

УДК 004.9; 621.74

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

О.В. Токова

*Міжнародній науково-навчальній центр інформаційних технологій
та систем НАН та МОН України*

len327@ukr.net

Виконано огляд методів та сучасного програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання процесів в галузі лиття, а саме при охолодженні виливків, показано їх переваги та недоліки. Результати проведеного огляду планується використати при створенні комп'ютерної технології моделювання термічних процесів в галузі ливарного виробництва.

Ключові слова: інформаційна технологія, виливок, комп'ютерне моделювання, лиття

Выполнен обзор методов и современного программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов в области литья, а именно при охлаждении отливок, показано их преимущества и недостатки. Результаты проведенного осмотра планируется использовать при создании компьютерной технологии моделирования термических процессов в области литейного производства.

Ключевые слова: информационная технология, отливок, компьютерное моделирование, литье.

An overview of the methods and modern software for computer simulation of processes in the field of molding, in particular the cooling of castings, shows their advantages and disadvantages. The results of the review are planned to be used when creating computer technology for simulation of thermal processes in the field of foundry production

Keywords: information technology, casting, computer simulation, casting.

Вступ

Лиття є найпоширенішим способом отримання виробів, що застосовуються у різних галузях людської діяльності. Від якості отриманих деталей буде залежить міцність виборів і галузь, де ці деталі застосовуються.

Міцність та твердість сталей залежить від кількості наявного в них вуглецю (вуглецеві сталі) та їх хімічного складу (насичення легуючими елементами), а також від термічного режиму їх вироблення. Виявляється, що виріб, виготовлений з інструментальної сталі та термічно оброблений є значно твердішим за ту саму сталь у «сирому» стані.

Ливарники, особливо на виробництвах із частим переналаштуванням для швидкої зміни номенклатури виробів, у своїй діяльності зустрічаються з необхідністю виконання складних науково-технічних розрахунків, розв'язанням задач моделювання і оптимізації металургійних процесів з метою приймання ефективних рішень для досягнення бажаного результату.

За таких умов для підприємства важливим є розробка програмного продукту, який міститиме базу даних металів і сплавів, їх хімічні та механічні властивості відповідно до ДСТУ, а також даватиме можливість обробляти результати експрес-тестів, аналізувати та підбирати необхідні складові для отримання якісного кінцевого продукту, налагоджувати режим роботи ливарної установки. Виробництво, забезпечене сучасним програмним продуктом, який супроводжує процес лиття, має змогу збільшити науково-технічні та виробничі можливості підприємства, підвищити його ефективність.

Тому метою даної роботи є виконання огляду існуючих програмних засобів комп'ютерного моделювання процесів ливарного виробництва, визначення їх переваг та недоліків, оцінка можливостей використання цих засобів на вітчизняному виробництві, а також формулювання вимог до комп'ютерних технологій, які були б розроблені за вимогами вітчизняних ливарних підприємств, були б націлені на роботу з вітчизняною базою металів і сплавів та придатні для впровадження.

1. Огляд сучасного програмного забезпечення в галузі лиття

Огляд, проведений в [1, 2], показав, що на сьогодні існує багато різних програмних продуктів, які використовують технологи-ливарники на підприємствах, але вони є недоступними за рядом параметрів для багатьох виробництв, особливо невеликих, зокрема, вони дорого коштують, потребують постійного оновлення і супроводу, але не розв'язують усіх завдань, що постають перед ливарником в процесі лиття.

В [3] проведено порівняльний аналіз найбільш поширених комп'ютерних систем для моделювання фізичних процесів, що супроводжують металургійні та ливарні технології. Математичне моделювання металургійних та ливарних процесів, аналіз можливих варіантів їх оптимізації пов'язані з удосконаленням різних технологій, які дозволяють знизити затрати на підготовку до виробництва і виготовлення виливків.

Сьогодні у світі використовують різні програмні продукти, які пов'язані з металургійними та ливарними процесами. У програмах застосовують обчислювальні методи та математичні алгоритми, які задовольняють певним потребам замовника. Лише порівнюючи результати промислових та експериментальних дослідів можна оцінити якість програмного продукту.

У роботі описуються найбільш використовувані у світі програмні продукти, такі як MAGMASOFT, ProCAST, LVMFlow /NovaFlow, ПОЛИГОН, наведено переваги та недоліки програм, їх функціональні можливості (рис. 1).

Авторами [3] зроблено висновок, що в даний час неможливо однозначно запропонувати комп'ютерну систему, яка б задовольняла і заводських технологів, і інженерів-дослідників. При виборі комп'ютерної системи ливарник має враховувати свої фінансові можливості, а також обсяг завдань, які необхідно розв'язати з використанням сучасного наукового інструменту.

Сравнительный анализ компьютерных систем

Решаемые задачи /возможности		MAGMASOFT	ProCAST	WinCAST	LVMFlow / NovaFlow	ПОЛИГОН
Постановка задачи	базы данных дополнительных технологических элементов	+	нет, задается HTC	+	+(частично)	+
	дополнение и редактирование баз данных	+	+	+	+	+
	возможность применения различных фильтров	+	—	—	+	—
	возможность моделирования литниковых чаш и нескольких раздельно заполняемых литниковых систем	+	—	—	—	—
	учет влияния пограничных условий	+	+(кроме внутренних элементов отливки)	+	+	+
	моделирование заполнения стопорного и чайникового ковшей	+	+	—	—	—
	расчет сектора 1/n части осесимметричной отливки	+	+	+	—	+

Рис.1. Фрагмент таблиці порівняльного аналізу

В [4] розглядається проблема отримання литих заготовок з кольорових металів та сплавів з бажаними характеристиками, адже традиційні технології отримання литих виливків методом неперервного лиття вже не можуть забезпечити характеристики майбутнього виробу, які б відповідали сучасним вимогам. Описуються технології отримання литих деталей методом неперервного лиття та процеси, які відбуваються при неперервному та напівнеперервному процесі лиття кольорових металів та сплавів.

Авторами побудовано математичну модель, на основі якої написана програма моделювання стаціонарних та нестаціонарних процесів неперервного лиття циліндричних виливків. Математична модель включає рівняння нерозривності, теплопровідності, рух Навьє-Стокса, турбулентність течії та інше. Модифікована система диференціальних рівнянь розв’язувалась методом контрольних об’ємів. Зроблено висновки, що на відміну від пакету загального призначення FLOW-3D, розроблена програма має спеціалізовану, вузьку галузь використання, що дозволяє значно скоротити та прискорити час розрахунків, крім того ця програма є досить легкою в користуванні.

2. Застосування відомих програмних продуктів для комп’ютерного моделювання ливарного процесу

На даний час у світі знають і використовують багато різних програмних продуктів [5], призначених для розв’язання завдань, які стоять перед технологами-ливарниками. Кожен з цих продуктів має свої особливості та задовольняє потребам конкретного виробництва.

На думку авторів [5] однією з найкращих програм у цій галузі (враховуючи співвідношення ціна – можливості - продуктивність) є програма SOLIDCast. Цей програмний комплекс дозволяє побачити процес заповнення порожнини форми металом, кристалізацію вилівка, визначити можливі місця утворення дефектів. І все це ще до виготовлення оснащення та замовленої партії продукту.

Не менш важливою перевагою цього продукту є його можливість створювати унікальну базу даних тих технологічних процесів, які вже використовувались у виробництві вилівоків.

Програмний комплекс SOLIDCast є системою початкового рівня і призначена, в першу чергу, для використання технологами цеху для розв'язання поточних технологічних та виробничих завдань.

На основі програмних комплексів ANSYS і ProCAST авторами [6] розроблені комп'ютерні моделі лиття платини в водо-охолоджувальну вилівницю з рухомим дном. В роботі представлені результати математичного моделювання лиття злитків з платини в промисловій установці. Вивчено вплив режимних параметрів роботи ливарної установки на процес кристалізації злитків, встановлено кількісні залежності, що дозволяють знизити величину усадочної раковини, а також виключити поверхневі і внутрішні дефекти в готових злитках платини.

На базі цих програм в [6] розроблено дві комп'ютерні моделі процесу, в яких диференціальні рівняння ґрунтуються на методі скінченних елементів. Проведено оцінку ступеня узгодженості цих моделей за результатами теплових розрахунків процесу лиття. Основна мета дослідження полягала у визначенні оптимального комплексу режимних параметрів розливання платини, який дозволить мінімізувати величину усадочної раковини, кількість зовнішніх і внутрішніх дефектів в готових злитках.

3. Спеціалізовані системи автоматизованого моделювання ливарних процесів

Комп'ютерне моделювання стає невід'ємною частиною процесів конструювання нових деталей і проектування технологічних процесів їх виготовлення [7].

Все частіше замовники ливарної продукції вимагають від виробника використання комп'ютерного моделювання. Переваги його застосування:

- можливість відпрацювання нюансів ливарної технології на віртуальному прототипі виготовлення вилівка, що зменшує або повністю виключає необхідність у виготовленні пробних вилівоків;
- скорочення процесу проектування технології;
- зниження собівартості вилівка.

Візуалізація фізичних процесів ливарної технології дозволяє краще зрозуміти особливості цих процесів, а отже, більш ефективно управляти ними з метою зниження дефектів вилівоків і підвищення виходу заданого вилівка. Серед багатьох систем автоматизованого моделювання ливарних процесів

(САМ ЛП) найчастіше використовуються такі: закордонні Magma, Procast, SolidCast, CastCAE, WinCast та дві російські розробки "Полігон" і LVMFlow.

Однак широке впровадження САМ ЛП стримується низкою причин, серед яких недостатність інформації про них, нестача кваліфікованих спеціалістів, необізнаність та інше.

Важливим питанням при використанні САМ ЛП на виробництвах є відповідність одержуваних в моделюванні результатів реальним виробничим даним. Для успішного застосування САМ ЛП віртуальна модель технологічного процесу повинна відповідати конкретному виробничому процесу. За коректної постановки задачі моделювання САМ ЛП дозволяє отримати кращі результати, ніж експериментальним шляхом.

В [7] розглядається такий програмний засіб, як FLOW-3D. Відмінною особливістю FLOW-3D є потужний гідродинамічний вирішувач, який дозволяє адекватно і з високим ступенем точності моделювати течію металу в ливарній формі та достовірно прогнозувати дефекти лиття, що утворюються на етапі заливки металу в форму.

4. Огляд методів моделювання та моделей термічних процесів у ливарному виробництві

У [8] здійснено математичне моделювання теплових процесів, пов'язаних зі зняттям перегріву розплаву, твердінням та наступним охолодженням порожнинного циліндричного виливка, що виготовляється методом відцентрового лиття в масивний металевий кокіль. На основі розв'язку низки крайових задач теорії теплопровідності проведено вибір значень термодинамічних параметрів з метою вдосконалення технологічного процесу.

Метою роботи [9] було підібрати найбільш оптимальні технологічні параметри, які забезпечували б отримання виливків без браку та дефектів та оптимізувати литниково живильну систему (ЛЖС, клапани та канали, через які розплавлений метал заповнює форму) при литті в кокіль за допомогою засобу СКМ LVM Flow. У якості об'єкта дослідження було обрано «Заготовку черв'ячного колеса» із алюмінієвої бронзи, встановлено вимоги до даної деталі, такі як: зносостійкість, міцність, пластичність, стабільність структури та механічних властивостей матеріалу. Було розглянуто 4 варіанти виливки з ЛЖС та результати комп'ютерного моделювання фізико-хімічних процесів затвердіння виливка. Комп'ютерне моделювання фізико-хімічних процесів під час формування виливка дозволяє скоротити затрати на налагодження технологій, що дає змогу замінити натурний експеримент на обчислювальний.

У [10] розглянуто принципові відмінності програмних засобів, якими є математичні методи для вирішення різницевого рівнянь:

- метод скінченних різниць,
- метод скінченних елементів,
- метод контрольних об'ємів.

Magmasoft, SolidCast, CastCAE, JSCAST, AnyCasting використовують метод скінченних різниць. Програмні засоби такі як Полигон, ProCast, WinCast т.д. використовують метод скінченних елементів. Метод контрольних об'ємів використовується в таких програмах як Flow-3D, LVMFlow. Кожен із цих програмних продуктів має свої переваги та недоліки. Найліпшим програмний комплексом для використання на вітчизняних виробництвах, на думку авторів [10], є AnyCasting, SolidCast, LVMFlow версія 2.92.

В [11] для обробки даних та прогнозування властивостей сплаву за заданим хімічним складом використовується нейронна мережа, що дозволяє оптимізувати склад сплаву за властивостями. Для розв'язування ливарних задач можливим є використання декількох різних нейромережових алгоритмів. Найбільш ефективним вважаються методи самостійної адаптації, які можуть пристосовуватись до змінювання складних систем. Для ливарного виробництва найкращим алгоритмом є алгоритм зворотного поширення помилки. Цей алгоритм добре зарекомендував себе у розв'язуванні задач прогнозування, а програмні засоби на базі цього алгоритму є достатньо недорогі та доступні. Для побудови нейромережової аналітичної моделі сплаву, яка включатиме хімічний склад, задані властивості, вартісну оцінку отримання металу, необхідна база даних, до якої входять експериментальні дані. На основі бази даних будується нейромережева аналітична модель, далі можна побудувати графіки впливу хімічних властивостей на різноманітні фізико-механічні властивості. За моделлю можлива оптимізація сплаву з урахуванням заданих властивостей.

У роботі [12] розроблено математичну модель і відповідну комп'ютерну програму на мові C++, що описують перетворення переохолодженого аустеніту в легованих сталях широкого спектру складів. Експериментально перевірена математична модель описує термодинаміку та кінетику розпаду переохолодженого аустеніту. Визначено ступінь залежності структуроутворення від швидкості охолодження при різних варіантах легування, досліджено вплив легування сталі марганцем, нікелем та хромом на утворення мартенситу та бейніту.

У роботі [13] проведено типізацію математичного опису в задачах синтезу оптимального регулятора технологічних параметрів ливарного виробництва, показано як різні процеси можуть бути описані математичними моделями з метою подальшого синтезу оптимальних регуляторів важливих технологічних параметрів. На основі диференційних рівнянь розробляється математичний опис для різних процесів ливарної промисловості. Для цього виявляють суттєво впливові технологічні параметри в досліджуваних процесах, вивчають можливість типізації математичного опису керуючих процесів на різних ділянках ливарного цеху та отримують математичний опис та показують його використання для синтезу оптимальних регуляторів технологічних параметрів досліджуваних процесів.

5. Технології лиття, що застосовуються в Фізико-технічному інституті металів та сплавів

Одним із напрямків удосконалення технології лиття у піщані формі є розробка методів попередження появи у виливках дефектів їх виготовлення в залежності від порушень технологічного процесу. Шляхи для виявлення дефектів виливків і розробки дій для їх попередження досить складні. Розробка системи інтелектуального моніторингу технології лиття є актуальною [14].

Відомі закордонні програми, такі як MagmaSoft, ProCast, Полигон, SolidCast концентрують свою увагу на створенні комп'ютерних програм для оцінки гідродинамічних та теплообмінних процесів у ливарній формі без оптимізації литих конструкцій. Вважають вилівок як вже готовий продукт. До того ж ці програми не адаптовані до ливарних процесів точних методів лиття, лиття за моделями, які газифікуються, розчиняються, випалюються, для гравітаційного лиття та лиття під тиском.

В закордонних продуктах недостатньо можливостей для оцінки ливарних процесів у формі при використанні низькотемпературних, оболонкових форм та отримання виливків у формах, які наповненні армуючою фазою з металевих і неметалевих матеріалів.

У [15] підкреслюється, що отримання виливків із заданими структурою і властивостями можливе лише при забезпеченні управління інтенсивністю тепловідведення в ливарній формі. Найбільш близькі методи управління тепловідводом базуються на фізичних способах зміцнення піщаної форми.

З розвитком технології лиття в піщану форму і формування властивостей литих конструкцій виникає необхідність синтезування різних фізичних впливів у процесах формування для створення високоефективних методів лиття. За результатами проведених дослідів методом термоаналізу та технологічних розробок Фізико-технічного інституту металів та сплавів отримано різні значення швидкості охолодження чавунного виливка в піщаній формі. Ці дані можуть бути прообразом створення бази даних металів та їх сплавів.

Поява у ливарних цехах вакуумованих форм з піску дозволило розглянути таку форму як зручний інструмент управління теплообміном між виливком та формою. В [16] наведено один із прикладів керування таким теплообміном. Спеціалістами запропоновано використовувати охолоджувач, до складу якого входить газове контрольоване середовище з твердою фазою у вигляді сипучого матеріалу із зазначеним розміром гранул.

Авторами [17] сформульовано практичні рекомендації на основі дослідів.

6. Задача розроблення програмного комплексу для моделювання ливарних процесів

З урахуванням результатів проведеного огляду існуючих програмних засобів доцільно розробити програмний комплекс, який міститиме не тільки функції, які є у відомих закордонних програмних продуктах, а саме:

- 1) розрахунок заповнення,
- 2) розрахунок затвердіння
- 3) розрахунок напруги,
- 4) термонапруга,
- 5) можливість автоматичних обчислень,
- 6) аналізу дефектів,
- 7) аналізу виду лиття,
- 8) аналіз лиття сплавів [3],

а й даватиме змогу ливарникам впливати на режим охолодження виливка різними параметрами, що даватиме змогу отримувати виріб бажаної якості.

У [18] описано ідеї щодо розроблення інформаційної технології моделювання термічних процесів у галузі ливарного виробництва.

Авторами [19] запропоновано розробку технології, яка міститиме базу даних металів та їх сплавів, їх хімічні, механічні властивості, інформацію про режими охолодження. В основі технології лежить метод індуктивного моделювання, який використовується для моделювання за експериментальними даними [20].

В [21] наведено огляд існуючих програмних засобів, їх функціональні можливості. Огляд існуючих програмних засобів показав, що вони є занадто дорогими для використання їх на заводах та фабриках України, потребують постійного доповнення та оновлення системи, а це, у свою чергу, зобов'язує підприємства мати сучасні прилади. Крім того у закордонних програмах відсутня вітчизняна база металів та сплавів, які використовуються на українських підприємствах і заводах.

Також у [21] показано процес охолодження металу або сплаву, його подальше порівняння з еталонними значеннями шляхом відбирання проби, проведення експрес аналізів, сформульовано три задачі ливарного виробництва, розв'язання яких є актуальним на сьогодні:

Задача 1. Супровід ливарника у прийнятті рішень, які вироби можна отримати з існуючого металу або сплаву.

Задача 2. Супровід ливарника щодо прийняття рішень з підбору невідомих складових сплаву.

Задача 3. Супровід прийняття рішень ливарником у процесі лиття та охолодження.

Для розв'язання цих задач розробляється комп'ютерна технологія моделювання термічних процесів на основі індуктивного підходу [22].

Висновки

На основі проведеного огляду методів та засобів моделювання процесів у ливарному виробництві зроблено висновки про переваги та недоліки існуючих програмних продуктів та методів, на основі яких вони побудовані та можливостей їх застосування при розв'язанні реальних задач.

Розв'язання завдань, що виникають у процесі лиття, даватиме змогу ливарникам швидко та правильно приймати рішення при виробництві

різноманітних металевих виробів, отримувати поради щодо оптимального режиму охолодження виливків, підбору найкращого хімічного складу та забезпечення належних фізико-механічних характеристик продукту.

Запланованій інформаційна технологія буде орієнтовна на українське виробництво, складатиметься з бази даних, яка буде наповнена інформацією про хімічні, фізико-механічні властивості металі, необхідну швидкість охолодження та параметри охолодження вилівка, а також інформацію про експерименти, які вже проводились на виробництві, та їх показники, міститиме блоки побудови моделі та аналізу отриманого результату.

Для моделювання планується використати метод групового урахування аргументів або поєднання декількох методів моделювання для отримання більш точних та якісних виробів.

Література

1. Кравченко О.В., Савченко Є.А. Інформаційна технологія індуктивного моделювання моніторингу процесів ливарного виробництва // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць. – К.: МННЦ ІТС, вип.7. – 2015. – С. 140-146.

2. Токова О.В., Савченко Є.А. Підхід до розроблення системи інформаційної підтримки рішень у ливарному виробництві // Індуктивне моделювання складних систем. Зб. наук. праць. – К.: МННЦ ІТС, вип.8. – 2016. – С. 194-202.

3. Тарасевич Н.І., Корниец І. В., Тарасевич І.Н., Дудченко А.В. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов // *Металл и литье Украины*, 2010, №5, С. 20-25.

4. Жиганов Н.К., Фомина Е.Е. Программа моделирования процесса непрерывного литья цветных металлов и их сплавов // Программные продукты и системы. – 2008.- №1. – С. 10-12.

5. Скуратов А.П., Махов Д.І, Павлов Е.А. // Компьютерное моделирование и оптимизация процесса литья слитков платины // Сибирский федеральный университет, Россия, 2014, С. 96-102.

6. Кучин П.С. , Мальцев Д.Н Математическое моделирование процессов литья металлов и сплавов Литейщик России, №10, 2008, С. 18-20.

7. Вольнов І.Н. // Компьютерное моделирование процессов при производстве ТПА //Трубопроводная арматура и оборудование №5 (38), ст. 108-110, Москва, 2008 г.

8. Андреев В.І., Дихта Л.М., Клименко Л.П., // Математичне моделювання процесів твердіння та охолодження порожнинного циліндричного вилівка при відцентровому литті в масивний кокіль // *Комп'ютерні технології Наукові праці*, Том 35, вип. 22, С. 59 – 69.

9. Сушко Т.И., Хоанг В.Х., Попов С.В., Пашнева Т.В. Компьютерное моделирование как аспект ресурсосберегающих технологий при выборе оптимального способа литья // *Научный альманах*, N 5-3(31), 2017

10. Матвеева С.О. Моделирование литейных процессов // САПР в литейном производстве, 2015, С. 95-99
11. Долгополов Л.Б., Тухватулин I.Х. Использование нейросетевой обработки данных в литейном производстве // Литейные процессы № 14, 2015, С. 99-105.
12. Каверинский В.В., Троцан А.И., Сухенко З.П. // Математическое моделирование кинетики распада переохлажденного аустенита в легированных сталях // Металлофиз. новейшие технол., 2017, т. 39, № 8, С. 1051–1068.
13. Демин Д.А. Типизация математического описания в задачах синтеза оптимального регулятора технологических параметров литейного производства // Восточно-Европ. журн. передовых технологий, 2014, № 1/4 (67), С. 43-56.
14. Дорошенко В.С. Шинский В.О. Предпосылки создания базы данных на основе концепции «регулирование скорости охлаждения отливки в форме – структура метала – металлосберегающие конструкции отливок», ФТИМС НАН Украины.
15. Найдек В.Л. Создание новых технологий и материалов на основе фундаментальных научных исследований // Библиотека литейщика. - 2017. - № 8. - С. 9-14.
16. Чудайкин А.И., Калинин В.П. Псевдооживленная среда как средство управления кристаллизацией отливки. // Литейное производство. – 2004. – № 12. – С. 19-20.
17. Кравченко О.В., Савченко Є.А. Розробка інформаційної технології індуктивного моделювання моніторингу процесів ливарного виробництва // Праці III Міжнародної конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій ІСАСІТ-2015, Київ, 11-13 грудня 2015.– С. 116-117.
18. Токова О.В., Савченко Є.А. Підхід до розроблення системи інформаційної підтримки рішень у ливарному виробництві // Індуктивне моделювання складних систем. – К.: МННЦ ІТС, вип. 8. – 2016. – С. 194-202.
19. Tokova O., Savchenko Ye. Development of Information Technology for Solution of Casting Production Monitoring Tasks // Proceedings of 8th International Workshop on Inductive Modeling (IWIM 2016), Kyiv-Zhukyn, Ukraine. – P.32-35.
20. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. - Киев: Наук. думка. – 1985. - 215 с.
21. Tokova O., Savchenko Ye. Inductive Modelling as a Basis of Informational Support of Decisions in Casting Production // Proc. of the XII IEEE International Conference CSIT-2017 & International Workshop on Inductive Modeling, September 05-08, 2017, Lviv, Ukraine. – Lviv: Publisher “Vezha&Co”, 2017. – P. 507-510.
22. Савченко Є.А., Степашко В.С., Токова О.В. Задача конструювання системи підтримки прийняття рішень у ливарному виробництві // Зб. тез допов. XXIV Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика-2017», Київ, 13-15 вересня 2017 р. – Київ: ТОВ «Аквармарин Ексклюзив», 2017. – С. 196.