

УДК 676:628.1.3

ПЛОСКОНОС В. Г., к.т.н., доц.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## СТРУКТУРНІ АСПЕКТИ ВЗАЄМОДІЇ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ ТА КАРТОНУ

Розроблено структурні аспекти взаємодії елементів складних систем з використанням основних положень теорії графів та топологічного методу аналізу з метою моделювання проблем, що виникають у водопотоках виробництва паперу та картону. Використання імітаційного моделювання дає можливість відтворити динаміку процесів, які відбуваються у досліджуваній технологічній системі.

**Ключові слова:** складна система, елемент системи, система водокористування, структурна модель системи, теорія графів, топологічний метод аналізу.

© Плосконос В. Г., 2017.

**Постановка задачі.** Враховуючи, що процес виробництва паперу та картону – це складна сукупність різних операцій, які відбуваються на окремих агрегатах (апаратах) технологічної системи, а також те, що функціонування кожної одиниці обладнання, яка входить до складу технологічної системи, залежить не тільки від комплексу своїх параметрів, а також від стану всієї системи в цілому, розроблено методологію дослідження динаміки функціонування складних систем [1], серед невирішених аспектів якої є створення та практичне використання структурної моделі взаємодії елементів цієї складної технологічної системи.

**Аналіз попередніх досліджень.** Як відомо, елементи складної системи взаємодіють між собою завдяки зв'язкам, які встановилися між ними, і це забезпечує їхнє узгоджене функціонування. З метою побудови структурної моделі системи в цілому та відбиття аспектів взаємодії елементів складної технологічної системи практика рекомендує скористатися теорією графів та топологічним методом аналізу складних систем, який базується на використанні математичних іконографічних (топологічних) моделей систем [2, 3].

Невирішеною частиною проблеми з практичної точки зору побудови такої моделі є те, щоб кожному вхідному сигналу від елемента зовнішнього середовища або виникаючому як вихідний сигнал елемента технологічної системи, вказати шлях (адресу), за яким цей сигнал повинен надійти в якості вхідного на елемент технологічної системи або зовнішнього середовища. Разом з тим, враховуючи, що зовнішнє середовище накладає свої “відбитки” на характер функціонування складної технологічної системи, необхідно також розглядати взаємодію системи картонно-паперового виробництва із зовнішнім середовищем.

Метою даної статті є побудови структурної моделі, тому технологічна система подається у вигляді матеріального орієнтованого спрямованого потокового графа:

$$G = G(U) = (U, E), \quad (1)$$

що складається із множини  $U = \{u_i\}, (i=1, \bar{N}_U)$  вершин та множини  $E = \{e_j\}, (j=1, \bar{D}_E)$  дуг.

**Виклад основного матеріалу.** Всю множину вершин графа можна розділити на три непересічні множини:  $U_1$  – джерел системи,  $U_2$  – стоків системи та  $U^*$  – проміжних вершин (елементів) технологічної системи, тобто:

$$U^* = U \setminus U_1 \cup U_2; U^* = \{i_1 : i_1 \in U / i_1 \notin U_1, i_1 \notin U_2\} \quad (2)$$

Тут елементи множин  $U_1$  і  $U_2$  відносяться до елементів зовнішнього середовища.

Даний спосіб є найбільш наглядною формою подання відносин між елементами складної системи, разом з тим, він не може бути використаний для вирішення задач структурного аналізу з використанням комп'ютерної техніки.

З іншого боку, інформацію, що характеризує граф, можливо подати в алгебраїчному вигляді за допомогою матриці. При цьому зв'язок графа і матриці дозволяє перевести структурні особливості системи на мову чисел.

Для цього необхідно задати числову функцію на вершинах графа. Функція вважається заданою, якщо кожній  $i$ -ої вершині  $u_i$  графа  $G(U)$   $u_i \in U$  (ставиться у відповідність деяке число  $l_i = l(u_i)$  з множини  $L$ ). Тоді кожна дуга графа  $G(U)$  (1) може бути подана у вигляді  $i, i_1$ , тобто парою чисел, перше з яких вказує на номер вершини, з якої дуга виходить, а друге – на номер вершини, у яку дуга входить.

Такий підхід дозволяє всю технологічну систему подати у вигляді матриці інциденцій  $[S]$  порядку  $[U^*E]$  з елементами за умови:

$$S_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{якщо дуга } e_j \text{ виходить із вершини } i \\ +1 & \text{якщо дуга } e_j \text{ виходить із вершини } i \\ 0, & \text{якщо дуга } e_j \text{ виходить із вершини } i \end{cases}$$

Для багатьох практичних завдань, пов'язаних з аналізом складних технологічних систем, зважаючи, що більшість елементів у матриці  $[S]$  виявляються нульовими, доцільно використовувати множинні способи формалізації структури. Для орієнтованого графа  $G(U)$  задається множина вершин  $U = \{u_i\}, (i=1, \dots, N)$  і відповідність  $G$ , що свідчить про зв'язок між собою вершин. Для кожної вершини  $u_i$  відповідність  $G$  визначає множину вершин  $G(u_i)$ , у які можливо безпосередньо потрапити з вершини  $u_i$ .

Таким чином, орієнтований граф задається перерахуванням (списком) множини  $G(u_i)$  для всіх вершин графа. При цьому дуги встановлюють зв'язок між елементами технологічної системи.

Разом з тим, центральне місце в технологічній системі, що подається у вигляді матеріального орієнтованого спрямованого потокового графа (1), мають займати моделі вершин графа, наявність яких дозволить з використанням засобів комп'ютерної техніки виконувати обчислювальний експеримент з метою визначення стану складної системи у будь-який проміжок часу.

У відповідності з виразом (2), частина вершин графа (1) відноситься до елементів зовнішнього середовища, а інші – складають множину елементів технологічної системи.

Елементи зовнішнього середовища розглядаються лише в тій частині, яка стосується їх впливу на елементи технологічної системи, а саме: водорозчинних мінеральних та органічних речовин, що надходять з волокнистими напівфабрикатами, допоміжними хімічними речовинами та свіжою водою. Елементи, що входять до складу технологічної системи, багатофункціональні.

Виходячи з мети функціонування даної технологічної системи, досліджувати їх необхідно з точки зору їх впливу на кількість водорозчинних органічних і мінеральних речовин, які перебувають у водопотоках картонно-паперового виробництва.

В процесі імітаційного моделювання стану водопотоків технологічної системи виробництва картону чи паперу з використанням комп'ютерної техніки буде доцільним подавати модель елемента у вигляді двох складових: статички і динаміки.

З точки зору статичних характеристик елементи технологічної системи можливо поділити на два класи.

До першого із них відносяться елементи, в яких водопотоки знаходяться в безпосередньому контакті з волокнистою суспензією.

Так, характеристики стану зворотніх потоків води, які надходять до елемента першого класу, за розчинними мінеральними речовинами можливо визначити, використовуючи залежність:

$$C_i^{\text{вод.розч.}} = \sum_{j=1}^{l_i} P_{ji} \cdot C_{ji} \setminus \sum_{j=1}^{l_i} P_{ji}, \quad (3)$$

де  $l_i$  – кількість водопотоків, які надходять в  $I$ -ий блок (вузол);  $P_{ji}$  – водопотік за  $j$ -ою дугою, що надходить до  $I$ -го блоку;  $C_{ji}$  – концентрація водорозчинної мінеральної речовини у  $P_{ji}$  – водопотоці.

Характеристики стану зворотніх потоків води, які надходять до елемента першого класу, за розчинними органічними речовинами можливо визначити з використанням математичних моделей статички, які необхідно розробляти з врахуванням складної залежності процесу переходу в розчинний стан органічних речовин від багатьох технологічних факторів. Цьому питанню в подальшому потрібно уділити особливу увагу.

Елементи технологічної системи, через які проходять потоки води, що містять незначні домішки твердих часток (маси), відносяться до другого класу.

Показники стану воду в цих елементах або усереднюються за всіма вхідними потоками (наприклад, ба-сейни зворотньої води), або змінюються за певними залежностями (наприклад, механо-хімічна або біологічна очистка стічних вод).

Для елементів другого класу (таких як механо-хімічна та біологічна очистка стічних вод) визначення стану стічних вод за показником розчинені органічні речовини, а також БСК<sub>5</sub> і ХСК доцільно проводити з використанням коефіцієнтів ефективності очищення стічних вод. Коефіцієнти можуть бути розроблені з використанням статистичних даних ефективності очищення води на підприємствах, що переробляють макулатуру.

Разом з тим, динамічна складова моделей елементів технологічної системи повинна давати уявлення про структуру потоків (водопотоків) в апаратах системи картонно-паперового виробництва.

Характеристики стану зворотніх і стічних вод за показником розчинених органічних і мінеральних речовин, розраховані за моделями статички, піддаються змінам в залежності від структури потоку в даному вузлі технологічної системи.

З погляду динаміки елементи технологічної системи необхідно розділити на чотири групи.

До першої групи слід віднести елементи, у яких маса перебуває в контакті з водою (крім басейнів для зберігання маси). Характерною рисою елементів першої групи є те, що вони мають невеликі ємності і тому потік з масою в них практично не затримується. Переміщуючись, маса зі швидкістю, обумовленою швидкістю відливу паперового (картонного) полотна на сітці паперо-картоноробної машини, рухається від початкових вузлів підготовки маси до напірного ящика. Елементом першої групи можна поставити у відповідність модель ідеального змішування, згідно з якою відбувається рівномірний розподіл розчинених речовин в масі води (потіці). Залежність між концентрацією  $i$ -го компонента розчинених мінеральних або органічних речовин на вході вузла  $C_i^{ex}$  і виході з нього  $C_i^{en}$  має вигляд:

$$dC_i \setminus d\tau = (C_i^{ex} - \tilde{N}_s^{ex}) \cdot V_c \setminus V \quad (4)$$

де  $V_c$  – об'ємна швидкість потоку маси (води);  $V$  – об'єм ємності досліджуваного елемента.

Для елементів першої групи величина відношення  $V_c/V$  практично дорівнює одиниці, а концентрація розраховується за моделями статички елементів першого класу.

Басейни для акумулювання розмеленої маси відділу підготовки маси з позиції подання їх як елементів технологічної системи, відносяться до другої групи. Для них характерне транспортне запізнювання по відношенню до порції маси, що надходить до басейну та наявність інтенсивного перемішування маси по всьому об'єму басейну. У результаті – відбувається деяке вирівнювання концентрації розмеленої маси  $i$ , як наслідок, вирівнювання концентрації розчинених мінеральних і органічних речовин. Залежність між концентрацією  $i$ -го компонента розчинених мінеральних (органічних) речовин на вході басейну  $C_i^{ex}$  та виході з нього  $C_i^{en}$  описується рівнянням (4). Величина відношення  $V_c/V$  для елементів другої групи значно більше одиниці. Воно для сучасних картонно-паперових підприємств вибирається з таким розрахунком, щоб забезпечити не менш двогодинного запасу маси в басейні. Масова концентрація  $C_i^{ex}$  визначається за рівняннями статички для елементів першого класу.

Басейни зворотньої води відносяться до елементів третьої групи. Для них характерно наявність незначної транспортної затримки порції, оборотної води, що надходить, та вирівнювання концентрації розчинених мінеральних і органічних речовин у межах порції. Для елементів третьої групи можливо застосувати рівняння (4). Відмінною рисою цих елементів, у порівнянні з елементами першої групи, є відсутність контакту з масою. У зв'язку із цим концентрація кожної порції води, що надходить до басейну, визначається на стадії, коли ця порція води утворилася. Значення  $C_i^{ex}$  розраховується за моделлю статички для елементів другого класу. Величина відношення  $V_c/V$  незначно більше одиниці.

До четвертої групи відносяться ємності картонно-паперового виробництва, призначені для очищення стічних вод (споруди механо-хімічної і біологічної очистки). На цих спорудах у результаті застосування хімічних реагентів або життєдіяльності бактерій відбуваються зміни якісних показників води, що очищається (зменшується концентрація розчинених органічних речовин. Разом з тим, у випадку застосування хімічних добавок можливе підвищення концентрації розчинених мінеральних речовин). Характерним є тривалий проміжок часу між надходженням води на очищення і поверненням її у виробничий процес (якщо повернення передбачене технологічним регламентом). Так, якщо для механо-хімічних очисних споруд цей проміжок становить у середньому 3-4 год, те для споруд біологічного очищення він може досягати декількох діб.

Динаміка водопотоків в елементах четвертої групи досить складна. На стадії надходження води на очисні споруди вона інтенсивно переміщується і її динаміку можна описати за допомогою рівняння (4). Значення  $C_i^{ex}$  в цьому випадку розраховується за рівняннями статички для елементів другого класу. Надалі рух потоків води набуває спокійного характеру. На цій стадії для опису структури потоків може бути використане рівняння моделі ідеального витіснення:

$$\partial C_i \setminus \partial \tau = -\omega \cdot \partial C_i \setminus \partial X, \quad (5)$$

де  $\omega$  – лінійна швидкість потоку води, що очищається;  $X$  – координата, уздовж якої рухається потік води, що очищається.

Згідно з рівнянням (5) потік води, що очищається, приймає поршневі плин без перемішування уздовж потоку за рівномірного розподілу розчинених забруднюючих речовин у напрямку, перпендикулярному руху.

Час перебування всіх часток в елементах четвертої групи однаковий і дорівнює відношенню об'єму емоності до об'єму води, що очищається.

**Висновки.** З метою побудови структурної моделі складної технологічної системи та відбиття аспектів взаємодії елементів такої системи використано основні положення теорії графів і топологічного аналізу складних систем, який базується на використанні математичних іконографічних (топологічних) моделей.

**Перспективи подальших досліджень.** Разом з тим, динаміку всієї технологічної системи можливо розкрити із застосування сучасних засобів комп'ютерної техніки, розглянувши математичні моделі кожного із елементів системи у їхньому взаємозв'язку, тобто з використанням моделей сполучення елементів складної технологічної системи.

#### Список використаної літератури

1. Плосконос В. Г. «Методологія дослідження динаміки функціонування складних систем виробництва паперу та картону», /Вісник НТУУ «КПІ» Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. Наук. зб. № 1(15), с. 71–74.
2. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – К., «Техника», 1976, 311 с.
3. Кикоть В. С., Плосконос В. Г. Идентификация характеристик сложных проектируемых систем с использованием самоорганизации и топологического метода анализа. – Автоматика, 1986, № 3, с. 34–42.

Надійшла до редакції 20.11.2016

---

*Ploskonos V. H.*

#### THE STRUCTURAL INTERACTION ASPECTS AND MATHEMATICAL MODELS OF COMPLEX SYSTEMS ELEMENTS OF PAPER AND PAPERBOARD PRODUCTION

*The paper and paperboard production is a complex totality of different operations which take place in individual units (apparatuses) of a technological system. The functioning of every machinery units which belongs to technological system depends not only on its parameter complex but also on all system state as a whole.*

*When working out the research methodology of complex system functioning dynamics [1] the questions of creation and practical use of interaction structural model of complex technological system elements remained unsettled.*

*During the work implementation the structural aspects of complex systems elements interactions are worked out. The end aim of such approach is problems modeling which are appearing in the water systems of paper and paperboard production with modern computers.*

*It is known that complex technological system elements interact thanks to the connections are become settled and it ensures their coordinated functioning for raised aim achievement.*

*For structural system model building as a whole and interaction aspects reflection of complex technological system elements the practice recommends to use the base theses of graph theory and topological analysis method of complex system analysis which are based on the use of mathematical icono-graphic ( topological) models.*

*In such case every either incoming signal from environmental element or outgoing signal of technological system element has pointed way ( address) for this signal to reach technological system element or environment as an incoming signal. At the same time taking into account that environment leaves its "marks" on the functioning character of complex technological system it is also necessary to consider the interaction of paper and paperboard production system with environment.*

*From practical point of view a material oriented directed steam graph and its presenting as the incidence matrix are the most obvious presentation form of relations between complex system elements.*

*The central place of technological system which is submitted as a material oriented directed steam graph is occupied by graph top models what can allow to carry out with computer technics the computing experiment for definition of complex system state during any period of time.*

*At the same time a part of graph tops belongs to environment elements and other parts make great number of technological system elements.*

*The environmental elements are considered only because of their influence on technological system elements.*

*The elements of technological system are multifunctional. That is why they must be researched concerning their influence on the quantity of waterdissoluble organic and mineral substances in water flows of paper and paperboard production proceeding from functioning aim of given technological system.*

*A the same time on the imitational modeling stage of state of paper and paperboard production technological system a necessity appears to give the models of separate system elements as two components: statics and dynamics which in their turn can be divided in separate groups and classes.*

*The dynamic component of all technological system can be opened only with use of computers by considering the mathematical models of its every element in intercommunication, i.e. with use of elements conjugation models of complex technological system.*

**Keywords:** complex system, system element, system of water consumption, structural system model, graph theory, topological analysis method.

#### References

1. Ploskonos, V.G. (2016). "Research methodology of complex system functioning dynamics of paper and paperboard production", *Wisnyk NTUU "KPI" Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozberezhennja*, no 1(15), pp. 71–74.
  2. Ivahnenko, A.G. (1976). "Long-term prognosis and complex system control", *Kyev, "Tehnika"*, 311 p.
  3. Kykotj, V.S. and Ploskonos, V.G. (1986). "Characteristics identification of complex projecting systems with use of selforganisation and topological analysis method", *Avtomatika*, no 3, pp. 34–42.
- 

УДК 678.025.2

**ПОГОРІЛИЙ О. В.,** магістр; **СІДОРОВ Д. Е.,** к.т.н., доц.;  
**КОЛОСОВ О. Є.,** д.т.н., проф.; **КАЗАК І. О.,** к.п.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## **ЗОНОВАНИЙ АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПІД ЧАС РОЗІГРІВАННЯ ПЕТ-ПРЕФОРМ**

*Виконано аналіз температурних режимів при формуванні виробів з ПЕТ-преформ по трьох характерних зонах за умови впливу конвективного нагріву. Розподіл температур по довжині ПЕТ-преформ розраховано з використанням методу інтерполявання кусково-кубічними поліномами. Вивчено зміну температури в часі в кожній зоні ПЕТ-преформи. Виявлено, що температури змінюються в часі за експоненціальним законом, а нагрівання відбувається по всіх зонах ПЕТ-преформи рівномірно до критичної температури формування. Наведено графік зміни температури по довжині ПЕТ-преформи для трьох характерних шарів: зовнішньої поверхні, середнього шару і внутрішньої поверхні ПЕТ виробу.*

**Ключові слова:** ПЕТ-преформа, конвекція, температурні режими, формування, економічна функція.

© Погорілий О. В., Сідоров Д. Е., Колосов О. Є., Казак І. О., 2017.

**Постановка задачі.** Серед методів виробництва виробів з поліетилентерефталату (ПЕТ), ймовірно, найбільш популярним, є метод пневмоформування з попереднім розігрівом заготовок. Цей процес базується на використанні структурно аморфних напівфабрикатів, так званих преформ, які попередньо отримують методом лиття під тиском зі гранульованого ПЕТ.

Нагрівання ПЕТ-преформ відбувається до температури вище температури скловання, яка становить близько 80 °С для більшості ПЕТ-композицій. Цей етап, як правило, здійснюється як за допомогою інфрачервоних обігрівачів, так і за умови конвективного нагріву. На другому етапі, ПЕТ-преформа розтягується з використанням циліндричного стрижня, і витягується з використанням двох рівнів тиску повітря. Виріб формується і охолоджується у прес-формі, температура якої регулюється за допомогою рідини, яка рухається в охолоджуючих каналах.

Умови нагрівання, які контролюють розподіл температури ПЕТ-преформи, сильно впливають на кінематику видування, і, отже, розподіл товщини виробу. Температурний стан ПЕТ-преформи також впливає на орієнтацію макромолекул у ПЕТ-виробі, яка індуквана двохосьовим розтягуванням, що, в свою чергу, впливає на механічні, оптичні і бар'єрні властивості кінцевого виробу [1].

Отже, найбільш істотними параметрами, що впливають на основні вихідні показники готового виробу є температурні режими, які важливо контролювати на протязі всього циклу виробництва ПЕТ-виробу.

**Аналіз попередніх досліджень.** Загальною проблемою є розподіл температури ПЕТ-преформи в процесі її формування. Дослідження наукових розробок в області формування ПЕТ-виробів свідчить про те, що