

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Віктор Михайлович СІДЛЕЦЬКИЙ
Ігор Володимирович ЕЛЬПЕРІН**

**ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУЮВАННЯ
СУЧАСНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ**

(З прикладами для дифузійної станції цукрового заводу)

Монографія

Київ
Видавництво Ліра-К
2022

УДК 664.12:658.011.56
С347

Рецензенти

Волощук В.А. – д.т.н., проф., завідувач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Осадчий С.І. – д.т.н., проф., професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

*Рекомендовано Вченою Радою
Національного університету харчових технологій
Протокол № 4 від 25 11 2021 р.*

Сідлецький В. М., Ельперін І. В.

С347 Технології конструювання сучасних автоматизованих систем. (З прикладами для дифузійної станції цукрового заводу) [текст] монографія. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2022. – 180 с.
ISBN 978-617-520-254-8

В монографії обґрунтовано наукові положення, які в сукупності розв'язують важливе науково-практичне завдання доповнення і розширення можливостей систем автоматизованого керування, що створює фундаментальне підґрунтя для розробки систем підтримки прийняття рішень. Висвітлено сутність отримання вимірюваної і невимірюваної інформації: від системи автоматичного контролю, оператора (про результати візуального огляду обладнання) та даних сировинної і заводської лабораторій. Визначено особливості наповнення бази знань. Досліджено: формування та звуження множини рекомендацій, методика визначення плану переробки сировини. Наведені наукові дослідження мають приклади практичної реалізації, а сформовані методичні рекомендації спрямовані на вдосконалення алгоритмів управління підприємством, його ритмічністю, продуктивністю для підвищення ефективної його роботи.

Монографія розрахована на наукових працівників, аспірантів, магістрів, студентів вищих навчальних закладів.

УДК 664.12:658.011.56

ISBN 978-617-520-254-8

© В. М. Сідлецький, І. В. Ельперін, 2022
© Видавництво Ліра-К, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП. Мета і задачі конструювання сучасних автоматизованих систем 6

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУЮВАННЯ СУЧАСНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ..... 11

1.1. Методи аналізу технологічних процесів. Приклад аналізу процесу екстрагування цукру з бурякової стружки	11
1.2. Аналіз процесу висолоджування в колонних дифузійних апаратах.....	15
1.3. Аналіз систем автоматизації колонними дифузійними станціями	25
1.3.1. Існуючі системи управління процесом висолоджування	25
1.3.2. Шляхи вдосконалення системи автоматизації. Приклад для дифузійної станції цукрового заводу	32
1.4. Основні акценти аналізу області дослідження конструювання сучасних автоматизованих систем.....	38
1.5. Мета і задачі досліджень для побудови вдосконаленої автоматизованої системи управління.....	39

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНІ СХЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ..... 41

2.1. Розробка методики опису предметної області	41
2.1.1. Аналіз алгоритмів акумулювання та структурної систематизації експертних даних	41
2.1.2. Структурний аналіз. Приклад структурного аналізу процесу висолоджування	46
2.1.2.1. Розробка функціональної моделі дифузійної станції	46
2.1.2.2. Діаграма блоку «визначення вимог до технологічного процесу.....	48
2.1.2.3. Діаграма блоку «Ідентифікація параметрів технологічного процесу.....	51

2.1.2.4. Діаграма блоку «обстежити роботу обладнання».....	53
2.2. Збір та обробка експертної інформації	55
2.2.1. Аналіз моделей представлення знань в ПППР	55
2.2.2. Розробка бази знань експертної інформації для ПППР	56
2.3. Структура і основні компоненти системи керування із розширеними можливостями.	65
2.4. Основні акценти в розробці структурних схем та компонентів вдосконаленої системи керування.....	68

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ

КЕРУВАННЯ	70
3.1 Вибір структури і основних компонентів ПППР	70
3.2. Формування рекомендацій для зміни технологічних параметрів.....	74
3.3. Розробка методики розрахунку прогнозованих показників роботи дифузійної станції	83
3.3.1. Вибір параметрів для розрахунку показників роботи дифузійної станції	83
3.3.2. Розробка моделі розрахунку прогнозованих показників роботи..	86
3.4. Вирішення задачі звуження множини вибору рекомендованих рішень	93
3.5. Основні акценти у формуванні та звуженні рекомендованих рішень для операторів	97

РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМИ ТА МОДУЛІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ

КЕРУВАННЯ	99
4.1. Аналіз впливу продуктивності на показники роботи дифузійної станції.....	99
4.2. Розробка методики розрахунку втрат цукру при зберіганні.....	101
4.3. Використання методів дослідження операцій при розробці алгоритмів та модулів вдосконаленої системи керування	106
4.4. Формування рекомендацій з урахуванням множини можливих рішень.....	113
4.5. Основні результати і висновки до розділу	123

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМ ВДОСКОНАЛЕНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	124
5.1. Функціональна структура системи управління з підсистемою підтримки прийняття рішень	124
5.2. Реалізація системи видачі рекомендацій у разі порушення технологічного режиму.....	128
5.3. Реалізація системи видачі рекомендацій для узгодження процесу зберігання і переробки сировини.....	133
5.4. Основні результати і висновки до розділу	136
ВИСНОВКИ.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	139
ДОДАТКИ.....	155
Додаток А. База знань евристичних правил	156
Додаток Б. Лінгвістична апроксимація параметрів дифузійної станції	164
Додаток В. Експериментальні дані роботи дифузійної станції.....	167
Додаток Г. Експериментальні дані втрат цукру в жомі в процесі роботи дифузійної станції	172
Додаток Д. Розраховані показники роботи станції.....	174

ВСТУП

Незважаючи на досить значну кількість та багатогранність підходів при розробці управляючих систем та їх модулів, важливими залишається питання - яким чином при керуванні виробничим процесом врахувати всі елементи, що впливають на його роботу, при цьому, яким чином переходити від локальних задач, що виникають на нижньому рівні управління, до узагальнюючих оцінок роботи, як всього виробництва так і системи управління, для розуміння її еволюційного дрейфу технологічних параметрів, як технологічного процесу і показників роботи системи керування, так і якісних та кількісних виробництва для вирішення стратегічних питань при керуванні. Для того щоб виявити появу нештатних ситуацій, всі технологічні параметри, які контролюються напряму (безпосередньо), чи є результатом комплексного виведення, повинні бути в єдиному інформаційному просторі, що аналізується системою керування, причому дані повинні аналізуватись, як статично, відносно один одного, так і динамічно, тобто аналізуватись, як вони змінюються в часі.

Сучасні підходи до розробки систем автоматизації, відповідають міжнародним стандартам ANSI/ISA 88 та ANSI/ISA 95 і т.д., надають концептуальну основу для побудови системи автоматизації управління виробничою діяльністю підприємств. Цей стандарт використовує понятійний апарат, моделі та структури даних, запроваджені стандартом.

Це дозволяє розглядати систему керування виробництвом, як сукупність взаємопов'язаних задач автоматизації управлінських процесів на усіх рівнях управління – від контролю технологічних процесів аж до управління бізнес-процесами і бізнес-плануванням. Що також дозволяє об'єднати та врахувати практично всі можливі задачі, що викликають в процесі керування виробничим підприємством. Ці підходи дозволяють управляти крім технологічного процесу ще й обробкою, логістикою, дистрибуцією, запасами, доставкою, виставлянням рахунків, бухгалтерським обліком, податковим обліком. Реалізуються в таких системах система розмежування доступу до інформації, які направлені на

протидію як зовнішнім загрозам (наприклад промислового шпигунству), так і внутрішнім (наприклад, розкраданням).

Враховуючи ієрархічність сучасних систем керування (MES, ERP, SCADA, DCS...) та значну відмінність між задачами та підходами їх вирішення, відповідно до кожного рівня, а іноді і відмінності між задачами на одному рівні, потрібно ввести аналітичний апарат, який би зміг об'єднати задачі, а відповідно і їх вирішення на кожному рівні та дозволив об'єднати при цьому всі рівні

Але ці переваги приводять до основних недоліків побудови сучасних систем керування, а саме бажання об'єднати всю ієрархію керування виробництвом привело, до великої кількості налаштувань в яких розбираються тільки розробники, що в свою чергу привело до непорозуміння хто ж повинен обслуговувати розроблену систему, і навіть після навчання конкретного персоналу виникає множина проблем із внесенням і підтримкою актуальності даних в системі. Це можна пояснити складністю або неможливістю адаптувати під задачі підприємства його специфічні технологічні процеси і наприклад бізнес-процеси. Система може страждати від проблеми «слабої ланки» — ефективність всієї системи може бути порушена одною ділянкою або одним із рівнем системи. Проблема сумісності з колишніми системами та системами, що оновлюються в процесах ремонту чи модернізації. Також недоліком є не розуміння задач і розроблених програми, що приводить до помилок розробників та неадекватність навчання персоналу. І саме головне в даних системах не вирішуються питання, що були показані в першому розділі: відсутність єдиного інформаційного простору, відсутність апарату врахування та переходу по всій ієрархії системи керування.

В монографії наводяться приклади для вдосконалення системи автоматизації дифузійної ділянки цукрового заводу, оскільки вилучення цукру з бурякової стружки – один з основних процесів цукрового виробництва, який значною мірою впливає на собівартість продукції, витрати енергетичних ресурсів та втрати цукру. Незважаючи на досить просту технологічну схему, процес

висолоджування являє собою складну систему, в якій відбуваються різноманітні фізичні, хімічні та біологічні процеси.

На більшості цукрових заводів керування дифузійною станцією відбувається з застосуванням системи автоматизації, яка побудована на базі сучасної мікропроцесорної техніки. За допомогою системи автоматизації підтримують регламентовані значення технологічних параметрів (температуру, рівень, тиск, рН, витрати та інші). Незважаючи на досить високий технічний рівень засобів автоматизації та алгоритмів управління, існуючі системи автоматизації не завжди можуть адекватно реагувати на порушення технологічного режиму. Це можна пояснити тим, що поза увагою системи автоматизації залишається цілий ряд неконтрольованих параметрів, до яких можна віднести: показники якості сировини та стружки, процеси переміщення стружки в ошпарювачі і колоні, питоме завантаження апаратів та інші. Крім того порушення технологічного режиму може відбуватись через вихід з ладу або погіршення робочих характеристик технічних засобів автоматизації, електроустаткування, механічного обладнання тощо, які не розпізнані системою управління або не помічені оператором.

Саме тому невід'ємною частиною в процесі управління дифузійною станцією є оператор, який втручається в роботу системи у разі порушень технологічного режиму, з якими не може впоратись автоматизована система управління. Ефективність прийнятих ним рішень залежить від його професіоналізму, вміння швидко виявити причину порушення і виробити адекватні дії оперативного реагування.

Враховуючи складність технологічного процесу сокодобування та сезонність роботи цукрового заводу, доцільним є доповнити існуючі системи автоматизації підсистемою підтримки прийняття рішень, яка б допомагала оператору правильно оцінити ситуацію і прийняти відповідне рішення.

В першому розділі розглядається аналіз області дослідження конструювання сучасних автоматизованих систем. Проводиться аналіз процесу висолоджування як об'єкта управління, в результаті чого були виділені фактори, що впливають на процес висолоджування, та проаналізовані можливості існуючих систем

керування. Показано, що незважаючи на високий рівень автоматизації дифузійного відділення, в процесі роботи виникають порушення технологічного режиму, які відбуваються в основному через неконтрольовану зміну якості стружки та її стану в процесі її переробки.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок про те, що існуючі системи автоматизації дифузійної станції необхідно доповнити підсистемою підтримки прийняття рішень, яка дозволить розрахувати рекомендовану продуктивність, допоможе в прийнятті рішень при коригуванні технологічних параметрів та у випадку виникнення ситуацій, що не відповідають нормальній роботі дифузійної станції.

В другому розділі розглядаються структурні схеми та компоненти вдосконаленої системи керування. Наведені результати досліджень з розробки бази знань. Були проаналізовані методи опису проблемної області і вибраний метод структурного аналізу та проектування (SADT), за допомогою якого була побудована функціональна модель дифузійної станції для збору експертної інформації, яка скла-дається з графічних діаграм. На основі функціональної моделі за результатами опитування експертів була розроблена продукційна модель процесу дифузії.

В третьому розділі наводиться приклад розробки алгоритмів та модулів вдосконаленої системи керування, показана розробка узагальненої структури правил продукції для всіх показників якості роботи дифузійної станції.

На її основі, на базі методики нечіткого логічного виведення, була розроблена модель формування рекомендацій щодо зміни технологічних параметрів на основі інформації, отриманої з системи автоматичного контролю, даних заводської лабораторії і результатів візуального обстеження роботи обладнання. Аналіз результатів логічного виведення показав, що окремі рекомендації одночасно впливають на різні показники роботи дифузії, і тому оператору важко визначитись з вибором конкретної рекомендації. У зв'язку з цим на підставі регресійного аналізу і методу вибору рішень з врахуванням домінуючих критеріїв розроблена методика прогнозування впливу зміни окремих

параметрів на загальні показники процесу дифузії і вибору однієї або декількох рекомендацій з загальної їх кількості для подання оператору для прийняття управлінських рішень.

В четвертому розділі наводяться результати розробки математичних моделей для розрахунку рекомендованих значень продуктивності дифузійної станції з використанням теорії гри. Розроблений алгоритми визначення втрат цукру в процесі зберігання і планування переробки сировини шляхом вирішення транспортної задачі з метою мінімізації загальних втрат цукру при зберіганні та переробці.

У п'ятому розділі наведена практична реалізація розробленої підсистеми прийняття рішень у складі автоматизованої системи управління, її технічна та програмна структура, а також результати впровадження.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУЮВАННЯ СУЧАСНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

1.1. Методи аналізу технологічних процесів. Приклад аналізу процесу екстрагування цукру з бурякової стружки

Вилучення цукру з бурякової стружки – один з основних процесів цукрового виробництва, яким у значній мірі визначається якість і кількість отриманого цукру та ефективність виробництва в цілому. На вітчизняних цукрових заводах цей процес відбувається в дифузійних апаратах неперервної дії, які прийшли на зміну дифузійним батареям періодичної дії Роберта. Існують різні типи дифузійних апаратів неперервної дії: ротаційні, ланцюгові, колонні, похилі. Вони відрізняються конструктивно, мають різні технологічні показники, але базуються на одному принципі дії – протипотоковому висолоджуванню [1-6]. Він полягає в протипотоковій обробці нарізаної стружки цукрового буряка гарячою водою (рис.1.1). При цьому цукроза та частина розчинених нецукрів поступово переходять у воду, в результаті чого вміст їх в стружці знижується, а в воді збільшується. В процесі дифузії стружка поступово втрачає свій цукор і перетворюється в жом, а вода поступово отримує цукор і перетворюється в дифузійний сік, який потім подається на подальші стадії цукрового виробництва.

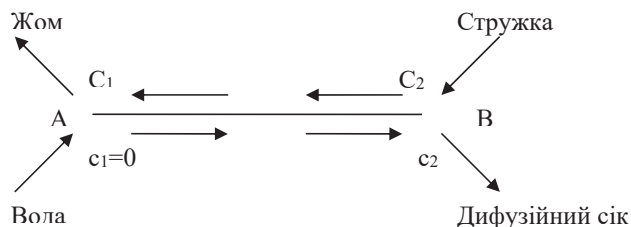


Рис. 1.1. Схема протипотокового неперервного дифузійного процесу

Процес екстрагування цукрози із бурякової стружки відносять до екстрагування в системі тверде тіло – рідина. Процес перенесення цукру із бурякової стружки відбувається в дві стадії: молекулярну дифузію цукрози всередині твердого тіла до

його поверхні і молекулярний та конвективний перехід цукрози з поверхні в рідину (масовіддачу). На рис 1.2 [2] бурякову стружку показано у вигляді пластинки, у якій відбувається процес перенесення цукрози зі стружки в рідину.

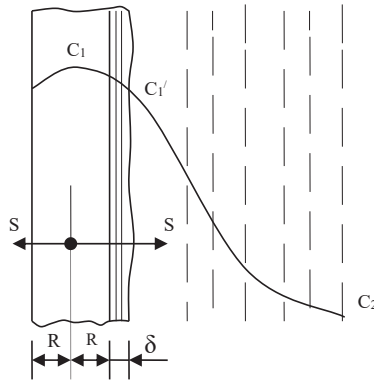


Рис 1.2. Схема перенесення цукрози зі стружки в рідину

Перша стадія – молекулярна дифузія – описується законом Фіка:

$$S = -\frac{D_{вн}}{R} \cdot F \cdot Z \cdot (C_1 - C_1'), \quad (1.1)$$

де: S – кількість екстрагованої речовини, $D_{вн}$ – коефіцієнт внутрішньої дифузії ($0,6 \dots 0,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$), F – площа дифузії, Z – тривалість процесу сокодобування, R – зведений радіус (залежить від товщини стружки), $(C_1 - C_1')$ – градієнт концентрації.

Друга стадія описується законом Ньютона:

$$S = \frac{D_{зн}}{\delta} \cdot F \cdot Z \cdot (C_1' - C_2), \quad (1.2)$$

де: $D_{зн}$ – коефіцієнт зовнішньої дифузії, δ – товщина пристінного шару рідини з середньою концентрацією C_1' .

Якщо стружку розглядати як одиницю об'єму, у якому зміну концентрацій можна прийняти як зміну потоків, то першу стадію можна віднести до закону переносу першого порядку Фіка - Нернста, що виражений через похідну першого порядку (градієнта) [9]:

$$j = -D \text{ grad } C, \quad (1.3)$$

де: j – потік маси, D – коефіцієнт молекулярної дифузії, C – концентрація.

На основі закону переносу першого порядку та беручи до уваги процес накопичення субстанції в середині контрольного об'єму за рахунок різниці вхідного і вихідного потоку, отримують закони переносу другого порядку:

$$(j_{\dot{a}\dot{o}} - j_{\dot{a}\dot{o}\dot{o}})dF = \frac{\partial M}{\partial \tau} dV, \quad (1.4)$$

де: $j_{\text{вх}}$ $j_{\text{вих}}$ – відповідно потік речовини на вході та виході із контрольного об'єму dV через поверхню dF , $\partial M/\partial \tau$ – приріст кількості речовини в середині об'єму dV .

Аналізуючи процес екстрагування цукру з бурякової стружки, Г. Оплатка та Э. Савичек [1] довели, що процес знецукрення відбувається не прямолінійно, а по кривій. На рис 1.3 показано процес знецукрення плоско – паралельної пластинки зі зруйнованої бурякової тканини товщиною d та початковою концентрацією C_0 , що занурена у воду. Так як об'єм води досить великий порівняно з об'ємом пластинки - концентрація на ній весь час дорівнює 0. Товстими лініями (крива 1,2,3,4,5) показані етапи знецукрення, які запропоновані Г.Оплаткою та Э. Савичеком, а прямими 3', 4', 5' – наближена теорія знецукрення.

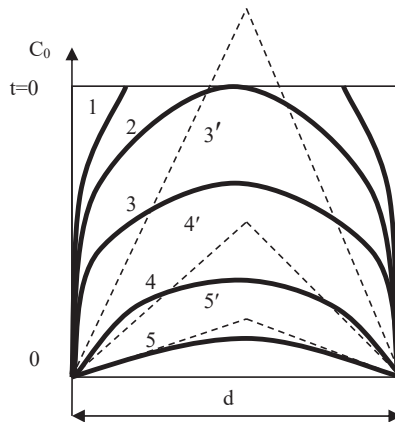


Рис 1.3. Протікання процесу знецукрення в буряковій пластинці

У свою чергу, враховуючи теоретичні основи процесу дифузії, наведені вище, П.М. Сілін довів [1], що в дифузійних апаратах немає великої різниці концентрацій, тому що свіжа стружка попадає не у воду, а в сік з великою концентрацією. При цьому процес дифузії не буде інтенсивним за рахунок того,

що клітини при нагріванні відмирають поступово. Це обґрунтовує можливість використання наближеної теорії прямолінійного процесу:

$$S = \frac{K_0 \cdot T_m}{\eta} \cdot F \cdot \frac{C - c}{\frac{r}{4}} \cdot Z, \quad (1.5)$$

де: S – кількість цукру, екстрагованого зі стружки; C – середня концентрація нормального соку в середині стружки; c – середня концентрація соку зовні стружки; $(C - c)$ – середня різниця концентрацій; $(C - c)/(r/4)$ – градієнт концентрації; r – товщина стружки; T_m та η – середня абсолютна температура і відповідна в'язкість води під час екстрагування; F – поверхня стружки; K_0 – постійна, яка не залежить від температури, але залежить від розміру частинок; Z – час дифузії.

Відповідно до цього закону, кількість екстрагованої речовини S пропорційна різниці концентрації на границі цього слою $(C - c)$, часу дифузії Z , температурі екстрагування T_m , площі слою F і пропорційно обернена товщині слою, тобто довжині шляху дифузії і в'язкості води під час екстрагування η .

Технологічні вимоги до технологічного процесу дифузії можна сформулювати наступним чином:

- досконалий протиток між екстрагентом та буряковою стружкою, для максимального ступеня знецукрення стружки;

- короточасний (10 хв.) нагрів бурякової стружки до температури 68...75 °С на початковій стадії та підтримка температури 67...70 °С протягом всього процесу для швидкої та повної денатурації білків протоплазми буряка. Завдяки цьому досягається максимально можлива швидкість екстрагування цукрози на більшій довжині екстрактора та забезпечується стерилізація середовища та придушення розвитку мікроорганізмів, які розкладають цукрозу;

- форма та розміри частинок стружки при мінімальному розмірі повинні забезпечувати низький внутрішній дифузійний опір, дозволяти рідкій фазі вільно фільтруватись через бурякову стружку та мати при цьому контакт з максимально можливою поверхнею кожної частинки;