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 установилися 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:

$$G = G(U) = (U, E), \tag{1}$$

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

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

$$U^* = U \backslash U_1 \cup U_2;\ U^* = \{i_1 : i_1 \in U / i_1 \notin U_1,\ i_1 \notin U_2\} \tag{2}$$

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 і-ой вершині u_1 графа $G(U)$ $u_1 \in U$ (ставиться у відповідність деяке число $l_1 = l(u_1)$ 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 інцеденцій [S] порядку [U*E] з елементами за умови:

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

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 $U=\{u_i\},(i=1,\ddot{W}_j)$ 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: статики 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 елементу першого класу, за розчинними мінеральними речовинами можливо визначити, використовуючи залежність:

$$C_i^{âõ.íåïð.} = \sum_{j=1}^{l_i} P_{ji} \cdot C_{ji} \setminus \sum_{j=1}^{l_i} P_{ji}\ , \qquad (3)$$

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

Характеристики стану зворотніх потоків води, які надходять до елементу першого класу, за розчинними органічними речовинами можливо визначати з використанням математичних моделей статики, 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, басейни 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 $БСК_5$ 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 статики, 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. Перемішуючись, маса зі швидкістю, обумовленою швидкістю відливу паперового (картонного) полотна на сітці паперо-картоноробної машини, рухається від початкових вузлів підготовки маси до напірного ящика. Елементам першої групи можна поставити у відповідність модель ідеального змішування, згідно з якою відбувається рівномірний розподіл розчинених речовин в масі води (потоці). Залежність між концентрацією і-го компонента розчинених мінеральних або органічних речовин на вході вузла $C_i^{âõ.}$ і виході з нього $C_i^{âèõ}$ має вигляд:

$$dC_i \setminus d\tau = (C_i^{âõ.} - \tilde{N}_з^{âèõ.}) \cdot V_c \setminus V \qquad (4)$$

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

Для елементів першої групи величина відношення *Vc/V* практично дорівнює одиниці, а концентрація розраховується за моделями статики 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 і, як наслідок, вирівнювання концентрації розчинених мінеральних і органічних речовин. Залежність між концентрацією і-го компонента розчинених мінеральних (органічних) речовин на вході басейну $C_i^{вх}$ та виході з нього $C_i^{вих}$ описується рівнянням (4). Величина відношення *Vc/V* для елементів другої групи значно більше одиниці. Воно для сучасних картонно-паперових підприємств вибирається 3 таким розрахунком, щоб забезпечити не менш двогодинного запасу маси в басейні. Масова концентрація $C_i^{вх}$ визначається за рівняннями статики 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 $C_i^{вх}$ розраховується за моделлю статики для елементів другого класу. Величина відношення *Vc/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 часи 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 перемішується і її динаміку можна описати за допомогою рівняння (4). Значення $C_i^{вх}$ в цьому випадку розраховується за рівняннями статики 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:

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

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

Згідно з рівнянням (5) потік води, що очищається, приймає поршневий 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 ємності 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 проектирумых систем с использованием самоорганизации и топологического метода анализа. – Автоматика, 1986, № 3, с. 34–42.
Надійшла до редакції 20.11.2016