

Л.М. ЧЕРНЕЛЕВСЬКИЙ, кандидат економічних наук
Український державний університет харчових технологій
Є.В. МУСІЯКА, Ю.О.ЗОТОВА
Л.І. ЧЕРНЯВСЬКА, доктор технічних наук
Український науково-дослідний інститут цукрової промисловості
О.В. ФОНОВ
Національний технічний університет України "КПІ"

**МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ
МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЦУКРОВОГО
ВИРОБНИЦТВА**

Розглянуто запропоновану авторами методологію формалізації моделей оптимізації розподілу матеріальних потоків технологічного комплексу цукрового виробництва на базі лінійного програмування та інтелектуальної надбудови у формі правил бази знань гібридної експертної системи.

Ключові слова: матеріальні потоки, оптимізація, експертні оболонки, критерії оптимізації, сімплекс-моделі, рівняння.

Нині подальший розвиток цукрової промисловості потребує впровадження у виробництво досягнень науки і техніки, передусім це стосується аспектів комп'ютерно-інформаційних технологій з використанням принципів теорії штучного інтелекту, зокрема її практичного розділу — експертних систем, які бурхливо впроваджуються в науку й виробництво.

Цукровий завод належить до типу безперервно-поточних виробництв з використанням агрегатів, які працюють у безперервних та безперервно-циклічних технологічних режимах.

Безперервно-діюче обладнання технологічного комплексу (ТК) використовується для перероблення буряків у стружку, очищення та упарювання соків. Безперервно-циклічне обладнання ТК застосовується для фільтрації соків, уварювання та центрифугування утфелів.

Спільне функціонування безперервно-діючого і безперервно-циклічного обладнання утруднює координацію злагодженого завантаження технологічних відділень ТК, його ритмічну роботу, що безпосередньо впливає на затрати праці, енергоресурсів, допоміжних матеріалів та реагентів, а також сировини.

Указані особливості цукробурякового виробництва значно впливають на оперативний вибір оптимальних параметрів регламенту роботи всього технологічного комплексу.

На багатьох підприємствах цукрової промисловості установлені ПЕОМ (автономні комплекси або в складі АСУ ТП та АРМ). Їх використовують для обліку і контролю виробництва, а також для керування окремими процесами технологічного комплексу відповідно до регламенту його роботи.

Регламент задається оперативно-технологічними службами головного технолога, теплотехніка, економіста та іншими відділами заводу. Стратегія переробки буряків та оптимальні показники регламенту роботи ТК залежать від складу та якості сировини, стану обладнання ТК, варіанта технологічної схеми ТК, економічних вимог. Ці показники визначаються застарілими традиційними методами на основі інструкцій, які не передбачають використання сучасних комп'ютерних програм обробки і математичного аналізу поточної інформації про стан ТК та якісні характеристики матеріальних потоків ТК за даними хімічних аналізів заводської лабораторії. В найліпших випадках використовуються програми розрахунку продуктів цукрового виробництва, які здебільшого спрямовані на облік виробництва за минулі зміни, ніж на його прогнозування для майбутніх змін.

Основний недолік методики вибору оптимальних показників регламенту ТК — немає типової математичної формалізації моделей відповідно до вимог сучасних інформаційних технологій, які розробляються на основі методів штучного інтелекту, в даному випадку — експертних систем з використанням пакетів прикладних програм.

Експертні системи (ЕС) є характерною рисою нинішнього періоду розвитку науки, техніки і виробництва [1, 2, 3]. Розробки прикладних експертних систем базуються на стандартних оболонках.

Експертні оболонки — це інтегровані програмні пакети, які можуть виконувати основні стандартні функції сучасного програмування з використанням методів штучного інтелекту.

Ядром експертної оболонки є три основних модулі: інтерфейс користувача; процесор логічного висновку; база знань.

Якщо в рамках експертної оболонки реалізуються не тільки "чисто" експертні моделі, а й класичні, наприклад моделі математичного програмування, тоді таку прикладну експертну систему називають гібридною (ГЕС). Ми проводимо дослідження із зведення різних методик розрахунків продуктів цукрового виробництва, визначення параметрів регламенту ТК та інших оптимізаційних задач (рівня оперативного керування ТК технічним персоналом цукрового заводу) до єдиної абстрактно-формалізованої системної методології на базі лінійного програмування та інтелектуальних засобів експертних систем.

Ми дослідили, що математична формалізація перерахованих вище задач може вирішуватися на основі узагальненої лінеаризованої моделі розподілу матеріальних потоків ТК сімплекс-моделі (Simplex Model), тобто моделі, при використанні якої застосовують сімплекс-метод [4, 5].

Основні труднощі при реалізації вибраної методології полягають у формулюванні узагальненої моделі розподілу потоків ТК, виборі коефіцієнтів співвідношення компонент потоків ТК, встановленні меж дозволеної області варіацій змінних, які перед розв'язанням оптимізаційної задачі повинен визначати технолог. Процес підготовки моделі оптимізаційної задачі ускладнюється великою кількістю змінних моделі, яких буває більше трьохсот [6]. Тільки досвідчений технолог може швидко сформулювати сімплекс-модель, адаптувати її до складних виробничих умов та аналізувати результати проміжних розв'язань задачі для здійснення цілеспрямованого пошуку оптимального розв'язку.

Сімплекс-модель може бути типовим блоком ряду задач з керування роботою ТК, однак у цій статті розглядається базова модель, яка пристосована для задачі вибору

оптимально згаджених показників регламенту роботи ТК цукрового виробництва. Цю задачу в переліку задач оперативного керування можна поставити на перше місце (у даному випадку під "оперативним керуванням" розуміють не автоматичне, а з участю людини, яка використовує ГЕС).

Для експлуатації сімплекс-моделі у заводських умовах потрібна інтелектуальна підтримка, тобто модель програми дій досвідченого оператора-технолога щодо її адаптації до поточних змінних умов роботи ТК. Якщо цю задачу на основі сімплекс-моделі розмістити у середовищі експертної оболонки, то такою інтелектуальною надбудовою буде її база знань [1,2].

Моделі бази знань за структурою можуть бути різними: на базі фреймів, семантичних моделей, предикатів першого порядку, продукцій, оснований на правилах математичної логіки.

У гібридній експертній системі, яка розробляється, база знань проблемної області моделюється правилами ЯКЩО—ТОДІ і пов'язаними з ними структурами даних. Кожне правило має передумову і висновок. Коли машина логічного висновку може встановити, що передумова істинна, тоді вона знає, що висновок також істинний.

Використання сімплекс-моделі з базою знань у рамках гібридної експертної системи дає можливість реалізувати не тільки алгоритми окремих розрахунків, а й цілий клас задач оперативного керування технічним персоналом ТК цукрового заводу — вибору оптимальних показників регламенту роботи ТК залежно від складу сировини, координації роботи відділень ТК, мінімізації енергетичних ресурсів і допоміжних матеріалів та поліпшення якості продукції.

Перейдемо до математичного формулювання задачі вибору оптимальних показників регламенту ТК. За допомогою сімплекс-моделі розподілу матеріальних потоків на прикладі дифузійного відділення ТК. Модель розподілу матеріальних потоків дифузійного віддалення за своєю природою нелінійна і в загальному вигляді має форму

$$F=f(V,W,T) \quad (1)$$

де F — критерій оптимізації; V, W, T — вектори відповідно вхідних, вихідних і режимних параметрів.

На основі моделі (1) розробимо лінеаризований її аналог — сімплекс-модель, яку можна подати такими рівняннями (нерівностями):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_{ij} x_j - b_j &\leq 0; \\ a_{ij} &\leq a_{ij} \leq a_{ij}; \\ x_j &\leq x_j \leq x_j; \\ i &=\overline{1, n}, j=\overline{1, m}; \\ F &= \sum_{j=1}^m c_j x_j; j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (2)$$

де F — масова частка цукрози в дифузійному соку, % до маси буряків (далі % до м.б.); x — витрати матеріальних потоків або їхніх компонент (цукрози, сухих речовин тощо); a_{ij} — коефіцієнти співвідношення і відбору компонент потоків (чистота, бірікс, частка втрат цукрози та ін.); x_j, x_j — нижні та верхні межі витрат матеріальних потоків та

їхніх компонент; a_{ij} ; a_{ij} — нижні та верхні межі коефіцієнтів співвідношення компонент потоків; b_j — кількість j -ї компоненти потоку; c_j — оцінювальний коефіцієнт змінної x_j .

Для повної форми моделі (2) ідентифікатори її параметрів у символічній його частині мають такі смислові позначення:

для типових змінних, % до м.б.:

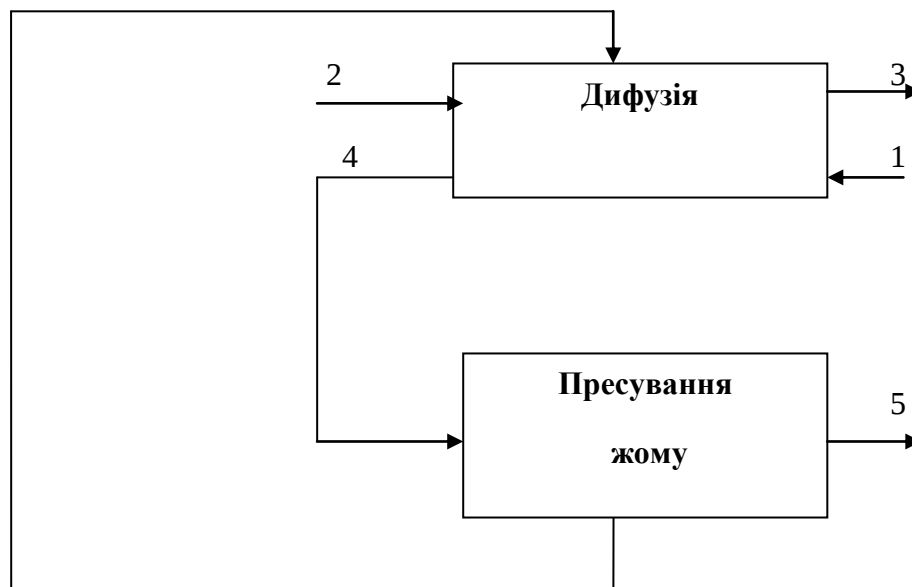
S — (Sugar) цукор, N — (No sugar) нецукри, D — (Dry) сухі речовини, W — (Water) вода;

для окремих змінних:

MK — м'якоть бурякової стружки, % до м.б; WSV — зв'язана вода буряків, % до м.б; SOK — рідка частина потоку, %.

Допоміжні змінні CX1, CX2, CX3, CX4, NY1, NY2, NY3, NY4 використовуються для лінеаризації залежності Сіліна $S4x1=f(F3x1)$, де $S4x1$ — кількість цукрози на 1 кг цукру в буряках, $F3x1$ — відкачка на 1 кг нормального соку.

Схема матеріальних потоків дифузійного відділення зображена на *рисунку*.



Функціональна схема розподілу матеріальних потоків : 1 — бурякова стружка; 2 — вода; 3 — дифузійний сік; 4 — свіжий жом; 5 — пресований жом; 6 — жомопресова вода

У цифровій частині ідентифікатора моделі вказується номер потоку відповідно до функціональної схеми (див. *рисунок*). Наприклад, SOK4 — рідка частина потоку 4, тобто свіжого жому.

Далі подамо модель (2), яка раніше була записана у формалізованому вигляді, у повній формі рівнянь (нерівностей):

$$E1 \ F1=100$$

$$E2 \ MK1-0.047F1=0$$

$$E3 \ S1-0.168F1=0$$

$$E4 \ UN3-0.0025F1=0$$

$$E5 \ MK1+WSV1+SOK1-F1=0$$

$$E6 \ SOK1-D1-W1=0$$

$$E7 \ S4-16.8S4x1=0$$

E8 $D1-S1-N1=0$
 E9 $F3-93F3x1=0$
 E10 $SOK1-0.93F1=0$
 E11 $WSV1+0.015F1<0$
 E12 $WSV1-0.04F1<0$
 E13 $S1-0.85D1=0$
 E14 $-F4+0.78F1<0$
 E15 $F4-0.83F1<0$
 /* ДИФУЗИЯ */
 E16 $F1+W2-F3-F4+F6V=0$
 E17 $D1-D3-D4+D6V=0$
 E18 $N1-N3-N4+N6V=0$
 E19 $S1-S3-S4+S6V-UN3=0$
 E20 $D3-S3-N3=0$
 E21 $SOK4+MK1-F4=0$
 E22 $CX1<0.024$
 E23 $CX2<0.0118$
 E24 $CX3<0.0046$
 E25 $CX4<0.0034$
 E26 $-NY1-NY2-Ny3-Y4+F3x1=1.185$
 E27 $CX1+CX2+CX3+CX4+S4x1=0.057$
 E28 $NY1-4.95CX1=0$
 E29 $NY2-10.25CX2=0$
 E30 $NY3-18.72CX3=0$
 E31 $NY4-31.25CX4=0$
 /* ПРЕСУВАННЯ ЖОМУ */
 E32 $F6+F5-F4=0$
 E33 $D6+D5-D4=0$
 E34 $N6+N5-N4=0$
 E35 $S6+S5-S4=0$
 E36 $W6+W5-W4=0$
 E37 $MK1+S4+N4+W4-F4=0$
 E38 $0.93MK1+S4+0.93N4+0.07W4=0$
 E39 $MK1+S5+N5+W5-F5=0$
 E40 $0.85MK1+0.85S5+0.85N5+0.85W5=0$
 E41 $S6+N6+W6-F6=0$
 E42 $F6V-0.96F6=0$
 E43 $N6V-0.96N6=0$
 E44 $S6V-0.96S6=0$
 E45 $S6+N6-D6=0$
 E46 $S5+N5-D5=0$
 E47 $S4+N4-D4=0$
 E48 $-S3+0.82D3<0$
 E49 $S3-0.869D3=0$
 E50 $SOK5+MK1-F5=0$
 E51 $F6+SOK-SOK4=0$

$$\begin{aligned} E52 - S6 + 0.4D6 &< 0 \\ E53 S6 - 0.7D6 &< 0 \\ E54 - S5 + 0.0025F1 &< 0 \\ E55 S5 - 0.0045F1 &< 0 \\ E56 \max S1 - UN3 - S5 \end{aligned}$$

У перших трьох позиціях зліва рівняння мають помітки E1-E56, на які в подальшому будемо посилалися.

Рівняннями (E 1-E 13) замодельовані вхідні характеристики бурякової стружки. На вхід дифузійного апарата надходить 100 кг (умовно, для зручності моделювання) стружки (рівняння E1). (В подальшому слово рівняння будемо опускати.) Масові частки компонент потоків подані в (E1-E56) не в % до м.б., а в частках одиниці. Наприклад, масова частка м'якоті стружки (МК = 4,7 % до м.б.) подана в (E2), а дигестії стружки ($S1 = 16,8$ % до м.б.) — в (E3). Необліковані втрати цукрози UN3 становлять 0,25 % до м.б. (E4). Стружка F1 складається з м'якоті МК1, зв'язаної води WSV1 і клітинного соку SOK1 (E5).

Далі в рівняннях: склад соку (E6), баланс сухих речовин у стружці (E8), зв'язок втрат цукрози у свіжому жомі (S4) з втратами на 1 кг цукру стружки $S4 \times 1$ (E7). Зв'язок відкачки дифузійного соку з відкачкою на 1 кг (E9). Допустимі межі концентрації зв'язаної води в стружці (E11, E12). Чистота бурякового соку стружки 85 % (E13). Допустимий вихід свіжого жому (78-83) % (E14, E15).

Покомпонентний матеріальний баланс мас вхідних і вихідних потоків і їхніх компонент: сухих речовин, нецукрів, цукрози відповідно подано в (E16-E19). Матеріальний баланс сухих речовин дифузійного соку (E20). Матеріальний баланс свіжого жому (E21).

Лінеаризація нелінійної залежності втрат цукрози на 1 кг цукру $S4 \times 1$ і відкачки $F3 \times 1$ на 1 кг нормального клітинного соку $S4 \times 1 = f(F3 \times 1)$ (E22-E31). Баланс мас потоків і їхніх компонент для жомового преса (E32-E40).

Покомпонентний баланс жомопресової води (E41). Облік втрат жомопресової води під час її оброблення (E44, E45). Покомпонентні баланси пресованого і свіжого жому (E46, E47). Чистота дифузійного соку (E48, E49). Баланси потоків пресованого і свіжого жому (E50, E51).

Допустимі границі чистоти жомопресової води (E52, E53) і втрат цукрози в пресованому жомі (E54, E55).

Функція цілі — максимізація масової частки цукрози в дифузійному соку (E56).

На основі принципів формалізації моделі відділення дифузії автори проводять наукові дослідження для розроблення наступних її розділів з урахуванням решти відділень ТК цукрового виробництва.

Здійснюється програмування бази знань як інтелектуальної надбудови для сімплекс-моделі, щоб імітувати її роботу в середовищі експертної оболонки демонстраційного макета ГЕС як підсистеми підтримки розв'язання неформалізованих задач при адаптації моделі оптимізації розподілу матеріальних потоків ТК. Паралельно проводяться аналіз, вибір і дослідження використання стандартних оболонок при створенні гібридної експертної системи.

У розглянутій лінеаризованій моделі розподілу потоків допустимі межі області розв'язань безпосередньо встановлюються експертом-технологом при створенні та коригуванні моделі. Якщо вона несумісна або потрібно поліпшувати показники регла-

менту роботи ТК, то користувач ГЕС змінює окремі величини меж багатокутника множини розв'язань задачі на основі даних про виробничу ситуацію і свого досвіду.

Правила бази знань для моделювання досвіду експерта-технолога реалізують принципи теорії нечітких множин з використанням фуцці-моделі (Fuzzy Model) [7]. Отже, можна запрограмувати дії експерта для поліпшення розв'язання сімплекс-моделі методом логічного вибору допустимих меж області розв'язань задачі. В теорії нечітких множин математичний формалізм базується на лінгвістичних величинах, тобто словесних характеристиках числових діапазонів змінних (технологічних параметрів). Наприклад, температуру в дифузійному апараті на основі нечітких множин можна виразити лінгвістичними величинами: низька, середня, вища за середню, висока і т.д.

Зв'язок числових значень діапазонів шкал і лінгвістичних величин змінних при моделюванні знань забезпечується функціями належності, ординатами якої є величини від 0 до 1. Згідно з цим принципом причинно-наслідкові зв'язки ЯКІЩО—ТОДІ, які характерні для мислення людини, можна виражати словесними ланцюжками за допомогою логічних зв'язок І, АБО.

Результат нечіткого логічного висновку перетворюється в чітке число на основі процедури де- фуцціфікації за принципом визначення абсциси центра ваги площі, окреслюваної вихідною функцією належності.

Ідея нечіткої структури лінгвістичних величин у моделюванні знань дала можливість зафіксувати у базі знань досвід експертів в означеній предметній області. В даному випадку формалізовану модель лінійного програмування можна доповнити рядом неформалізованих моделей бази знань. Наприклад, при оптимізації економічних показників дифузійної установки замість прямих нижньої і верхньої меж втрат цукрози в пресованому жомі можна ввести в модель обґрунтовану логічно верхню межу коефіцієнта відкачки, яка визначається за неформалізованою моделлю з лінгвістичними „ величинами.

Для фуцці-моделі бази знань з прогнозування коефіцієнта відкачки використовують змінні, які виражаються лінгвістичними величинами і числовими значеннями діапазонів шкал, зв'язаними функціями належності, а саме: витрати бурякової стружки; дигестію бурякової стружки; категорію будяків; якість процесу дифузії;

відхилення втрат цукрози від норми в пресованому жомі;

витрати газу (мазуту);

витрати пари на перший корпус випарної установки.

Нижче наведено результати розв'язування задачі оптимізації розподілу потоків дифузійного відділення ТК цукрового виробництва:

F1=100MK1=4.7S1=16.8UN3=0.18WSV1=2.3SOK1=93D1=19.5349W1=73.4651
S4=0.508778S4x1=0.030284N1=2.73488F3=122.912F3x1=1.32163F4=81
W2=57.2854F6V=16.6267D3=18.6301 D4=0.97 D6V=0.065253 N3=2.31014N4=0.461222
CX1=0.024 N6V=0.036474 S3=16.32 S6=0.208778 SOK4=76.3 CX2=0.002715 CX3=0
CX4=0 NY1=0.1188NY2=0.027834 NY3=0NY4=0F6=47.0976 F5=33.9024 D6=0.245622
D5=0.724378 N6=0.036843 N5=0.424378 S5=0.3 W5=28.478 W6=46.852 W4=75.33
S6V=0.206691 SOK5=29.2024

Змінюючи формулювання функції цілі в моделі (E56), можна встановлювати інші вимоги при оптимізації розподілу потоків ТК з урахуванням ринкової ситуації, цін на цукор, паливо, реагенти та інші допоміжні матеріали.

Висновки.

1. Запропоновано методологію формалізації моделей розподілу потоків ТК для цукрового виробництва на базі лінійного програмування і бази знань в середовищі оболонок експертних систем.
2. У демонстраційному макеті ГЕС для підсистеми підтримки розв'язування неформалізованих задач при адаптації моделі оптимізації розподілу матеріальних потоків ТК програмно проімітовано середовище експертної оболонки з базою знань. Наведено розв'язання числового прикладу лінеаризованої моделі оптимізації розподілу потоків ТК на прикладі дифузійного відділення.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Рот М.* Интеллектуальный автомат: компьютер в качестве эксперта: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 80 с.
2. *Герасимов В.М., Тарасов В.А., Токарев И.В.* Человеко-машинные системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта. — К.: Наук. думка, 1993. — 184 с.
3. *Мешалкин В.П.* Экспертные системы в химической технологии. — М.: Химия, 1995. — 367 с.
4. *Данцинг Дж.* Линейное программирование, его применение и обобщение. — М.: Прогресс, 1966. — 600 с.
5. *Дудников Е. Е., Цодиков Ю. М.* Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством (Применение вычислительных машин в исследованиях и управлениях производством). — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
6. *Гербут К.Ф., Капац А.В., Мусияка Е.В.* Выбор рационального режима проведения технологического процесса на свекло-сахарном заводе как задача АСУ ТП / Сб. науч. тр. — М.: ВНИИСП, Снижение расхода сырья на производство сахара: 1983. — 67-73 с.
7. *Заде ЛА.* Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир,