УДК 681.513

ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКТИВНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЧАВУННОГО ВИЛИВКА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Є.А. Савченко, О.В. Кравченко
Міжнародній науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України
savchenko@irtc.org.ua,

Для розв'язання задачі моделювання процесу охолодження чавунного виливка за експериментальними даними застосовано комбінаторним алгоритм МГУА, за допомогою якого отримано моделі, що відображають залежність проміжної температури від параметрів, які впливають на процес охолодження виливка.
Ключові слова: комбінаторний алгоритм МГУА, охолодження виливка, проміжна температура

Для решения задачи моделирования процесса охлаждения отливка по экспериментальным данным применен комбинаторный алгоритм МГУА, с помощью которого получены модели, отражающие зависимость промежуточной температуры от параметров, которые влияют на процесс его охлаждения.
Ключевые слова: комбинаторный алгоритм МГУА, охлаждение отливка, промежуточная температура.

To solve the problem of modeling the process of cooling the casting from the experimental data used combinatorial algorithm GMDH which are obtained via model reflecting intermediate temperature dependence of the parameters that affect the cooling process.
Keywords: combinatorial GMDH algorithm, cooling casting, intermediate temperature.

Вступ

Метою даної роботи є застосування індуктивного підходу для моделювання одного з процесів, що відбувається при ливарному виробництві, а саме процесу охолодження чавунного виливка для подальшого підбору такого оптимального режиму охолодження, що дасть можливість отримати виливок заданої структури.

Дані для проведення дослідження отримано фахівцями з інституту металів та сплавів, з якими співпрацюють автори. Поставлено задачу знайти оптимальну модель охолодження чавунного виливка. У роботі розглядається охолодження циліндричного виливка з чавуну СЧ20 в піщаній ливарній формі.

Для побудови моделей в роботі використовується індуктивний підхід. Він заснований на побудові моделі переходу від окремих даних до їх узагальнення у вигляді моделей.

Втіленням індуктивного підходу є метод групового урахування аргументів (МГУА) - оригінальний метод побудови моделей за експериментальними даними в умовах невизначеності, автором якого є академік О.Г. Івахненко.

Цей метод зарекомендував себе як метод, що дає можливість відкривати залежності і видобувати нові знання, які містяться в вибірці даних, але невідомі людині - автору моделювання. Тобто отримані за цим методом моделі оптимальної складності відтворюють невідому закономірність функціонування досліджуваного об'єкта (процесу), інформація про які неявно міститься у вибірці даних [1-3].

Ефективність алгоритмів МГУА підтверджена широким досвідом успішного вирішення численних реальних завдань в екології, гідрометеорології, економіці, техніці, як у нас, так і за кордоном [4, 5].

1. Постановка проблеми

В інституті металів та сплавів проводяться дослідження процесу охолодження чавунного виливка при різних режимах охолодження. Метою таких досліджень є досягнення певної якості готового чавунного продукту, який був би міцним і відповідав би заданим властивостям.

Проведено вимірювання температури охолодження зазначеного виливка при різних характеристиках дисперсного наповнювача форми і застосовуючи різні режими впливу на нього.

У проведених експериментах використано контейнерну вакуумуєму піщану форму, в якій охолоджували циліндричний чавунного виливок, моделюючи ливарний технологічний процес. У цій формі проводили вимірювання температури охолодження зазначеного виливка, змінюючи характеристики дисперсного наповнювача форми і застосовуючи різні режими впливу на нього.

На рисунку 1 наведено контейнерну форму в розрізі, де позначено:

1 - мановакуумметри;

2 - заливальна воронка;

3 - випар виливка-зразка;

4 - синтетична плівка (або металева герметична кришка);

5 - сітка трубки-подачі або відсмоктування повітря;

6 - манометр надлишкового тиску;

7 - регулюючі вентилі;

8 - сипучий наповнювач;

9 - сітчасте днище для вертикального відсмоктування повітря;

10 - вогнетривка підставка.

Розплав чавуну СЧ20 заливається у заливну воронку 2 (рис. 1) та охолоджується під дією різних режимів.

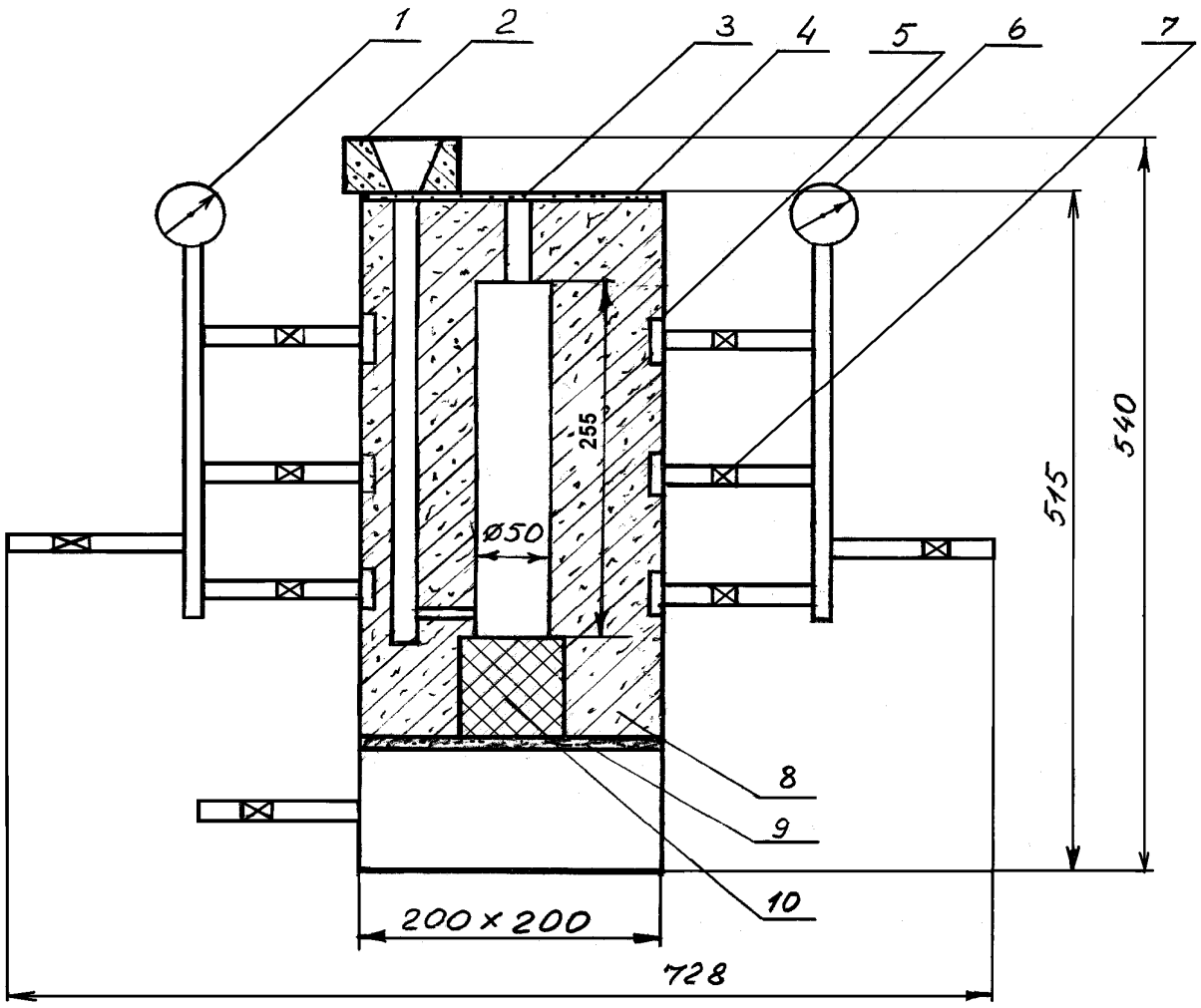

Рис.1. Контейнерна форма в розрізі

Розплав чавуну СЧ20 заливається у заливну воронку 2 (рис. 1) та охолоджується під дією різних режимів.

Застосовуються такі режими охолодження виливку:

1. У сипучий наповнювач (8) додається різна кількість води, наприклад 200 г.;
2. Може відбуватися продувка або відсмоктування повітря (5);
3. Може використовуватися продувка піску через регулюючі вентилі (7).

При проведенні експерименту в тепловідвідному шарі піщаного середовища ливарної форми було встановлено біля поверхні виливка і по глибині цього шару з кроком ℓ = 10мм п'ять термопар з записуючим потенціометром для визначення величин температур по товщині дисперсного тепловідвідного шару. Проведено цикл вимірювання температур по товщині цього шару в часі від процесу заливки форми рідким чавуном до його охолодження до температури вилучення з ливарної піщаної форми (300-400 °С). На рис. 2 наведено точки розміщення термопар (1-5) при охолодженні до температури вилучення з ливарної піщаної форми.

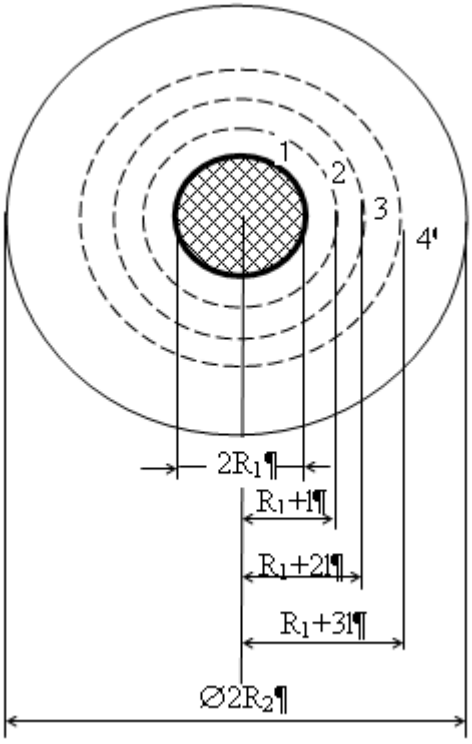

Рис.2. Точки розміщення термопар

В таблиці 1 наведено температуру виливка, яка вимірюється термопарами в заданих точках (рис.2).

Таблиця 1

Температура виливка

T	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
0.00	29	30	31	31	31
5.00	29	30	31	31	31
10.00	29	30	31	31	31
15.00	29	30	31	31	31
20.00	29	30	31	31	31
25.00	29	30	31	31	32

Продовження таблиці 1

30.00	29	31	32	32	32
35.00	30	32	32	33	34
40.00	30	33	33	35	35
45.00	31	35	35	38	37
50.00	33	37	36	41	41
55.00	34	40	39	45	44
60.00	36	44	41	50	49
65.00	39	48	45	56	55
70.00	42	54	49	62	61
75.00	45	59	54	70	68
80.00	48	65	59	77	76
85.00	52	71	64	85	84
90.00	56	78	70	94	93
95.00	61	85	76	103	102
100.00	66	93	83	112	111

На рисунку 3 наведено результат експерименту, в якому чавунний виливок охолоджується без наповнювача і без дії на нього інших впливів. П’ять кривих, які зображені на графіку, визначають охолодження виливка в п’яти різних точках, де розміщено термопари, які зображено на рис.2.

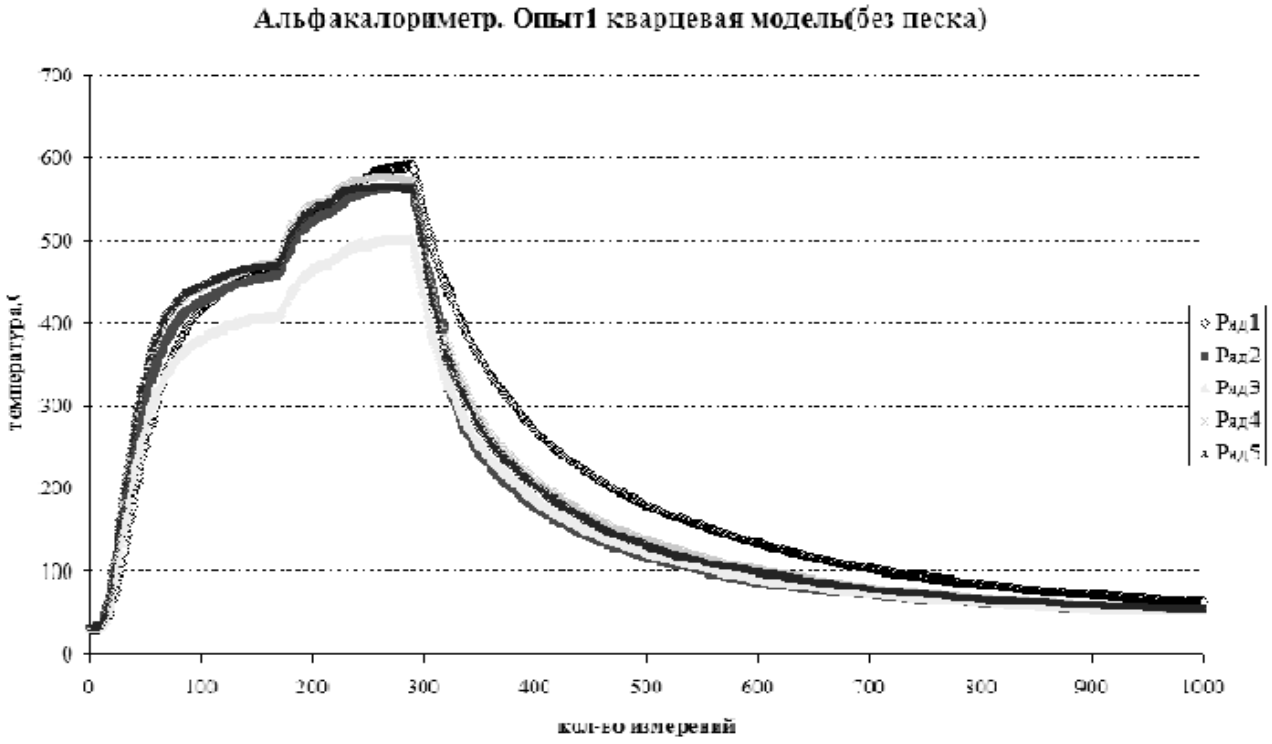

Рис. 3 Результат одного з проведених експериментів

Проведено близько 50 експериментів, серед яких експертами визначено найкращі, що задовольняють заданим вимогам.

За результатами цих експериментів складено таблицю 2.

Таблиця 2

Дані охолодження виливка

№	Початкова T^0, C	Проміжна T_2^0, C	Час (сек.)	Умови
1	560	275	2400	Пісок без впливу
2	500	360	1575	Вібрація на протязі 20 хв. +5хв. вібрація та вакуумування
3	550	350	2400	Вакуум 40 хв.
4	580	360	2400	Продувка, через 3 хв., вакуумування
5	500	285	2400	Вакуумування 40 хв., продувка через верхній кран
6	520	340	2400	Вакуум - $0.6 кгс / м^2$ на протязі 40 хв., продувка верхнього і середнього кранів
7	520	320	2400 с	Вакуум 40 хв., продувка через три крана
8	500	275	2400	Вакуум 40 хв., продувка верхнього крану
9	465	285	2400	Продувка через верхній і нижній крани з вакуумуванням 40 хв.
10	505	325	2400	Продувка через три крани, 40 хв.
11	505	305	2400	Вібрація 20 хв., з одночасною продувкою 40 хв. через три крана
12	500	305	2400	Продувка 40 хв. через верхній кран
13	450	250	2400	Продувка через верхній і середній крани
14	550	180	2400	Металічний циліндр в пустому контейнері
15	610	375	2400	Металічний циліндр в чорному кварцовому піску
16	530	265	2400	В чорному кварцовому піску продувка через 3 крани, вакуум – 40 хв.
17	500	215	2400	Додання 200 г води і продувка через верхній кран

2. Застосування індуктивного підходу для побудови моделей

За всю історію розвитку алгоритмів МГУА вони мали широкий спектр застосувань в різних галузях людської діяльності. Ще в 1980-х роках МГУА застосовувався для моделювання реальних задач побудови моделей деяких фізико-технологічних процесів, пов'язаних зі сферою металів і сплавів. МГУА був застосований для моделювання процесу виплавки силікомарганцю в електропечі [4]. Побудовано моделі залежності питомої витрати електроенергії, вмісту кремнію в сплаві і марганцю в шлаку. Ці моделі дозволяють оптимізувати витрата електроенергії в електропечі.

МГУА використаний для прогнозування виникнення анодного ефекту в алюмінієвих електролізерах по спектральним характеристикам [5], а також побудови залежності геометричних характеристик хвилеподібною поверхні між плитами, що утворюється при зварюванні вибухом, від розташування та розміру плит, а також від кількості використовуваної вибухівки [6]. У задачі моделювання взаємодії іонів з поверхнею матеріалів побудована залежність коефіцієнта розпилення поверхні матеріалу потоком іонізованого газу від його властивостей [7]. Метою вирішення такого завдання є підбір матеріалу покриття поверхні літального апарату, який би найменш всього руйнувався потоком газу.

Таким чином, на основі досвіду застосування методів, розроблених в теорії індуктивного моделювання, запропоновано застосування індуктивного півдходу для моделювання процесу охолодження чавунного виливка.

3. Моделювання охолодження виливка за комбінаторним алгоритмом МГУА

У роботі поставлено задачу побудови моделі залежності проміжної температури від параметрів, які впливають на процес охолодження виливка. За цією моделлю можна буде визначити проміжну термератури при заданих режимах охолодження, знаючи початкову температуру виливка.

На основі даних таблиці 2 складено вибірку даних (таблиця 3), яка містить оцифровані значення ризних режимів охолодження виливка. В таблицю ввійшли тільки ті експерименти, які мали задовільний кінцевий результат, що було визначено експертами. Значення зміних таблиці 3 визначено так: за наявності вібрації та вакуумування записано час їх проведення; при застосуванні продувки «1» - її наявність, «0» - у разі її відсутності.

Вибірка вхідних даних (табл. 3) використано для моделювання. Для побудови моделей застосовується комбінаторний алгоритм МГУА. Останні два експерименти залишені для перевірки моделей.

Таблиця 3

Вибірка вхідних даних для моделювання

№	T	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	Проміжна T_{20}, С	Початкова T_0, С	Час	Вібрація	Вакуумування	Продувка		
2				хв	хв	1й кран	2й кран	3й кран
3						Верхній	середній	нижній
4	275	560	2400	0	0	0	0	0
5	360	500	1575	20	40	0	0	0
6	350	550	2400	0	40	0	0	0
7	360	580	2400	0	40	1	1	1
8	285	500	2400	0	40	1	0	0
9	340	520	2400	0	40	1	1	0
10	320	520	2400	0	40	1	1	1
11	275	500	2400	0	40	1	0	0
12	285	465	2400	0	40	1	0	1
13	325	505	2400	0	0	1	1	1
14	305	505	2400	20	0	1	1	1
15	305	500	2400	0	0	1	0	0
16	250	450	2400	0	0	1	1	0
17	375	610	2400	0	0	0	0	0
18	265	530	2400	0	40	1	1	1

Далі розглянуто два варіанти побудови моделей: без масштабування даних та з його застосуванням.

Перший варіант. Без масштабування даних за даними табл.3 застосовуючи комбінаторний алгоритм МГУА отримано таку модель:

Модель 1. (без масштабування)

$$Y = 12{,}0411 + 0{,}5632x_1 - 0{,}2783x_4 .$$

Критерії моделі $AR = 483{,}54$; $CB = 2064{,}6$.

де AR - зовнішній критерій точності, CB - зовнішній критерій незміщеності помилок.

На рис. 4. наведено результат моделювання за моделлю №1. Наведено дійсні значення початкової температури (суцільна лінія) та за отриманою моделлю (пунктирна лінія).

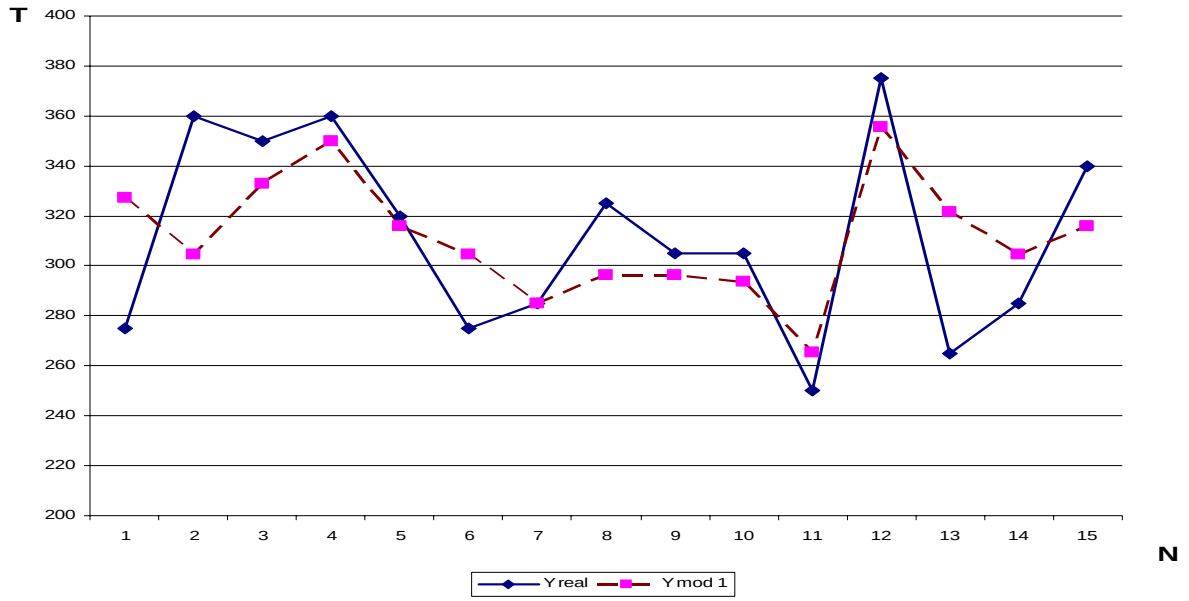

Рис.4. Результати моделювання за моделлю №1

Другий варіант

Далі наведено три найкращих моделі за комбінаторним алгоритмом МГУА, які отримано з масштабуванням даних, тобто дані кожного стовпця табл.3 поділено на максимальне значення у цьому стовпці. Моделі відрізняються за кількістю аргументів.

Модель 2. (з масштабуванням)

$$Y = 0{,}4425 + 1{,}0256x_1 - 0{,}5135x_2 + 0{,}0139x_3 - 0{,}0233x_6 + 0{,}0448x_7 .$$

$$\mathrm{AR} = 0.0076,\ CB = 0{,}5642.$$

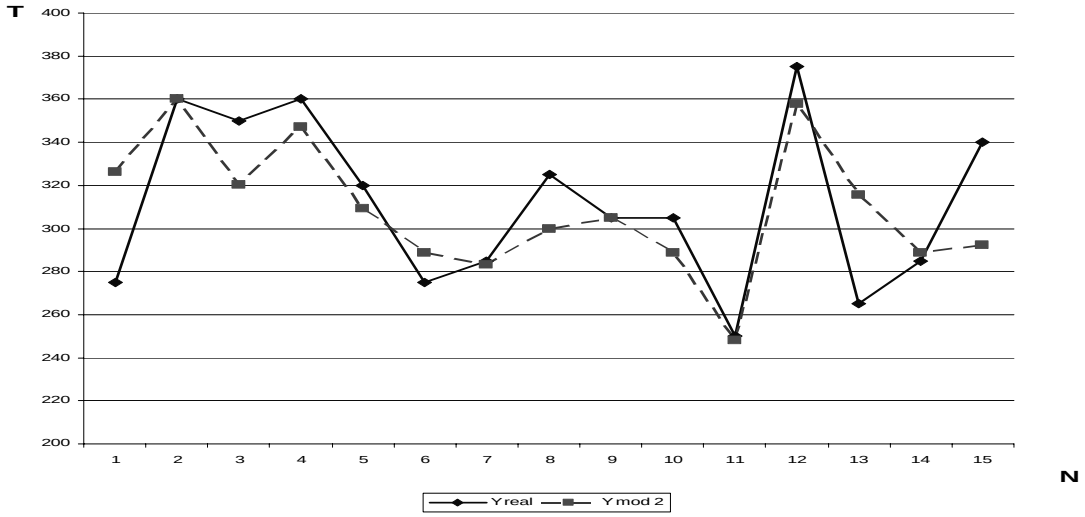

Рис.5 Результати моделювання за моделлю №2

Модель 3. (з масштабуванням)

$$Y = 0{,}482 + 1{,}0037x_1 - 0{,}567x_2 + 0{,}0317x_7,$$

$\mathrm{AR} = 0.00767$, $CB = 0{,}1182$.

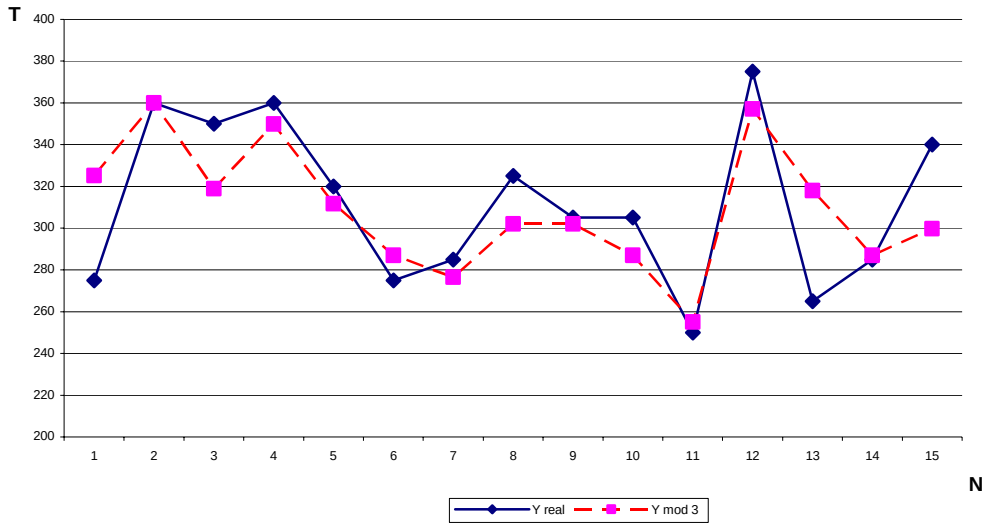

Рис.6 Результати моделювання за моделлю №3

Модель 4. (з масштабуванням)

$$Y = 0{,}493 + 1{,}012x_1 + 0{,}1026x_3,$$

$\mathrm{AR} = 0.00791$, $CB = 0{,}077$.

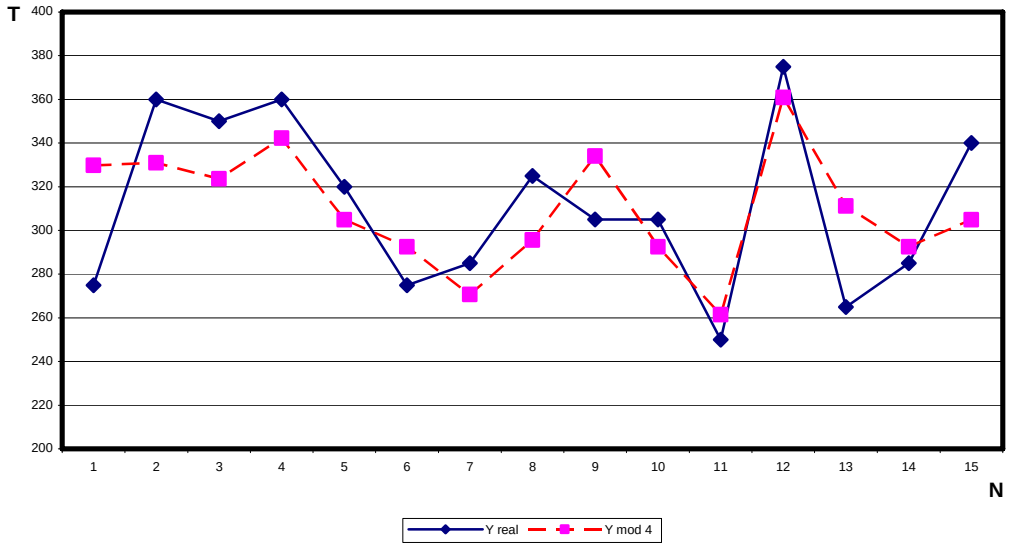

Рис.7 Результати моделювання за моделлю №4

Висновок

У результаті проведеного дослідження побудовано моделі залежності проміжної температури від параметрів, що описують процес охолодження.

Аналіз отриманих моделей показав, що змінна x_1 входить до усіх отриманих моделей. Зрозуміло, що проміжна температура залежить від початкової. В найкращу модель (модель №3) ввійшли початкова температура, час та наявність вакуумування. Отримані моделі можна використати для підбору оптимального режиму охолодження (модель №2).

Література

1. Е.А. Марценюк, В.С. Дорошенко, О.В. Кравченко. Основы теоретического анализа результатов оперативного мониторинга объектов и процессов литейного производства // XII Всеукраїнська науково-практична конференція ”Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, НТУУ «КПІ», Київ, 2014.

2. В. П. Кравченко, О.В. Кравченко. Дистанционный экомониторинг технологических процессов в промышленности // IX Международная научная конференция «Литье. Металлургия. 2014», Запорожье, ФТіМС НАНУ, Київ, 2014.

3. В. П. Кравченко, О.В. Кравченко. Методы индуктивного моделирования в задачах закономерностей теплообмена между отливкой и формой // X Международная научная конференция «Литье. Металлургия. 2014», Запорожье, ФТіМС НАНУ, Київ, 2014.

4. А.Г. Ивахненко. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. - Киев: Наук. думка, 1982 – 296 с.

5. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. - Киев: Наук. думка. – 1985. - 215 с.

6. Goduna V.V., Stepashko V.S. Simulation of the Silicomarganese Melting Process in the Electric Furnace // Automation. – 1989. –N2. – P. 71-75.

7. Аралбаева Г.Г., Сарычев А.П. Прогнозирование анодного эффекта в алюминиевых электролизерах по спектральным характеристикам на основе МГУА // Автоматика. – №6. – 1987. – С. 38 – 45.

8. Ивахненко А. Г. Веревкин М. Е. Ивахненко Г. А. Исследование процесса сварки взрывом с помощью комбинаторного алгоритма МГУА и расширения выборки данных. // Автоматическая сварка, №3, 2004, С. 35 – 44.

9. Ivakhnenko A.G., Savchenko E.A., Somina L.P Inductive Method of Optimal Model Selection by External Error Criterion with Additional Determination Using Bias // Proceedings of International Workshop of Inductive Modelling. Prague, 22-26 September. – 2007. – P. 128 – 133.

10. Savchenko Ie.A., Kravchenko O.V. Analysis of Methods and Tools of Inductive Modeling of Physical and Technological Processes // Proceedings of 4th International Conference in Inductive Modelling ICIM 2013. – Kyiv: IRTC, 2013. – P. 315-319.