

### АРХІТЕКТУРА БАГАТОАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ВІРТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ РОЗПОДІЛУ ЛІГАТУРИ В ЗЛИТКАХ КРЕМНІЮ

**І. Г. Оксанич, О. С. Притчин**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: alpritchin@ukr.net

Розроблено структуру багатоагентної системи віртуального моніторингу температурних полів і розподілу лігатури, що включає в себе множину взаємодіючих агентів, здатних сприймати й колективно обчислювати параметри температурного поля в реальному часі процесу вирощування. Підвищення вимог до якості монокристалічних злитків кремнію призводить до посилення вимог до точності відтворення оптимальних умов вирощування. Це, у свою чергу, вимагає безперервного контролю розподілу лігатури в зоні кристалізації та вирощеної частини злитка. Однак, такий контроль можливий тільки непрямими методами, із залученням специфічних математичних моделей, здатних ідентифікувати температурне поле розплаву і злитка в реальному часі за результатами прямих вимірів температури в окремих точках теплового вузла, швидкості обертання затравки й тигля та деяких інших параметрів. Очевидно, що, використовуючи тільки одну інформаційну технологію, наприклад, розрахунки розподілу лігатури чисельним методом, систему прийняття розв'язків на базі нечіткої логіки або штучні нейронні мережі, вкрай складно ефективно розв'язати поставлене завдання. Тому при розробці системи моніторингу розподілу лігатури було вирішено створити мультиагентну систему.

**Ключові слова:** кремній, розподіл лігатури, умови вирощування, моніторинг.

### АРХИТЕКТУРА МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ВИРТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИГАТУРЫ В СЛИТКАХ КРЕМНИЯ

**И. Г. Оксанич, А. С. Притчин**

Кременчуский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: alpritchin@ukr.net

Разработана структура многоагентной системы виртуального мониторинга температурных полей и распределения лигатуры, включающая в себя множество взаимодействующих агентов, способных воспринимать и коллективно вычислять параметры температурного поля в реальном времени процесса выращивания. Повышение требований к качеству монокристаллических слитков кремния приводит к ужесточению требований к точности воспроизведения оптимальных условий выращивания. Это, в свою очередь, требует непрерывного контроля распределения лигатуры в зоне кристаллизации и выращенной части слитка. Однако, такой контроль возможен только косвенными методами, с привлечением специфических математических моделей, способных идентифицировать температурное поле расплава и слитка в реальном времени по результатам прямых измерений температуры в отдельных точках теплового узла, скорости вращения затравки и тигля и некоторых других параметров. Очевидно, что, используя только одну информационную технологию, например, расчет распределения лигатуры численным методом, систему принятия решений на базе нечеткой логики или искусственные нейронные сети, крайне сложно эффективно решить поставленную задачу. Поэтому при разработке системы мониторинга распределения лигатуры было решено создать мультиагентную систему.

**Ключевые слова:** кремний, распределение лигатуры, условия выращивания, мониторинг.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Підвищення вимог до якості монокристалічних злитків кремнію призводить до посилення вимог до точності відтворення оптимальних умов вирощування. Це, у свою чергу, вимагає безперервного контролю розподілу лігатури в зоні кристалізації та вирощеної частини злитка. Однак, такий контроль можливий тільки непрямими методами, із залученням специфічних математичних моделей, здатних ідентифікувати температурне поле розплаву [1] й злитка в реальному часі за результатами прямих вимірів температури в окремих точках теплового вузла, швидкості обертання затравки й тигля і деяких інших параметрів.

Очевидно, що, використовуючи тільки одну інформаційну технологію, наприклад, розрахунки розподілу лігатури чисельним методом, систему прийняття розв'язків на базі нечіткої логіки або штучні нейронні мережі, вкрай складно ефективно розв'язати поставлене завдання. Тому при розробці системи моніторингу розподілу лігатури було прийнято рішення створити мультиагентну (багатокомпонентну) систему (МАС), у якій результат не-

прямого виміру розподілу лігатури в підкристалічній області й у злитку формується колективом моделей (агентів), кожен з яких робить свій внесок у підвищення адекватності результату виміру.

Метою роботи є підвищення якості моніторингу процесу вирощування монокристалів кремнію шляхом створення мультиагентної системи, що забезпечує моніторинг розподілу лігатури в злитку.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** МАС будується як множина взаємодіючих агентів, здатних сприймати й колективно обчислювати параметри температурного поля в реальному часі технологічного процесу [2]. Це дозволяє МАС вирішувати завдання високої складності, що не піддаються розв'язку іншими методами або потребуючих для свого розв'язку занадто великих обчислювальних ресурсів. МАС використовується як доповнення до існуючої системи автоматичного керування або як підсистема підтримки прийняття розв'язків для оператора-технолога.

На відміну від існуючих ієрархічних МАС, описаних у роботах [3, 4], у розроблюваній системі

агент верхнього рівня ієрархії здійснює контроль поведінки агентів, узагальнення результатів їх діяльності, а також здійснює самонавчання всієї системи в цілому. Самонавчання окремих агентів і системи в цілому дає можливість адаптувати роботу підсистеми моніторингу до індивідуальних властивостей ростової установки й особливостей конкретного процесу вирощування.

Формальну модель МАС, що розробляється, можна представити в вигляді:

$$MAS = \langle A, E, R, F \rangle, \quad (1)$$

де  $A$  – множина агентів;  $E$  – вплив середовища, у якому функціонує МАС;  $R$  – множина відносин

між компонентами;  $F$  – множина функціональних завдань, розв'язуваних МАС.

Структура МАС, призначеної для моніторингу розподілу лігатури (рис. 1), містить наступні елементи: датчик температури нагрівача, температури теплового екрана, температури в точці під поверхнею розплаву, датчики швидкості обертання тигля й злитка; блок первинної обробки й агрегування даних прямих вимірів; базу даних, яку агенти можуть кригувати в процесі самонавчання; агенти А0...А6 вирішують функціональні завдання віртуального моніторингу температури в точках, недоступних для прямого виміру, формування табличного відображення параметрів температурних полів і графічного відображення форми фронту кристалізації.

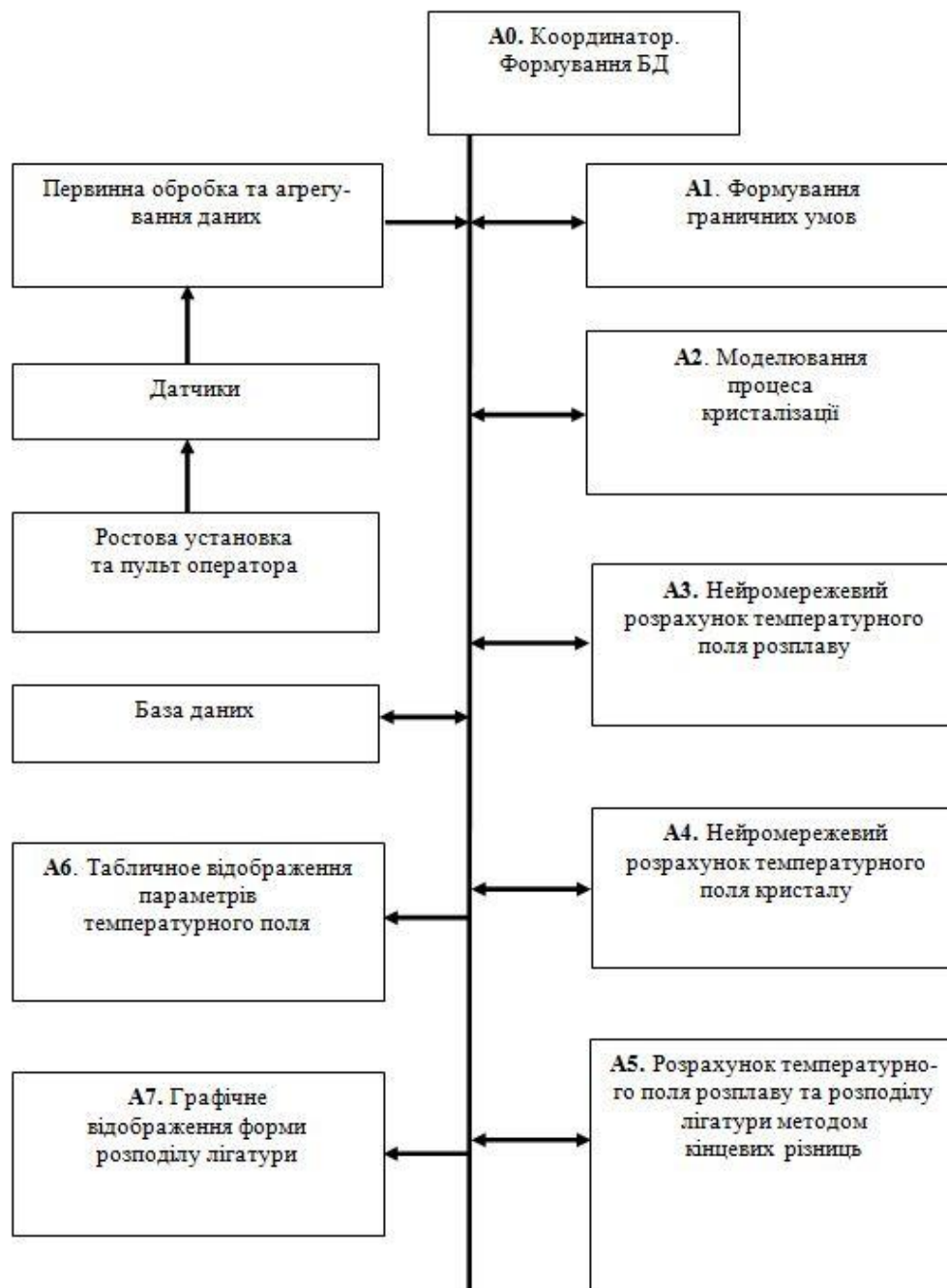


Рисунок 1 – Структура мультиагентної системи моніторингу

Моніторинг температурних полів за допомогою набору агентів, що входять до складу багатокомпонентної системи моніторингу процесу вирощування монокристалів кремнію по Лес-Технології [5] проводиться по наступному алгоритму:

1. Налаштування системи віртуального моніторингу при проведенні типового процесу вирощування. При цьому база даних системи оновлюється скоригованими значеннями параметрів моделей використаних при проектуванні системи.

2. Запуск основного циклу моніторингу. Запуск відліку дискретного часу із заданим інтервалом  $\Delta t$  (агент А0).

На кожному інтервалі:

2.1. Фіксація значень прямо вимірюваних величин та величин, що обчислюються (температури нагрівача, температури теплового екрана, температури в точці під поверхнею розплаву, швидкості обертання тигля й злитка, маси вирощеного злитка, діаметра злитка, рівня розплаву).

2.2. Розрахунок граничних умов для агентів А3 – А6 на підставі прямо вимірюваних величин (агент А1).

2.3. Обчислення значень температури в контрольних точках розплаву за допомогою нейромережової моделі й збереження результатів розрахунків, як точок з фіксованою температурою в розрахунковій сітці поряд з вимірюваною термопарою температурою в контрольній точці. (агент А4).

2.4. Ітераційний розрахунок ступеня затвердіння в зоні кристалізації. Корекція коефіцієнтів тепло-

провідності розплаву в зоні фронту кристалізації (агент А3).

2.5. Нейромережовий розрахунок температури в заданих точках злитка (агент А5).

2.6. Розрахунки температурного поля злитка методом кінцевих різниці із урахуванням граничних умов, у якості яких виступають рівняння теплових потоків випромінювання з поверхонь злитка, тигля й екрана (агент А6). При цьому враховуються точки з фіксованим значенням температури, отримані від агентів А4 і А5.

2.7. Збереження вимірюваних і розрахованих параметрів у базі даних.

2.8. Формування й вивід результатів моніторингу в табличному й графічному форматі

2.9. Кінець тіла основного циклу.

3. Агент А0 фіксує час протікання процесу, поточну довжину й діаметр злитка, рівень розплаву та відповідним чином перебудовує структуру нейромережових моделей. Крім того, координатор поповнює базу даних системи відомостями про зриви оптимальних умов вирощування для наступного аналізу.

Таким чином, використання мультиагентної системи дозволяє здійснювати коригування розподілу лігатури в системі кристал-розплав з обліком рекурентних взаємозв'язків між факторами.

На рис. 2 наведена загальна схема інформаційної технології віртуального моніторингу розподілу лігатури в системі кристал-розплав у процесі виробництва злитків кремнію.

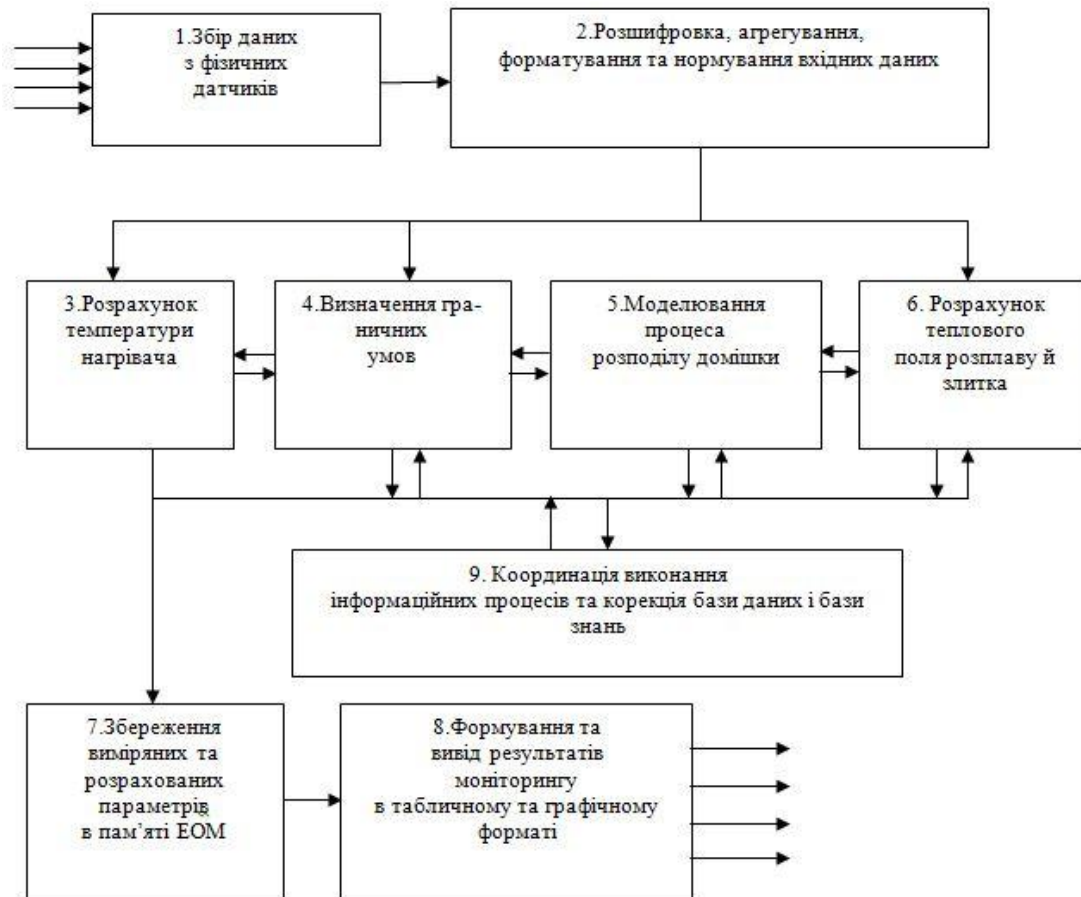


Рисунок 2 – Загальна схема інформаційної технології віртуального моніторингу температурного поля системи кристал-розплав в процесі вирощування монокристалів кремнію 23

Розроблена інформаційна технологія віртуального моніторингу розподілу лігатури в процесі вирощування злитків кремнію містить у собі систему інформаційних процесів (ІП), математичних моделей і методів [6], технічних і програмних засобів, зокрема – фізичних і віртуальних датчиків температури, датчиків швидкостей обертання й витягування, модель обчислення діаметра злитка, модель обчислення рівня розплаву за результатами виміру діаметра й довжини вирощеної частини злитка, технічні засоби для введення незмінних для даного процесу значень параметрів, ЕОМ, що здійснює обробку даних одержуваних від системи фізичних датчиків відповідно до пропонуваного у даній роботі моделей і алгоритмів, а також вивід і зберігання результатів моніторингу для використання їх в автоматизованій системі керування процесом вирощування монокристалів.

Розглянемо докладніше інформаційні процеси, показані на рис. 2.

ІП1. Збір даних з фізичних датчиків. Даний інформаційний процес здійснюється програмно-апаратним комплексом існуючої АСУТП ростової установки.

ІП2. Отримані від програм-драйверів числові значення у відповідних форматах завантажуються в оперативну пам'ять ЕОМ і зберігаються в окремих масивах бази даних з відповідним значенням дискретного часу  $t_i$ .

ІП3. Розрахунок температури нагрівача. Обчислювальна процедура, заснована на математичній моделі, здійснює наступні операції:

3.1. Приймання даних про швидкість витягування, мм/хв. (значення задається оператором);

3.2. Приймання даних для розрахунку рівня розплаву а саме: маса завантаження; вимірний діаметр вирощеного на даний момент злитка; щільність розплаву; радіус тигля й обчислення рівня розплаву.

3.3. Прийом даних про споживану потужність нагрівача, кВт.

3.4. Розрахунок поточного значення температури нагрівача.

ІП4. Розрахунок граничних умов. Процедура розрахунку граничних умов здійснює наступні дії:

4.1. Прийом даних про температуру нагрівача від віртуального датчика А2.

4.2. Прийом даних про температуру нагрівача від пірометра.

4.3. Ввід розподілу температури на стінці тигля. На практиці із цією метою використовується функціональна залежність, отримана апроксимацією даних, отриманих у ході експериментів.

4.4. Ввід з бази даних табличних значень розподілу температури на стінці екрана [7].

ІП5. Моделювання процесу розподілу домішки за допомогою нечіткого клітинного автомата.

5.1. При опусканні затравки поверхня розділу фаз вважається гладкою, відповідною до геометричних розмірів затравки.

5.2. Після обчислення значень температури на всій розрахунковій сітці, перераховуються значення ступенів затвердіння комірок клітинного автомата.

5.3. Після перерахування значень ступенів затвердіння комірок проводиться перерахування коефіцієнтів теплопровідності кремнію в зоні фронту кристалізації. Значення коефіцієнтів теплопровідності одержують виходячи з виразу:

$$\lambda_i = \mu \cdot \lambda_{ТВ} + (1 - \mu) \cdot \lambda_{Ж}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – ступінь затвердіння комірки нечіткого клітинного автомата;  $\lambda_{ТВ}$  і  $\lambda_{Ж}$  – відомі значення коефіцієнтів теплопровідності твердої й рідкої фази.

5.4. Проводиться перерахування температурного поля розплаву по МКР із застосуванням отриманих на попередній ітерації значень коефіцієнтів теплопровідності комірок у підкристалійній області.

5.5. Обчислюється різниця значень температур кремнію, отриманих по МКР, на попередній та наступній ітераціях.

ІП6. Даний інформаційний процес є ієрархічним і містить два допоміжні процеси ІП6.1, ІП6.2 і основний – ІП6. Спочатку виконуються процеси нижнього рівня – ІП6.1 й ІП6.2.

ІП6.1. Розрахунки значень температури розплаву в заданих точках з урахуванням впливу конвекції в розплаві. Це завдання вирішує спеціальна нейронна мережа. Розглянемо дану процедуру докладніше.

Обчислення температури за допомогою нейронмережевої моделі проводиться в напрямку від поверхні розплаву за напрямком до дна тигля. У радіальному напрямку розрахунок у верхньому шарі мережі проводиться від контрольної точки до осі симетрії системи й до бічної поверхні тигля; у наступних шарах - від бічної поверхні тигля в напрямку до осі симетрії системи.

Так як протягом процесу вирощування рівень розплаву в тиглі поступово зменшується, виникає необхідність у послідовному відключенні верхніх шарів моделі. Відключення відбувається при проходженні шаром мережі границі розділу «розплав-поверхня». Відключення здійснюється заміною передаточної функції вихідних нейронів нульовою функцією.

Оскільки температура розплаву в контрольній точці подається на вхід блоків тільки верхнього шару мережі, то при відключенні верхнього шару у відповідних блоках шару, що перебуває під ним, цей вхід автоматично активізується. Активізація входу відбувається шляхом заміни нульової передаточної функції відповідного нейрона на лінійну функцію.

ІП6.2. Розрахунок температури в заданих точках злитка за допомогою нейронної мережі.

ІП6.3. Ітераційне обчислення параметрів температурного поля розплаву й злитка методом кінцевих різниць із використанням точок з фіксованою температурою, отриманих процедурами 3 і 4, і збереження результатів у пам'яті комп'ютера при досягненні значень, що встановилися, на тимчасовій сітці [8].

Розрахунок проводиться по так званій неявній схемі. Вона утворюється, якщо в правих частинах рівнянь усі температури віднести до наступного моменту часу. Така схема вважається абсолютно стійкою.

Розрахункова схема побудована за допомогою методу змінних напрямків [9], одного з різницевих методів найбільш придатних для розв'язку двовимірних завдань теплопровідності [10]. Він дозволяє значно скоротити обсяг обчислень, одержати розумні результати при рахунку на грубих сітках і з більшим кроком за часом.

ІІІ. Збереження вимірних і розрахованих параметрів у пам'яті ЕОМ. Даний процес реалізується стандартними засобами мови програмування.

ІІІІ. Формування й вивід результатів моніторингу в табличному й графічному форматі. Даний процес також реалізується стандартними засобами мови програмування.

ІІІІІ. Координація виконання інформаційних процесів і корекція бази даних і бази знань.

Для забезпечення системі гнучкості й можливості коригування й донавчання, при розробці використовувалися нейромережеві технології, а для виявлення ситуацій зриву оптимальних умов процесу передбачається використання апарата нечіткої логіки. Із цієї причини в системі обов'язково повинна бути присутня база знань, що містить інформацію про ознаки й умови зміни просторової структури нейронних мереж, а також про взаємовплив факторів процесу вирощування і їх спільний вплив на якість кінцевої продукції. База знань фізично реалізована у вигляді масивів даних, розташованих у постійній пам'яті ЕОМ.

Інформаційний процес ІІІІІ дозволяє за вхідними даними ефективно відшукати найбільш відповідний вектор параметрів у базі знань, а також вчасно відстежити нетипову ситуацію, щоб згодом, під контролем оператора, внести її в базу знань і, таким чином, провести донавчання системи. Даний процес реалізується в мультиагентній системі моніторингу агентом А0.

Одним з переваг інформаційної технології віртуального моніторингу є можливість донавчання системи в процесі експлуатації. Донавчання здійснюється в такий спосіб:

Під час всього процесу вирощування дані про всі вимірювані й контрольовані параметри процесу зберігаються в окремій області пам'яті. Після закінчення процесу вирощування вся інформація про хід перебігу процесу архівується й не може бути мимовільно вилучена без втручання оператора. В міру надходження даних про якість вирощеного злитка архів забезпечується додатковим файлом, у якому проводиться оцінка результатів вирощування.

В міру нагромадження архівної інформації (по закінченні 20...40 процесів вирощування) оператором дається команда для обробки накопичених даних. Внаслідок цього формується база знань про сприятливе й несприятливе протікання процесу. Крім того, виділяються вектори значень параметрів техпроцесу попередні виникненню аварійних ситуацій або зриву нормального росту, що в майбут-

ньому дозволить заздалегідь попередити оператора про можливість виникнення небажаної ситуації.

**ВИСНОВКИ.** Розроблена структура багатоагентної системи віртуального моніторингу температурних полів і розподілу лігатури, що включає в себе множину взаємодіючих агентів, здатних сприймати й колективно обчислювати параметри температурного поля в реальному часі процесу вирощування.

Розроблений загальний алгоритм роботи системи моніторингу температурних полів і розподілу лігатури, що забезпечує координовану взаємодію всіх агентів системи.

Розроблена інформаційна технологія моніторингу теплових умов процесу вирощування монокристалів кремнію по методу Чохральського як система взаємодіючих інформаційних процесів. Запропоновані процедури розрахунків дозволяють обчислити температурні поля в розплаві й кристалі з достатньою точністю при невисоких вимогах до обчислювальних ресурсів, що дозволяє визначити профіль розподілу лігатури. Використання спеціальної моделі кристалізації на базі нечіткого клітинного автомата дозволяє враховувати ступінь затвердіння розплаву при розрахунках температурного поля в підкристалійній області.

Розроблені на концептуальному рівні алгоритм сповіщення майстра-технолога про вихід параметрів техпроцесу за припустимі границі, а також алгоритм донавчання системи, шляхом поповнення бази знань під контролем оператора.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Оксанич А.П. Метод и нейросетевая модель расчёта температурного поля расплава в процессе выращивания методом Чохральского // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 1/2010 (72), част. 1. – С. 54–60.
2. Boettinger W. Solidification microstructures: recent developments, future directions // Acta mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 43–70.
3. Wilkins D.E. Interactive Execution Monitoring of Agent Teams // Journal of Artificial Intelligence. – 2003. – Vol. 18. – P. 217–261.
4. Евгеньев Г.Б. Технология создания многоагентных прикладных систем // Труды одиннадцатой национальной конференция по искусственному интеллекту с международным участием: Дубна, 2008. – М.: ЛЕНАНД. – Т. 2. – С. 306–312.
5. Lukanin D. Parallel Simulation of Czochralski crystal growth // Lecture Notes in Computer Science. – 2004. – Vol. 3019. – P. 469–474.
6. Васильев А.Н. Математическое моделирование систем с распределенными параметрами на основе нейросетевой технологии – С.-Петербург, 2011. – 365 с.
7. Мурашко А.Г. Извлечение знаний из баз данных при помощи нейронной сети и нечёткого интерпретатора // Новые технологии: Научный вестник КУЭИТУ. – 2008. – Вип. 4/2008 (22). – С. 41–46.

8. Пономарёв С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: [монография]. – Тамбов, 2006. – 204 с.

9. Формалев В.Ф. Метод переменных направлений с экстраполяцией по времени для параболических задач со смешанными производными // Вычислительные технологии. – 1996. – Вып 2/1996, – Том 1, – С. 99–103.

10. Берман Г. Теплопроводность твёрдых тел: [монография]. – М.: Мир, 1979. – 286 с.

## ARCHITECTURE OF MULTIAGENT SYSTEM OF VIRTUAL MONITORING OF LIGATURE DISTRIBUTION IN SILICON INGOTS

I. G.Oksanich, O. S. Prytchyn

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: alpritchin@ukr.net

**Purpose.** Improving of the quality requirements of monocrystalline silicon ingots leads to increasing of accuracy requirements for playback of optimal growing conditions. Therefore we decided to create a multiagent (multicomponent) system (MAS) while developing system of monitoring of ligature distribution. **Methodology.** MAS is constructed as a set of interacting agents, able to perceive and collectively calculate the parameters of temperature field in real-time process. This allows MAS to solve problems of high complexity which can not be solved by other methods or require too large computational resources for their solution. **Results.** We developed the structure of multi agent system of virtual monitoring of temperature fields and distribution of ligature. We developed the general algorithm of the system of monitoring of temperature fields and distribution of ligature that provides coordinated interaction of all agents of the system. We developed the information technology of monitoring of thermal conditions of growing process of silicon single crystals by Czochralski method. **Originality.** The proposed calculation procedure allows to calculate the temperature field and distribution of ligature in the melt and crystal, with reasonable accuracy and low requirements for computing resources. Using a special model of crystallization on the basis of fuzzy cellular automaton allows to take into account the degree of solidification of the melt in the calculation of the temperature field and distribution of ligature in area under crystal. **Practical value.** The system can be implemented in plants of growing single crystals of silicon ingots. This system allows to improve the monitoring of the process of growing silicon ingots, which will reduce the production costs. References 10, figures 2.

**Key words:** silicon, ligature distribution, conditions for the growth, monitoring.

### REFERENCES

1. Oksanich, A.P. (2010), "The method and the neural network model for calculating the temperature field of the melt during growth process by the Czochralski method", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 1(72), pp. 54–60.

2. Boettinger, W. (2000), "Solidification microstructures: recent developments, future directions", *Acta mater*, no. 48, pp. 43–70.

3. Wilkins, D.E. (2003), "Interactive Execution Monitoring of Agent Teams", *Journal of Artificial Intelligence*, no. 18, pp. 217–261.

4. Evghenev, G.B. (2008), "Technology of creation of multi-agent application systems", *Proc. 11th Int. Conf. On Artificial Intelligence*, pp. 306–312.

5. Lukanin, D. (2004), "Parallel Simulation of Czochralski crystal growth", *Lecture Notes in Computer Science*, no. 3019, pp. 469–474.

6. Vasilev, A.N. (2011), *Matematicheskoe modelirovanie sistem s raspredelyonnymi parametrami na osnove neyrosetevoy tehnologii* [Mathematical modeling of distributed parameter systems based on neural network technology], Saint-Petersburg, Russia.

7. Myrashko, A.G. (2008), "Extracting knowledge from data bases with use of neural networks and fuzzy interpreter", *Novye tehnologii: Nauchnyy vestnik KUEITU*, no. 4(22), pp. 41–46.

8. Ponomaryov, S.V. (2006), *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty teplofizicheskikh izmereniy* [Theoretical and practical aspects of thermal measurements], Tambov, Russia.

9. Formalev, V.F. (1996), "Method of variable directions with time extrapolation for parabolic tasks with mixed derivative", *Vychislitelnye tehnologii*, no. 2, pp. 99–103.

10. Berman, G. (1979), *Teploprovodnost tvyordykh tel* [The thermal conductivity of solids], Mir, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 14.05.2016.