

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



САМОЙЛЕНКО ЮЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 517.977.5:663.14

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИМИ
ПРОЦЕСАМИ ВИРОЩУВАННЯ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ДРІЖДЖІВ**

Спеціальність 05.13.07

Автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Трегуб Віктор Григорович,
Національний університет харчових технологій, м. Київ,
професор кафедри інтегрованих автоматизованих систем управління.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Хобін Віктор Андрійович,
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів.

доктор технічних наук, професор
Кузьменко Борис Володимирович,
Академія муніципального управління, м. Київ,
професор кафедри обчислювальної техніки і інформатики.

Захист відбудеться «17» грудня 2015 року о 13-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий «12» листопада 2015 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради
К 26.058.05,
к.т.н., доцент



О.М.М'якшило

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В останні роки розвиток дріжджової промисловості полягає у вдосконаленості технологічних процесів, що дає змогу підвищити якість дріжджів та продуктивність апаратів. Процес вирощування хлібопекарських дріжджів вимагає підтримання основних факторів процесу відповідно до обраного технологічного регламенту, відхилення хоча б одного з них призводить до зниження генеративної активності дріжджів, що в свою чергу впливає на вихід їх біомаси.

Апарати періодичної дії (АПД), в яких відбуваються процеси з між фазними переходами (ПМФ) мають певні особливості, які роблять завдання їх оптимального управління доволі складним. При оптимальному керуванні АПД у разі, коли його продуктивність обмежує продуктивність всього виробництва необхідно мінімізувати тривалість циклу АПД, а коли такого обмеження немає достатньо максимізувати питомий вихід готового продукту, враховуючи значну долю сировини у його собівартості. Тому розв'язання завдання з двома такими критеріями управління є актуальним.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є створення оптимальної системи керування апаратом для вирощування хлібопекарських дріжджів періодичної дії в залежності від виробничої ситуації, яка пов'язана з узгодженням роботи сепараційного відділення.

Для досягнення вказаної мети визначені такі основні задачі:

- системний аналіз апарату для вирощування дріжджів, як об'єкта керування;
- аналіз та синтез математичних моделей процесу;
- розробка комплексу задач оптимального керування, що включає:
 - вибір критерію оптимального керування в залежності від виробничої ситуації;
 - мінімізація тривалості циклу;
 - максимізація виходу готового продукту;
- реалізація системи оптимального керування апаратом для вирощування дріжджів.

Об'єкт дослідження – процеси керування апаратом для вирощування хлібопекарських дріжджів періодичної дії.

Предметом дослідження є способи оптимального керування апаратом періодичної дії для вирощування хлібопекарських дріжджів.

Наукова новизна отриманих результатів:

❖ вперше розроблено параметричну логіко-динамічну модель періодичного процесу вирощування дріжджів;

❖ вперше побудовані діаграми класів, послідовності та діяльності з використанням мови моделювання UML і розроблено алгоритм логічного управління апаратом періодичної дії для вирощування хлібопекарських дріжджів;

❖ вперше запропоновано ситуаційний підхід до вибору критерію керування і відповідного режиму функціонування апарата для вирощування

дріжджів, що працює періодично, який полягає в узгодженості роботи відділень вирощування дріжджів та сепарації;

❖ удосконалено кінетичну модель процесу вирощування хлібопекарських дріжджів шляхом визначення рівнянь зв'язку її параметрів зі змінними стану процесу вирощування;

❖ запропонована дворівнева апаратно-програмна реалізація системи оптимального керування апаратом для вирощування хлібопекарських дріжджів в залежності від виробничої ситуації.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена система оптимального керування періодичним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів, яка в залежності від виробничої ситуації мінімізує тривалість циклу апарата або максимізує питомий вихід готового продукту .

Результати роботи передані до розгляду для впровадження на ПрАТ «Компанія Ензим» та використовуються в навчальному процесі Національного університету харчових технологій кафедри автоматизації процесів управління.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових конференціях у Національному університеті харчових технологій в 2010-2015 рр.; міжнародних конференціях з автоматичного керування «Автоматика-2010» (м. Харків), «Автоматика-2011» (м. Львів), «Автоматика-2012» (м. Київ), «Автоматика-2013» (м. Миколаїв), «Автоматика-2014» (м. Київ).

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 18 друкованих праць: 4 статті в фахових виданнях, з яких одна входить до науко-метричних баз: Index Copernicus, EBSCOhost, CABI Full Text, Universal Impact Factor, Google Scholar (ISSN: 2225-2924), одна стаття в міжнародному журналі та 13 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел з 130 найменувань і 11 додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи 136 стор., з яких зміст викладено на 110 стор. друкованого тексту, містить 42 рисунка, 3 таблиці та 11 додатків.

Особистий внесок у розробку наукових результатів. Усі основні положення та результати дисертаційної роботи, що захищаються, одержані автором самостійно. У наведених публікаціях здобувачем виконано наступне: розроблена параметрична логіко-динамічна модель періодичного процесу вирощування хлібопекарських дріжджів [2]; розроблені діаграми UML необхідні для синтезу логічної підсистеми [2]; запропоновано метод визначення кінетичних параметрів, а також визначені регресійні залежності для форм-фактора, який залежить від початкових параметрів процесу та сталої часу, яка пов'язана з параметрами, що впливають на швидкість проходження процесу вирощування хлібопекарських дріжджів [4,5]; запропоновані задачі оптимального керування процесами з між фазними переходами у залежності від варіантів виробничої ситуації [1]; розроблена структура системи керування процесом вирощування дріжджів в залежності від виробничої ситуації [3].

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Показана актуальність роботи з точки доцільності оптимального керування періодичним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів. Сформована мета та завдання досліджень. Визначені наукова новизна отриманих результатів. Вказано на апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

Перший розділ присвячений аналізу апарата для вирощування хлібопекарських дріжджів, як об'єкта керування. Проведено аналіз математичних моделей процесу вирощування та існуючих систем автоматизації. Проведений аналіз математичних моделей показав, що вони не охоплюють весь можливий діапазон зміни термодинамічних сил і часових стадій розвитку процесу, та не враховують те, що періодичний процес може проходити як при наявності періоду індукції (латентного періоду), так і при його відсутності.

Проведений аналіз дозволив сформулювати мету дослідження. Вона полягає у формуванні системного підходу до моделювання періодичного процесу та його оптимального керування.

Другий розділ присвячений моделюванню періодичного процесу вирощування товарних хлібопекарських дріжджів та визначенню регресійних залежностей для кінетичних параметрів процесу.

Математична модель апарата періодичної дії (АПД) має логіко-динамічну структуру (ЛДС). Логічна підсистема апарата представлена у вигляді табличної параметричної логіко – динамічної моделі (табл. 1), де використовуються наступні позначення: p_1, p_2, \dots - логічні умови; U_1^1, U_2^1, \dots – команди на відкриття клапанів подачі меляси; U_1^0, U_2^0, \dots - команди на закриття клапанів подачі меляси; A_1, A_2, \dots - позиційні оператори; $D^{\tau_1}(U_3), D^{\tau_2}(U_2), \dots$ - відповідно функції затримки на час τ_1 , після відкриття клапана U_3 , що визначається технологічним регламентом, так як аміачна вода подається неперервно на протязі визначеного інтервалу часу; функція затримки на час τ_2 після відкриття клапана U_2 , що визначається технологічним регламентом, так як меляса подається неперервно в ферментер протягом даного інтервалу часу до початку стадії дозрівання.

Так, наприклад, розглянемо операцію у пункті 1.6 табл.1. Подача засівних дріжджів у ферментер відбувається після виконання логічної умови $p_6(pH_n \wedge t_n)$, яка вказує на те, що повинні бути забезпечені одночасно відповідні початкові значення pH_n та температури середовища t_n для засіву дріжджів. Даній умові відповідає позиційний оператор A_6 , якому відповідає команда U_8^1 на відкриття клапана подачі засівних дріжджів.

На даний момент у зв'язку із розвитком та впровадженням сучасної мікропроцесорної техніки, характерною особливістю сучасних технологічних систем, включаючи і системи періодичного вирощування дріжджів, є підвищення їх логічної складності. Тому для моделювання логічної підсистеми ЛДС апарата для вирощування дріжджів використана об'єктно-орієнтована

мова моделювання UML (Unified Modeling Language). В роботі застосовані наступні типи діаграм, які в подальшому використовуються для синтезу алгоритму логічного управління апаратом: *класів*, яка показує структуру системи; *послідовності*, яка показує часову послідовність стадій та операцій процесу; *діяльності*, що опису зміну стану об'єкта під дією визначених внутрішніх дій.

Таблиця 1. Параметрична ЛДМ

Стадія і операція	Логічна умова	Управління		Реакція об'єкта
		Оператори	Команди	
Стадії 1. Складка 1.1. подача води, меляси, аміачної та ортофосфорної кислоти	$p_1(h_0 \wedge \bar{U}_1 \wedge \bar{U}_2 \wedge \bar{U}_3 \wedge \bar{U}_4 \wedge \bar{U}_5 \wedge \bar{U}_6 \wedge \bar{U}_7 \wedge \bar{U}_8 \wedge \bar{U}_9 \wedge \bar{U}_{10} \wedge \bar{U}_{11} \wedge \bar{U}_{12} \wedge \bar{U}_{13} \wedge \bar{U}_{14} \wedge \bar{U}_{15} \wedge \bar{U}_{16} \wedge \bar{U}_{17} \wedge \bar{U}_{18} \wedge \bar{U}_{19} \wedge \bar{U}_{20} \wedge \bar{U}_{21} \wedge \bar{U}_{22} \wedge \bar{U}_{23} \wedge \bar{U}_{24} \wedge \bar{U}_{25} \wedge \bar{U}_{26})$	A_1	U_5^1 $U_1^1 \wedge U_2^1$ $U_3^1 U_4^1$	$h = f_1(Q_{в0}, G_{м0}, G_{а.в.0}, Q_{орф.к.0}, \tau)$
1.2. Закінчення подачі води	$p_2(Q_{в0})$	A_2	U_5^0	
1.3. Закінчення подачі меляси	$p_3(G_{м0})$	A_3	$U_1^0 U_2^0$	
1.4. Закінчення подачі аміачної води	$p_4(G_{а.в.0})$	A_4	U_3^0	
1.5. Закінчення подачі ортофосфорної кислоти	$p_5(Q_{орф.к.0})$	A_5	U_4^0	
1.6. подача засівних дріжджів	$p_6(pH_n \wedge t_n)$	A_6	U_8^1	$h = f_2(V_1, G_{з.д.}, \tau)$ $B = f_3(V_1, G_{з.д.}, pH_n, t_n, \tau)$
1.7. Закінчення подачі засівних дріжджів	$p_7(Q_{з.д.})$	A_7	U_8^0	

Для класу *Controller* діаграма діяльності наведена на рис. 1. Дію зображують прямокутником із заокругленими кутами, а умови переходу від

операції до операції записують у квадратних дужках біля стрілок, що зображують переходи.

Початок процесу вирощування хлібопекарських дріжджів характеризується порожнім апаратом h_0 та закритими клапанами $U10_{off} - U26_{off}$. Після виконання цієї умови розпочинається стадія Skladka та відкривається клапан $U5$ подачі води. Коли подано заданий об'єм води даний клапан закривається при виконанні умови Q_{60} , що записана у квадратних дужках. Далі, коли клапан $U5$ закривається $U5_{off}$, відкриваються клапани подачі меляси до апарату $Open U1$ та $Open U2$. Надалі перехід від дії до дії здійснюється аналогічно при виконанні умов переходу.

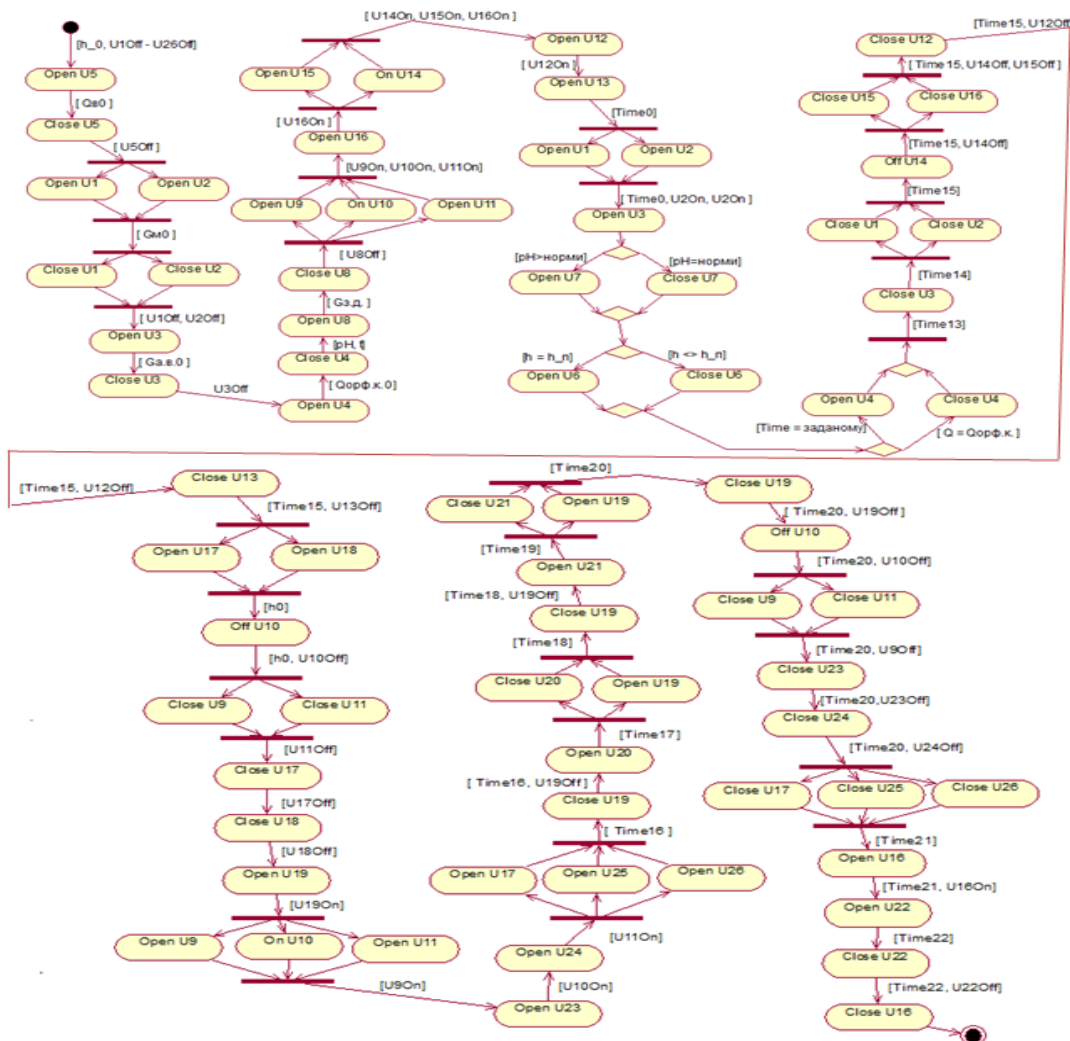


Рис. 1

Перелічені діаграми дозволяють відобразити зв'язки як між апаратом вирощування дріжджів та контролером, так і всередині самого апарату і з їх допомогою синтезувати програму логічного керування апаратом.

Періодичний процес вирощування хлібопекарських дріжджів може проходити як при наявності періоду індукції (латентного періоду), так і при його відсутності. Таким вимогам відповідає кінетичне рівняння з нелінійної часової складової, що містить кінетичні параметри n і θ .

$$X = X_M - (X_M - X_{II}) \exp\left[-(\tau/\theta)^n\right], \quad (1)$$

де X , X_M , X_{II} – величини, що характеризують кількість нової фази відповідно: поточну, максимальну і початкову; n і θ – кінетичні параметри; τ – час.

Перевірка можливості використання рівняння (1) для опису процесу вирощування хлібопекарських дріжджів проводилась за експериментальними даними, отриманими ВНТІЦ на Московському дріжджовому заводі та автором на дріжджовому заводі ПрАТ «Компанія Ензим».

На рис.1 та 2 наведені експериментальні та розрахункові залежності X від τ при таких значеннях кінетичних параметрів: $\theta_{екс} = 4.9$ год, $n_{екс} = 1.08$ (рис.1) і $\theta_{екс} = 4.84$ год, $n_{екс} = 2.05$ (рис. 2). Середня похибка по масиву оброблених даних становить 5 %.

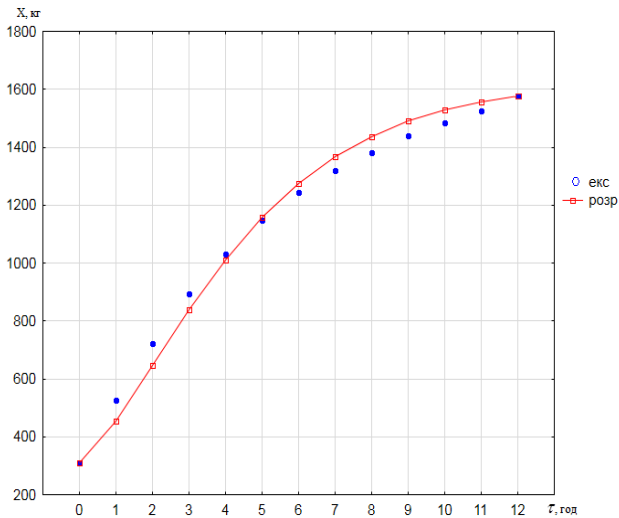


Рис. 2

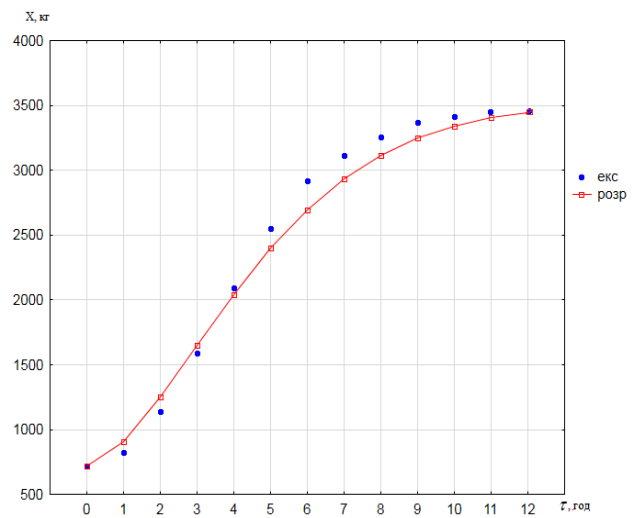


Рис. 3

На основі експериментальних даних з використанням метода найменших квадратів визначалися регресійні рівняння для кінетичних параметрів n (2) і θ (3). При цьому виходили з того, що при обробці застосовувалися числові масиви даних про кількість засівних дріжджів; години вирощування; температуру та pH культурального середовища; вміст алкоголю культурального середовища; концентрацію та приріст біомаси; кількість дріжджів щогодини; набір культурального середовища; тренди витрат меляси, аміачної води та ортофосфornoї кислоти; концентрацію цукрів у мелясі.

$$n = f(t_n, pH_n, zd_n) = 0.142441 \cdot zd_n - 0.00747 \cdot t_n^2 + 0.114989 \cdot t_n \cdot pH_n + 0.021825 \cdot t_n - 0.43805 \cdot pH_n^2, \quad (2)$$

де t_n – початкова температура культурального середовища, що змінювалась в діапазоні 28...35 °C; pH_n – початкове рН культурального середовища що змінювалось в діапазоні 3,8...5,5 од. рН; zd_n – концентрація засівних дріжджів, що змінювалась в діапазоні 4-12 г/л. Коефіцієнт детермінізації становить $R^2 = 0.953342$.

$$\theta = f(Fn, pH, Kц, t) = 0.3317 \cdot Fn^2 + 2.3168 \cdot pH^2 - 0.2861 \cdot Kц - 0.2114 \cdot t - 0.2685 \cdot Fn \cdot pH^2, \quad (3)$$

де pH – рН культурального середовища в діапазоні зміни 4.0–5.5 од. рН; $Kц$ – концентрація цукру в мелясі в діапазоні зміни 42.2–46,6 %, Fn – витрата повітря

на аерацію 1 м^3 культурального середовища в діапазоні 7-12.5 $\text{ м}^3/\text{год}$, t -температура культурального середовища в діапазоні 30-35 $^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт детермінізації становить $R^2 = 0.989$.

В **третьому розділі** розв'язана двох критеріальна задача оптимального керування апаратами періодичної дії для процесу вирощування хлібопекарських дріжджів.

Для узгодження роботи апаратів періодичної дії (АПД) з неперервно функціонуючим виробництвом їх організують в технологічні комплекси (ТК), які за умови неперервної подачі сировини чи початкового напівпродукту вивантажують готовий продукт чи напівпродукт після вивантаження інших апаратів. В залежності від співвідношення поточної продуктивності АПД і продуктивності наступної за технологічним потоком установки (НТПУ) можливі дві ситуації:

перша – коли АПД є «вузьким місцем» виробництва і продуктивність НТПУ довгостроково перевищує продуктивність АПД. Для подолання такої ситуації необхідно максимізувати продуктивність апаратів періодичної дії;

друга – коли продуктивність АПД не обмежує продуктивність виробництва, тоді треба обрати режим ефективного використання корисних компонентів вхідного напівпродукту, максимізуючи вихід готового продукту і таким чином технологічну складову собівартості виробництва.

Постановка задачі оптимального керування (ЗОК) такими процесами у залежності від наведених варіантів виробничої ситуації подана у табл.2

Таблиця 2. Варіанти розв'язання задачі оптимізації

1-ий варіант	2-ий варіант
$\tau_u \rightarrow \min$ (4)	$\beta_u \rightarrow \max$ (5)
$b_u = b_u^*$ (6)	$\tau_u^* \geq \tau_u$ (7)
$\beta_u \geq \beta_{u, \text{дон}}$ (8)	$b_u / \tau_u \geq \left(b_u / \tau_u \right)_{\text{дон}}$ (9)

По першому варіанту, враховуючи постійний робочий об'єм апарата і задану кількість готового продукту b_u^* , отриманого за цикл, для максимізації продуктивності апарата достатньо мінімізувати тривалість циклу τ_u апарата при питомому виході готового продукту $\beta_u = b_u / g_u$ (g_u – кількість початкового напівпродукту) не нижче допустимого $\beta_{u, \text{дон}}$.

Другий варіант реалізується з допомогою максимізації β_u при обмеженнях, які накладаються на тривалість циклу та продуктивність апарату b_u / τ_u . Критерієм переходу з одного варіанту на інший є оцінка співвідношення продуктивності АПД з продуктивністю наступного за потоком технологічного обладнання.

Реалізація ЗОК обох варіантів можлива з допомогою кінетичної моделі міжфазних переходів, яка в цьому випадку стає одночасно і динамічною

моделлю, причому зміною технологічних режимів досягаються такі значення кінетичних параметрів, які доставляють оптимум критерію керування.

Ситуаційний підхід щодо керування дріжджовирощувальним апаратом періодичної дії базується на логічній схемі, за допомогою якої проводиться: діагностування ситуації, що пов'язані із узгодженістю роботи апарата та неперервно функціонуючим виробництвом і визначення шляхів досягнення цілі; виявлення чинників, які впливають на рішення щодо ситуації.

Параметрична схема керування дріжджовирощувальним апаратом за ситуаційним підходом наведена на рис. 4. На параметричній схемі змінними керування для стадії складка є початкові значення: витрати меляси G_{m0} , витрата аміачної води $G_{ам.в.0}$, витрата ортофосфорної кислоти $Q_{орф.к0}$ та об'єму води $V_{в0}$; для стадії накопичення: витрата меляси G_m , витрата аміачної води $G_{ам.в.}$, витрата ортофосфорної кислоти $Q_{орф.к}$ та витрата повітря на аерацію культурального середовища $G_{нов}$. До збурюючих впливів віднесено концентрацію цукрів $Kц$.

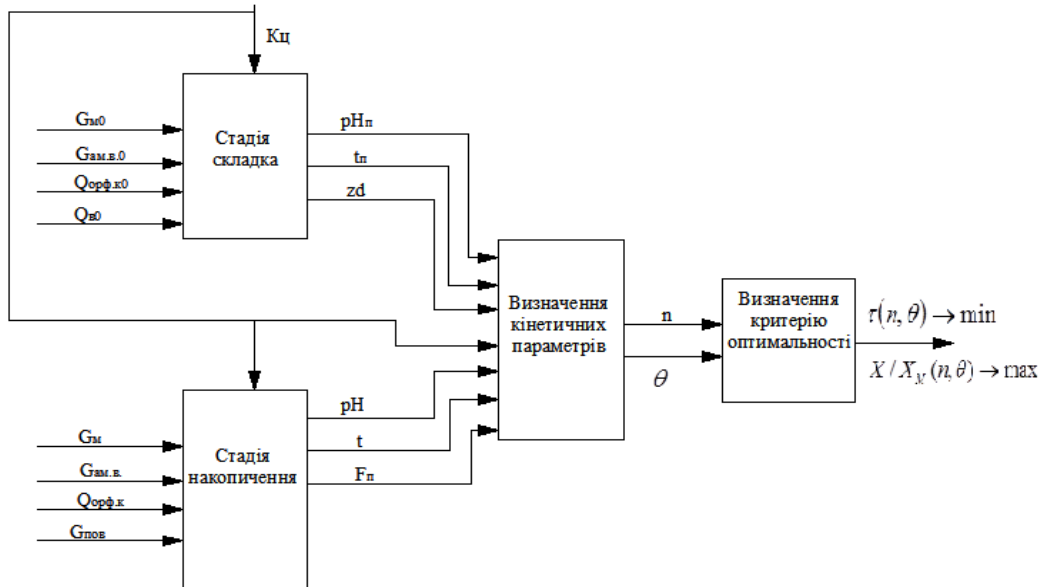


Рис. 4

Перемінними стану процесу є параметри, які входять до регресійних залежностей кінетичних констант n та θ , а саме: початкові значення температури t_n та рН середовища pH_n , та параметри процесу: температура t , pH , концентрація цукрів в мелясі $Kц$ та витрата повітря на аерацію 1 м^3 культурального середовища $Fп$.

Виходячи із параметричної схеми постановки задачі оптимального керування за ситуаційним підходом зводиться до наступного: в залежності від обраного режиму керування мінімізації тривалості циклу або максимізації виходу готового продукту обираємо варіант оптимального режиму роботи апарату для вирощування хлібопекарських дріжджів. Відповідно до вибраного варіанту підбираються відповідні значення змінних керування.

1. Мінімізація тривалості процесу періодичного процесу. Для розв'язання цієї задачі представимо кінетичне рівняння в наступному вигляді:

$$\tau = \theta \left\{ \ln \left[\frac{X_M - X_{II}}{X_M - X_K} \right]^{1/n} \right\} \quad (10)$$

звідси:

$$\tau(\theta) \rightarrow \inf \Rightarrow \theta^* = \inf \theta \quad (11)$$

$$\tau(n) \rightarrow \inf \Rightarrow n^* = \begin{cases} \sup n, \text{ коли } X_K / X_M > A \\ \inf n, \text{ коли } X_K / X_M < A \end{cases} \quad (12)$$

$$(13)$$

де $A=1-0,368[1 - (X_{II}/X_M)]$. Вираз (13) через малий вихід дріжджів практичного значення немає, тому мінімізація тривалості циклу реалізується через вирази (11) та (12).

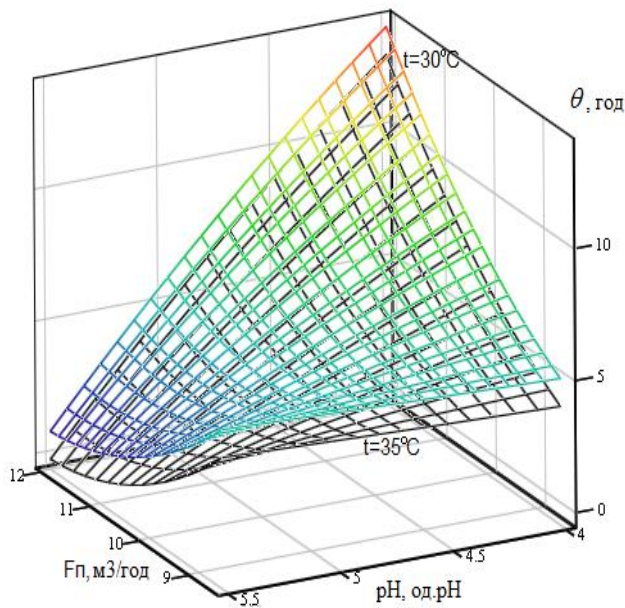


Рис. 5

При пошуку вирішення задачі на значення змінних стану та керування накладаються обмеження: $4.0 \leq pH \leq 5.5$ од. рН, $42.2 \leq K_u \leq 46.6$ %, $30 \leq t \leq 35$ °С, $8.5 \leq F_n \leq 12.5$ (м³/год)/м³ культурального середовища.

Дослідження впливу параметрів на значення постійної часу наведено на рис. 5 при $K_u=45$ % та рис. 6 при $t=32$ °С. Як видно із рис. 5, збільшення температури процесу вирощування у зазначених вище межах призводить до зменшення сталої часу, а мінімум функції лежить в діапазонах зміни повітря на аерацію 1 м³ культурального середовища 10-12 м³/год, що відповідає максимальній аерації, а рН середовища повинна бути максимальною та відповідати діапазону 5.0-5.5 од. рН. Відповідно до рис. 6, збільшення вмісту цукру у мелясі призводить до зменшення сталої часу θ в діапазонах зміни витрати повітря F_n та pH середовища, що відповідають максимальним значенням.

При моделюванні знаходження мінімальної постійної часу враховувались температура та концентрація цукру в мелясі та було визначено, що оптимальні

Знаходження мінімуму часу вирощування дріжджів призведе до зменшення виходу готового продукту, тому потрібно враховувати обмеження, які накладаються на вихід дріжджів і він повинен бути не менше допустимого. Розв'язання задачі зводиться до знаходження таких змінних стану регресійних залежностей, які дають змогу мінімізувати постійну часу та максимізувати форм-фактор.

Мінімізація постійної часу зводиться до наступного:

$$\theta = f(F_n, pH, K_u, t) \rightarrow \min \quad (14)$$

діапазони зміни параметрів повинні бути в наступних межах: $t=[31; 34] \text{ } ^\circ\text{C}$, $pH=[5.0; 5.5]$ од. рН, $F_n=[10.0; 11.8]$ ($\text{м}^3/\text{год}$)/(1м^3 к.с.).

Максимізація форм-фактора зводиться до наступного:

$$n = f(t_n, pH_n, zd_n) \rightarrow \max \quad (15)$$

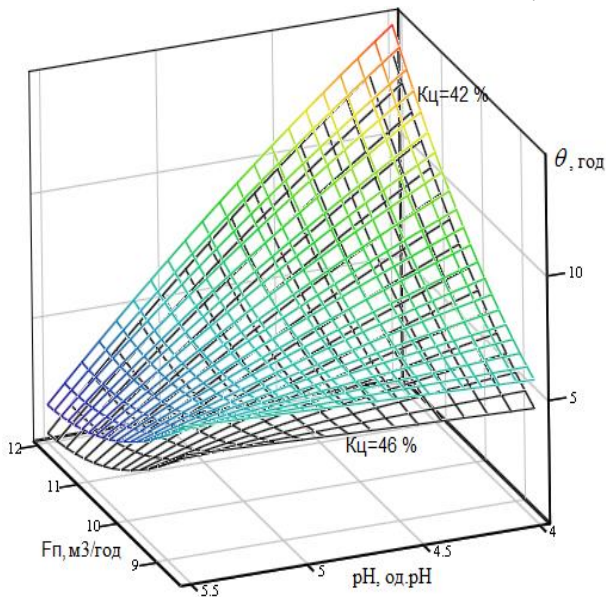


Рис. 6

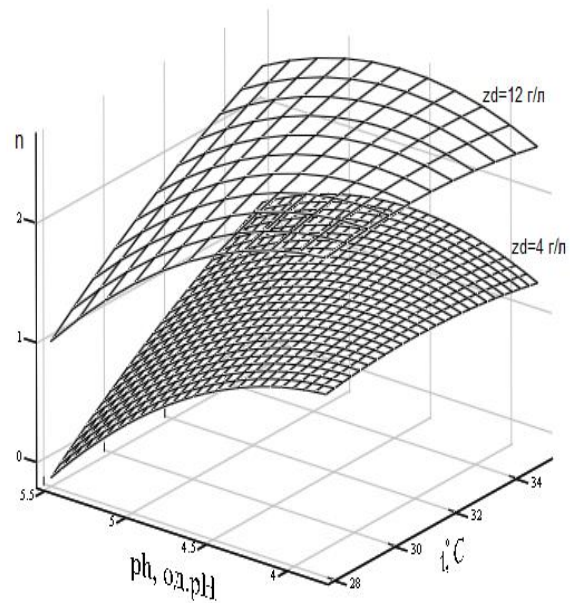


Рис. 7

Отже, максимум форм-фактора досягається при значеннях температури $t=[32; 34] \text{ } ^\circ\text{C}$ та $pH=[4.5; 5]$ од. рН в залежності від кількості засівних дріжджів, що вносяться у складку при наведених вище обмеженнях.

2. Максимізація продуктивності апарата для вирощування дріжджів.

Для розв'язання цієї задачі представимо кінетичне рівняння в наступному вигляді:

$$X / X_M = 1 - [1 - (X_{II} / X_M)] \exp[-(\tau/\theta)^n], \quad (16)$$

звідки:

$$X / X_M (\theta) \rightarrow \sup \Rightarrow \theta^* = \sup \theta \quad (17)$$

$$X / X_M (n) \rightarrow \sup \Rightarrow n^* = \begin{cases} \sup n, \text{ коли } \tau_{К.об} > \theta \\ \inf n, \text{ коли } \tau_{К.об} < \theta \end{cases} \quad (18)$$

$$(19)$$

де $\tau_{К.об}$ – обмеження на час закінчення процесу утворення і росту нової фази.

Отже, щоб максимізувати вихід готового продукту процесу вирощування хлібопекарських дріжджів потрібно максимізувати постійну часу та максимізувати коефіцієнт (форм-фактор) форми кінетичної кривої. До тривалості циклу роботи апарата входить час вирощування хлібопекарських дріжджів, який може коливатися в залежності від обраного режиму функціонування. При обмеженні (18) всі рекомендації зберігаються, а при обмеженні (19), вихід готового продукту менший за допустиме значення та практичного значення немає.

Максимізація постійної часу зводиться до наступного:

$$\theta = f(F_n, pH, K_c, t) \rightarrow \max \quad (20)$$

При пошуку рішення задачі у відповідності до технологічного регламенту та умов фізичної реалізації процесу, на значення змінних управління та стану накладаються наступні обмеження: $4.0 \leq pH \leq 5.5$ од. рН, $30 \leq t \leq 35$ °С, $42.2 \leq K\alpha \leq 46.6$ %, $8.5 \leq Fn \leq 12.5$ (м³/год)/(1м³ к.с.).

Варто проаналізувати вплив даних параметрів на сталу часу θ для її максимізації. Як видно із рис. 5 зменшення температури процесу вирощування призводить до збільшення сталої часу, а максимум функції лежить в діапазонах зміни повітря на аерацію 1 м³ культурального середовища 10-12 м³/год, що відповідає максимальній аерації, а рН середовища повинна бути максимальною та відповідати діапазону 4.0-5.0 од. рН.

Як видно із рис. 6, зменшення вмісту цукру у мелясі призводить до збільшення сталої часу θ в діапазонах зміни збільшення витрати повітря Fn та зменшення pH середовища.

При моделюванні знаходження максимальної постійної часу враховувались температура та концентрація цукру в мелясі та було визначено, що оптимальні діапазони зміни параметрів повинні бути в наступних межах: $t = [30; 35]$ °С, $pH = [4.5; 4.8]$ од. рН, $Fn = [8.5; 10.5]$ (м³/год)/(1м³ к.с.).

В четвертому розділі представлена структура автоматизованої системи керування апаратом періодичної дії вирощування дріжджів на основі ситуаційного підходу, технічна та програмна реалізація системи.

Оцінка ефективності функціонування системи у разі мінімізації тривалості процесу та максимізації продуктивності апарату визначається шляхом імітаційного моделювання всього процесу вирощування дріжджів в апараті періодичної дії з експериментальними та оптимальним параметрами, що визначені за відповідним алгоритмом. Результати моделювання динаміки зміни кількості накопичення біомаси, порівнюючи експериментальні та оптимальні значення, для мінімізації тривалості циклу наведені на рис. 8 та рис. 9, для максимізації продуктивності – рис. 10 та рис. 11.

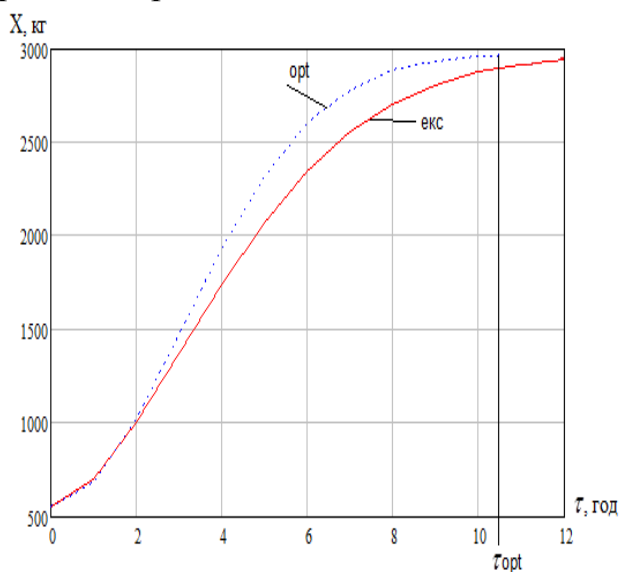


Рис. 8

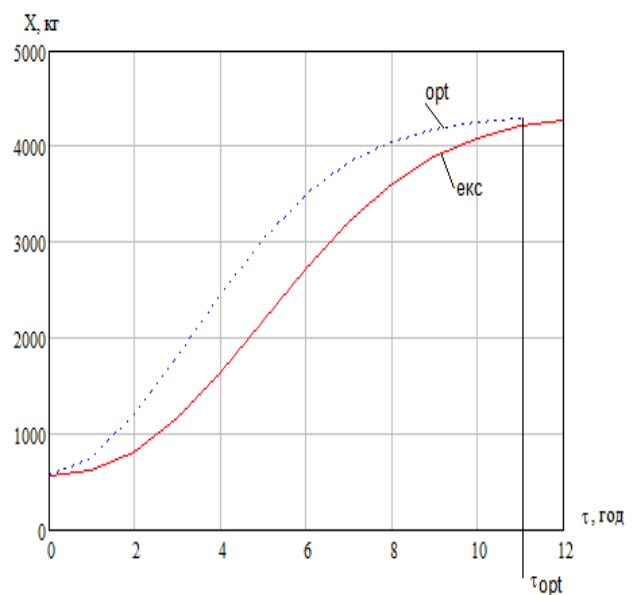


Рис. 9

Для рис. 8 оптимальні параметри: $t_n=32^0\text{C}$, $pH_n=4.2$ од. рН, $K\mu=45\%$, $t=32^0\text{C}$, $pH=5.0$ од. рН, $F_n=10.5$ (м³/год)/(1м³ к.с.), $\theta_{opt}=4.37$ год, $n_{opt}=1.9721$, $\tau_{opt}=10.2$ год. Тривалість процесу вирощування зменшується на 10 %.

Для рис. 9 оптимальні параметри: $t_n=32^0\text{C}$, $pH_n=4.2$ од. рН, $K\mu=45.4\%$, $t=32^0\text{C}$, $pH=5.0$ од. рН, $F_n=14.5$ (м³/год)/(1м³ к.с.), $\theta_{opt}=4.84$ год, $n_{opt}=1.9$, $\tau_{opt}=11$ год. Тривалість процесу вирощування зменшується на 8.3 %.

Загальне середнє значення ефекту мінімізації тривалості циклу становить 9 %, а всього циклу – 6 %.

Для рис. 10 оптимальні параметри: $t_n=32^0\text{C}$, $pH_n=4.2$ од.рН, $K\mu=43\%$, $t=30^0\text{C}$, $pH=4.5$ од.рН, $F_n=9.8$ (м³/год)/(1м³ к.с.), $\theta_{opt}=6.84$ год, $n_{opt}=2.14$, $(X/X_m)_{opt}=0.976$. Вихід дріжджів збільшився на 2.33 %.

Для рис. 11 оптимальні параметри: $t_n=32^0\text{C}$, $pH_n=4.2$ од.рН, $K\mu=45\%$, $t=32^0\text{C}$, $pH=4.5$ од.рН, $F_n=9.5$ (м³/год)/(1м³ к.с.), $\theta_{opt}=5.14$ год, $n_{opt}=1.45$, $(X/X_m)_{opt}=0.96$. Вихід дріжджів збільшився на 2.5 %.

Загальне середнє значення збільшення виходу дріжджів становить 2.4 %.

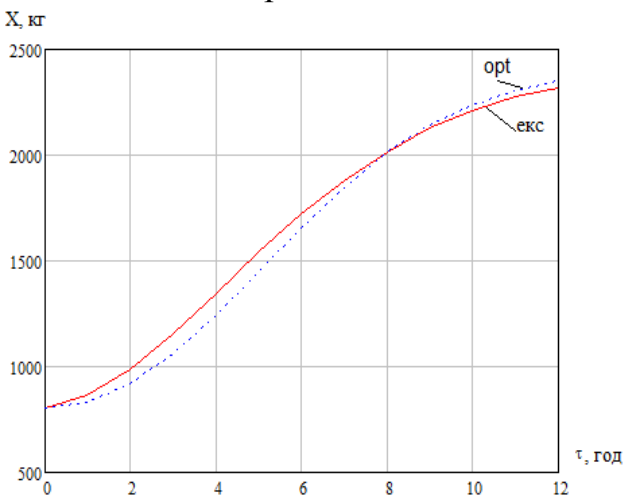


Рис. 10

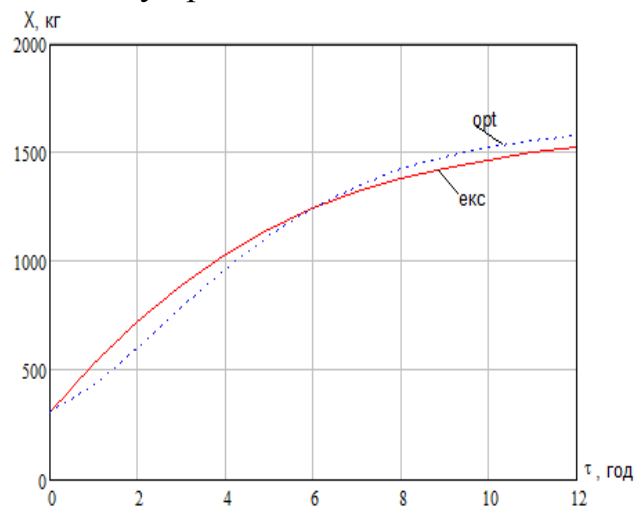


Рис. 11

На рис. 12 показана структурна схема системи оптимізації апарату для вирощування хлібопекарських дріжджів (АВХД), яка синтезована на основі сформованої цілі керування; класифікаційних ознак АВХД як об'єкта керування; наявності необхідних технічних засобів та вимірювальних перетворювачів для отримання достовірної інформації про керовані величини.

Нижній рівень представлений програмованим логічним контролером ПЛК, що здійснює автоматичне керування процесом відповідно до алгоритму логічного управління та локальними регуляторами: подачі меляси $P(G_m)$, аміачної води $P(G_{ам.в.})$, ортофосфорної кислоти $P(Q_{орф.к.})$, подачі повітря на аерацію культурального середовища $P(G_{нов.})$ та витрати холодної води для підтримки заданої температури в апараті $P(Q_{х.в.})$, завдання яким визначає динамічна підсистема на основі розв'язання задачі оптимального керування.

Верхній рівень системи забезпечує вирішення задачі оптимізації на основі критеріїв керування, виконуючі функції розпізнавання ситуацій та визначення керуючих дій відповідно до обраного критерію керування.

Критерій оптимізації змінюється в залежності від ситуації, що виникла на виробництві, тобто автоматизована система керування вибирає необхідний режим в залежності від ситуації, що визначається за вхідною поточною інформацією про завантаженість відділення сепарації. Отже, у блоці критеріїв знаходяться два критерії оптимізації: тривалість процесу вирощування та продуктивність апарату.

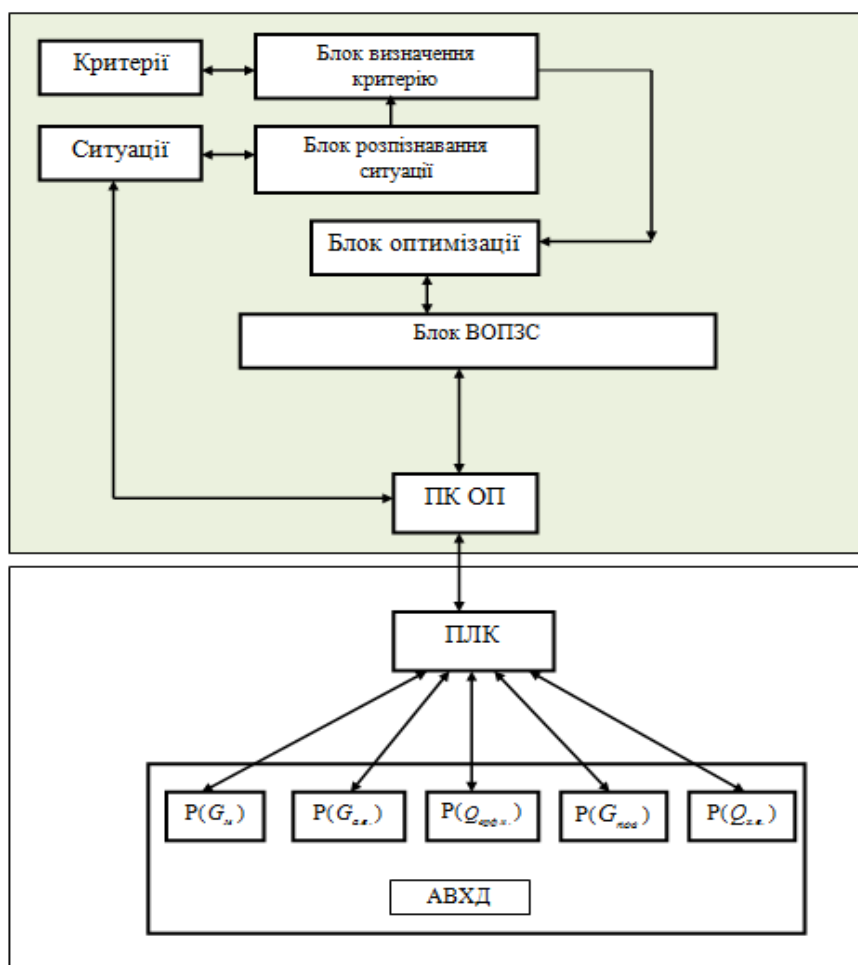


Рис. 12

В блоці оптимізації відповідно визначеній ситуації визначається оптимальний режим. В цей блок надходить інформація про вибір критерію керування. Комп'ютер розраховує за допомогою алгоритмів мінімізації тривалості циклу або максимізації виходу дріжджів оптимальні значення параметрів регресійних залежностей кінетичних констант, знаходячи таким чином оптимальні значення змінних стану. Відповідно до визначених оптимальних параметрів визначається технологічний режим проведення процесу, що реалізовується через надходження сигналів завдання на локальні регулятори.

Знаходження та розрахунок оптимальних режимів здійснюється за допомогою програм, які розроблені з використанням пакета MatLab для знаходження мінімальної тривалості циклу та максимізації виходу дріжджів.

Реалізація розробленої системи можлива шляхом модифікації існуючих систем, пристосувавши їх до обраних алгоритмів.

Для реалізації оптимального керування обрано контролер фірми Schneider Electric Modicon M340, що здатний реалізувати функції локального регулювання та логічного керування за розробленою моделлю UML. Програма реалізується з врахуванням структури системи, послідовності стадій під час кожної ситуації, станів, реакцій на ці стани, тривалості кожного процесу. Фрагмент програми для стадії *Skladka* наведено на рис. 13.

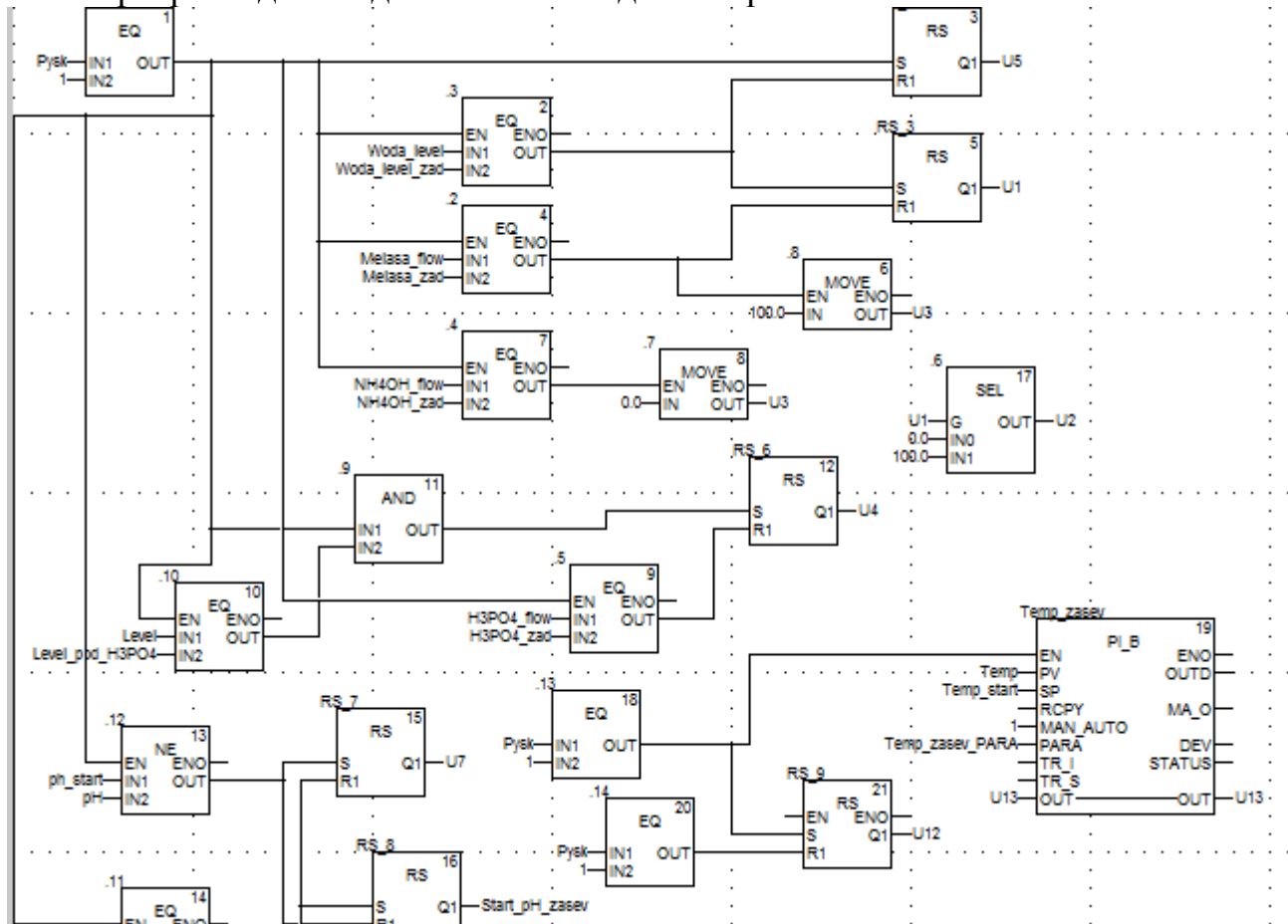


Рис. 13

Для побудови системи диспетчеризації апаратом для вирощування хлібопекарських дріжджів використана гнучка і надійна система Vijeo Citect з високою продуктивністю. Її потужні засоби візуалізації технологічного процесу та функціональні можливості дозволили створити зручну систему диспетчеризації, яка допомагає операторам повністю контролювати протікання всіх стадій технологічного процесу вирощування дріжджів і оперативно реагувати на відхилення в ньому і підвищувати його продуктивність.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано новий розв'язок науково-прикладної задачі підвищення ефективності функціонування апарата періодичної дії для вирощування хлібопекарських дріжджів за рахунок використання автоматизованої системи управління, побудованої з

застосуванням методів розробки підсистем логічного та оптимального управління процесом.

1. Розроблена параметрична логіко-динамічна модель (ЛДМ) періодичного процесу вирощування дріжджів. Для побудови логічної підсистеми ЛДМ використана уніфікована мова моделювання UML, включаючи діаграму діяльності, що використовується для розв'язання задачі логічного керування та мінімізації тривалості циклу його роботи.

2. Розроблені регресійні залежності кінетичних констант процесу вирощування хлібопекарських дріжджів від параметрів технологічного процесу, які використовуються для оптимізації циклу роботи апарата. Встановлено, що значення константи форм-фактор залежить від параметрів початкового стану культурального середовища, а значення константи стала часу – від параметрів стану, що визначають швидкість розвитку процесу вирощування.

3. Використання способу оптимального керування АВХД для розв'язання задачі мінімізації тривалості процесу зменшує тривалість стадій вирощування в середньому на 9 %, а цикл роботи апарата в середньому – на 6 %.

4. Використання способу оптимального керування АВХД для розв'язання задачі максимізації виходу готового продукту збільшує вихід продукту в середньому на 2.4 %.

5. Запропонована дворівнева апаратно-програмна реалізація системи оптимального керування апаратом для вирощування хлібопекарських дріжджів, верхній рівень якої забезпечує розпізнавання ситуації і розрахунок оптимального режиму роботи апарату, а нижній – логічне управління та реалізацію оптимальних значень змінних стану.

6. Практичне значення результатів роботи забезпечують програми реалізації алгоритмів логічного та оптимального управління. Результати роботи прийняті до розгляду для впровадження на дріжджовому заводі ПрАТ «Компанія Ензим» м. Львів, а також впровадженні в навчальний процес кафедри автоматизації процесів управління Національного університету харчових технологій.

Основний зміст дисертації викладено в опублікованих роботах:

1. Трегуб В.Г. Оптимальне керування періодичними процесами з між фазними переходами / В.Г. Трегуб, Ю.О. Чорна (Самойленко) / Східно - Європейський журнал передових технологій, 6/4 (48) 2010. – С. 10-12.
2. Чорна (Самойленко) Ю.О. Моделювання періодичного процесу вирощування хлібопекарських дріжджів з використанням мови UML / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / «Енергетика і автоматика» № 1(19).-К.:Національний університет біоресурсів та природокористування України. 2014 р.- 115-123 с
3. Чорна (Самойленко) Ю.О. Оптимізація керування процесом вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб/

Науково-практичний інформаційний журнал «Науково-технічна інформація», № 3. - К.: УкрНТІ., 2014р.- С. 47-50.

4. Чорная (Самойленко) Ю.А. Определение кинетических параметров для микробиологического процесса выращивания хлебопекарных дрожжей / Ю.А. Чорная (Самойленко), В.Г. Трегуб / «Food science, engineering and technologies 2014», Scientific works, Volume LXI, part I, Plovdiv, October 24-25, 2014, - P. 640-643.
5. Чорна (Самойленко) Ю.О. Визначення кінетичних параметрів для процесу вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Журнал «Наукові праці НУХТ», К: НУХТ, 2015 р., Том 21 № 1, - С. 15-20.
6. Чорна (Самойленко) Ю.О. Моделювання та оптимальне керування періодичним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб/ Програма і матеріали 76-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ. – 2010. – С. 110.
7. Чорна (Самойленко) Ю.О. Моделювання періодичного процесу вирощування хлібопекарських дріжджів з використанням мови UML / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодні та перспективи». - Київ, НУХТ, 27-28 вересня 2010р.- С. 58-59.
8. Чорна (Самойленко) Ю.О. Логічне управління періодичним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / 17-та міжнародна конференція з автоматичного управління «автоматика-2010». Тези доповідей. – Харків, 27 – 29 вересня, 2010 р.- С. 166-167.
9. Чорна (Самойленко) Ю.О. Особливості дріжджовирощувального апарата в якості об'єкта управління / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Програма і матеріали 77-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ. – 11-12 квітня 2011 р. – С. 200.
10. Чорна (Самойленко) Ю.О. Побудова параметричної логіко-динамічної моделі апарата для вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / 18-та міжнародна конференція з автоматичного управління «автоматика-2011». Тези доповідей. – Львів, 28 – 30 вересня, 2011 р.- С. 60
11. Чорна (Самойленко) Ю.О. Постановка задачі оптимального управління дріжджовирощувальним апаратом / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Програма і матеріали 78-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ. – 2012. – С. 135.
12. Чорна (Самойленко) Ю.О. Розроблення логічної моделі апарата для періодичного вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / 19-та міжнародна конференція з автоматичного управління «автоматика-2012». Тези доповідей. Том 1. – Київ: НУХТ, 2012. – С. 294.

13. Чорна (Самойленко) Ю.О. Розробка логічної підсистеми управління напівнеперервним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Програма і матеріали 79-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ. – 2013. – Ч.ІІ. – С. 561-563.
14. Чорна (Самойленко) Ю.О. Оптимальне керування періодичним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / 20-та міжнародна конференція з автоматичного управління «автоматика-2013». Тези доповідей. Том 1. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 143.
15. Чорна (Самойленко) Ю.О. Оптимальне керування періодичним процесом вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Програма і матеріали 80-ої міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. – К.: НУХТ. – 2014. – Ч.ІІ. – С. 457-459.
16. Чорна (Самойленко) Ю.О. Побудова структури системи керування дріжджовирощувальним апаратом / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб/ 21-та міжнародна конференція з автоматичного управління «автоматика-2014». Тези доповідей. – К: КПІ, 2014. – С. 304-305.
17. Чорна (Самойленко) Ю.О. Кінетичні параметри мікробіологічного процесу вирощування хлібопекарських дріжджів / Ю.О. Чорна (Самойленко), В.Г. Трегуб / Програма і матеріали Міжнародна наукової конференції «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості», 13-17 жовтня 2014 р. – К.: НУХТ, 2014 р. – С. 281.
18. Чорна (Самойленко) Ю.О. Використання UML для побудови логічної системи управління дріжджовирощувальним апаратом періодичної дії / Ю.О. Чорна (Самойленко), О. Дарчик / Програма і матеріали 81 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 23-24 квітня 2015 р. – К.: НУХТ 2015, Частина 2 – С. 285.

АНОТАЦІЯ

Самойленко Ю.О. Моделювання та оптимальне керування періодичними процесами вирощування хлібопекарських дріжджів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування – Національний університет харчових технологій, Київ, 2015.

Дисертація присвячена питанню розробки оптимального керування роботи апаратом для вирощування хлібопекарських дріжджів на основі кінетичної оптимізації, а також побудови автоматизованої системи керування даним об'єктом. Розроблені регресійні залежності для кінетичних параметрів і перевірені на адекватність за допомогою експериментальних даних, що отримані на дріжджових заводах.

Для побудови логічної підсистеми логіко-динамічної моделі використовується уніфікована мова моделювання UML. Розроблені діаграми класів, послідовності та діяльності дають змогу представити складний технологічний процес вирощування хлібопекарських дріжджів в аспектах статичної структури системи, часової послідовності між стадіями та операціями циклу та з точки зору логічного управління апаратом.

Розв'язана двохкритеріальна задача оптимального керування апаратами періодичної дії для процесу вирощування хлібопекарських дріжджів та розроблені алгоритми оптимального керування мінімізації тривалості циклу та максимізації продуктивності апарата, що дають можливість зменшити тривалість стадії вирощування в середньому на 9 % та збільшити вихід готового продукту – на 2.4 %.

Запропонована дворівнева структурна схема системи оптимізації апарату для вирощування хлібопекарських дріжджів, верхній рівень якої забезпечує вирішення задачі оптимізації на основі критеріїв керування, виконуючі функції розпізнавання ситуацій та визначення керуючих дій відповідно до обраного критерію керування, а нижній – реалізацію оптимальних значень параметрів стану.

Ключові слова: апарат періодичної дії, оптимальне керування, логіко-динамічна модель, діаграма класів, діаграма послідовності, діаграма діяльності, критерії керування.

АННОТАЦИЯ

Самойленко Ю.А. Моделирование и оптимальное управление периодических процессов выращивания хлебопекарных дрожжей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация процессов управления - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2015.

Диссертация посвящена вопросу разработки оптимального управления работы аппаратом для выращивания хлебопекарных дрожжей на основе кинетической оптимизации, а также построения автоматизированной системы управления данным объектом. Разработанные регрессионные зависимости для кинетических параметров и проверены на адекватность с помощью экспериментальных данных, полученных на дрожжевых заводах.

Для построения логической подсистемы логико-динамической модели используется унифицированный язык моделирования UML. Разработанные диаграммы классов, последовательности и деятельности позволяют представить сложный технологический процесс выращивания хлебопекарных дрожжей в аспектах статической структуры системы, временной последовательности между стадиями и операциями цикла и с точки зрения логического управления аппаратом.

Решена двухкритеріальна задача оптимального управління апаратами періодичного действия для процесса выращивания хлебопекарных дрожжей

и разработаны алгоритмы оптимального управления минимизации длительности цикла и максимизации производительности аппарата, позволяющие уменьшить продолжительность стадии выращивания в среднем на 9 % и увеличить выход готового продукта - на 2.4%.

Предложенная двухуровневая структурная схема системы оптимизации аппарата для выращивания хлебопекарных дрожжей, верхний уровень которой обеспечивает решение задачи оптимизации на основе критериев управления, выполняющие функции распознавания ситуаций и определения управляющих воздействий в соответствии с выбранным критерием управления, а нижний - реализацию оптимальных значений параметров состояния.

Ключевые слова: аппарат периодического действия, оптимальное управление, логико-динамическая модель, диаграмма классов, диаграмма последовательности, диаграмма деятельности, критерии управления.

THE SUMMARY

Samoilenko Y. A. Modeling and optimal control of periodic process of growing baker's yeast. - The manuscript.

Dissertation for a candidate degree of technical sciences by specialty 05.13.07 - automation of management processes - National University of Food Technologies, Kyiv, 2015.

Dissertation is devoted to development of optimum control of the apparatus of growing of baker's yeast-based kinetic optimization and construction of automated data management system object. Developed regression to dependence of kinetic parameters and tested for adequacy by using experimental data obtained in yeast factories.

For build a logical subsystem logical-dynamic model using Unified Modeling Language UML. Developed class diagrams, sequence of activities and allow the present complicated process of growing of baker's yeast in the aspects of static system structure, the time sequence between the stages and operations cycle and in terms of logical management unit.

In this dissertation solved the problem of optimal control apparatus of growing of baker's yeast cultivation process and optimum control algorithms minimize cycle times and maximize the productivity of the machine, making it possible to reduce the duration of the stage of growing on average by 9 % and increase the output of the finished product - by 2.4 %.

The proposed two-tier system block diagram of optimization system of growing of baker's yeast, the upper level which ensures solving the optimization problem based on criteria of management, performing detection situations and determine control actions according to the selected criteria of control, and the bottom - the realization of optimal parameter values condition.

Keywords: batch apparatus, optimal control, logic-dynamic model, class diagram, sequence diagram, activity diagram, management criteria.