

LOGICAL MODEL OF PERIODIC PROCESSES IN MASSECUITE VACUUM DEVICES WITH TWO-STAGE CRYSTALLIZATION

I. Bokoch, V. Tregub, O. Klumenko
National University of Food Technologies

Key words:

*UML
Vacuum apparatus
Modeling
Uterine massecuite
Crystallization*

Article history:

Received 13.07.2020
Received in revised form
27.07.2020
Accepted 10.08.2020

Corresponding author:

I. Bokoch
E-mail:
ua2d2ua@gmail.com

ABSTRACT

The article presents the developed logical model of a vacuum apparatus of periodic action (VAPA) with the process of two-stage crystallization in terms of the unified modeling language UML, which is an integral part of the unified software development process and is a broad profile language. UML uses graphical notation to create an abstract model of the system and is quite relevant today. This logical model makes it possible to visualize one of the most complex processes in the sugar industry — the process of sugar crystallization.

The article describes the principle of the combined VAPA operation during preparing uterine massecuite and, on its basis, massecuite of the 1st product. The article describes in detail the method of preparation of uterine massecuite and its advantages over the classic seed suspensions.

The developed logical model includes four main diagrams of the UML language: classes, which serves to represent the structure of the model; sequence that shows the sequence of objects during specific operation; state that shows the sequence of states in which an object may find itself depending on external events and the object's response to those events; activities that are designed to describe changes in the state of the object under the influence of internal predefined actions. To build this logical model, a parametric logical-dynamic model of the vacuum apparatus created in tabular form with a list of cycle operations, conditions of their beginning and control actions was used.

As a result, the work described in this article will provide a clearer understanding of the processes occurring in VAPA with non-stationary form factor during the preparation of uterine massecuite and the first product which is based on the massecuite. Also it will simplify further work in the study of two-stage crystallization process and development of automation systems for the above process.

ЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УТФЕЛЬНИХ ВАКУУМ-АПАРАТАХ З ДВОЕТАПНОЮ КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ

І. В. Бокоч, В. Г. Трегуб, О. М. Клименко

Національний університет харчових технологій

У статті представлено розроблену логічну модель вакуум-апарата періодичної дії (ВАПД) з процесом двоетапної кристалізації в термінах уніфікованої мови моделювання UML (Unified Modeling Language), що є невід'ємною частиною уніфікованого процесу розробки програмного забезпечення і мовою широкого профілю. Це відкритий стандарт, що використовує графічні позначення для створення абстрактної моделі системи. Така логічна модель дає змогу наочно відобразити один із найскладніших процесів у цукровій промисловості — процес кристалізації цукру.

Описано принцип роботи комбінованого ВАПД при варінні маточного утфелю та, на його основі, утфелю першого продукту. Також детально описано метод підготовки маточного утфелю і наведено його переваги над класичними затравками та затравними суспензіями.

Розроблена логічна модель включає чотири основні діаграми мови UML: класів, що слугує для подання структури моделі; послідовності, що показує послідовність об'єктів під час виконання певної операції; стану, що показує послідовність станів, в яких може опинитися об'єкт залежно від зовнішніх подій і реакції об'єкта на ці події; діяльності, яка призначена для опису зміни стану об'єкта під дією внутрішніх наперед визначених дій. Для побудови логічної моделі використана створена в табличній формі параметрична логіко-динамічна модель вакуум-апарата з переліком операцій циклу, умовами їх початку та керуючими діями.

Запропонована логічна модель дасть змогу більш наочно зрозуміти процеси, що відбуваються у ВАПД з нестационарним форм-фактором під час підготовки маточного утфелю і на його основі утфелю першого продукту та спростить подальші дослідження двоетапного процесу кристалізації і розробку систем автоматизації для вищенаведеного процесу.

Ключові слова: UML, вакуум-апарат, моделювання, маточний утфель, кристалізація.

Постановка проблеми. У багатьох регіонах світу, особливо в Європі, в наш час спостерігається трансформація цукрової промисловості, спрямована на підвищення ефективності роботи цукрових заводів і цукрової галузі в цілому. Окрім того, очікується, що компанії, які займаються виробництвом цукру, як і багато інших хімічних компаній, будуть усе більше прагнути стати більш екологічними та енергоефективними, оскільки вони розуміють, що можуть зменшити забруднення та збільшити прибутки одночасно. Одним із найбільш енергозатратних етапів у виробництві цукру є варіння утфелю з метою подальшого нарощування вже існуючих кристалів і саме тому цей етап потребує детального вивчення та дослідження [1; 2].

Надійно працювати з високими концентраціями, отримуючи високоякісний утфель першої кристалізації, дає змогу відносно новий метод двоетапної кристалізації з використанням маточного утфелю, широко розповсюджений на цукрових заводах Німеччини, Великої Британії та інших країн [3].

Підготовка маточного утфелю включає три етапи:

- попередня підготовка кристалічної суспензії для внесення затравки;
- одержання кристалічної основи із середніми розмірами кристалів 0,1...0,13 мм при охолодженні;
- нарощування кристалів основи при випарюванні в окремому вакуум-апараті до середнього розміру кристалів 0,3 мм.

Маточний утфель (МУ) для першої кристалізації повинен відповідати особливим вимогам, тому метод його підготовки достатньо складний і вимагає додаткового обладнання. Ідея полягає в тому, що процес початкового кристалоутворення та закріплення кристалів виділяється із циклу отримання утфелю в окремий процес підготовки маточного утфелю (МУ).

Процес підготовки МУ полягає в тому, що сироп в апараті доводиться до концентрації $CP\ 75\text{—}76\%$, а потім охолоджується до температури близько 50°C . При досягненні температури 50°C пересичення досягає величини 1,1 і в апарат подається підготовлена затравна паста або пудра. Після охолодження отриманого продукту розмір кристалів досягає приблизно 0,1—0,13 мм. Таку кристалічну затравку може бути безпосередньо використано для одержання дрібнокристалічного утфелю або він проходить подальшу обробку у вакуум-апараті, де розмір кристалів доводиться до 0,3 мм. Кристалічна затравна суспензія по трубопроводах замкненого контуру з прийомної мішалки насосом подається в напірну мішалку, а звідти вже — у ВАПД.

Створення якісної кристалічної затравки, хоч і є досить складним етапом, проте сприяє значному полегшенню процесу кристалізації, оскільки критичні фази утворення й початкового нарощування кристалів відбуваються відокремлено від процесу приготування кінцевого продукту.

Незважаючи на відносну складність одержання маточного утфелю, він має високі якісні показники (рівномірність кристалів, відсутність конгломератів), що дає змогу збільшити продуктивність ВАПД, використовувати сиропи високої концентрації, зменшити споживання пари та збільшити вихід кристалічного цукру з утфелю за рахунок більшої рівномірності кристалів, що сприяє зменшенню затрат води на пробілювання.

Виробничі дослідження показують, що впровадження такого способу уварювання утфелю забезпечує збільшення виходу кристалічного цукру з утфелю, зменшення витрат води на пробілювання та витрат палива. Розрахунки показують, що застосування такого способу дає змогу на 20—30% збільшити продуктивність ВАПД I продукту та на 10—15% — II і III продуктів, зменшити витрати електроенергії в кристалізаційному відділенні, а також втрати цукру від термічного розкладу.

Автоматизоване керування апаратами періодичної дії (АПД) передбачає використання логіко-динамічних структур при побудові як математичних моделей цих апаратів, так і систем керування ними [4]. Однак залишається невирішеним завдання побудови автоматизованої логіко-динамічної системи управління двоетапним процесом періодичної кристалізації утфелю першого продукту на основі логіко-динамічної моделі цього об'єкта.

Мета дослідження: розробити логічну модель управління періодичними процесами в утфельних вакуум-апаратах першого продукту з двоетапною кристалізацією як основу для подальшого створення автоматизованої системи управління цим об'єктом.

Викладення основних результатів дослідження. Одним із ефективних інструментів для побудови логічних моделей гібридних систем є уніфікована мова моделювання UML (Unified Modeling Language) [5]. Для опису в термінах UML періодичних процесів вакуум-апарата, в якому як початковий компонент використовується маточний утфель, візьмемо за основу комбінований вакуум-апарат першого продукту та маточного утфелю, спрощена технологічна схема якого представлена на рис. 1, оскільки саме така технологія зараз найбільш поширена на цукрових підприємствах.

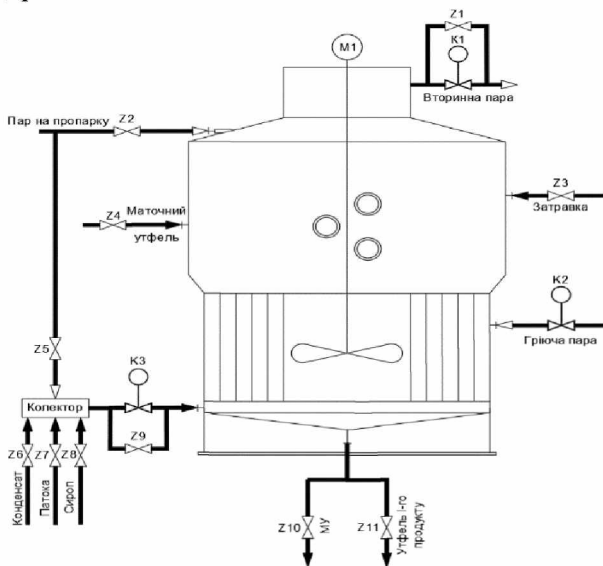


Рис. 1. Комбінований вакуум-апарат першого продукту і маточного утфелю

Таблична параметрична логіко-динамічна модель (ЛДМ) такого ВАПД представлена в табл. 1.

Таблиця 1. Параметрична ЛДМ ВАПД

Операції циклу	Логічні умови	Керуючі дії
1	2	3
1. Перевірка готовності апарата	$L2 \geq L2min; L1=0;$ $Z1, \dots, Z11=0;$ $K1, \dots, K3=0\%$	
2. Створення розрідження в апараті	$P1 \leq P1min$	$Z1=1$ $K1=100\%$
3. Набір сиропу в апарат	$Timer\ 1 > \tau_1$	$Z8=1; Timer\ 1$ $K3:=100\%; Z9=1$
4. Згущення сиропу	$L1 \geq L1min$ $L1=L1^*; P1=P1^*;$ $P2=P2^*$	$K3(L1); Z1=0, Z9=0;$ $K1(P1); K2(P2)$

Продовження таблиці 1

1	2	3
5. Заведення кристалів	$\alpha \geq \alpha^*$	Z3=1; Timer2
	Timer2 $> \tau_2$	Z3=0,
6. Закріплення кристалів		Timer 3
	Timer 3 $> \tau_3$	K3(Q1)
7. Варка МУ	L1=L1*, P1=P1*, P2=P2*	Z8=0; Z7=1; K2(P2); K1(P1)
	L1=L1max; Q1=Q1*	Z6=1; K3(Q1); K1, K2,=100%,
8. Вивантаження МУ		Z1=1; K1=0%, Timer 4
	Timer 4 $> \tau_4$	Z1=0; Z2=1
	P1 $> P1^*$	Z10=1; Timer 5
9. Пропарка апарата	Timer 5 $> \tau_5$; L1 < 5%	Z5=1; K3=100%; Timer 6
	Timer 6 $> \tau_6$,	Z2=0; Z5=0; K3=0%
10. Перевірка готовності апарата	L2 $> L2_{min}$; L1=0; Z1, ..., Z11=0; K1, ..., K3=0%	
11. Створення розрідження в апараті		Z1=1
	P1 $\leq P1_{min}$	K1=100%,
12. Набір сиropу в апарат		Z8=1; Timer7
	Timer 7 $> \tau_7$	K3:=100%, Z9=1
13. Згущення сиropу	L1 $> L1_{min}$	
	L1=L1*, P1=P1*, P2=P2*	K3(L1); Z1=0; Z9=0; K1(P1); K2(P2)
	2	3
	$\alpha \geq \alpha^*$	Z4=1,
	V1 $> V1^*$	Z4=0,
		Timer 8
	Timer 8 $> \tau_8$	K3(Q1)
	L1=L1*, P1=P1*, P2=P2*	Z8=0; Z7=1; K2(P2); K1(P1)
	L1=L1max; Q1=Q1*	Z6=1; K3(Q1); K1, K2=100%; Timer 9
	Timer 9 $> \tau_9$	Z1...Z11=0; K2, K3=0%
		Z1=1; K1=0%; Timer 10
	Timer 10 $> \tau_{10}$	Z1=0, Z2=1
	P1 $> P1^*$	Z10=1; Timer 11
	Timer 11 $> \tau_{11}$; L1 < 5%	Z5=1; K3=100%; Timer 12
Timer 12 $> \tau_{12}$,	Z2=0; Z5=0; K3=0%	

Примітка: У таблиці використано такі умовні позначення:

Z1 — заслінка створення розрідження; Z2 — заслінка пари на пропарку апарата; Z3 — заслінка вводу затравки; Z4 — заслінка вводу МУ; Z5 — заслінка пари на пропарку колектора; Z6 — заслінка подачі води в колектор; Z7 — заслінка подачі патоки в колектор; Z8 — заслінка подачі сиropу в колектор; Z9 — заслінка подачі продукту в апарат; Z10 — заслінка вивантаження МУ; Z11 — заслінка вивантаження першого продукту; K1 — клапан створення розрідження; K2 — клапан граючого пару; K3 — клапан подачі продукту в апарат; L1 — рівень в апараті; L2 — рівень у збірнику сиropу; T1 — температура utfелю; P1 — розрідження в апараті; P2 — тиск у граючій камері; V1 — об'єм подачі МУ в апарат; Q1 — концентрація сухих речовин; α — коефіцієнт пересичення; Timer (i) — таймер;

$P1(i)$ — величина розрідження, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння; $P2(i)$ — величина тиску в граючій камері, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння; $V1(i)$ — величина об'єму подачі МУ в апарат, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння; $L1(i)$ — величина рівня в апараті, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння; $L2(i)$ — величина рівня в збірнику сиропу, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння; $Q1(i)$ — величина концентрації сухих речовин, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння; $T1(i)$ — величина температури утфелло, задана в режимній карті для певного етапу процесу варіння.

Враховуючи багатостадійність технологічного процесу, була проведена декомпозиція системи на кілька частин, кожна з яких відповідатиме за керування технологічним процесом на певній стадії чи конкретній операції, тобто процес було поділено на окремі кроки, тісно пов'язані між собою. Перший — підготовка апарата до варки МУ, другий — створення вакууму, третій — набір сиропу, четвертий — згущення сиропу, п'ятий — заведення кристалів, шостий — варка МУ, сьомий — вивантаження МУ, восьмий — підготовка апарата до варіння першого продукту, дев'ятий — створення вакууму, десятий — набір сиропу, одинадцятий — згущення сиропу, дванадцятий — введення МУ, тринадцятий — варка утфелло, чотирнадцятий та п'ятнадцятий — уварювання та вивантаження відповідно.

З більш ніж десяти типів модельних конструкцій UML-діаграм, що надають можливість розглядати систему під різними кутами зору, в дослідженні для відображення системи використано такі основні типи діаграм:

- класів, яка показує структуру системи;
- взаємодії, яка відображає часову послідовність використання об'єктів;
- стану, що визначає послідовність станів об'єкта залежно від зовнішніх подій;
- діяльності, що описує змінення стану об'єкта залежно від внутрішніх дій.

Діаграма класів (рис. 2, рис. 2.1) служить для подання структури моделі і не залежить від часу. Вона визначає типи об'єктів системи і різні зв'язки та відношення між ними. На цій діаграмі клас зображено у вигляді прямокутника, що поділений горизонтальними лініями на три секції: верхня містить назву стадії (операції), середня — перелік атрибутів-функцій, що керують вхідними і вихідними потоками, тобто датчики та стан виконавчих механізмів (ВМ) і завдання на них; нижня — перелік операцій, що описують поведінку об'єктів класу (операції, що виконуються під час конкретної стадії) [6]. Для того, щоб побудувати цю діаграму, спочатку виділяють у системі окремі, відносно незалежні компоненти, а потім визначають, яким чином вони взаємозв'язані.

Двома основними компонентами комплексу, що розглядається, є ВАПД і контролер. Контролер надсилає об'єкту сигнали керування заслінками ($Z(i)$), клапанами ($K(i)$) та мішалкою М1. Для правильного керування об'єктом контролеру необхідно врахувати значення рівня в апараті ($L1$) та збірнику сиропу ($L2$), температури ($T1$), розрідження ($P1$), тиску ($P2$), вмісту сухих речовин ($Q1$), інтервалів часу та інших параметрів. Контролер представлений окремим класом PLC, який містить атрибути. До атрибутів віднесені вхідні сигнали з датчиків, сигнали на відкриття (закриття) або ввімкнення (вимкнення) виконавчих механізмів. Об'єкт представлений класом Апарат, атрибутами якого є функції, що керують вхідними та вихідними потоками.

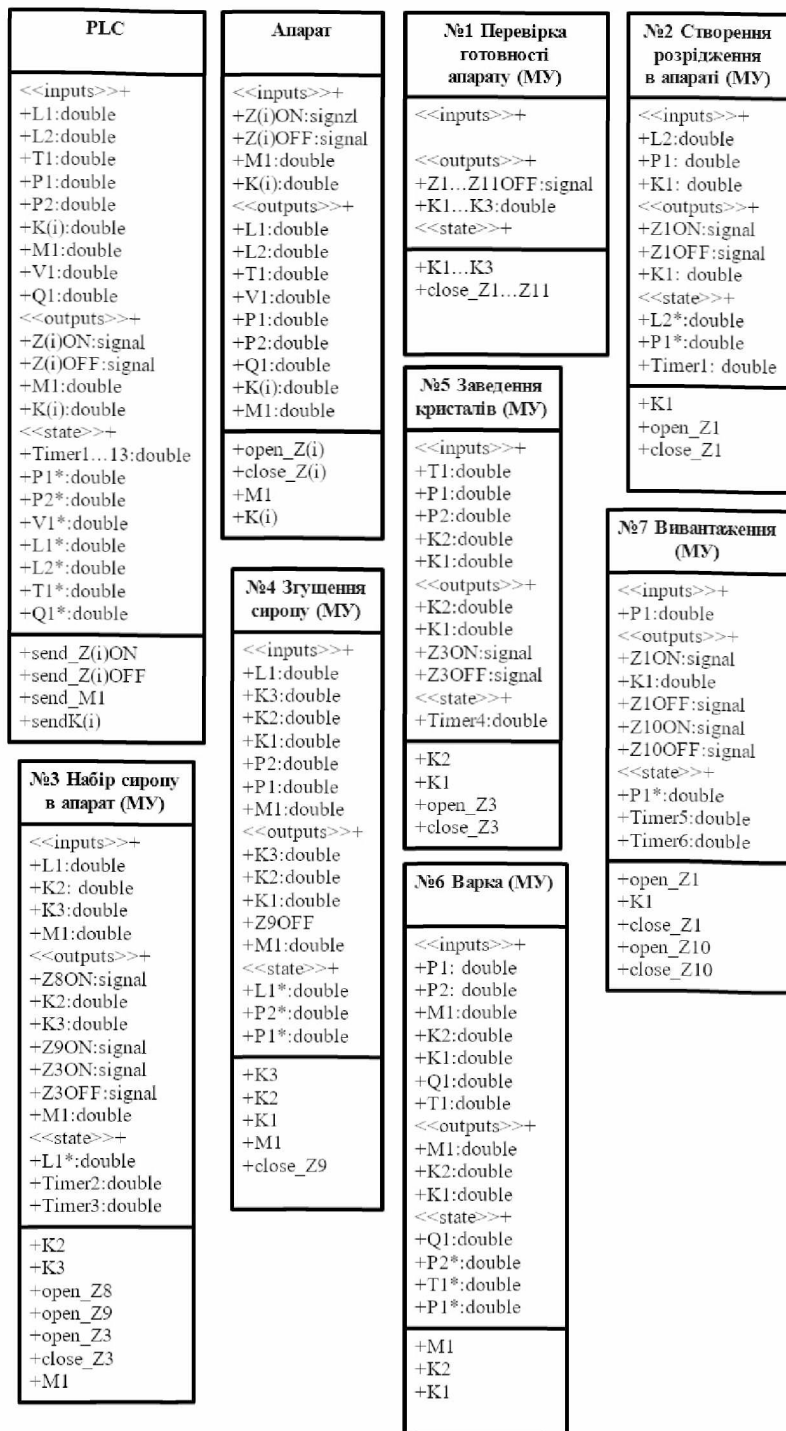


Рис. 2. Діаграма класів, частина 1

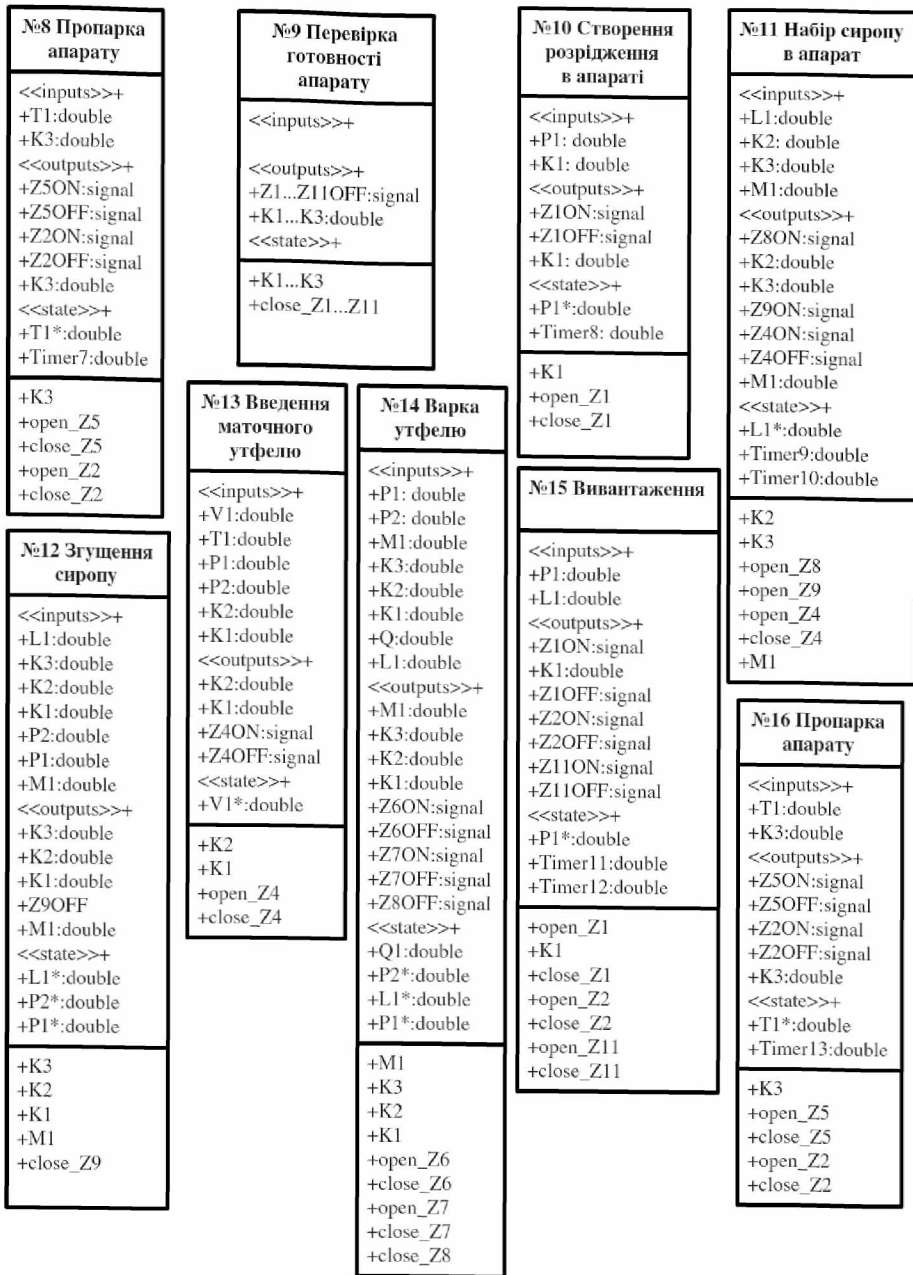


Рис. 2.1. Діаграма класів, частина 2

Для прикладу, стадія «Створення розрідження в апараті» містить такі атрибути:

- входи: L2 — рівень у збірнику сиропу; P1 — розрідження у ВАПД; K1 — положення регулюючого органа (РО) клапана подачі продукту у ВАПД;

- виходи: Z1ON, Z1OFF — сигнали на відкриття та закриття заслінки створення розрідження у ВАПД; K1 — завдання для регулюючого органа (РО) клапана створення розрідження у ВАПД;

- задані величини: P1* — мінімальне розрідження у ВАПД для виконання певної умови переходу; Timer 1 — таймер для виконання певної умови переходу.

Також стадія «Створення розрідження в апараті» передбачає такі операції: K1 — зміна положення (РО) клапана створення розрідження у ВАПД; open_Z1, closet_Z1 — відкриття та закриття, відповідно, заслінки створення розрідження у ВАПД.

Діаграма послідовності (рис. 3, рис. 3.1) показує, в якій послідовності з'являються об'єкти при виконанні якоїсь операції і який потік інформації виникає при цьому. Діаграма послідовності описує повний цикл роботи вакуум-апарата з часовими інтервалами, що задаються регламентом. За допомогою цієї діаграми можливо проаналізувати часову послідовність стадій і операцій циклу при його програмній реалізації. Вертикальні прямокутники під апаратом показують стадії та операції життєвого циклу, що відбуваються протягом одного часового інтервалу. Наприклад, п'ята стадія «Заведення кристалів» існує в часі, в якому відбуваються такі дії: відкриття та закриття заслінки «подачі затравки в апарат» Z3 і керування клапаном створення розрідження в ВАПД K1 та клапаном подачі пари K2.

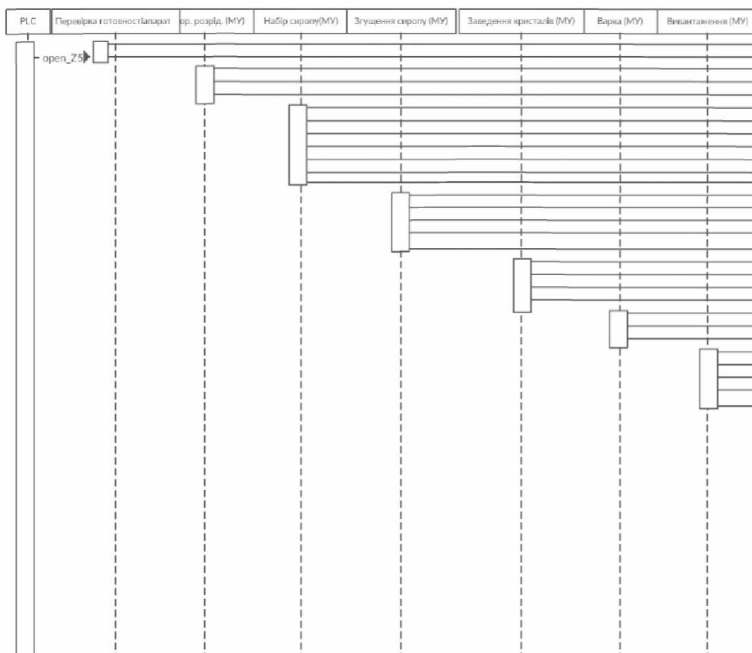


Рис. 3. Діаграма послідовності, частина 1

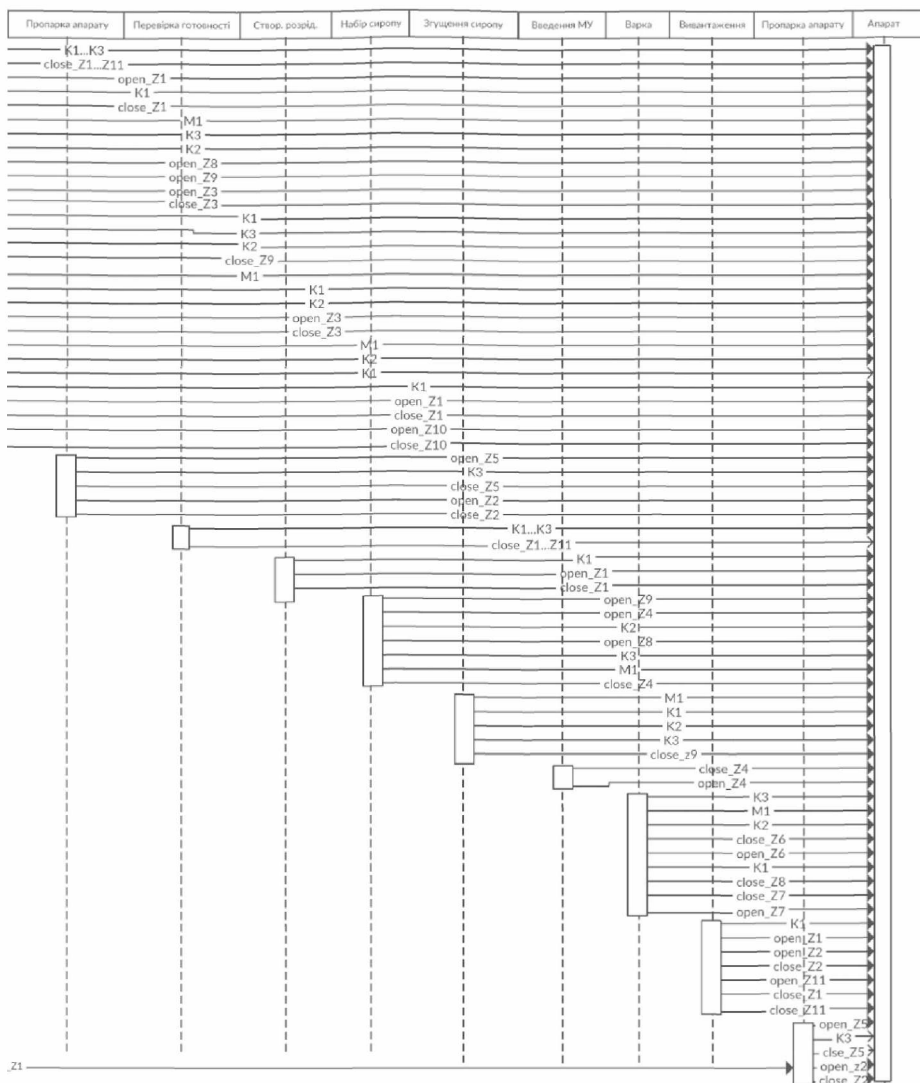


Рис. 3.1. Діаграма послідовності, частина 2

Діаграма стану (рис. 4) показує послідовність станів, в яких може опинитися об'єкт залежно від зовнішніх подій і реакції об'єкта на ці події. Стан позначається Wait і відповідає певному інтервалу часу в житті ВАПД. Він зображений прямокутником із закругленими кутами, який має дві секції. В них наводиться ім'я стану і змінні стану та внутрішня поведінка. Остання найчастіше містить такі дії: entry — дія на вході у стан; exit — дія на виході зі стану.

Для класу PLC розроблена діаграма стану (рис. 4). Фактично в цьому разі стан характеризує ситуацію очікування під час інтервалів часу, які починаються змінною положення виконавчих органів (Send). Так, при очікуванні системи, в проміжку стадії 10, система на вході відкриває заслінку створення розрідження в ВАПД Z1 і дає завдання на клапан створення розрідження в ВАПД K1, а при

виході з цього проміжку закриває заслінку Z1. Діаграма стану може бути використана для мінімізації тривалості циклу ВАПД.

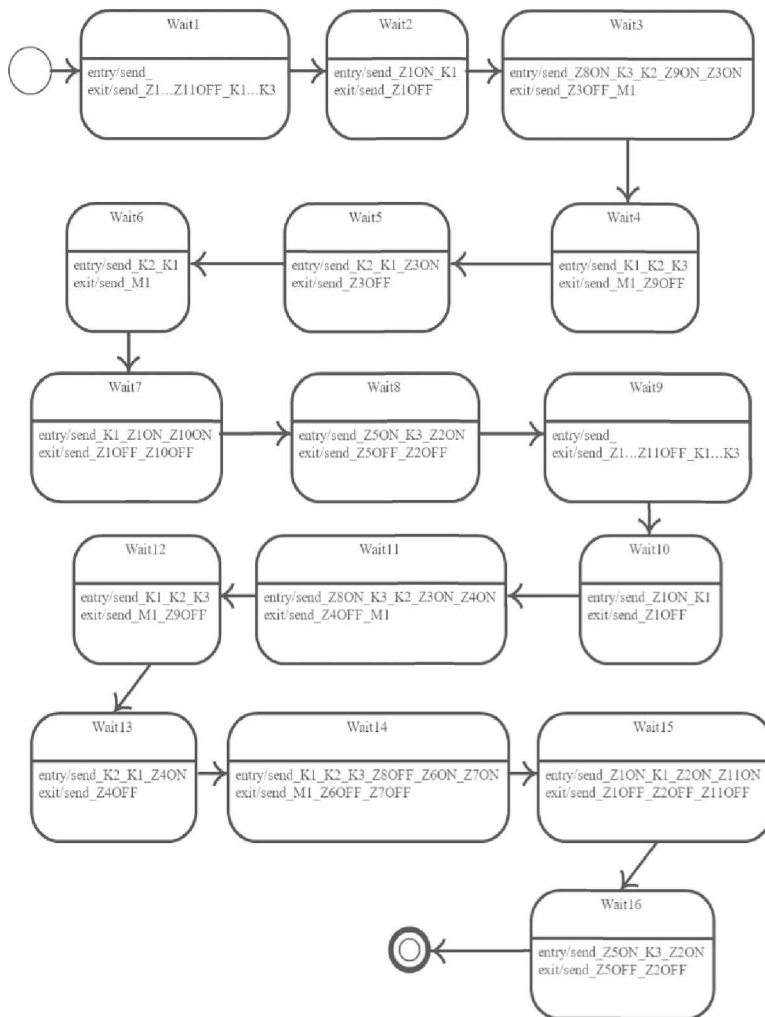


Рис. 4. Діаграма стану

Діаграма діяльності (рис. 5, рис. 5.1) призначена для опису зміни стану об'єкта під дією внутрішніх, наперед визначених дій. На відміну від діаграми стану основним елементом цієї діаграми є дія. Для цієї мети було використано блок-схеми або структурні схеми алгоритмів. Кожна дія на діаграмі відповідає виконанню певної операції, перехід до наступної дії спрацьовує тільки при завершенні операції попередньої дії. Ця діаграма фактично є алгоритмом логічного керування вакуум-апарата. Біля стрілок записують умови переходу до кожної наступної дії [7]. Наприклад, під час операції «Набір сиропу» для того, щоб змінився командний сигнал на клапан подачі продукту в апарат K1 і відкрилася заслінка «швидкого набору апарата», повинна виконатися умова

Тимер 3, тобто повинно пройти 5 с після відкриття заслінки подачі сиропу в колектор Z8.

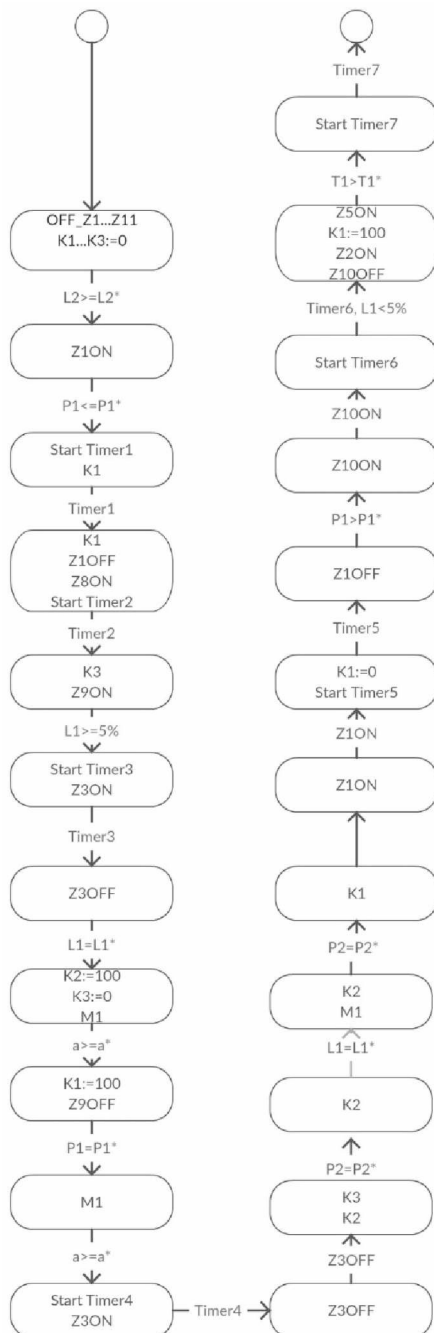


Рис. 5. Діаграма діяльності, частина 1

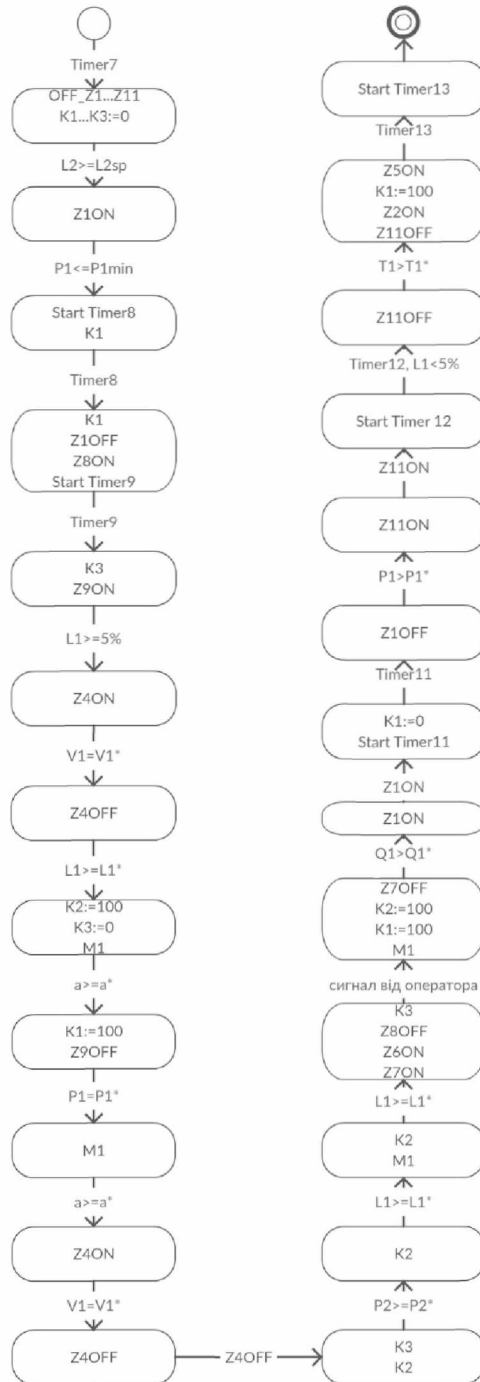


Рис. 5.1. Діаграма діяльності, частина 2

Вищезгадані діаграми дають змогу наочно моделювати такий складний процес, як варіння утфелю, причому таким чином, щоб були визначені всі зв'язки як

між апаратом та контролером, так і безпосередньо всередині самого апарата. А це, у свою чергу, допомагає більш швидко і якісно дослідити та реалізувати процес і надає можливість його дослідження без безпосереднього втручання у виробництво.

Висновок

Розроблена в термінах UML логічна модель періодичної двоетапної кристалізації першого продукту є алгоритмічною основою створення програмного забезпечення автоматизованої системи керування вакуум-апаратами, що реалізують цей процес.

Література

1. Gillian Eggleston Future Sustainability of the Sugar and Sugar — Ethanol Industries. December 2010. ACS Symposium Series 1058:1-19.
2. Lauret P., Boyer H., Gatina J. C. Hybrid modelling of a sugar boiling process. March 2000. *Control Engineering Practice*. 8(3):299-310.
3. Петриченко І. Б., Резніченко Ю. М. Інноваційні технології галузі: курс лекцій для студентів спеціальності 7.05170111 «Технології цукру та полісахаридів» денної та заочної форми навчання. Київ: НУХТ, 2013. 174 с.
4. Трегуб В. Г. Автоматизация периодических процессов в пищевой промышленности. Київ: Техніка, 1982. 160 с.
5. Бенькович Е. С., Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем: учеб. пособ. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2002. 444 с.
6. Зачем нам UML? Или как сохранить себе нервы и время. URL: <https://habr.com/ru/post/458680>.
7. Диаграмма активностей (Activity diagram). URL: https://flexberry.github.io/ru/fd_activity-diagram.html.