

**УПРАВЛІННЯ ДІЛЯНКОЮ ПЕРШОЇ САТУРАЦІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕНЗОРНОГО АНАЛІЗУ**

*В. М. Сідлецький, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інтегрованих автоматизованих систем управління*

Є. О. Кадура, студент, АК-4-1,

Національний університет харчових технологій

email: vmsidletskiy@gmail.com

Анотація

Складність задачі управління подачею вапнякового молока та сатураційного газу на ділянку апаратів першої сатурації з'являється вже на етапі формування підходу до регулювання, крім цього додатково потрібно врахувати множину можливих варіантів підтримання співвідношення. Це пояснює необхідність застосування моделей при формуванні управляючих діянь, а також перевірку уже сформованих діянь. При чому модель повинна передбачати можливість як структурної зміни (при зміні підходів до управління) так і адаптації при коригуванні технологічного режиму. Саме тому вибір тензорного аналізу до моделювання процесів на ділянці апаратів першої сатурації є найбільш доцільним. В даній статті наведений приклад використання тензорного аналізу в автоматизованій системі управління апаратами ділянки першої сатурації. Наведена постановка задачі для вирішення якої необхідне моделювання і використання тензорного аналізу при розробці моделі. В статті показано розробку тензора для технологічного процесу та процесу управління, що дозволяє адаптувати кожну окрему модель апарату, а потім їх об'єднання в єдину модель технологічної ділянки. Також наведений підхід використання тензорної моделі для системи управління.

Ключові слова: *дефекація, сатурація, система управління, тензор, базис, тензорне множення.*

Актуальність

До однієї із основних стадій виробництва цукру входить ділянка першої сатурації (рис.1) – стадія очищення дифузійного соку вапном та діоксидом вуглецю від нецукрів (сокоочисне відділення) [1]. Схема очищення дифузійного соку на ділянці першої сатурації складається з наступних основних операцій: попередня дефекація (переддефекація); основна дефекація; апарат першої сатурації. Це є універсальна схема в якій передбачена можливість

очищення дифузійного соку різними варіантами, що вибираються в залежності від якості перероблюваного буряка, тобто якості дифузійного соку.

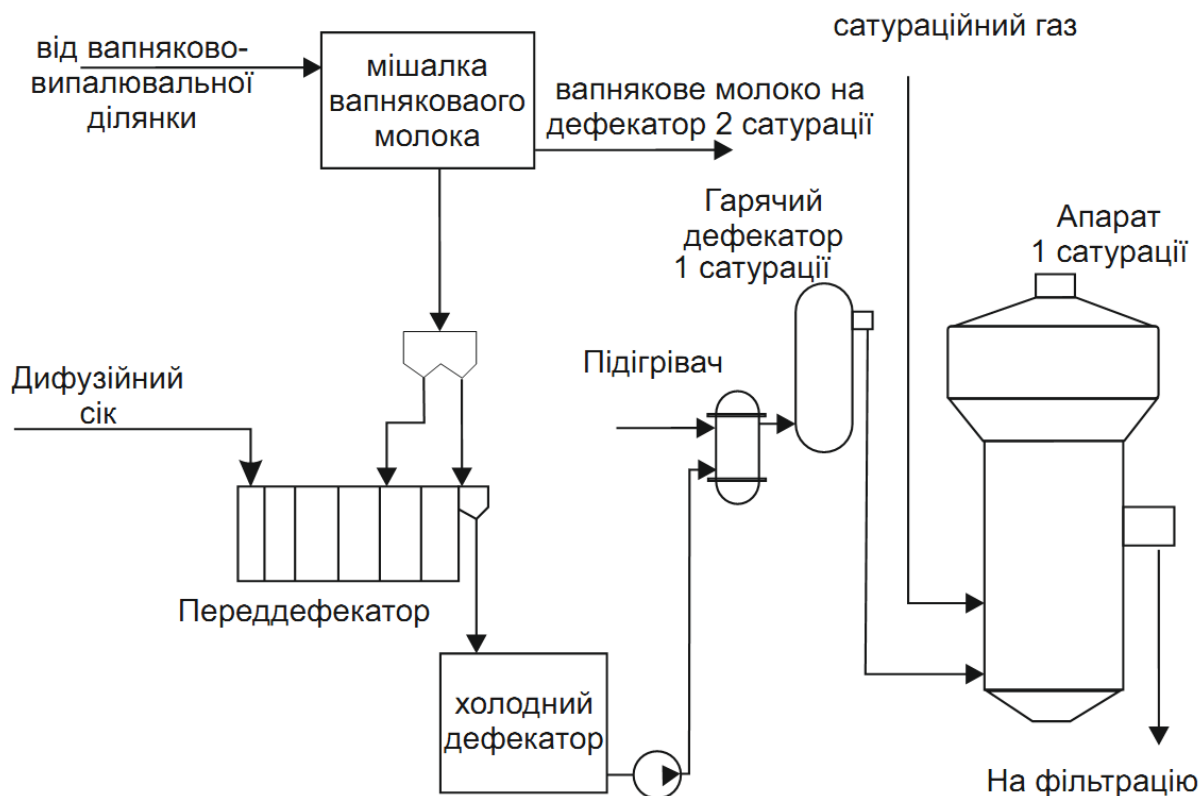


Рис 1 Спрощена схема технологічної ділянки 1 сатурації

Різні варіанти обробки дифузійного соку на станції дефекосатурації передбачають зміну роботи технологічного обладнання, як введення в роботу апаратів, так і виключення їх із роботи (наприклад: робота із основною дефекацією та без неї; із повернення соку 1-ї сатурації на переддефекацію також можлива робота без повернення соку на переддефекацію, або використання комбінованої холодно - гарячої дефекації), а також можливу зміну параметрів технологічного режиму в регламентних межах табл. 1. Тобто в залежності від якості перероблюваного буряка технологічний процес (кількість та послідовність працюючого обладнання) та технологічний режим будуть підбиратись для досягнення показників якості дифузійного соку на виході апарату першої сатурації, а також техніко-економічних показників всього

підприємства, будуть накладені обмеження по використанню ресурсів та часу проходження технологічного процесу.

Зміни в технологічному процесі також накладають вимоги до системи управління даної ділянки. Це пов'язано насамперед із тим, що при зміні роботи технологічного обладнання потрібно і змінювати задані значення для регуляторів (як наслідок можуть виникнути затяжні перехідні процеси) так і змінювати налаштування самих регуляторів: пропорційну, інтегральну та диференційну складові. Але при цьому необхідно зауважити, що при зміні ведення технологічного процесу самі підходи до управління можуть також змінитись.

Таблиця 1

Параметри технологічного режиму ділянки 1 сатурації

	перед- дефекація	Холодна дефекація	Гаряча дефекація	1 сатурація
Температура процесу, С:	40-50	40-50	90	80-85
Тривалість процесу, хв.:	20-30	20,0-30,0	5,0- 10,0	10,0
Витрата вапна,% СаО до маси буряка:	0,2-0,3	1,0-1,8	0,5-0,7	
Лужність соку за допомогою фенолфталеїну,% СаО:		0,8-1,2	0,8-1,2	0,09-0,11
pH ₂₀ соку:	11,0-11,2			11 ± 0,2
Вміст СО ₂ в сатураційному газі, не менше,%:				28

Тобто для процесу очистки дифузійного соку характерна значна варіативність, але наведена варіативність відносилась до технологічного процесу, така ж ситуація і є по відношенню до системи управління. Наприклад, регулювання подачі вапна на переддефекатор може відбуватись трьома способами: 1) по значенню рН преддефекованого соку на виході із апарату, 2)

по співвідношенню дифузний сік/вапняне молоко, 3) по співвідношенню дифузний сік/вапняне молоко і коригуванням по значенню рН переддефекованого соку.

В свою чергу контури системи управління основною дефекацією можуть регулювати подачу вапна в апарат по таким трьом підходам: 1) постійно у часі, незалежно від кількості перероблених буряків та якості дифузійного соку, 2) в залежності від якості дифузійного соку, 3) за витратою дифузійного соку.

Для першої сатурації також характерні три підходи до керування, найбільшого поширення набула схема управління подачі сатураційного газу по відхиленню величини рН на виході із сатуратора, але кращі показники регулювання коли сатураційний газ подається по співвідношенню кількість дифузійного соку до кількості газу із корекцією по рН на виході та по вмісту CO_2 в сатураційному газі.

Для вибору способу керування та налаштування регуляторів, потрібне чітке розуміння технологічного процесу: фізико-хімічні складові, час його проходження, інерційність, транспортне запізнення процесу. Саме тому в процесі аналізу широко використовується моделювання, як технологічного процесу так і процесів керування. Використання моделей вносить розуміння причино наслідкових зв'язків, та полегшує вибір підходів управління. На даний час для моделювання широко використовують методи диференційних та алгебраїчних рівнянь, але як зазначено вище розроблена модель повинна враховувати: всі вхідні та вихідні параметри технологічного процесу; мати можливість структурної зміни (тобто мати можливість включення або виключення із моделі окремих елементів які пов'язані із роботою окремих технологічних апаратів); можливість реагувати на зміну діапазону управляючих діянь; враховувати попередні технологічні процеси та мати здатність інтегруватись у наступні моделі або розрахунки управляючих дій. Тобто розроблена модель процесу очистки дифузійного соку та управління цього цим процесом повинна враховувати всі можливі варіанти роботи, та надати можливість провести їх аналіз, рішення.

Саме тому в даній роботі запропоновано використати методи тензорного аналізу для розробки компонентів моделі та виконання розрахунків в системі управління процесом очистки дифузійного соку. Тензорний аналіз дозволяє спростити процес моделювання практично для будь-якої області за рахунок введення категорії багатовимірного простору. Розроблена тензорна модель дозволяє описувати всі задачі незалежно від їх складності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Тензор узагальнює поняття скаляра, вектора і матриці. При цьому правила перетворення компонент тензора влаштовані так, що ми можемо конструювати нові тензори з наявних по деяким простим правилам.

Тензорний аналіз представляє собою узагальнення понять з векторного аналізу та дозволяє об'єднати масиви даних та фізичні величин складної природи, які не можуть, бути описані або представлені у вигляді скалярів або векторів [2]. Тому, використання тензорного методу для побудови моделі виробничого процесу є найбільш виправданим.

Тензорний аналіз та тензорне розкладання стали застосовуватися для: розробки нейронних мереж, проектування систем штучного зору, обробки сигналів, обробки та аналізу даних [3].

Насамперед тензор – це математичний об'єкт, який не залежить від зміни системи координат, але його компоненти при зміні системи координат перетворюються по певним математичним законам. Із тензором тісно пов'язаний його ранг і він може бути: нульового, першого, другого і так далі, рангу. Тензор нульового рангу – це скаляр і є наслідком прямого вимірювання параметра, наприклад: температури, густини, витрати. тиску і ін. Більш складніші вимірювання, наприклад спектроскопія дозволяє отримати комплекс параметрів, який можна задати у вигляді вектора – це тензор першого рангу. У двовимірному просторі тензор другого рангу найпростіше уявити як матрицю, яка описує неоднорідність заданого простору та діє на вхідний вектор, змінюючи його напрям і масштаб. Як правило, для аналізу комплексних даних

n -го порядку формується тензор n -го рангу який використовується для моделювання функцій великого числа змінних.

Теорія тензорного аналізу дозволяє спростити моделювання законів практично для будь-якої області за рахунок введення категорії багатовимірному простору, вона дозволяє описувати всі поверхні незалежно від їх складності. Тензорний аналіз та тензорне розкладання стали застосовуватися у багатьох областях, наприклад: нейронні мережі, проектування систем штучного зору, обробки сигналів та обробки і аналізу даних. Тензорний аналіз представляє собою узагальнення понять з векторного аналізу та дозволяє об'єднати масиви даних та фізичні величин складної природи, які не можуть, бути описані або представлені у вигляді скалярів або векторів. Тому, використання тензорного методу для побудови моделі виробничого процесу є найбільш виправданим.

Для роботи із тензорами широко використовуються програмні пакети для ЕОМ. Наприклад для MATLAB розроблені спеціалізовані програми, наприклад Tensor Toolbox, TDALAB Laboratory [4, 5]. Вони дозволяють вирішувати завдання представлення та обробку даних у вигляді тензорів. Дані програмні пакети застосовуються для обробки сигналів, систем контролю, нейронних мереж, нечіткої логіки, статистичної обробки та моделювання.

Мета дослідження

Різні варіанти обробки дифузійного соку на станції дефекосатурації передбачають зміну роботи технологічного обладнання, як введення в роботу апаратів, так і виключення їх із роботи (наприклад: робота із основною дефекацією та без неї; із повернення соку 1-ї сатурації на переддефекацію також можлива робота без повернення соку на переддефекацію, або використання комбінованої холодно - гарячої дефекації), а також можливу зміну параметрів технологічного режиму в регламентних межах. Тобто в залежності від якості перероблюваного буряка технологічний процес (кількість та послідовність працюючого обладнання) та технологічний режим будуть підбиратись для досягнення показників якості дифузійного соку на виході ділянки дефекосатурації, а також техніко-економічних показників всього

підприємства, будуть накладені обмеження по використанню ресурсів та часу проходження технологічного процесу.

Локальні контури управління апаратами ділянки інтегровані в автоматизовану систему управління всього процесу дефекозатурації, а та в свою чергу інтегрується до інших ділянок підприємства і всі разом формують автоматизовану систему управління підприємством. Система управління сокоочисного відділення включатиме в себе традиційні локальні контури управління параметрами та додаткові модулі, в яких будуть формуватись управляючі дії, що будуть слугувати завданням для ведення технологічного режиму, тобто завданням для локальних контурів управління.

Зміни в технологічному процесі накладають вимоги до системи управління сокоочисного відділення. Це пов'язано насамперед із тим, що при зміні роботи технологічного обладнання потрібно і змінювати задані значення для регуляторів (як наслідок можуть виникнути затяжні перехідні процеси) так і змінювати налаштування самих регуляторів: пропорційну, інтегральну та диференційну складові. Але при цьому необхідно зауважити, що при зміні ведення технологічного процесу самі підходи до управління можуть також змінитись.

Тобто для процесу очистки дифузійного соку характерна значна варіативність, але наведена варіативність відносилась до технологічного процесу, така ж ситуація і є по відношенню до системи управління. Наприклад, регулювання подачі вапна на переддефекатор може відбуватись трьома способами: 1) по значенню рН преддефекованого соку на виході із апарату, 2) по співвідношенню дифузний сік/вапняне молоко, 3) по співвідношенню дифузний сік/вапняне молоко і коригуванням по значенню рН переддефекованого соку.

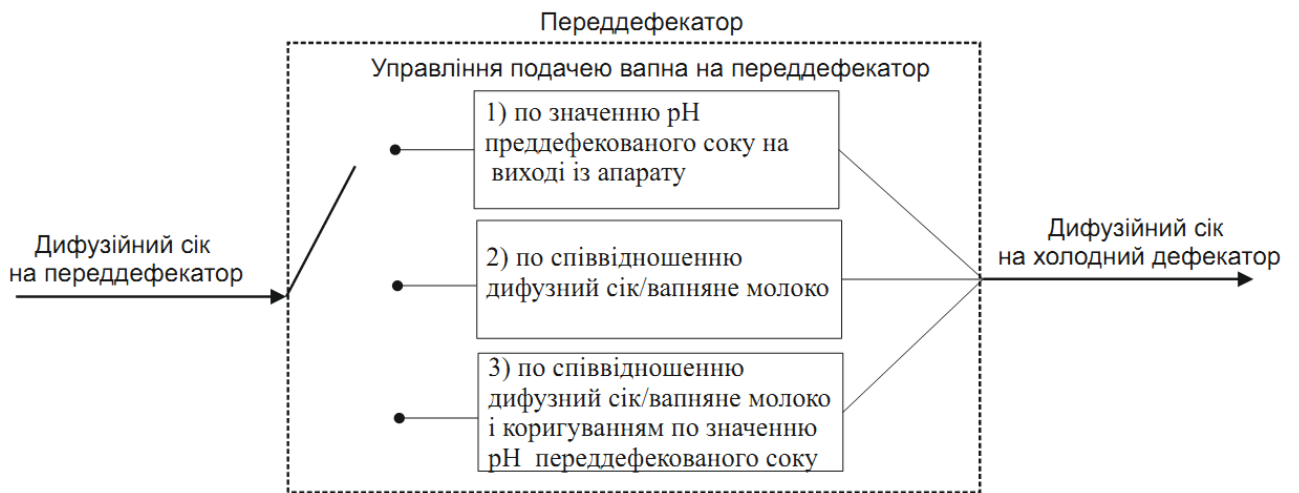


Рис 2 Вибір регулювання подачі вапна на переддефекатор

В свою чергу контури системи управління основною дефекацією можуть регулювати подачу вапна в апарат по таким трьом підходам: 1) постійно у часі, незалежно від кількості перероблених буряків та якості дифузійного соку, 2) в залежності від якості дифузійного соку, 3) за витратою дифузійного соку.

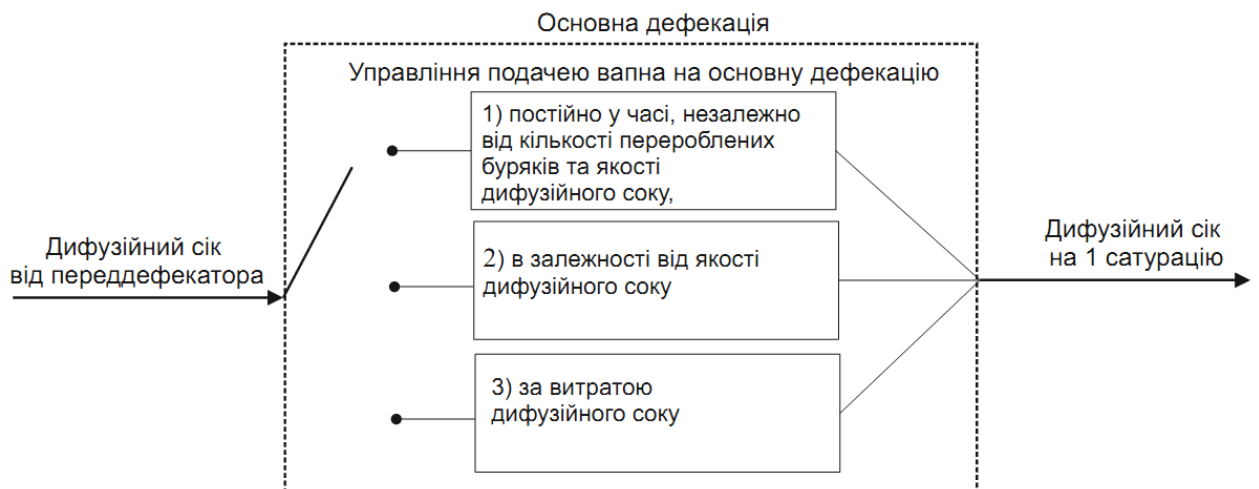


Рис 3 Вибір регулювання подачі вапна на основну дефекацію

Для першої сатурації також характерні три підходи до керування, найбільшого поширення набула схема управління подачі сатураційного газу по відхиленню величини рН на виході із сатуратора, але кращі показники регулювання коли сатураційний газ подається по співвідношенню кількості дифузійного соку до кількості газу із корекцією по рН на виході та по вмісту CO_2 в сатураційному газі.

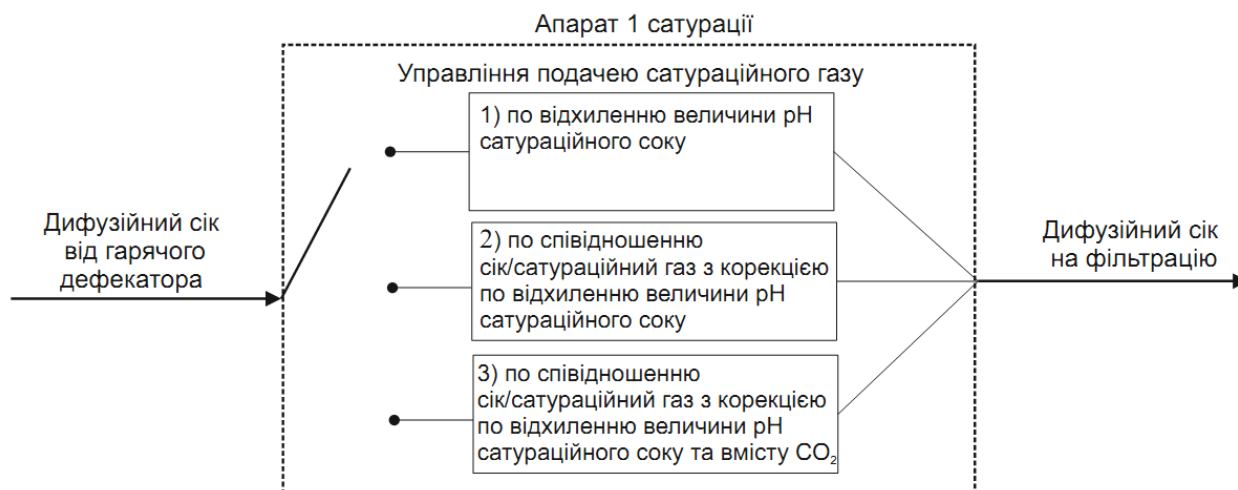


Рис 4 Вибір регулювання подачі сатураційного газу в 1 сатуратор

Виходячи із рис 2-4, можна побачити, що складність задачі управління подачею вапнякового молока та сатураційного газу на ділянку апаратів 1 сатурації з'являється вже на етапі формування підходу до регулювання, а якщо при цьому ще і врахувати множину можливих варіантів підтримання співвідношення, то можна із впевненістю судити про необхідність застосування моделей при формуванні управляючих діянь та перевірці процесу управління. При чому модель повинна передбачати можливість як структурної зміни (при зміні підходів до управління) так і адаптації при коригуванні технологічного режиму. Саме тому вибір тензорного аналізу до моделювання процесів на ділянці апаратів 1 сатурації є найбільш доцільним

Результати дослідження та їх обговорення

Для початку приймаємо, що завжди присутній початковий та кінцевий стан технологічного процесу, наприклад, після проходження технологічного процесу змінились показники системи (середовища). Також є початковий та кінцевий стан в роботі системи керування, яка формує управляюче діяння для переходу з одного усталеного режиму в інший, для зміни стану параметра (стану обладнання – вкл./викл.) або для утримання системи в заданому режимі. Це може бути періодична робота апарату, введення в роботу чи виведення технологічної лінії з роботи, збій роботи обладнання або зміна режиму роботи теплообмінного апарату.

В загальному приймаємо, що при управлінні параметрами технологічного процесу (керування апаратами, ділянками, технологічними лініями або підприємства в цілому) кожний керований процес в будь який момент може переходити (вимагає переходу) з одного поточного стану в інший.

Початкова точка вектору – це вхідні параметри, кінцева точка – це вихідні параметри, тобто це числові значення вхідних, вихідних змінних, тобто це координати вектора, але ці координати (тобто числа) самі по собі не мають ніякого сенсу і їх потрібно використовувати тільки з відповідними базовими векторами, що будуть утворювати систему координат простору технологічного процесу. При цьому розмірність технологічного простору буде залежати від кількості змінних на вході і виході. Координатні осі вибираються, як абсолютна система координат, що відповідатиме розмірності простору процесу пастеризації. Тобто кількість осей буде відповідатиме кількості параметрів. При цьому всі базисні осі повинні бути взаємно перпендикулярні (ортогональні) та мати однакові розмірності і рівні одиничної міри (ортонормовані).

Якість проходження кожного технологічного процесу характеризується наборами значень вхідних та вихідних параметрів, якщо прийняти, що для станції сокоочистки є вектор вхідних змінних \vec{X} , що матиме такі складові як: витрата дифузійного соку, температура, вміст в соку нецукрів (пульпа, пектинові речовини, слабкі азотисті основи, солі органічних і неорганічних кислот, білок, амінокислоти), значення рН, витрата вапна, витрата сатураційного газу, кольоровість; та вектор вихідних змінних \vec{Y} . Вектор вихідних змінних для ділянки дефекосатурації матиме такі складові: температура соку, лужність соку, рН, вміст нецукрів, кольоровість соку, чистота соку.

Також необхідно доповнити новий простір, в даному випадку \vec{U} – вектор управління. На рис. 5 показано графічне представлення процесу на ділянці 1 сатурації у вигляді трьохмірного простору.

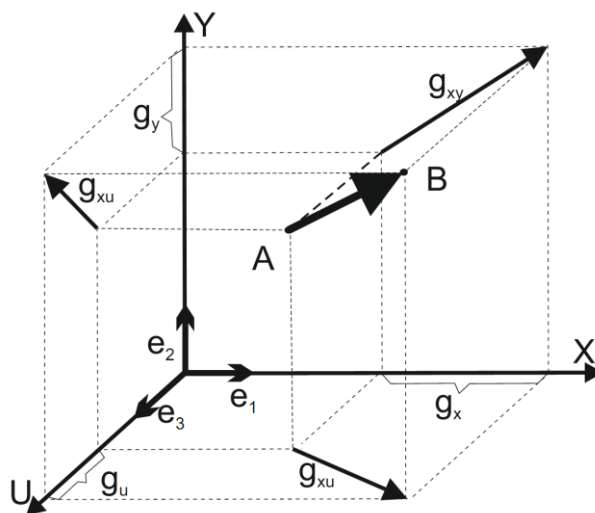


Рис 5. Представлення процесу на ділянці 1 сатурації у вигляді трьохмірного простору

Графічне представлення процесу на рис. 5 краще подати у вигляді математичного виразу :

$$y_m = A^k_{mn} x_n u_k \quad 1$$

Де A^k_{mn} - тензор, що описує процеси на ділянці 1 сатурації.

Як зазначено в постановці завдання потрібно не просто побудувати модель, в даному випадку тензор, а вміти адаптувати її в залежності від виду технологічного процесу, тобто кількості в роботі апаратів, та їх послідовності в процесі, або зміни структури системи керування об'єктом. Наприклад змінюються технологічні процеси для переддефекатора (змінюється відсоткове співвідношення подачі вапняного молока на переддефекатор), а також для апарату основної дефекації (ввели подачу вапнякового молока в апарат) та апарату 1 сатурації.

При моделюванні роботи апаратів ділянки першої сатурації, тензори дозволяють не тільки побудувати модель у вигляді багатомірного об'єкту, а й проводити над нею алгебраїчні операції: об'єднання тензорів, їх додавання та множення. Наприклад для двох тензорів $\underline{A} = a_{ij}$ та $\underline{B} = b_{ij}$ їх сума наведена на (5), а добуток двох тензорів $\underline{A} = a_{ij}$ та $\underline{B} = b_{pqr}$ відповідно (6).

$$V_{ij} + U_{ij} = A_{ij} \quad 2$$

$$V_{ij} U_{pqr} = A_{ijpqr} \quad 3$$

Тобто виконуючи алгебраїчні операції над тензорами технологічних апаратів та рівнів управління, формується тензорна модель для всієї ділянки.

Наприклад об'єднання трьох просторів в одну модель можна виконати за допомогою тензорного множення трьох лінійних просторів, в нашому випадку: V – простір переддефектора, W – простір основної дефекації, U – простір першої сатурації сатурації, що будуть входити в багатомірний простір D для тензора A

$$A = V \otimes W \otimes U \quad 4$$

Базиси для кожного простору будуть наступними, $B_V = \{e_1, \dots, e_n\}$ базис простору V , $B_W = \{l_1, \dots, l_m\}$ базис простору W , $B_U = \{t_1, \dots, t_k\}$ базис простору U . Кожний елемент вказаних просторів буде знаходитись відповідно до значення свого базису.

$$v = \sum_{j=1}^n c_{ij} e_j, \quad w = \sum_{r=1}^m q_{ir} l_r, \quad u = \sum_{z=1}^k p_{iz} t_z \quad \text{де } c_{ij}, q_{ir}, p_{iz} \in D \quad 5$$

Відповідно до правил тензорного множення [2] та (3) елементи тензора A будуть розраховані

$$a = \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^m \sum_{z=1}^k \left(\sum_{i=1}^s c_{ij} \cdot q_{ir} \cdot p_{iz} \right) \cdot e_j \otimes l_r \otimes t_z \quad 6$$

Тобто елементи тензору A будуть перераховані відповідно до базису $B_A = \{e_1 \otimes l_1 \otimes t_1, \dots, e_j \otimes l_r \otimes t_z\}$.

Знайдений тензор використовується як модель технологічного процесу ділянки 1 сатурації в автоматизованій системі керування, а саме для розрахунку управляючого діяння чи знаходження прогнозованого значення.

Тобто важливою задачею є використання даної моделі у системі керування, тобто розрахунку управляючого діяння, або знаходження прогнозованого значення, тому для використання тензорних моделей в системах керування потрібно зменшити розмірність тензору до розмірності вхідної інформації, для цього використовують математичний апарат, що зменшує розмірність тензора, – тензорне розкладання. Найбільш вживаними є: розкладання Таккера, сингулярне розкладання, скелетне розкладання. Наприклад для трьохмірного тензору в якому будуть задані матиме такі розмірності як кількість продукції, якість продукції та кількість використаних ресурсів провівши розкладання можна отримати матризовані тензори рис 4.

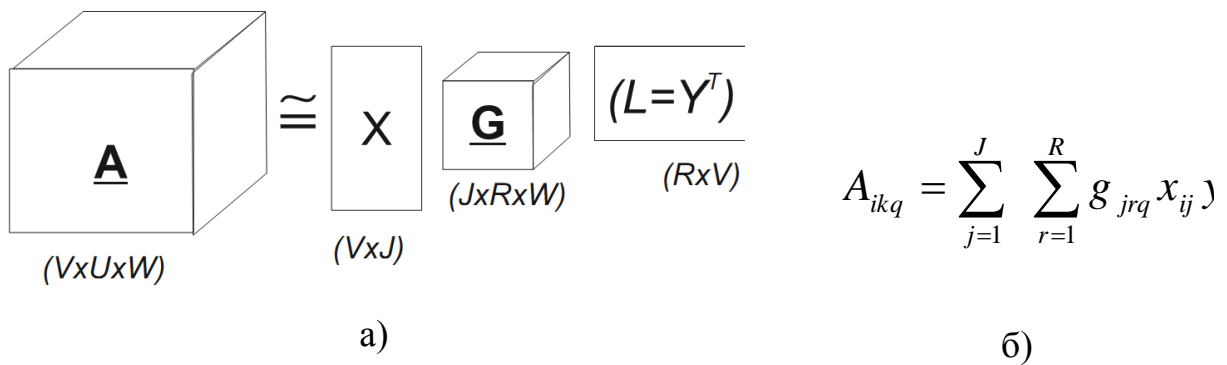


Рис 4 Розкладання тензора методом Такера: а) графічне представлення, б) аналітичне

Таким чином можна сформулювати тензорну модель для всієї ділянки дефекосатурації та відповідно всіх ієрархій керування,

Висновки і перспективи подальших наукових досліджень

В даній статті наведений приклад використання тензорного аналізу в автоматизованій системі управління процесів для ділянки 1 сатурації. Перевага тензорного аналізу в тому, що тензор, як для об'єкта управління так і самої системи управління, розраховується тільки один раз, далі компоненти тензора перераховуються в залежності від вибраного базису. При чому, якщо є тензори для технологічного апарату або лінії, то при необхідності моделі ділянки підприємства або всього виробництва тензори можна додавати та множити. При цьому будуть сформовані нові тензори, тобто буде розроблена нова тензорна модель, як для ділянки так і всього підприємства.

Список літературних джерел

1. Сидлецкий В. М., АСУ станциями сокодобывания и сокоочистки / В.М. Сидлецкий, В.М. Кушков, С.М. Швед. // Автоматизация в промышленности – 2008. – №2. – С. 26-29.

2. Разумова, М. А. Основи векторного і тензорного аналізу: навчальний посібник / М. А. Разумова, В. М. Хотяїнцев. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. – 216 с.

3., Cichocki A. Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-way Data Analysis and Blind Source Separation. Chichester/A. Cichocki, R. Zdunek, A.-H. Phan, and S. Amari. – U.K.: John Wiley&Sons Ltd, 2009. – 407p.

4. Tensor Toolbox version 2.6 by Brett W. Bader, Tamara G. Kolda, Jimeng Sun, Evrim Acar, Daniel M. Dunlavy, Eric C. Chi, Jackson Mayo, et al. Copyright 2015, Sandia National Laboratories. Released February 6, 2015

5. TDALAB Laboratory for Tensor Decomposition and Analysis by Guoxu Zhou, Andrzej Cichocki 2012 Cichocki Laboratory for Advanced Brain Signal Processing.

References

1. Sidletskiy V. M., Kushkov V.M., Shved S.M. (2008) ASU stantsiyami sokodobyivaniya i sokoochistki. Avtomatizatsiya v promyishlennosti. 2, pp. 26-29. (in Russian)

2. Razumova, M. A. Khotiaintsev V. M. (2011) Osnovy vektornoho i tenzornoho analizu: navchalnyi posibnyk. Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskiy universytet". 216 p. (In Ukrainian).

3., Cichocki A., Zdunek R., Phan A.-H., Amari S. (2009) Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-way Data Analysis and Blind Source Separation. Chichester. U.K.: John Wiley&Sons Ltd. 407p.

4. Tensor Toolbox version 2.6 by Brett W. Bader, Tamara G. Kolda, Jimeng Sun, Evrim Acar, Daniel M. Dunlavy, Eric C. Chi, Jackson Mayo, et al. Copyright 2015, Sandia National Laboratories. Released February 6, 2015

5. TDALAB Laboratory for Tensor Decomposition and Analysis by Guoxu Zhou, Andrzej Cichocki 2012 Cichocki Laboratory for Advanced Brain Signal Processing.

УПРАВЛЕНИЕ УЧАСТКОМ ПЕРВОЙ САТУРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕНЗОРНОГО АНАЛИЗА

В.М Сидлецкий, Е.О. Кадура

Аннотация

В данной статье показан пример использования тензорного анализа в автоматизированной системе управления аппаратами участка 1 сатурации. Показана постановка задачи, для решения которой необходимо моделирование и использования тензорного анализа в процессе разработки модели. Показано разработку тензора для технологического процесса и процесса управления, а также подход использования тензорной модели.

Ключевые слова: дефекация, сатурация, система управления, тензор, базис, тензорное умножение.

THE METHOD OF TENSOR ANALYSIS FOR PROCESS CONTROL SYSTEMS FIRST SATURATION

V.Sidletskyy, Ie.Kadura.

Annotation

This article shows an example of the use of tensor analysis in an automated process control system phase 1 carbonation devices. Shown formulation of the problem, the solution of which is necessary to the modeling and the use of tensor analysis in the development model. Results for the development of the tensor of the process and process control systems, as well as the approach of using tensor model.

Keywords: defecation, saturation, the control system, the tensor basis tensor product.