

**Ярмілко А.В., Багінський М.Ю., Приходько Д.С.**  
**Вибір програмної платформи як засіб підвищення ресурсної ефективності та динамічних характеристик вбудованих систем реального часу**

*Ярмілко Андрій Васильович, старший викладач,  
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна.  
Багінський Максим Юрійович, незалежний дослідник, Черкаси, Україна.  
Приходько Дмитро Сергійович, аспірант,  
Інститут проблем математичних машин і систем НАНУ України, Київ, Україна.*

**Анотація.** Розглянуто проблему впливу використаної програмної платформи на швидкість функціонування модельно-орієнтованих додатків у вбудованих системах реального часу. Запропоновано можливі варіанти та критерії оцінки ефективності її вирішення. Визначено перспективні засоби програмної реалізації задачі зміни моделей. Розроблено методику кількісної оцінки запропонованих методів і засобів. З використанням моделей двох типів (синтетичних та за методом МГУА) експериментально досліджено властивості інтерпретаторів скриптових мов, механізму DLL і середовища Matlab як зовнішнього інструменту забезпечення зміни моделей. Чисельні оцінки, отримані за запропонованою моделлю обробки експериментальних даних, засвідчили високий потенціал скриптової мови Lua та інтерпретатора LuaJIT. Подано інтерпретацію отриманих результатів стосовно ряду моделей, актуальних у системах інтелектуального керування, представлено рекомендації до забезпечення оптимального використання розроблених методів і засобів у вбудованих системах управління реального часу.

**Ключові слова:** модель, критерії ефективності, вбудовані системи, системи реального часу, модельно-орієнтоване управління

Однією з характерних тенденцій сучасного етапу розвитку систем керування технологічним обладнанням та виробничими системами є впровадження в контури управління компонентів з інтелектуальними функціями. Нова якість систем керування потребує впровадження ефективних архітектурних рішень як на апаратному, так і на програмному рівнях реалізації з огляду на зростання обсягів та складності інформаційних процесів, вимог до їхніх часових параметрів. Одним з рішень у контексті зазначеної проблеми є модельно-орієнтований підхід до створення систем. Він передбачає використання на всіх етапах функціонування системи великої кількості моделей різного призначення та структури. Для забезпечення генерування, транспортування, зберігання та використання актуальних на конкретному етапі інтелектуального аналізу та прийняття рішень моделей, у загальному випадку, потрібно досягати високих показників продуктивності програмно-апаратної інфраструктури. Дана вимога посилюється у зв'язку з особливостями архітектури та функціонування вбудованих систем реального часу як типової цільової платформи промислових систем інтелектуального керування. Зважаючи на потенційну складність підтримки алгоритмів функціонування сучасних процесів керування на технічному рівні, актуальним завданням є пошук нових методологічних рішень забезпечення ресурсної ефективності та необхідних динамічних характеристик систем керування реального часу, а також дослідження їхніх властивостей.

Нами проводились дослідження, спрямовані на пошук ефективних рішень у галузі діагностики та керування технологічними модулями високоенергетичної обробки матеріалів [1, 4, 6]. Було запропоновано метод формування поведінкової стратегії інтелектуального виробничого модуля, який базується на адаптації виробничої системи шляхом модифікації моделі управління при зміні прогнозу її функціонування на основі екстремального принципу керування цільовим параметром [6]. Експерименти, проведені у модельному середовищі, продемонстрували хорошу збіж-

ність результатів та підтвердили гіпотезу про підвищення ефективності функціонування виробничої системи при застосуванні в процесі вироблення поведінкових стратегій інтелектуального модуля методів оптимізації [4].

У якості каналу отримання діагностичної інформації про перебіг технологічного процесу та стан компонентів виробничої системи досліджувався візуальний канал спостереження за зоною технологічної дії [1]. Було встановлено, що візуальний моніторинг має значний потенціал, зокрема – для забезпечення багатопараметричного адаптивного керування процесом електронно-променевого зварювання та виконання контрольних процедур з метою визначення оцінок якості виробу, оскільки методи візуалізації дозволяють на основі отриманих зображень виділити технологічно значимі артефакти та отримати достатньо широкий набір ознак процесу.

Теоретичні дослідження та практичні результати в галузі керування високоенергетичними технологічними процесами з використанням даних візуалізації [2, 7] свідчать про методологічну прийнятність та ефективність застосування модельно-орієнтованого підходу до створення систем такого типу, оскільки виникає потреба у використанні моделей реалізації, прогнозування та відновлення. У запропонованих нами методи управління зі зміною стратегій [6] та напрямках використання методів візуалізації [1] зазначений підхід також є надзвичайно актуальним з огляду на використання різноманітних моделей, тип та структура яких може істотно змінюватися відповідно до поточної стратегії керування, вибору апаратних засобів відеомоніторингу, цілей, методів і параметрів візуалізації, методу прогнозування тощо. Проте отримані наукові рішення мають суттєву чутливість до способу технічної реалізації на програмному та апаратному рівнях, яка обмежує можливість їхнього впровадження внаслідок обмежень конструкторсько-технологічного та економічного характеру.

Метою даної статті є дослідження методів та засобів підвищення ресурсної ефективності та динамічних

характеристик вбудованих систем реального часу задля мінімізації вимог до апаратної платформи та забезпечення середовища функціонування процедур інтелектуального керування.

Серед можливих факторів підвищення ефективності функціонування систем з критичними параметрами, оптимальний вибір програмної платформи є одним з визначальних для ресурсного забезпечення, швидкості та можливостей обслуговування процесів синтезу, зберігання, розгортання/згоргання, транспортування моделей керування в системах з інтелектуальними функціями. Проте різноманіття типів математичних моделей інтелектуального керування та методів обробки даних різної структури та призначення, серед яких методи групового урахування аргументів (МГУА), теорії ігор, теорії автоматів та ін., ставить питання стосовно методики як щодо порівняння ефективності окремих середовищ та засобів, так і щодо їхньої прийнятності для задач з моделями певного типу. У ході дослідження нами розглядалися можливі варіанти взаємодії математичних середовищ і прикладних систем, способи представлення моделей, механізми заміни моделей управління систем керування в реальному масштабі часу; визначалися критерії кількісної та якісної оцінки моделей та їх метричні характеристики. При цьому обмеження та оптимальність топології систем керування не розглядалися.

Аналіз існуючих технологій дозволив виявити кілька перспективних для впровадження у вбудовані системи реального часу засобів швидкої зміни моделей управління. Враховувалося, що зміна моделі може здійснюватися як заміною параметрів моделі, так і заміною власне моделі. У першому випадку модель може бути написана на мові програмування високого рівня, скомпільована під архітектуру виконавчого пристрою та зашита в ПЗП виконавця, а інформація про параметри моделі може надходити із-зовні по каналах зв'язку від керуючого пристрою до виконавчого. Практична реалізація у другому випадку не є настільки тривіальною, оскільки різні моделі можуть мати кардинально різні способи реалізації, а їх узагальнення і пошук способів уніфікації для представлення різних видів моделі через однаковий інтерфейс не завжди можливі.

Середовище функціонування моделі може бути забезпечене як реалізацією власних інструментів для створення та відпрацювання моделей в масштабах реального часу, так і використанням сторонніх апробованих рішень, які забезпечують отримання моделей заданої якості. В такому випадку для інтеграції отриманих моделей у виконавчі пристрої необхідно лише створити інструменти обміну між середовищами генерації та відпрацювання моделей. Так, математичний пакет Matlab є досить потужним, надає зручний рівень абстракції для вирішення задач різних типів, багатоваріантний у взаємодії середовища із зовнішніми програмами. Однак переваги Matlab в надійності та забезпеченості засобами роботи із складними даними нівелюються громіздкістю (потребує ОЗП виконавчого пристрою обсягом 1204 МБ) та необхідністю використання віртуальної машини Java. Тому можливість використання Matlab у вбудованих системах реального часу є досить сумнівною.

Альтернативою є використання скриптових мов, які часто застосовуються як засіб розширення функціональності програмних засобів. Розглядалися Python та Lua. Python є стандартним компонентом \*nix систем і характеризується наявністю численних бібліотек і модулів для виконання різних задач. Серед них – Sage, яка є відкритою математичною бібліотекою для Python [9] і інколи використовується як вільний заміник Matlab. Враховуючи це, Python може бути адекватною альтернативою Matlab в плані обробки та аналізу даних, створення моделей. Разом з тим, інтерпретатор Python може бути використаний як виконавчий елемент розроблених моделей. Варто відмітити можливість використання мови для вбудованих систем, оскільки доступним є вихідний код, який може бути зібраний під необхідну платформу. Lua, як і Python, є відкритою мовою і має доступну програмну реалізацію. Для роботи Lua використовує компілятор в байткод і віртуальну машину для виконання згенерованого байткоду. Для даної мови розроблено інтерпретатор LuaJIT, який забезпечує умови для виконання програмного коду з великою швидкістю та може бути використаний для критичних задач [8]. Доброю передумовою використання у вбудованих системах є компактність реалізації мови. На відміну від Python, для Lua не створено такої великої кількості бібліотек, тому реалізацію частини математичного апарату потрібно реалізовувати в C/C++. Однак це дозволяє використовувати для складних обрахунків оптимізований код, скомпільований під конкретну платформу.

Ще одним вартим уваги варіантом є заміна моделей як скомпільованого програмного коду. Даний підхід повинен забезпечити найбільшу швидкість, проте вимагає додаткового дослідження в плані використання для вбудованих систем.

Оптимальність можливих варіантів вирішення задачі інтеграції зовнішніх моделей в системи управління реального часу оцінювалася за запропонованими [5] критеріями: 1) швидкість виконання моделі; 2) швидкість зміни моделі; 3) вимоги до розміру ОЗП виконавчого пристрою; 4) можливість інтеграції у вбудовані системи; 5) тип, математичний апарат та складність моделей; 6) складність створення моделі; 7) складність та збитковість представлення моделі; 8) об'єм моделі та форма представлення. Найбільш ефективні рішення обиралися на основі комплексної оцінки за переліченими критеріями. При цьому метричні характеристики швидкодії досліджених методів підтримки функціонування модельно-орієнтованих додатків спиралася на експериментальні дані замірів швидкості ініціалізації середовища, завантаження представлення моделі, власне виконання моделі та вивантаження середовища.

У якості тестових моделей використовувалися бенчмарки двох типів, при розробці яких враховувалися ідентичність прояву при різних способах їхнього представлення та відповідність властивостям типових моделей, які використовуються у системах керування з інтелектуальними функціями. Одна з груп створених тестів відноситься до класу синтетичних. Їхній алгоритм реалізує комбінацію «легких» (віднімання, додавання, зміна знаку) та «важких» (множення-ділення, показникові та тригонометричні функції) математич-

них операцій. Загальне математичне представлення тестової моделі має наступний вигляд:

$$\sum_{i=1}^{1000} i + \frac{\sin(i)^i}{i} \quad (1)$$

Даний варіант бенчмарку адекватно представляє поведінку системи при використанні моделі у вигляді систем рівнянь, оскільки під час обрахування такої моделі мають виконуватися математичні операції перелічених типів.

Іншою моделлю, яка використовувалася для оцінки ефективності розроблюваних засобів, є модель, базована на алгоритмові МГУА. Пропонована тестова модель має знаходити функцію, яка апроксимує деякий ряд даних. Вибір такої форми моделі обумовлений тим, що одна із можливих сфер застосування розроблюваних засобів зміни моделей – автономні роботи, в яких застосовується розбиття логіки системи на три рівні [3]. Зокрема, для задач середнього рівня пропонується використовувати інтелектуальні моделі.

Формалізація та узагальнення кількісних та якісних оцінок за всією множиною висунутих критеріїв виконувалася на основі експертно встановлених вагових коефіцієнтів [5]. Такий спосіб формалізації достатній для використання методу аналізу ієрархій при виборі способів забезпечення реалізації модельно-орієнтованих додатків. Варто зауважити, що оцінка важливості критеріїв дуже залежить від випадку використання і має визначатися відповідно до вимог, встановлених задачами розроблюваної системи.

Дослідження швидкості роботи запропонованих засобів проводилося з використанням оригінальних модулів відпрацювання моделі на основі використання скриптової мови Lua (у реалізації LuaJIT, яка має більшу швидкодію інтерпретатора), скриптової мови Python та на основі використання механізму динамічних бібліотек. При проведенні експериментів використана наступна програмно-апаратна платформа: процесор – Intel® Core™ i3 CPU M 350 @ 2.27 Гц × 4; ОЗП – 3,8 ГБ DDR3; HDD – 500 ГБ; Linux Ubuntu 12.04 LTS; версія ядра – 3.2. Було проведено вимірювання швидкості виконання різних етапів роботи із моделлю при використанні бенчмарків двох типів (табл. 1). Для вимірювання використовувалися вбудовані в тестуючу програму засоби.

Таблиця 1.

**Об'єм моделей та тривалість виконання етапів роботи при їхньому відпрацюванні**

Засіб	Тип моделі	Об'єм моделі, байт	Ініціалізація середовища, мс	Відкривання моделі, мс	Виконання моделі, мс	Звільнення середовища, мс
LuaJIT	синтетична	220	65	32	206	31
	за МГУА	312		29	31663	
DLL	синтетична	6800	0	33	205	7
	за МГУА	16281		33	31662	
Python	синтетична	256	17726	98	976	3819
	за МГУА	331		80	32781	

В табл. 2 наведено інші показники ефективності експериментальних моделей.

Таблиця 2.

**Показники ефективності засобів створення та опрацювання моделей**

Критерії	DLL	Python	LuaJIT
Вимоги до розміру ОЗП виходячого пристрою	100 КБ	10 МБ	512 КБ
Можливість інтеграції у вбудовані системи	так	так	так
Типи та складність моделей	залежить від розробника	дуже велика	залежить від розробника
Складність створення моделі	середня	невелика	середня
Складність та збитковість представлення моделі	середня	невелика	невелика

Комплексні оцінки засобів створення та опрацювання моделей, обраховані за методом аналізу ієрархій з використанням запропонованих вагових коефіцієнтів (табл. 3), наведено у табл. 4.

Таблиця 3.

**Вагові коефіцієнти критеріїв оцінки ефективності**

Критерії	Коефіцієнт
Швидкість ініціалізації середовища	0,04
Швидкість завантаження моделі	0,29
Швидкість виконання моделі	0,3
Швидкість звільнення середовища	0,02
Вимоги до розміру ОЗП виходячого пристрою	0,01
Можливість інтеграції у вбудовані системи	0,2
Типи та складність моделей	0,02
Складність створення моделі	0,01
Складність та збитковість представлення моделі	0,01
Об'єм моделі	0,1

Таблиця 4.

**Комплексні оцінки засобів створення та опрацювання моделей**

Засіб зміни моделі	Комплексна оцінка для синтетичної моделі	Комплексна оцінка для моделі за методом МГУА
Python	0.192	0.258
DLL (C++)	0.388	0.353
LuaJIT	0.386	0.336

Як видно, при заданих вагах критеріїв комплексна оцінка для інтерпретатора LuaJIT практично збігається з показником для способу на основі використання DLL-механізму, розглянуті альтернативи (Python, Matlab) суттєво поступаються за ефективністю. При цьому варто зауважити, що при обрахуванні моделей базованих на інтелектуальних алгоритмах, за умови того, що частина логіки реалізована в модулі зміни моделі, час перебування програми в стані виконання скрипта невеликий відносно загального витраченого часу. Тому при аналізові ефективності методів зміни моделей з використанням моделі на основі алгоритму МГУА всі методи мають приблизно однакову швидкість відпрацювання моделей, проте різні ресурсні вимоги, а тому й різну комплексну оцінку.

Оцінюючи отримані результати, зазначимо, що актуальні для функціонування систем модельно-орієнтованого керування і, зокрема, реалізації розробленого методу інтелектуального керування технологічними процесами [6] типи моделей можуть бути класифіковані за ступенем подібності до двох досліджених типів. Так, автоматні моделі, відпрацювання яких передбачає розв'язання систем диференціальних рівнянь, а також нейромережеві моделі, мають спільні експлуатаційні риси з моделями за МГУА. Оптимізаційні моделі відповідають випадку синтетичного тес-

ту з переважанням операцій додавання та множення. При оцінці ж ступеню обчислювальної складності та інших експлуатаційних властивостей моделей у складі конкретної системи керування реальним часом не-

обхідно застосовувати адекватні можливим варіантам програмно-апаратної платформи системи вагових коефіцієнтів запропонованих критеріїв.

#### ЛІТЕРАТУРА (REFERENCES TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Литвинов В.В. Многопараметрическое адаптивное управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки. / В.В. Литвинов, А.В. Ярмілко // Математичні машини і системи. – 2013. – №2. – С.130-138.  
*Litvinov V.V., Yarmilko A.V. Multiparameter adaptive technological production control of electron-beam welding // Mathematical machines and systems, no. 2, pp. 130–138. IMMSP NASU, Kyiv, Ukraine. (2013)*
2. Литвинов В.В. Модельно-ориентированное управление как стратегия функционирования интеллектуальных производственных систем / В.В. Литвинов, В.В. Казимир // Математичні машини і системи. – 2004. – № 4. – С. 143–156.  
*Litvinov V.V., Kazymyr V.V. Modelno-orientirovannoe upravlenie kak strategiya funkcionirovaniia intelektualnykh proizvodstvennykh sistem [Modeloriented control as strategy of functioning of the intelligent manufacturing systems] // Mathematical machines and systems, no. 4, pp. 143–156., IMMSP NASU, Kyiv, Ukraine. (2004)*
3. Звенигородський О. С. Интеллектуальная система планирования тактики руху автономного робота в квазістационарном пространстве: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.23 «Засоби та системи штучного інтелекту» / Звенигородський Олександр Сергійович. – Донецьк, 2002. – 27 с.  
*Zvenigorodsky A.S. Intelektualna sistema planuvannia taktyky rukhu avtonomnoho robota v kvazistatsionarnomu seredovyskhi [Intelligent planing system of movements autonomous robot in half stationary space]: Manuscript. Dissertation for seeking of scientific degree of a candidate of technical sciences on specialty 05.13.23 – Facilities and systems of artificial intelligence / Zvenigorodsky Alexander, Donetsk State Institute for Artificial Intelligence, Donetsk, 2002. – 19 p. [in Ukrainian]*
4. Ярмілко А.В. Дослідження ефективності системи управління зі зміною стратегій. / А.В. Ярмілко, Д.С.Приходько // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2013. – №4 (81). – С.77-81.  
*Yarmilko A.V., Prykhodko D.S. Doslidzhennia efektyvnosti systemy upravlinnia zi zminoiu stratehii [Efficiency investigation of the control system with strategies changing] // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, vol. 81, iss. 4, pp. 77–81, KrNU, Kremenchuk, Ukraine. (2013)*
5. Ярмілко А.В. Забезпечення швидкої зміни моделі поведінки у вбудованих системах реального часу / А.В. Ярмілко, М.Ю. Багінський // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – №2 (79). – С. 51–55.  
*Yarmilko A.V., Bahynskiy M.Yu. Zabezpechennia shvydkoi zminy modeli povedinky u vbudovanykh systemakh realnoho chasu [Ensuring the rapid changing of behavior models in imbedded real-time control systems] // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, vol. 79, iss. 2, pp. 51–55, KrNU, Kremenchuk, Ukraine. (2013)*
6. Ярмілко А.В. Формування стратегії керування технологічним модулем за даними поточного моніторингу та експрес-діагностики // Математичні машини і системи. – 2013. – № 1. – С. 102–110.  
*Yarmilko A.V. Formuvannia stratehii keruvannia tekhnolohichnym modulom za danymy potochnoho monitryngu ta ekspres-diaagnostyky [The formation of the control strategy of the technological unit based on the current monitoring and rapid diagnosis] // Mathematical machines and systems, no. 1, pp. 102–110. MMSP NASU, Kyiv, Ukraine. (2013)*
7. Electron beam welding machine KL118.00.00.000. Maintenance manual. – К.: Paton electric welding institute, 2004. – 443 p.
8. LuaJIT: Performance Comparison. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://luajit.org/performance.html>
9. Sage: Open Source Mathematics Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sagemath.org/>

#### Yarmilko A., Bahynskiy M., Prykhodko D. The choice of software platform as a means of increasing the resource efficiency and dynamic characteristics in embedded real-time control systems

**Abstract.** The authors discuss a problem of the influence of the used software platform on the rate of the model-oriented applications operation in embedded real-time systems. The most appropriate options, feasible variants and estimation criteria of the efficiency of this problem solutions were proposed in the article. Also the advanced tools and facilities of real-time models changing program implementation were defined. The authors have presented the developed technique and tools for quantitative evaluation of the proposed methods. The article also focuses on testing the methods of models changing in embedded real-time systems. The experimental research results of the model changing methods properties based on using Matlab engine, performed by the authors, are discussed in the article, as well as scripting languages and shared library concept developed with using two types of models: synthetic and GMDH-like. Numerical estimates obtained by the proposed model of data processing have shown high potential of Lua scripting language with LuaJIT interpreter. In the end of the paper there are the interpretation of the results in relation to the number of models that are relevant to intelligent control and the usage recommendations for the methods developed for the real-time embedded control systems were presented.

**Keywords:** model, criteria of efficiency, embedded systems, real-time systems, model-driven engineering.

#### Ярмілко А.В., Багінський М.Ю., Приходько Д.С. Выбор программной платформы как средство повышения ресурсной эффективности и динамических характеристик встроенных систем реального времени

Рассмотрена проблема влияния использованной программной платформы на скорость функционирования модельно-ориентированных приложений во встроенных системах реального времени. Предложены возможные варианты и критерии оценки эффективности её решения. Определены перспективные средства программной реализации задачи смены моделей. Разработана методика количественной оценки предложенных методов и средств. С применением моделей двух типов (синтетических и по методу МГУА) экспериментально исследованы свойства интерпретаторов скриптовых языков, механизма DLL и среды Matlab в качестве внешних инструментов обеспечения отработки моделей. Численные оценки, полученные на основе предложенной модели обработки экспериментальных данных, свидетельствуют о высоком потенциале скриптового языка Lua и интерпретатора LuaJIT. Представлена интерпретация полученных результатов относительно моделей, актуальных в системах интеллектуального управления, даны рекомендации по обеспечению оптимального использования разработанных методов и средств во встроенных системах управления реальным временем.

**Ключевые слова:** модель, критерии эффективности, встроенные системы, системы реального времени, модельно-ориентированное управление.