

УДК 621.913

**Ковалевська О. С., Ковалевський С. В.****АПАРАТНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОБІЛЬНОСТІ РЕКОНФІГУРОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ**

Створення технологічних машин, зокрема – металообробних верстатів, являє собою надзвичайно важливе завдання, вирішення якого дозволяє забезпечувати точність виконання технологічних команд, таких, як точність позиціонування технологічного інструменту, точність переміщення виконавчих ланок механізмів технологічних машин. Це досягається конструюванням вузлів, яке б мало необхідної жорсткістю, вібростійкою, точністю позиціонування і контурних переміщень з задовільними динамічними характеристиками [1, 2, 3, 4]. Однак, поряд з підвищенням якості конструкторських рішень, не менш ефективним є створення ефективних систем управління, в тому числі адаптивних і оптимальних. У зв'язку з цим актуальним є створення ідентифікаційних моделей, на основі яких можна отримати металообробне обладнання з високим рівнем автоматизації, такі як верстати-роботи, складальні роботи, гнучкі виробничі системи, в тому числі – Реконфігуровані. До таких моделей пред'являється ряд специфічних вимог, зокрема – швидкість і точність ідентифікації моделей в часі виконання виробничих процесів [5]. При цьому особливо слід підкреслити доцільність розглядати реконфігурацію виробничих систем на основі мобільних верстатів-роботів в нерозривному зв'язку з мобільністю і реконфігурацією систем управління.

На жаль, серійні системи управління металорізальними верстатами не володіють зазначеним рівнем інформаційного забезпечення. При цьому, сучасний рівень інформаційних технологій і їх апаратної реалізації дозволяє долати цей недолік на принципах модульності і реконфігурування під постійно мінливим колом завдань.

Метою статті є надання принципів забезпечення верстатів-роботів, заснованих на механізмах паралельної структури, що відповідають цьому рівню автоматизації обладнання системами управління. Основним завданням дослідження є розробка принципів побудови мобільних модульних систем управління мобільними інтелектуальними технологічними машинами з механізмами паралельної структури для реконфігурованого виробництва.

Сьогодні спостерігається інтенсивне зростання популярності згортальних нейронних мереж, які представляють собою високоефективний математичний апарат обробки великих масивів даних з метою їх ідентифікації, в тому числі для створення еталонних моделей [6, 7]. Згорткові нейронні мережі характеризуються тим, що вони мають:

- меншу, в порівнянні з традиційними структурами нейронних мереж, ємність нейронів при зростанні можливостей;
- здатність описувати не шукану функцію таблиці прецедентів, а створювати архітектуру, яка здатна відновлювати безліч шуканих функцій;
- здатність виділяти найбільш характерні особливості об'єкта на даних, незалежно від їх конфігурації;
- здатність відображати принципи, прийняті тензорним обчисленням, коли складні моделі будуються на ієрархії простих моделей, які формуються в процесі навчання згортальних нейронних мереж;
- вихідний шар сверточное нейронної мережі відновлює вихідні-вхідні дані, а мінімізація похибки відновлених даних являє собою цільову функцію оптимізації навчання такої нейронної мережі.

Для того, щоб реалізувати створення ідентифікаційної моделі з метою її використання в якості еталонної моделі в системі автоматичного управління, застосовані бібліотека NumPy (математична бібліотека для мови програмування Python, яка додає підтримку великих багатовимірних

масивів і матриць, а також велику колекцію високорівневих математичних функцій для роботи з цими масивами), SciPy (бібліотека Python з відкритим вихідним кодом, яка використовується для наукових і технічних обчислень), бібліотека Theano для роботи з багатовимірними тензорами і графами, в тому числі – з використанням можливостей пошуку екстремумів тензорних функцій, а також бібліотека Keras для проведення машинного глибокого навчання на нейронних мережах [8, 9, 10, 11]. Це дозволяє використовувати апаратну зв'язку мікропроцесорів типу Mega 2560 або аналогічних мікропроцесорів і одноплатного міні-комп'ютера Raspberry pi3 b + для створення інтелектуальних систем управління мобільними верстатами-роботами.

Одноплатний міні-комп'ютер Raspberry Pi 3 Model b + спроектований таким чином, щоб вмістити в невеликому форм-факторі плати дешеві і продуктивні компоненти. У всіх версіях міні-комп'ютера Raspberry Pi використовуються процесори ARM з низьким енергоспоживанням, проте модель b + отримала оновлений процесор ARM від Broadcom. Він представлений чотирьохядерним процесором Cortex A53 з тактовою частотою 1,4 ГГц. Raspberry Pi 3 Model b + має підтримку Gigabit Ethernet. При цьому швидкість інтернету може досягати 315 Мбіт / с. Пропускна здатність міні-комп'ютера обмежена роз'ємом USB 2.0. Є підтримка Power over Ethernet (PoE) через відповідний роз'єм на платі. На Raspberry Pi 3 Model b + присутні повнорозмірний порт HDMI, чотири USB-порту і аудіо роз'єм. Завантаження ОС здійснюється через слот карт microSD [12, 13]. Особливою перевагою одноплатних комп'ютерів є їх модульність і можливість як завгодно нарощувати ці плати, об'єднуючи їх у все більш і більше потужні обчислювальні багатоядерні пристрої з високим рівнем швидкодії, що наближається за своїми властивостями до суперкомп'ютерів: при реалізації навчання на пристрої Raspberry pi3 Model b +. Тому їх застосування в модульних системах управління мобільними верстатами-роботами надає нові можливості, як це стверджувалося в роботах .

Багатоваріантність компоновок мобільних верстатів для різних варіантів завантаження реконфігурованих ділянок механічної обробки і складність управління виконавчими руками робочого інструмента вимагає постійного контролю його положень в робочому просторі і їх корекції відповідно до еталонної моделлю. У роботах [11, 13] показано особливості динаміки гексапод як представника верстатного обладнання з механізмами паралельної структури. Зокрема, авторами цих робіт підтверджується складний характер коливань механічної системи. Ці дослідження проводилися при вимушених коливаннях фіксованої частоти, що дорівнює 10, 50, 100, 150 Гц. Амплітуда коливань по осях X, Y має різний характер: при частоті 10 Гц зі збільшенням жорсткості різко зменшується, а при частотах 100, 150 Гц амплітуда мінімальна і змінюється незначно. Амплітуди крутильних коливань щодо осей X, Y, Z мають залежності аналогічні лінійним. На підставі цих досліджень автори роблять висновок про те, що коливання по осях X, Y і крутильні коливання вимагають ретельного розрахунку конструкторсько-технологічних параметрів. Цей висновок підтверджує необхідність пошуку альтернативного рішення для забезпечення точності і продуктивності обладнання різних компоновальних схем. Тому, формування складу і обсягу основного та допоміжного обладнання в механоскладальному виробництві визначається не сформованими традиціями і можливостями його поновлення, а тією номенклатурою виробів, яка на даний момент часу є актуальною і найбільш затребуваною. Такий підхід дозволить адаптувати можливості виробництва до випуску різних виробів. Замінюючи перспективу оснащення заводів сучасними металорізальними верстатами, обробними центрами, гнучкими автоматизованими модулями, гнучкими виробничими ділянками і цехами на постійне безперервне комплектування ділянок і цехів мобільними верстатами-роботами, можна на порядки знизити витрати на основні фонди. Особливістю такого розвитку виробничої потужності підприємства є: формування структури замовлень на продукцію високого попиту (критерієм відбору є вигода від її виготовлення); розробка технологічних процесів з використанням безлічі можливих варіантів конфігурації мобільних верстатів-роботів; вибір оптимальних варіантів компоновання мобільних інтелектуальних верстатів-роботів; складання і установка мобільних верстатів-роботів на ділянці механообробки в призначених позиціях.

Запропонована концепція нового рівня забезпечення гнучкості багатономенклатурного виробництва в машинобудуванні передбачає модульність матеріальних, енергетичних та інформаційних носіїв – складових технологічних систем з глибокою інтеграцією функцій, що забезпечують виготовлення продукції. Таким чином, етапи створення реконфігурованих виробництв включають такі позиції:

1. Параметричний ряд актуаторів – рухомих ланок механізмів паралельних структур. Розмірний ряд повинен включати актуатори з передавальним відношенням в межах  $1: 4 \div 1: 6$ . Для забезпечення хорошого швидкодії актуатори слід створювати на основі магнітних лінійних приводів [14].

2. Параметричний ряд базових елементів для конфігурації механізмів паралельної структури.

3. Параметричний ряд інструментальних платформ.

4. Параметричний ряд настановних пристосувань з програмованими координатами.

5. Швидкозмінні електромеханічні інструментальні пристосування і системи інструментів для обробки деталей і складання виробів.

6. Комплекти драйверів для управління актуаторами і виконавчим механізмами мобільних верстатів-роботів.

7. Форм-фактори для мікропроцесорів Mega 2560, драйверів актуаторів і приводів головного руху і подач інструментального вузла, одноплатних міні-комп'ютерів Raspberry pi3 b+, пристроїв введення-виведення керуючих команд.

8. Ділянки механоскладального цеху з розміченими елементами базуються сіткою настановних елементів для базування актуаторів відповідно до структури механізмів відповідно до ейлерова циклами.

9. Програмне забезпечення управління виконавчими механізмами сконфігурованих ділянок механічної обробки і складання.

10. Програмне забезпечення діагностики конфігурації виконавчих ланок механізмів паралельної структури.

11. Програмне забезпечення створення ідентифікаційних моделей і їх перетворення в еталонні моделі для адаптивного управління реконфігурованою системою.

12. Програмно-інформаційний комплекс проектування реконфігурованих структур технологічного обладнання та процесів реконфігурації обладнання.

Дійсно, застосування мобільних верстатів з використанням механізмів паралельної структури, вимагає забезпечення складного характеру управління їх виконавчими ланками, які базуються на принципово нових методах і способах контролю і діагностики нового обладнання, технологічних процесів і продукції. А впровадження мобільних верстатів забезпечує:

– зміну структури виробничого середовища за рахунок зміни компонування обладнання, організації робочого простору, транспортування;

– зміну властивостей компонентів довкілля;

– зниження інформаційної ентропії середовища;

– зміну енергетичної насиченості середовища;

– зміну інформаційної насиченості середовища;

– зміну інтелектуальних властивостей середовища.

Цей перелік базується на розробці операцій технологічного, енергетичного, інформаційного та комунікаційного забезпечення виробництва.

На відміну від мобільних роботів, тут під робочим середовищем розуміти середовище оброблюваної деталі або виробу, що збирається. Як відомо, для процесів обробки заготовок деталей і складання машин потрібна точність рухів виконавчого механізму. Еталонна модель також вимагає високої точності реалізації (в межах 1–2 мкм). У цьому полягає відмінність робіт з досліджень мобільних адаптивних роботів і робіт з досліджень в області створення мобільних інтелектуальних верстатів-роботів. Звичайно, такий рівень автономності мобільних верстатів є найвищим.

В роботах [15, 16] наведені обґрунтування необхідності оптимізації управління складними механізмами технологічних машин, а також представлені моделі процесів ефективного за критеріями витрат енергії управління обладнанням з паралельною кінематикою з використанням їх динамічної та статичної моделей. Показано, що в незаданій діапазоні швидкостей робочого органу при реалізації такого управління можна не враховувати маси і інерційні параметри елементів такого обладнання. Однак основні переваги обладнання з паралельною кінематикою найбільш яскраво проявляються в умовах великих швидкостей переміщення виконавчих механізмів при заданій точності траєкторії переміщення інструменту і його позиціонування.

Авторами розроблений метод ідентифікації положення, кінематичних і динамічних параметрів механізмів з кінематикою паралельної структури, з яких складаються мобільні верстати-роботи. Збудження конструкції реконфігурованого обладнання малопотужним акустичним сигналом з розподілом сигналів однакової амплітуди дозволяє встановлювати залежності (1):

$$F(A,t) = x(t), y(t), z(t), \quad (1)$$

де  $F(A,t)$  – збуджуючий сигнал,

$x(t), y(t), z(t)$  – координати актуальної точки об'єкта.

Ці дані можуть бути використані для управління позиціонуванням виконавчої ланки механізму з паралельною кінематикою. У зв'язку з цим, метою представленого дослідження є підтвердження можливості багатокomпонентного аналізу параметрів об'єктів (процесів і обладнання). Як інформативне джерело діагностичного сигналу, слід використовувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні.

Для досліджень використано алгоритм швидкого обчислення дискретного перетворення Фур'є [17] за допомогою FFT-аналізатора.

Оцінка спектральної щільності проводиться за відомою реалізацією  $X_P(t)$  сигналу шляхом формування з неї дискретної послідовності  $x(n)$ ,  $n \rightarrow 0, 1, \dots, \tilde{N}-1$  і обробки цієї послідовності відповідно до заданого квантування.

Управління виконавчими рухами технологічних машин з механізмами паралельної структури являє собою складну задачу, рішення якої може бути отримано на основі рішення задач кінематики та динаміки виконавчих механізмів. В результаті можуть бути створені умови для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їх рухів по заданій траєкторії. Для цих цілей системи управління повинні бути оснащені інформативними системами ідентифікації об'єктів.

Для створення інтелектуальної системи управління основними складовими елементами реконфігурованого виробництва розроблено методику акустичної діагностики для механізмів технологічних машин (верстатів – роботів), що дозволяють діагностувати різні їх стани в різних умовах. Показана можливість використання запропонованого підходу до управління складними технологічними машинами, такими як верстати з механізмами на основі паралельної кінематики для підвищення точності позиціонування виконавчих механізмів, забезпечення їх динамічної настройки і оптимізації траєкторій переміщень робочих органів обладнання (в тому числі – ріжучого інструменту). Все це дозволяє розширити діапазон можливостей підвищення точності і продуктивності їх роботи.

Пошук складних траєкторій зі змінними координатами і похідними першого і другого порядку від траєкторії переміщення дозволяють визначати і прогнозувати стан об'єкта в будь-який момент часу. Тим самим створюються умови для управління становищем робочого органу мобільного верстата-робота з урахуванням поточних умов роботи верстата-робота (добре і слабо формалізованих) змінних факторах.

## ВИСНОВКИ

На основі представлених розробок авторів сформована концепція реконфігурованого багатомономенклатурного виробництва, заснованого на принципово новому підході

до компонування, зокрема, механоскладального цеху конкурентоспроможного виробництва із застосуванням мобільних інтелектуальних верстатів з кінематикою паралельної структури.

У концептуальному вигляді ця концепція передбачає наявність в механоскладальному цеху таких підрозділів, як:

- заготівельний ділянку на основі машини безперервного лиття заготовок в поєднанні з деталепрокатним станом;
- механічний ділянку, що представляє собою майданчик для монтажу мобільних верстатів з системою інтелектуального управління;
- діляниця складання-розбирання мобільних верстатів з кінематикою паралельної кінематики;
- діляниця складання основний продукції.

Для реалізації запропонованої концепції авторами розроблена гамма (розмірний ряд) елементів реконфігурованої виробничої системи на базі мобільних верстатів з паралельної кінематикою і інтелектуальних систем управління, що дозволяє підтримувати машиноремонтний кластер на базі реконфігурованих виробництв. При цьому, запропонована концепція може бути запропонована як ринковий товар у вигляді гама мобільних верстатів з інтелектуальним управлінням для різних виробництв.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Made-in-China.com* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.made-in-china.com/cs/hot-chinaproducts/Machine\\_Tools.html?gclid=CjwKCAjwwdTbBRAIEiwAYQf\\_EzP3fe\\_3CdCCdDTyWYSdDqgyrPL\\_mFdbiTmjiNkrSGS0SW4C6ySgoRoC\\_nsQAvD\\_BwE](https://www.made-in-china.com/cs/hot-chinaproducts/Machine_Tools.html?gclid=CjwKCAjwwdTbBRAIEiwAYQf_EzP3fe_3CdCCdDTyWYSdDqgyrPL_mFdbiTmjiNkrSGS0SW4C6ySgoRoC_nsQAvD_BwE).
2. *Modifications Of Basic Machines* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.britannica.com/technology/machine-tool/Modifications-of-basic-machines>.
3. Новиков Ф. В. *Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки* : монографія / Ф. В. Новиков. – Д. : ЛІРА, 2018. – 400 с.
4. *Технологии производства: проблемы и решения* : монографія / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко и др. – Д. : ЛІРА, 2018. – 536 с.
5. Лишенко Н. В. *Силовые параметры резания в системах адаптивного управления станками* / Н. В. Лишенко // *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении* : матер. науч.-техн. конф. – Киев : АТМ України, 2010. – С. 77–81.
6. Schmidhuber J. *Deep Learning in Neural Networks : An Overview* / J. Schmidhuber // *Neural Networks*. – 2015. – Vol. 61. – P. 85–117.
7. *Recurrent neural network based language model* / Mikolov T., Karafiat M., Burget L., Cernocky J., Khudanpur S. // *11th Annual Conference of the International Speech Communication Association*. – Japan, 2010. – P. 1045–1048.
8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mila.quebec/en/mila>.
9. *Instructables* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.instructables.com/id/Installing-Keras-on-Raspberry-Pi-3>.
10. *Deep Learning with Python: A Hands-on Introduction*. Nikhil Ketkar Bangalore [Електронний ресурс]. – Karnataka, India. – Режим доступу: <https://www.apress.com/in/book/9781484227657>.
11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://respigotech.it/index.php?topic=8443.0>.
12. *Raspberry Pi* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.raspberrypi.org>.
13. *Root-Nation.com* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://root-nation.com/news/it-news/raspberry-pi-3-model-b>.
14. Meessen K. J. *Analysis and design of a slotless tubular permanent magnet actuator for high acceleration applications* / K. J. Meessen, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova // *Journal of applied physics*. – 2009 – Vol. 105 – Pp. 07F110-1 – 07F110-3.
15. Смирнов В. А. *Кинестатическое моделирование энергоэффективного управления оборудованием с параллельной кинематикой* / В. А. Смирнов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2010. – Вып. 16. – № 29. – С. 65–70.
16. Смирнов В. А. *Повышение производительности обработки на оборудовании с параллельной кинематикой* / В. А. Смирнов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2010. – Вып. 15. – № 10 (186). – С. 72–76.
17. Merlet J.-P. *Parallel Robots*. – Springer-Verlag New York Inc., 2006. – 394 p.