ВУ;  $CP_{соку}$  — вміст сухих речовин соку перед ВУ;  $W_1$  — кількість випареної в 1 корпусі води з соку;  $S_{П1к}$  — витрата соку після 1 корпусу ВУ;  $CP_{П1к}$  — вміст сухих речовин соку на виході з

1 корпусу. Кожна з позицій, іншими словами — кожен з параметрів, може перебувати в трьох станах: *norm* — коли поточне значення параметра дорівнює розрахованому значенню; *more* — значення параметра більше розрахованого; *less* — значення параметра менше розрахованого. Під розрахованим розуміємо таке значення параметра, яке отримане в результаті теплового розрахунку випарного апарату і випарної установки в цілому, що відповідає усталеному режиму роботи ВУ. В таких розрахунках за необхідну приймається умова рівності кількості води, яку необхідно випарити з соку, кількості фактично випареної води. Також враховується вид випарних апаратів, їх поверхня нагріву та інше. Розглянемо ситуацію, коли усі параметри в межах норми, крім  $E1_1$ , який раптом збільшився, тобто відбір вторинної пари на підігрівник соку 3 групи перед ВУ став більшим розрахованого. Тоді збільшиться і загальний паровідбір з 1 корпусу, а в моделі параметр  $E1$  прийме значення *more*. При збільшенні паровідбору в надсоковому просторі зменшиться тиск, що призведе до випарення води з соку в більшій кількості і  $W1$  прийме значення *more*. Одночасно збільшиться вміст сухих речовин соку на виході з 1 корпусу ( $CP_{П1к}$  : *more*) і зменшиться витрата соку після 1 корпусу ( $S_{П1к}$  : *less*).

**Висновки.** Розроблені мережеві математичні моделі призначені для використання в алгоритмічному та програмному забезпеченні ефективних систем керування технологічним комплексом цукрового заводу на основі енергозбережних технологій шляхом багатокритеріальної оптимізації за компромісною схемою Парето в режимі реального часу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Трахтенгерц, Э.А. Сетевые методы управления в крупномасштабных сетях / Э.А. Трахтенгерц, Ф.Ф. Пашенко. — М.: URSS, 2016. — 200 с.
2. Основы теплотехнологии цукрового виробництва: навчальний посібник / М.О. Прядко, М.О. Масліков, В.П. Петренко, В.І. Павелко, В.М. Філоненко. — Вінниця: Нова Книга, 2007. — 297с.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. / Питерсон Дж. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
4. Савва Т.Ю. Разработка математической модели загрузки оборудования на предприятии по переработке скоропортящегося сырья [Электронный ресурс] / Т.Ю. Савва // Материалы секции «Информационные технологии в социально-экономических системах» V Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве». — Орел, 2012. — Режим доступа — <http://irsit.ru/files/article/194.pdf>
5. Казимир В.В. Метод формализованого опису бізнес—процесів управляючих web-порталів / В.В. Казимир, М.В. Харченко // Математичні машини і системи. — 2015.— № 2. — С. 130—138.

## СЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫПАРНОЙ СТАНЦИЕЙ САХАРНОГО ЗАВОДА

О.В. Школьна, А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько

Национальный университет пищевых технологий

Разработаны сетевые математические модели функционирования выпарной станции сахарного завода, которые позволяют создать эффективные системы многокритериального оптимального управления качеством продукции, производительностью и распределением тепловой энергии между технологическими установками.

**Ключевые слова:** сахарное производство, испарительная станция, автоматизированное управление, сетевая модель, сети Петри.