УДК 681.51 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.28

М. О. РИБАЛЬЧЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-5162-5201

О. Ю. ПОТАП
кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-8643-0228

М. В. МИХАЙЛОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0002-9960-6189

О. П. ЄГОРОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0002-9867-0437

В. І. ШИБАКІНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0009-0003-4387-8315

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ STATEFLOW ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ В МЕТАЛУРГІЇ

У статті розглядається застосування програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем у металургії. Акцентується увага на перевагах Stateflow як розширення системи Simulink, що дозволяє проектувати та моделювати подієво-керовані системи та кінцеві автомати, в тому числі ієрархічні моделі.

Проаналізовано дослідження та публікації, що стосуються використання Stateflow для моделювання систем логічного керування, до прикладу, у транспортних системах переміщення сипучих вантажів, а також у системах автоматичної сигналізації на залізничних переїздах.

Основною метою роботи є обґрунтування доцільності використання програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем, зокрема технологічних процесів у металургії.

Представлено приклади моделювання металургійних процесів. Зокрема, розглянуто моделювання системи вибору вільної машини безперервного лиття заготівок (МБЛЗ). Виконано моделювання роботи агрегату «ківш», який слугує для підігріву металу перед послідовними технологічними операціями та доводки розплаву за хімічним складом. Stateflow дозволяє формалізувати різні режими нагріву в залежності від ступенів потужності трансформатора, а також відстежувати зміну температури розплаву залежно від обраного режиму.

Окремо розглянуто моделювання системи управління формуванням багатокомпонентних порцій шихти на доменному конвеєрі. Модель системи управління враховує, що змішана порція може складатися з різних типів матеріалів (агломерат, окатиші, кокс), враховує їх співвідношення та розташування на конвеєрі, а також продуктивність збірного конвеєра. Stateflow-діаграма імітує роботу вагових воронок та визначає час включення механізмів розвантаження.

Зроблено висновок про доцільність використання Stateflow для моделювання процесів плавки, нагріву, транспортування та дозування матеріалів у металургії, що дозволяє підвищити ефективність управління технологічними процесами, забезпечити безпеку праці та якість продукції.

Ключові слова: *Matlab, Stateflow-діаграма, подієво-керовані системи, моделювання, металургія.*

M. O. RYBALCHENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-5162-5201

O. YU. POTAP
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-8643-0228

M. V. MYKHAILOVSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9960-6189

O. P. YEHOROV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9867-0437

V. I. SHYBAKINSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9867-0437

USING THE STATEFLOW SOFTWARE TOOL FOR MODELING COMPLEX SYSTEMS IN METALLURGY

The article examines the application of the Stateflow software tool for modeling complex systems in metallurgy. Emphasis is placed on the advantages of Stateflow as an extension of the Simulink system, which allows designing and modeling event-driven systems and finite-state machines, including hierarchical models.

Recent research and publications concerning the use of Stateflow for modeling logical control systems, for example in transport systems for moving bulk cargo, and in automatic signaling systems at railway crossings, have been analyzed.

The main goal of the work is to substantiate the feasibility of using the Stateflow software tool for modeling complex systems, particularly technological processes in metallurgy.

Examples of modeling metallurgical processes are presented. Specifically, the modeling of a system for selecting a free continuous casting machine (CCM) is considered. Modeling of the «furnace-ladle» unit operation was performed, which serves to heat the metal before subsequent technological operations and to refine the melt's chemical composition. Stateflow allows formalizing various heating modes depending on the transformer power stages, and also tracking the change in melt temperature depending on the selected mode.

Separately, the modeling of the control system for forming multi-component charge portions on a blast furnace conveyor is discussed. The control system model takes into account that the mixed portion can consist of different types of materials (sinter, pellets, coke), their ratio and location on the conveyor, as well as the volumetric capacity of the collection conveyor. The Stateflow diagram simulates the operation of weighing hoppers and determines the activation time of unloading mechanisms.

A conclusion is drawn about the expediency of using Stateflow for modeling metal melting, heating, transportation, and material dosing processes in metallurgy, which allows increasing the efficiency of technological process control, ensuring safety and product quality.

Key words: *Matlab, Stateflow-diagram, event-driven systems, modeling, metallurgy.*

Постановка проблеми

З безлічі існуючих на сьогоднішній день пакетів візуального моделювання особливий інтерес викликають універсальні пакети, що не орієнтовані на визначену вузькоспеціальну область, а дозволяють моделювати структурно-складні гібридні системи у різних прикладних задачах. Серед них особливе місце займає Matlab [1].

Однією з основних причин широкого використання пакета Matlab є великий спектр засобів, що надається користувачеві для рішення різноманітних задач у різних областях людської діяльності. Серед цих засобів особливе місце займає підсистема Simulink. Simulink – це інтерактивне середовище для моделювання й аналізу широкого класу динамічних систем за допомогою блок-діаграм. У склад Simulink входить додаток Stateflow – графічний інструментарій для моделювання складних систем керування. Програмний засіб Stateflow є розширенням системи Simulink, який представляє собою середовище для побудови і моделювання подієво-керованих систем. Для моделювання кінцевих автоматів можна використовувати стандартні блоки системи Simulink, проте програмний засіб Stateflow забезпечує можливість функціонування кінцевих автоматів шляхом побудови ієрархічних моделей як підсистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] авторами показано використання Stateflow для моделювання систем логічного керування. Розглядається доцільність використання Stateflow для побудови алгоритмів і програм системи логічного керування транспортною ділянкою переміщення сипучих вантажів. В роботі продемонстровано, як Stateflow дозволяє моделювати події, переходи станів і генерувати код для промислових контролерів (наприклад, Simatic в TIA Portal).

Stateflow дозволяє створювати моделі реактивних систем, перевіряти умови зациклення та порушення діапазону даних, реалізовувати паралельні операції та рекурсивні алгоритми управління [3]. Його можна використовувати для оптимізації процесів механічної обробки у гнучких виробничих системах, що дозволяє підвищити ефективність управління технологічними процесами.

Робота [4] присвячена імітаційному моделюванню електронної системи автоматичної переїзної сигналізації нового покоління для забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. Основна мета – перевірка та вдосконалення алгоритму функціонування системи з урахуванням можливих відмов елементів і забезпечення відмовостійкості. Stateflow у цій роботі використано для опису поведінки системи у вигляді станів і переходів – тобто, для моделювання роботи системи як кінцевого автомата, де кожен стан відповідає певному режиму роботи або події (наприклад, рух поїзда, активація сигналізації, відмова елемента). Stateflow дозволяє чітко формалізувати алгоритм реагування системи на різні комбінації вхідних сигналів, зокрема на відмови окремих елементів (реле, датчиків, світлофорів).

У моделі враховано різні ситуації: рух поїзда в обох напрямках, аварійна зупинка, відмови елементів, затримки сигналів тощо. За допомогою Stateflow вдалося виключити конфліктні стани та зациклення, перевірити коректність роботи системи при відмовах.

Даний інструмент також є дуже перспективним для використання при моделюванні технологічних процесів у металургії [4]. Розглянемо кілька ключових аспектів, які роблять Stateflow корисним інструментом у цій галузі.

Металургійні процеси часто включають складні послідовності операцій, які залежать від різних умов і подій. Stateflow дозволяє чітко визначити ці послідовності за допомогою діаграм станів і переходів, що забезпечує точне моделювання логіки процесу. Наприклад, можна змоделювати послідовність операцій системи шихтоподачі в процесі формування порцій шихти для доменної печі.

Крім того, металургійні процеси вимагають точного керування для забезпечення якості продукції та безпеки. Stateflow можна використовувати для моделювання систем керування, які реагують на зміни параметрів процесу та виконують необхідні дії. Наприклад, можна змоделювати систему керування температурою в печі, яка регулює подачу палива та повітря залежно від показань датчиків.

Stateflow тісно інтегрований з Simulink, що дозволяє моделювати гібридні системи, які поєднують дискретні та безперервні компоненти. Це особливо корисно для моделювання процесів, де потрібно враховувати як логіку керування, так і фізичні процеси, такі як теплопередача та хімічні реакції. Можливо моделювати процеси плавки металу, де потрібно враховувати як логіку керування печами, так і динаміку теплопередачі в металі.

Існують випадки, коли технологічні процеси можуть бути схильні до різних подій та помилок, таких як відмова обладнання або відхилення параметрів процесу. Stateflow дозволяє визначити реакцію системи на ці події та помилки, що забезпечує надійну та безпечну роботу процесу. Це системи аварійного вимкнення обладнання у разі виникнення небезпечних ситуацій.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є обґрунтування доцільності використання програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем, зокрема технологічних процесів у металургії.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо приклади складних систем, робота яких може бути змодельована за допомогою Stateflow.

Виконаємо моделювання системи вибору вільної машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Дана машина забезпечує квазібезперервне переведення рідкої сталі, що знаходиться в сталерозливному ковші, в твердий стан у вигляді заготовок певної геометричної форми.

Обробка металу виконується на тій МБЛЗ, яка є вільною в даний момент. Нижче приведена часова діаграма процесу (рис. 1).

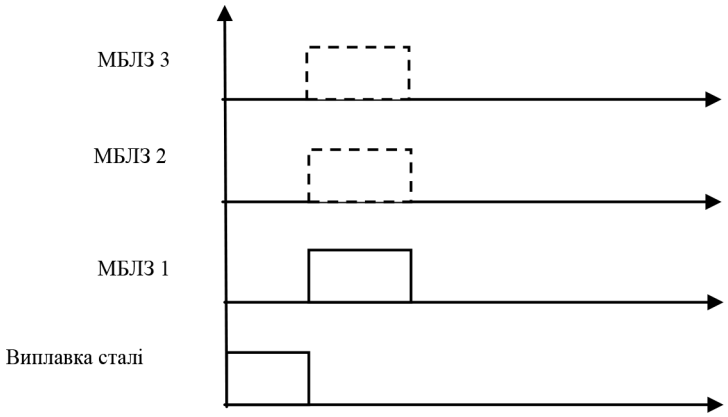

Рис. 1. Часова діаграма процесу

Stateflow діаграма, яка дозволяє змоделювати такий процес представлена на рис. 2. За замовчуванням активується стан Zero. Як тільки модельний час стає рівним 10 одиницям, виконується перехід до точки прийняття рішень. Змінній u присвоюється значення, яке буде відповідати номеру вільної МБЛЗ і виконується перехід до одного з трьох станів One, Two, Three. Значення змінної u змінюється в блоці Constant у Simulink.

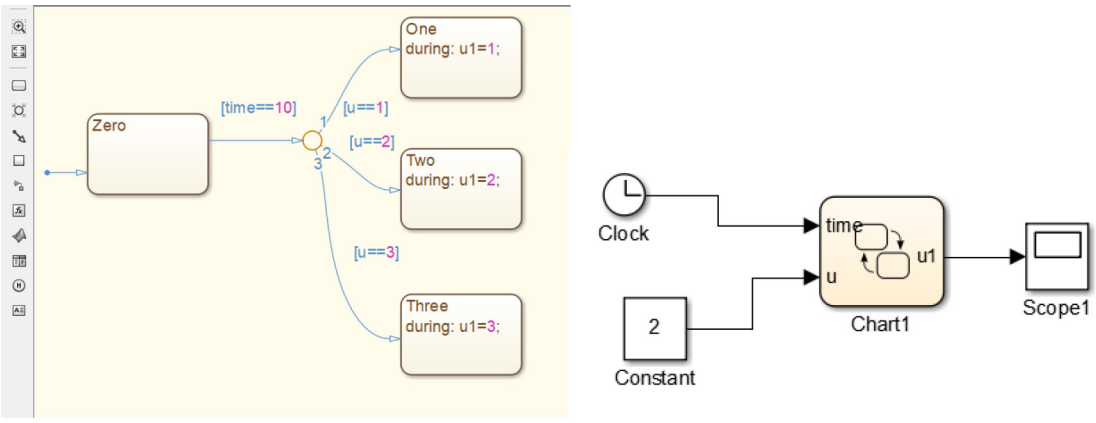

Рис. 2. Діаграма Stateflow та Simulink модель

В залежності від того, який з трьох станів (One, Two, Three) вибирається, змінній u1 за допомогою процедури *during* присвоюється значення 1, 2, 3 відповідно.

На рис. 3 та 4 представлено оглядач змінних та результати моделювання при u=2.

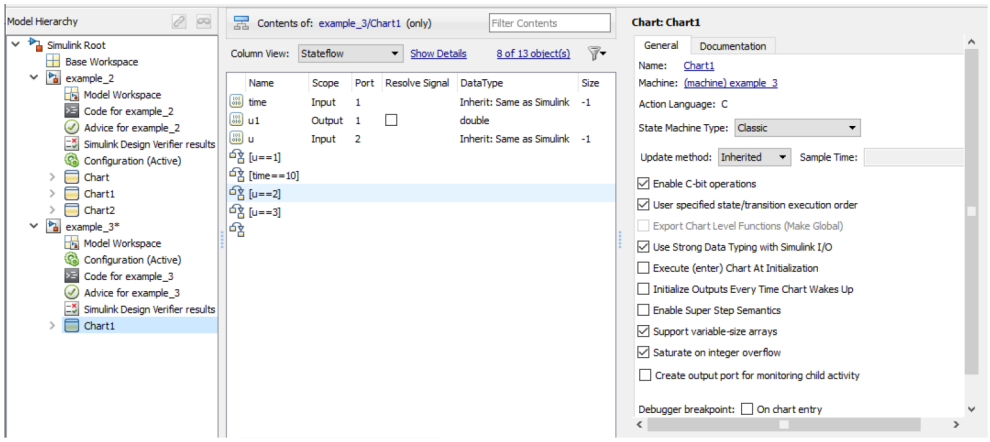

Рис. 3. Змінні та події змодельованої системи

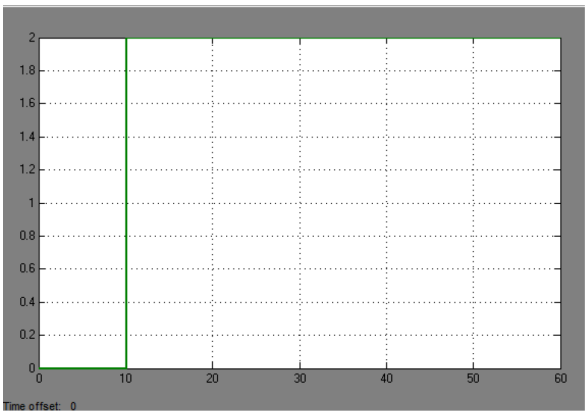

Рис. 4. Результати моделювання

Розглянемо тепер моделювання роботи агрегату «піч-ківш». Позапічна обробка – швидко розвиваючий, перспективний метод отримання високоякісної сталі. Порядок обробки ковшів на ділянці позапічної обробки сталі наступний: сталь, що виплавляють в металургійних цехах, розливають в ковші, виконують скачування шлаку на машині скачування шлаку, послідовно нагрівають та доводять за хімічним складом на установці «піч-ківш», після чого відправляють на вакуумну обробку.

Отже, одним з основних агрегатів позапічної обробки є установка «піч-ківш», яка слугує для підігріву металу перед послідовними технологічними операціями та доводці розплаву за хімічним складом.

Робота «печі-ковша» характеризується різними режимами нагріву в залежності від ввімкнення ступенів потужності трансформатора (4, 6, 8). Нагрів металу починають на низьких ступенях потужності, як правило, 4-й, поки не стабілізується робота електродів. Після переходять на більш високі ступені, і основний нагрів виконують на 8-й ступені до тих пір, поки не буде досягнута потрібна температура. Нижче приведена часова діаграм процесу (рис. 5).

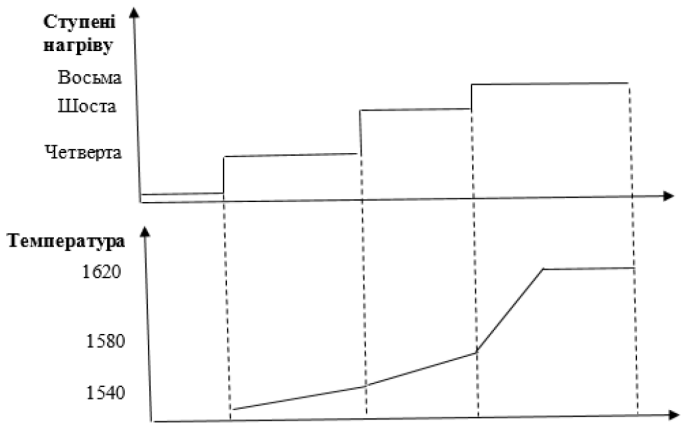

Рис. 5. Часова діаграма процесу

У вікні редактора Stateflow створюємо структурну схему моделі, як на рис. 6.

У Simulink потрібно до Stateflow моделі додати блоки, які дозволять генерувати дані. На рис. 7 показано загальний вигляд моделі Simulink.

Опишемо роботу створеної моделі.

За замовчуванням активізується стан 1. Як тільки функція LHF1, що задається із Simulink в блоці *Step* стає рівною 1, починається нагрів металу на установці «піч-ківш» і відбувається перехід до стану 2. В залежності від значення функції *Stupen*, відбувається послідовне перемикання станів, імена яких відповідають номерам ступенів потужності трансформатора. Спочатку активізується стан 3 (виконується умова переходу [Stupen==4]). У цьому стані відбувається зміна температури розплаву *T* наступним чином:

```
during: T0+dT4*(time-time1);
exit: temp=T; time1=time.
```

Як тільки значення змінної *Stupen* перестає бути рівним 4 (виконується умова переходу [Stupen!=4]), виконується перехід до точки прийняття рішення, а потім до стану 6. Стан 6 має наступні процедури:

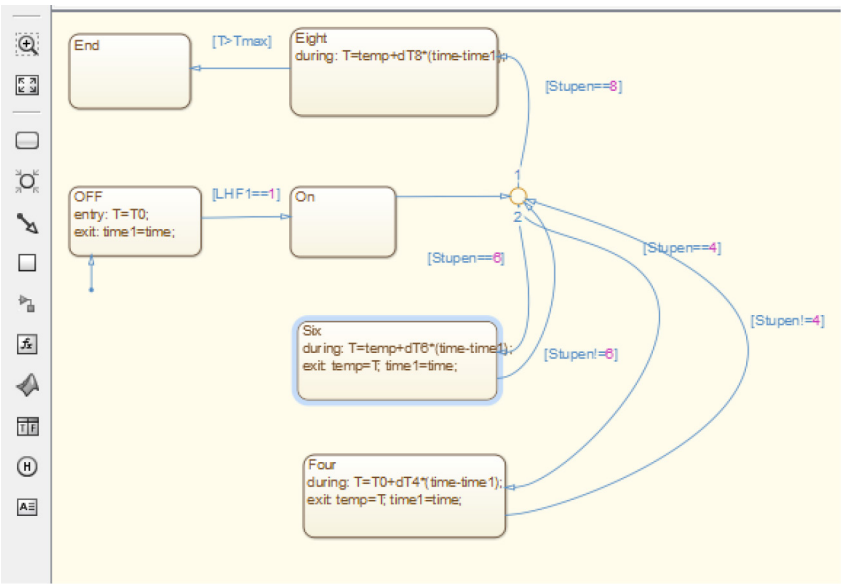

Рис. 6. Загальний вигляд діаграми Stateflow

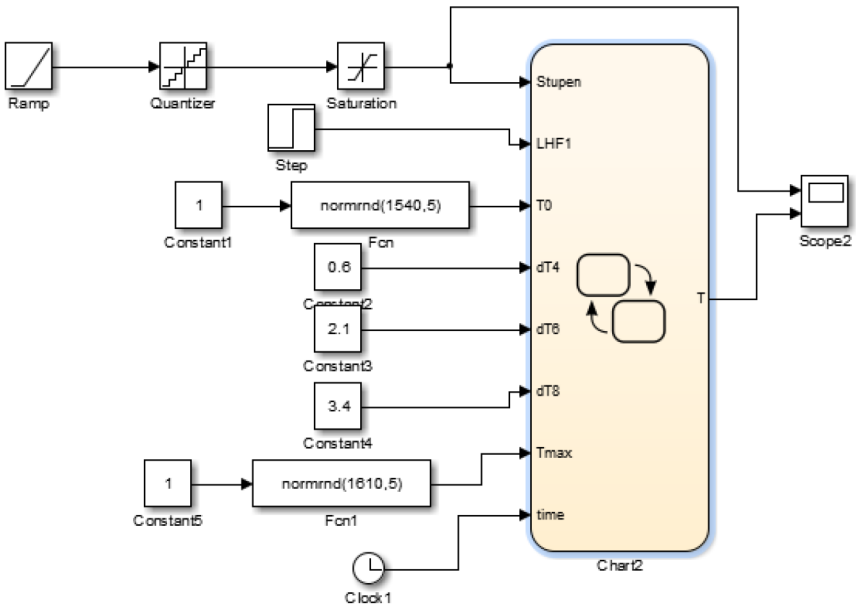

Рис. 7. Загальний вигляд моделі Simulink

```
during: temp+dT6*(time-time1);
exit: temp=T; time1=time.
```

А стан 8 такий: *during: temp+dT8*(time-time1).*

Як видно, під час кожного із станів змінюється температура розплаву *T*. Змінна *T* є вихідною і відображається на графіку моделювання. Швидкості нагріву розплава в залежності від ступені потужності (вихідні змінні *dT4, dT6, dT8*) задаються з моделі Simulink.

Як тільки значення температури T стає більше ніж задана температура нагріву T_{max}, виконується перехід до стану Кінець і модель Stateflow завершує свою роботу.

Крім швидкості нагріву *dT* та заданої температури нагріву T_{max}, на час роботи моделі також впливає початкова температура T_0. Вона також задається з Simulink. Значення цієї змінної повинно бути в діапазоні 1520–1580 °C.

В блоці Fcn моделі Simulink для завдання випадкового розподілення значення температури T_0 використовується формула: normrnd(m_{1x}, σ_x). Для завдання випадкового розподілення значення температури в блоці Fcn1 вводимо формулу: normrnd(m_{2x}, σ_x).

Таблиця змінних моделі представлена на рис. 8.

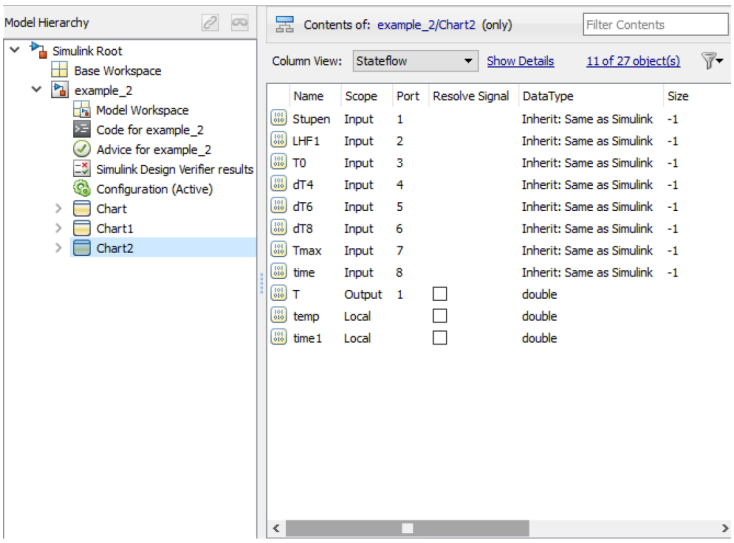

Рис. 8. Таблиця змінних моделі

На рис. 9 приведені результати моделювання.

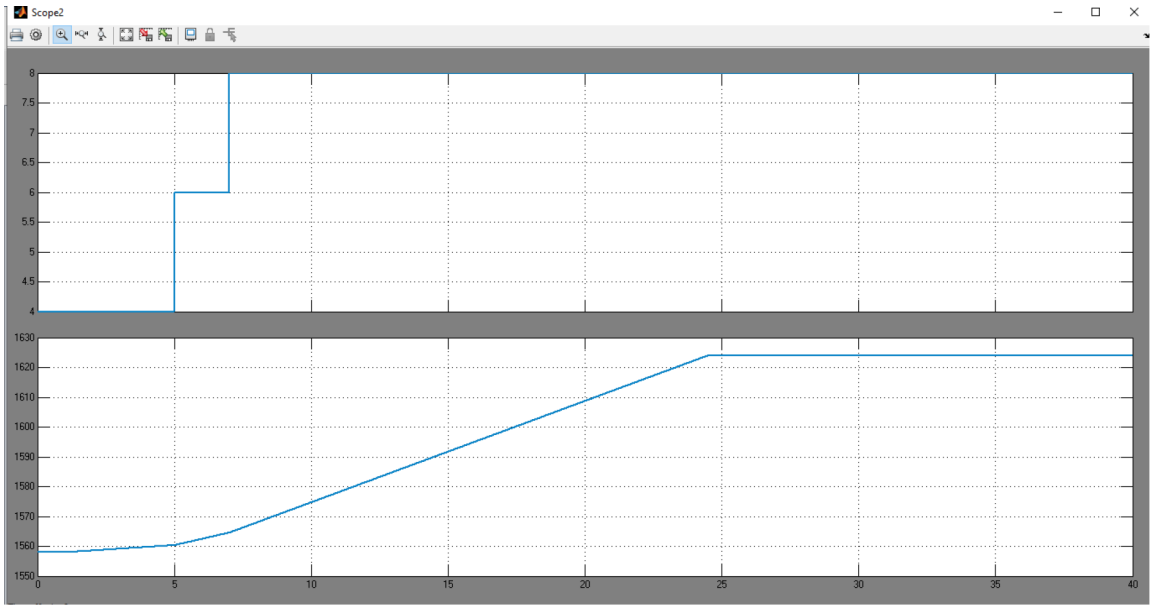

Рис. 9. Фінальні результати моделювання

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що отримані графіки відповідають діаграмі процесу, що була приведена на рис. 6.

Розглянемо більш складну систему управління формуванням багатокопонентних порцій шихти на доменному конвеєрі [6]. Оскільки процес функціонування системи шихтоподачі розглядається як послідовна зміна її станів при транспортуванні доз агломерату, окатишів і коксу, то для моделювання роботи системи шихтоподачі з можливістю формування на конвеєрі багатокомпонентної порції обраний саме Stateflow. Модель цього процесу представлена на рис. 10.

Перед початком моделювання за заданою програмою завантаження доменної печі визначають багатокомпонентну змішану порцію у вигляді послідовних ділянок на збірному конвеєрі, на яких кількість і співвідношення змішування компонентів постійно. Таким чином, у Simulink-моделі вихідними даними для моделювання є маса компонентів на кожній з ділянок, насипна маса шихтових матеріалів, об’ємна продуктивність збірного конвеєра. Також визначаються вагові воронки, що беруть участь у процесі формування багатокомпонентної порції.

Внутрішня структура моделі – основна діаграма станів та їх переходів StateChart, представлена на рис. 11.

Блок «Система управління» розраховує відповідно до заданої багатокомпонентної порції необхідну витрату кожного компонента в межах ділянки.

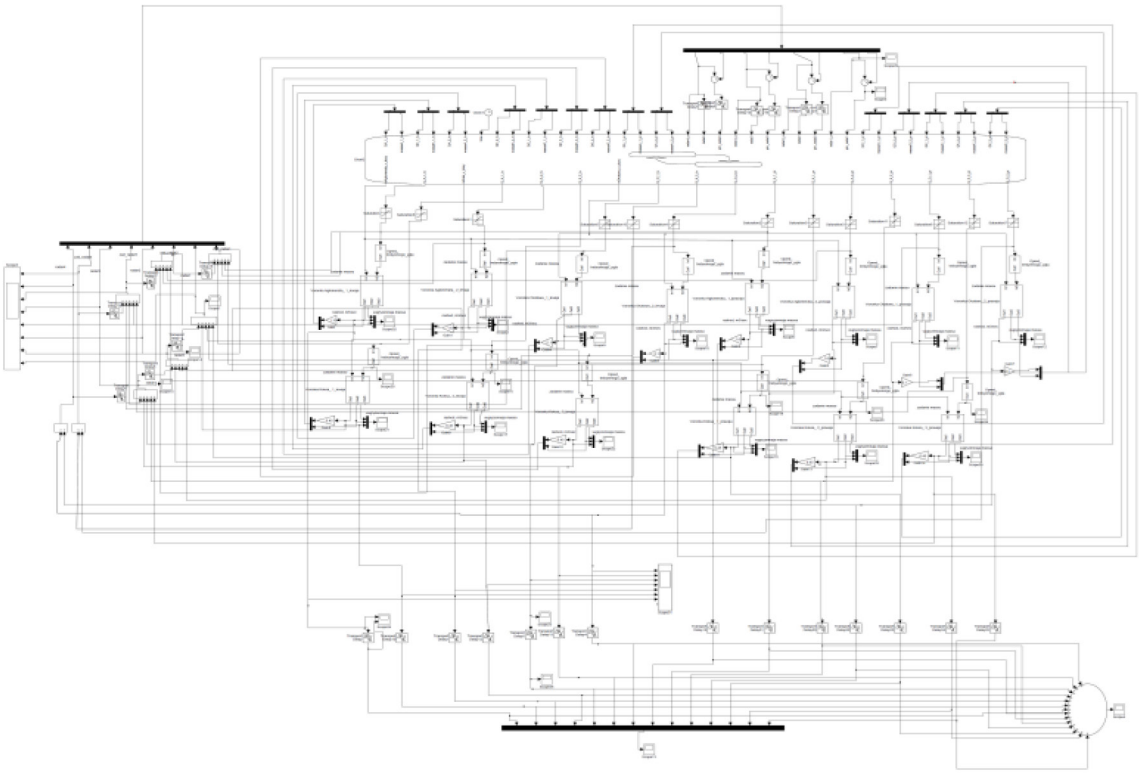

Рис. 10. Загальний вигляд Simulink-моделі

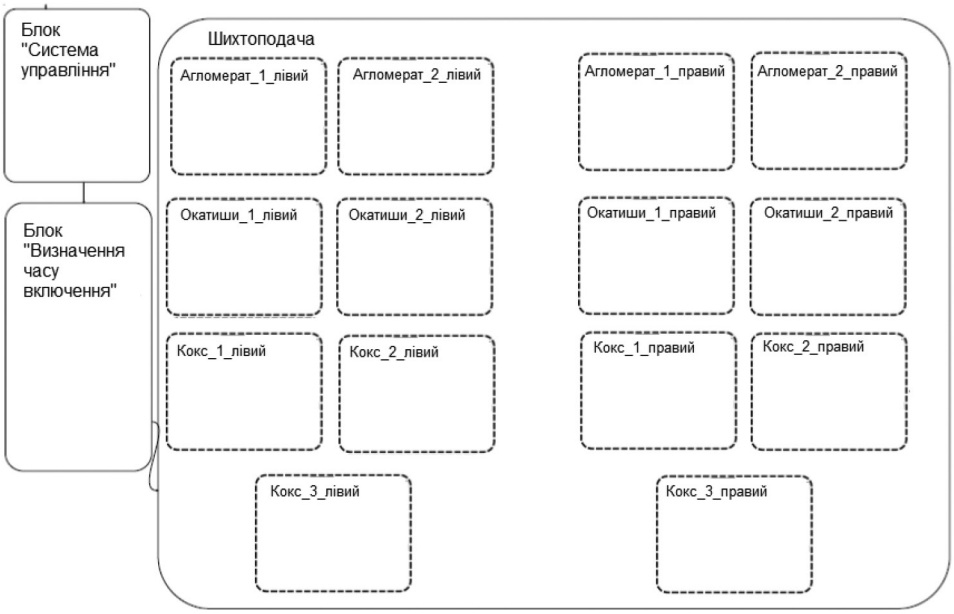

Рис. 11. Структура Stateflow-моделі

Блок «Визначення часу включення» визначає прогнозовані часові тривалості головних та хвостових частин дози в межах ділянки, а також час включення механізмів розвантаження при прямій послідовності роботи вагових воронок.

Основний блок «Шихтоподача» включає 14 паралельних блоків, які можуть бути активні одночасно: 4 блоки для імітації роботи вагових бункерів агломерату – Агломерат_1_лівий, Агломерат_2_лівий, Агломерат_1_правий, Агломерат_2_правий; 4 блоки для імітації роботи вагових бункерів окатишів – Окатиші_1_лівий, Окатиші_2_лівий, Окатиші_1_правий, Окатиші_2_правий, 6 блоків для імітації роботи вагових бункерів коксу – Кокс_1_лівий, Кокс_2_лівий, Кокс_3_лівий, Кокс_1_правий, Кокс_2_правий, Кокс_3_правий. Кожен із цих станів працює незалежно від інших. Стан стає активним, якщо спрацьовує умова переходу, що веде до цього стану.

Кожна з 14 подій включає вкладені ексклюзивні стани, що характеризують готовність вагової воронки до вивантаження і розвантаження шихти на 1, 2, …, *i*-й ділянці (рис. 12).

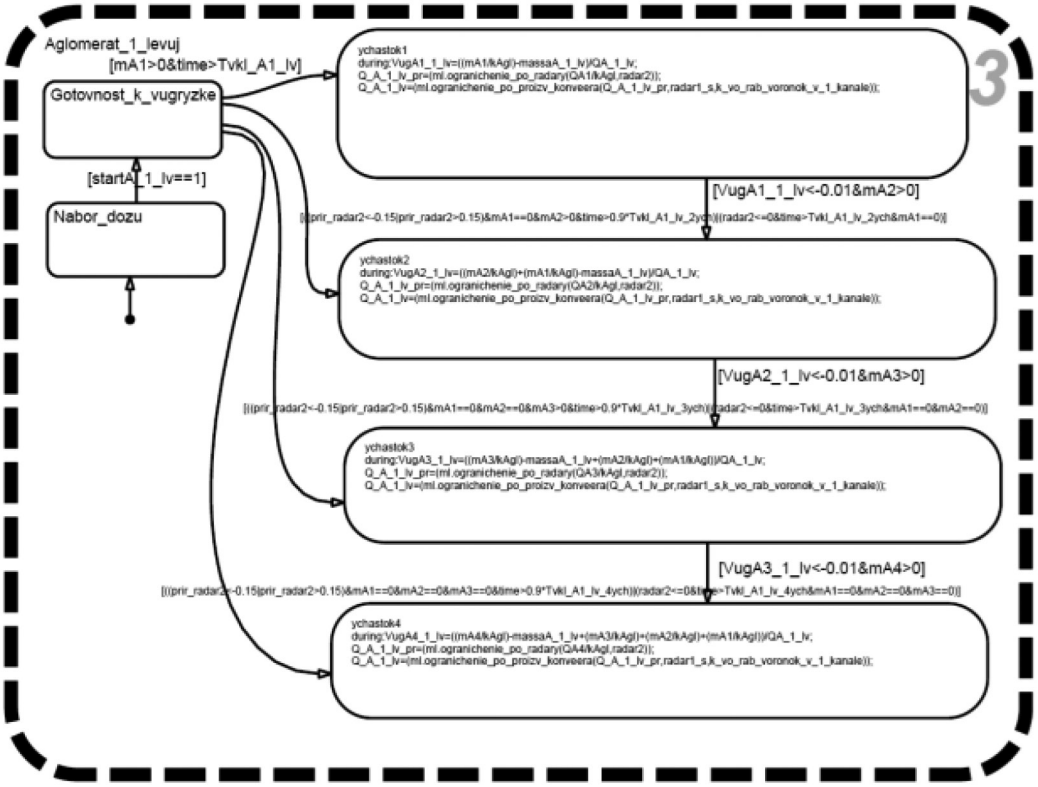

Рис. 12. Діаграма Stateflow, що імітує роботу вагової воронки

Крім Stateflow-діаграми Simulink-модель містить також 14 моделей систем регулювання дозуванням матеріалу.

Розглянемо модель формування порції, структура якої представлена на рис. 13. Задаються наступні параметри: $m_A/1 = 30$ т – маса агломерату на першій ділянці, $m_K/1 = 10$ т – маса коксу на першій ділянці; $m_O/2 = 20$ т – маса окатишів на другій ділянці; $\gamma_A = 1{,}6$ т/м^3 – насипна маса агломерату, $\gamma_K = 0{,}45$ т/м^3 – насипна маса коксу, $\gamma_O = 2{,}1$ т/м^3 – насипна маса окатишів; П = 0,8 м^3/с – об'ємна продуктивність збірного конвеєра. Для вивантаження обрані вагові бункери Кокс_3_лівий, Агломерат_1_лівий та Окатиші_1_лівий.

Рис. 13. Структура заданої порції

Результати моделювання наведені на рис. 14–18.

На рисунках 14–16:

1 – графік зміни кута відкриття затвора вагової воронки в градусах;

2 – вивантажена маса у тонах;

3 – завантаження матеріалом доменного конвеєра.

Аналіз графіків, отриманих в процесі моделювання, дозволив встановити, що розроблена модель дозволяє формувати змішані порції, що складаються з будь-якої кількості матеріалів, з урахуванням заданого розташування компонентів та їх співвідношення в порції, змінної геометрії сипучого матеріалу, що розвантажується з вагової воронки, та сумарної об'ємної продуктивності конвеєра.

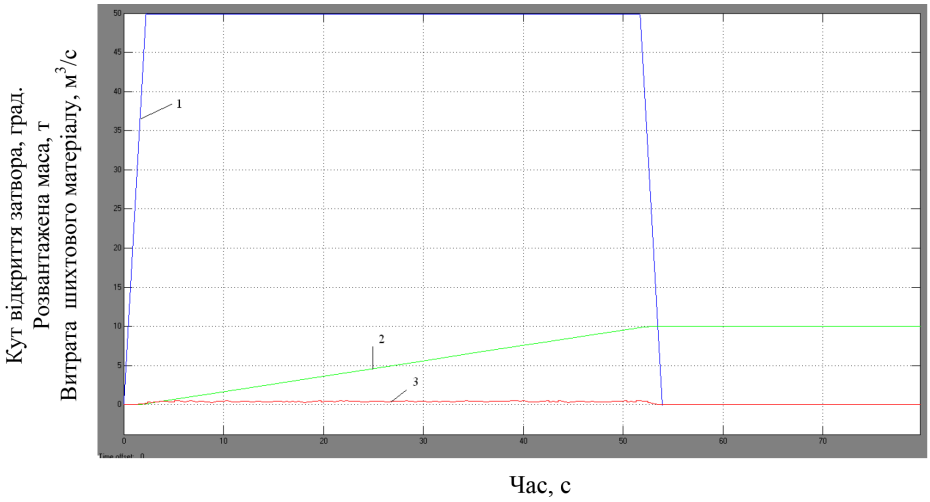

Рис. 14. Робота вагової воронки Кокс_3_лівий

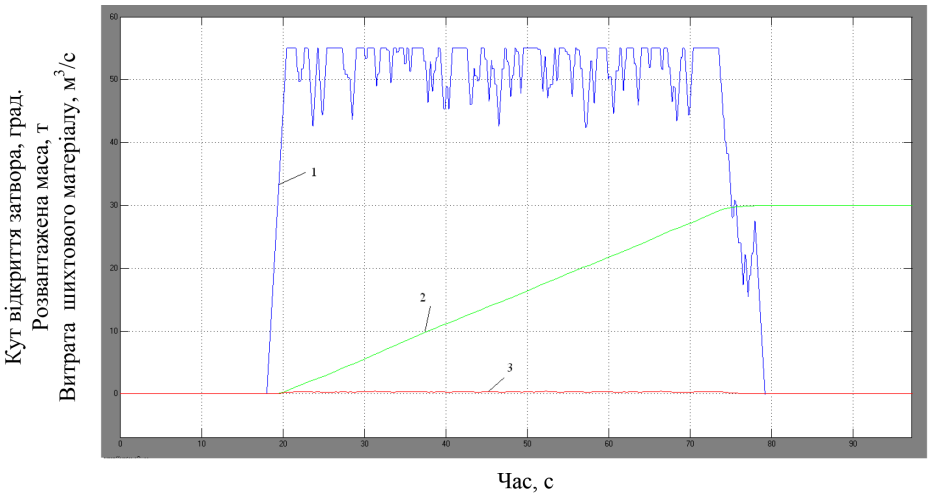

Рис. 15. Робота вагової воронки Агломерат_1_лівий

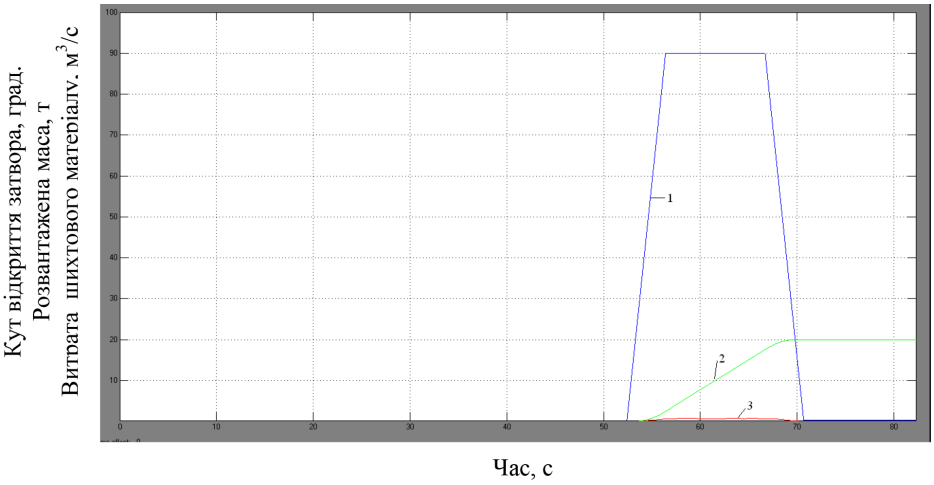

Рис. 16. Робота вагової воронки Окатиші_1_лівий

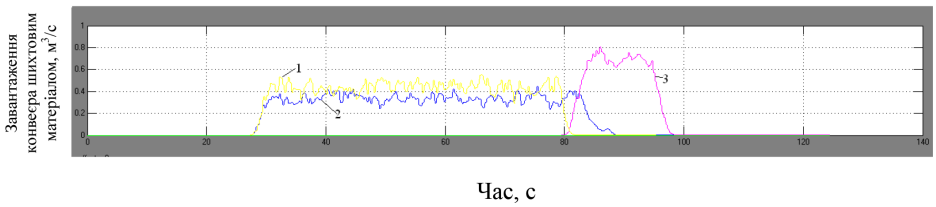

Рис. 17. Накладення в часі графіків зміни витрат компонентів: 1 – графік зміни витрати агломерату; 2 – графік зміни витрати коксу; 3 – графік зміни витрати окатишів

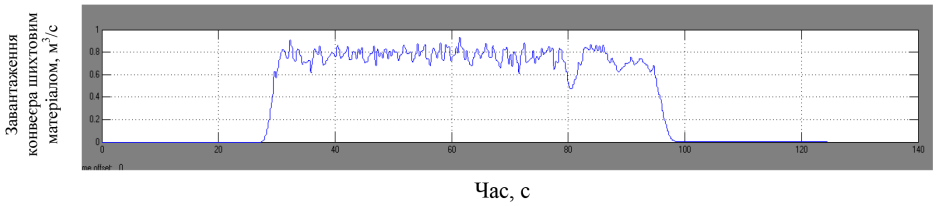

Рис. 18. Завантаження матеріалом конвеєра

Висновки

Таким чином, наведені приклади підтвердили доцільність використання програми Stateflow для:

– моделювання процесів плавки та розливання металу;
– моделювання систем керування доменними печами;
– моделювання систем керування транспортними системами в металургійних цехах.

Список використаної літератури

1. Documentation MathWorks [Електронний ресурс] // Офіційний інтернет-сайт MathWorks. URL: https://de.mathworks.com/help/

2. Левінський, М. В., Левінський, В. М. Використання Stateflow для побудови алгоритмів і програм системи логічного керування транспортною ділянкою переміщення сипучих вантажів. Збірник наукових праць Національного університету «Одеська морська академія», 1 (60). С. 122–132.

3. Веселовська Н. Р. Практична реалізація методики управління процесом механічної обробки. / Н. Р. Веселовська // Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця. 2020. № 1(108). С. 91–102.

4. Муха Ар. А. Моделювання алгоритму функціонування АПС-ЕГ засобами пакету MATLAB Simulink+Stateflow // Математичні машини і системи. 2013. № 4. С. 179–187.

5. Кукушкін О. М., Бейцун С. В., Жаданос О. В., Рубцов Д. А. Аналіз складних систем: Навчальний посібник. Дніпропетровськ : ДІПОпром, 2007. 68 с.

6. A Model to Control the Formation of Multi-Component Charge Portions on a Blast Furnace Conveyor / Rybalchenko, M.O., Selegej, A.M., Golovko, V.I., Selegej, S.M., Mirgorodskaya, O.S.// Science and Innovation – Volume 16(6). 2020. P. 36–45. (Web of Scince ISSN 2413-497X (Ukrainian ed. Online) ISSN 1815-2066 (Ukrainian ed. Print) https://doi.org/10.15407/scine16.06.036

References

1. Documentation MathWorks [Electronic resource] // Official MathWorks website. URL: https://de.mathworks.com/help/

2. Levinsky, M. V., Levinsky, V. M. Using Stateflow to build algorithms and programs for the logical control system of the transport section of bulk cargo movement. Collection of scientific papers of the National University “Odesa Maritime Academy”, (1(60)), P. 122–132.

3. Veselovska N. R. Practical implementation of the method of controlling the mechanical processing process. / N. R. Veselovska // Technology, energy, transport of the agricultural complex. Vinnytsia. 2020. No. 1(108). P. 91–102.

4. Mukha A. A. Modeling the algorithm of the APS-EG functioning using the MATLAB Simulink+Stateflow package // Mathematical machines and systems. – 2013. No. 4. P. 179–187.

5. Kukushkin O. N., Beitsun S. V., Zhadans A. V., Rubtsov D. A. Analysis of complex systems: tutorial. Dnipropetrovsk : GIPOprom, 2007. 68p.

6. A Model to Control the Formation of Multi-Component Charge Portions on a Blast Furnace Conveyor/ Rybalchenko, M. O., Selegej, A. M., Golovko, V. I., Selegej, S. M., Mirgorodskaya, O. S.// Science and Innovation. Volume 16(6). 2020. C.36–45. (Web of Scince ISSN 2413-497X (Ukrainian ed. Online) ISSN 1815-2066 (Ukrainian ed. Print)) https://doi.org/10.15407/scine16.06.036