

М. В. Печеник<sup>1</sup>  
С. О. Бур'ян<sup>1</sup>  
С. О. Маліборський<sup>1</sup>

## АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ВІДПРАЦЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ЗА ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ, СПРИЧИНЕНОЇ ШТУЧНОЮ ЗМІНОЮ НАВАНТАЖЕННЯ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ КОМПЛЕКСІ МЕТАЛООБРОБКИ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

*Сформульована мета роботи та задача дослідження особливостей використання конвеєрів з гнучким тяговим елементом в сучасних системах автоматизованої металообробки. Подано технологічну схему металообробного комплексу, який виконує операції без втручання людини. Показано актуальність використання конвеєрів в процесах, де вимагається точне відпрацювання у разі штучного переміщення вантажу. З використанням пакету прикладних програм MatLab Simulink досліджено модель електромеханічної системи конвеєра з векторно-керованим асинхронним електродвигуном. Виконано дослідження статичних та динамічних характеристик транспортного конвеєра комплексу металообробки. На основі аналізу статичних та динамічних режимів роботи конвеєра, побудовано діаграму навантаження привода, проведено дослідження характеру зміни амплітуди максимальної похибки за штучного змінення статичного моменту. Зазначено, що внаслідок послідовного оброблення заготовок деталей на лінії їх вага зменшується, що зумовлює зменшення максимальної похибки за швидкістю тягового елемента. За допомогою отриманих результатів виконано дослідження поведінки системи для двох випадків — з максимальною та мінімальною продуктивністю лінії. За отриманими залежностями визначено, що система залишається стійкою за наявності високочастотної зміни штучного навантаження. Встановлено, що у випадку високої продуктивності транспортна система працює стійко, параметри її не виходять за межі встановлених вимог (максимальна динамічна похибка не перевищує 3 % від номінальної швидкості транспортного механізму), і тому використання конвеєра з векторним керуванням в автоматизованій лінії металообробки є доцільним. Отримані результати дозволили рекомендувати в проектуванні автоматизованих ліній металообробки використання стрічкових конвеєрів з векторно-керованими асинхронними електродвигунами для транспортування деталей і заготовок.*

**Ключові слова:** комплекс, асинхронний двигун, моделювання, металообробка, конвеєр, автоматизована лінія, векторне керування, керування швидкістю, кутова швидкість.

### Вступ

У світовій практиці одним з перспективних напрямків розвитку промислових комплексів є створення автоматизованих ліній, у т. ч. і з металообробки, які визначають замкнений цикл виробництва деталей та іншої продукції без втручання людського фактору [1]. Використання таких систем сприяє підвищенню продуктивності технологічних процесів та техніко-економічних показників промислового підприємства в цілому.

Разом з цим, важливою проблемою під час створення автоматизованої лінії металообробки є розробка надійних засобів транспортування заготовок деталей вздовж технологічної лінії в процесі їх обробки. Використання транспортних візків та ланцюгових конвеєрів внаслідок інерційності переміщення заготовок і деталей, ускладненого процесу завантаження та розвантаження зменшує продуктивність технологічної лінії та не дозволяє забезпечити повну автоматизацію процесу керування.

Одним з перспективних напрямків розв'язання вказаної задачі є використання безперервних транспортних систем з гнучким тяговим елементом, які забезпечують стабільну швидкість переміщення та реалізують заданий закон керування процесом руху. Забезпечення потрібного закону руху з високим ступенем точності потребує використання сучасних систем електроприводів, серед яких перспективним є використання векторно-керованих асинхронних електродвигунів [2], [3].

В процесі переміщення заготовок деталей електромеханічна система конвеєра піддається штучним збуренням, частота яких збільшується з ростом продуктивності технологічної лінії. В цих умовах достатньо актуальною є задача відпрацювання динамічної похибки за швидкістю та забезпечення сталого режиму роботи електромеханічної системи конвеєра. Це дозволить оцінити доцільність використання в автоматизованих лініях металообробки стрічкових конвеєрів з векторно-керованими асинхронними електродвигунами.

Метою роботи є дослідження характеру відпрацювання динамічних похибок за швидкістю електромеханічної системи з векторним керуванням у разі впливу штучних навантажень.

### Результати дослідження

Для визначення режимів роботи стрічкового конвеєра як елемента технологічного комплексу стисло розглянемо принцип побудови алгоритму функціонування автоматизованої лінії металообробки, технологічна схема якої показана на рис. 1.

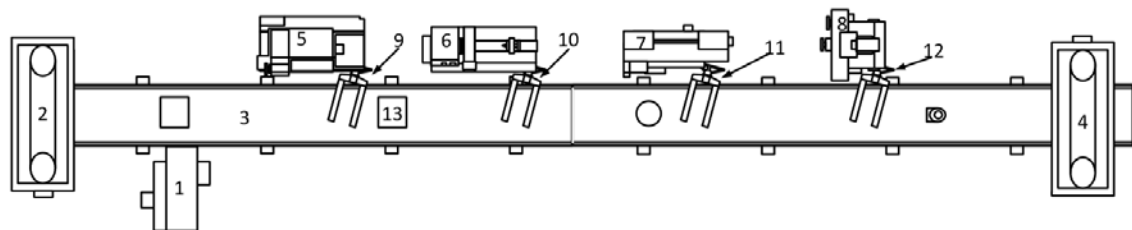


Рис. 1. Технологічна схема автоматизованої лінії металообробки

Автоматизована лінія металообробки працює за таким алгоритмом: приводний електродвигун (1) запускає транспортну систему комплексу. З досягненням номінальної швидкості починається подача заготовок із завантажувача (2). Заготовки транспортуються стрічкою (3) до розвантажувача (4). В процесі транспортування заготовки потрапляють у виробничі зони, у яких їх знімають маніпулятори (9—12) та повертають після обробки на верстатах (5—8). Оскільки в процесі технологічного циклу виникає досить висока частота зміни навантаження, то електромеханічна система конвеєра має забезпечити стабільний режим руху та швидке відпрацювання динамічної похибки за швидкістю. Дослідження динамічних характеристик конвеєра виконано на базі електромеханічної системи, функціональна схема якої показана на рис. 2.

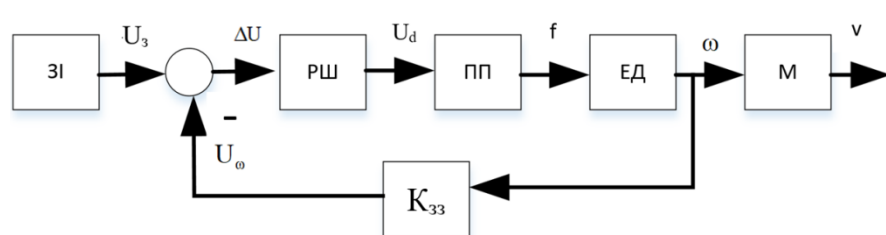


Рис. 2. Функціональна схема системи керування: ЗІ — задатчик інтенсивності, РШ — регулятор швидкості, ПП — перетворюючий пристрій, ЕД — електродвигун, М — механізм, К<sub>зз</sub> — коефіцієнт зворотного зв'язку

За допомогою ЗІ формується траєкторія напруги задання  $U_z$ , після порівняння з напругою зворотного зв'язку  $U_\omega$ , отримується значення напруги для формування заданої швидкості стрічки  $\Delta U$ , після регулятора швидкості отримуємо діюче значення напруги  $U_d$ , яке після ПП подається як синусоїдальний сигнал певної частоти  $f$  на електродвигун та унормовує кутову швидкість  $\omega$ , яка за допомогою механізму М перетворюється в лінійну швидкість стрічки  $v$ .

Дослідження виконано на основі стрічкового конвеєра з такими параметрами: довжина 100 м, лінійна швидкість руху 0,5 м/с, кількість одночасно оброблюваних заготовок на лінії з максимальною продуктивністю  $n_v = 6$ , маса квадратного метра стрічки  $m_m = 3,6$  кг/м<sup>2</sup>, кількість верстатів на лінії  $n = 4$ , маса заготовки до  $m_1 = 30$  кг та після обробки на лінії  $m_2 = 21$  кг, кутова швидкість приводного двигуна конвеєра  $\omega = 78$  рад/с, потужність двигуна  $P = 4$  кВт.

Згідно з відомими методами [4], [5], отримано математичну модель електромеханічної системи та за допомогою пакету прикладних програм MatLab Simulink розроблено обчислювальну структуру для дослідження динамічних режимів роботи транспортної системи.

В дослідженні проаналізовано характер відпрацювання похибки за швидкістю та її вплив на стійкість роботи системи керування з різною інтенсивністю штучного навантаження тягового елемента конвеєра.

Відповідно до технологічного процесу, побудовано графік навантаження конвеєра (рис. 3).

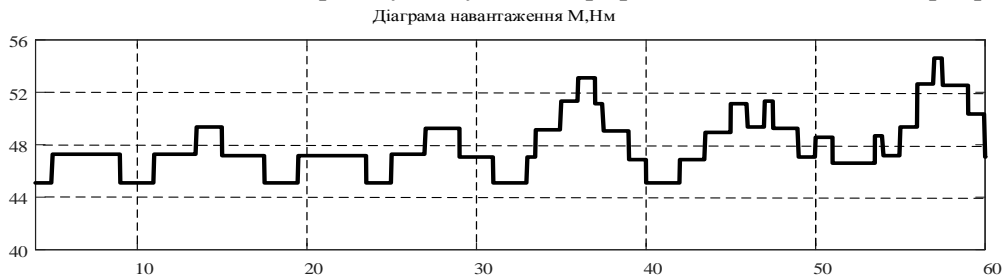


Рис. 3. Діаграма навантаження в межах одного робочого циклу

Діаграма навантаження конвеєрної лінії, яка обслуговує 4 верстати, враховує весь спектр навантаження системи від мінімального до максимального рівня. Як видно з рис. 3, на початку відбувається поступове заповнення лінії деталями, після цього відбувається відпрацювання алгоритму роботи з переміщення деталей [6]. Вважалось, що в процесі обробки заготовок деталей їх маса зменшується з 30 кг до 21 кг. Для наочності отриманих характеристик дослідження виконуються в масштабі часу 1:10 із заданою кутовою швидкістю  $\omega = 78$  рад/с. Результати досліджень показано на рис. 4 та 5.

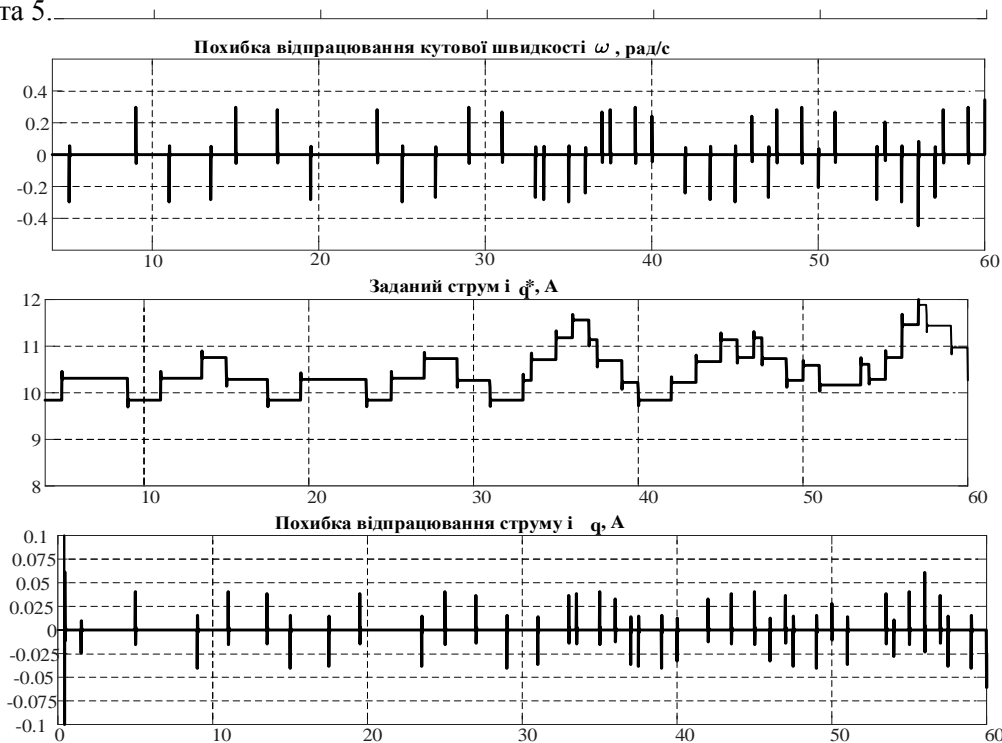


Рис. 4. Динамічні режими роботи конвеєра під час відпрацювання діаграми навантаження

Результати досліджень показують, що зі зміною навантаження за максимальної продуктивності величина похибки знаходиться в межах від 0,3 до 0,22 рад/с, що складає 0,3...0,22 % від номінальної швидкості і не перевищує допустимі для конвеєрів з гнучким тяговим елементом значення, що підтверджено в роботах [7]—[9].

З графіка, показаного на рис. 5, випливає, що час відпрацювання максимальної похибки становить 0,07 с.

Аналіз характеру розподілення похибок через зміну навантаження показує, що період відпрацювання похибки не впливає на процес встановлення заготовки та знімання деталі з тягового елемента конвеєра.

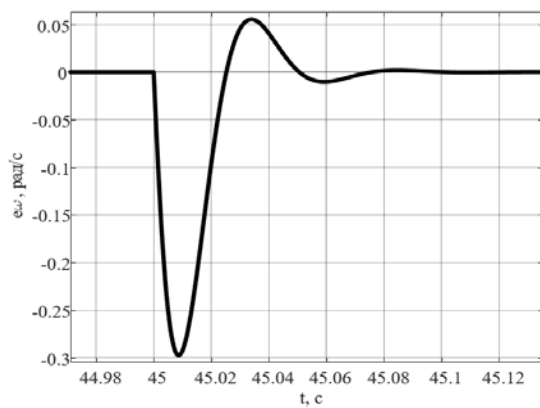


Рис. 5. Перехідний процес похибки відпрацювання кутової швидкості за компенсації динамічного навантаження

Це забезпечує сталу роботу як транспортної системи, так і технологічного комплексу в цілому.

### Висновки

Дослідження показують що використання електро-механічної системи з векторно-керованим асинхронним електродвигуном в автоматизованому комплексі металообробки дозволяє забезпечити високу точність відпрацювання заданого закону керування. З аналізу характеру відпрацювання максимальних динамічних похибок за швидкістю руху конвеєра випливає, що коливальні процеси стрічки відсутні і тому не відбувається пошкодження деталей під час транспортування.

Отримані результати дозволяють рекомендувати використання стрічкових конвеєрів з векторно-керуваними асинхронними електродвигунами для

проектування нових і модернізації наявних автоматизованих ліній металообробки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. М. Бочков, і Р. І. Сілін. *Обладнання автоматизованого виробництва*, підруч., Р. І. Сілін, Ред. Львів, Україна: вид-во Львів. політехніка, 2015, 404 с. ISBN 978-617-607-780-0.
- [2] *Development of Moving Equipment for Fishermen's Catches using the Portable Conveyor System*. [Electronic resource]. Available: <https://cutt.ly/GEN1KPY>.
- [3] B. Jeftenić, et al., "Energy efficiency in transportation of bulk material with frequency controlled drives," in *14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, Ohrid, Macedonia, 2010, v. 5, pp. 105-113.
- [4] С. М. Пересада, і С. М. Ковбаса, «Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем,» *Технічна електродинаміка*, № 14, с. 17-22, 2002.
- [5] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer – Verlag, Berlin: 1996, 420 p.
- [6] M. Pechenyk, M. Pushkar, S. Burian, and L. Kazmina, "Investigation of Energy Characteristics of the Electromechanical System in Multi-motor Conveyors under Variation of Traction Load Level on the Belt," *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 303-306.
- [7] М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, і Л. М. Казьміна, «Дослідження характеру розподілу втрат при завантаженні конвеєра,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 62-66, 2018.
- [8] Н. В. Печеник, и С. А. Бурьян, «Энергоэффективные режимы работы электромеханических систем ленточных конвейеров,» *Техническая электродинамика*, № 5, с. 122-124, 2014.
- [9] М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, і А. О. Горбатовський, «Особенности підвищення енергетичної ефективності електро-механічної систем конвеєра,» *Вісник НТУУ «ХПІ», серія: Проблеми автоматизованого електропривода теорія і практика*, № 36, с. 382-384, 2013.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.10.2021

**Печеник Микола Валентинович** — канд. техн. наук, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

**Бур'ян Сергій Олександрович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: sburyan18@gmail.com ;

**Маліборський Станіслав Олександрович** — студент факультету електроенерготехніки та автоматики

**M. V. Pechenyk<sup>1</sup>**  
**S. O. Burian<sup>1</sup>**  
**S. O. Maliborskyi<sup>1</sup>**

## Analysis of the Nature of Working Dynamic Error at the Speed of the Electromechanical System at the Artificial Change of Load in the Automated Machine

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The purpose of work and the task of research of features of use of conveyors with a flexible traction element in modern systems of the automated metalworking are formulated. The technological scheme of the metalworking complex which carries out operations without human intervention is presented. The article presents the relevance of the use of conveyors in processes that require precise testing during artificial movement of cargo. Based on the MatLab Simulink application package, a model of an electromechanical conveyor system with a vector-controlled induction motor is obtained. The study of

static and dynamic characteristics of the transport mechanism of the metalworking complex is performed. Based on the analysis of static and dynamic modes of operation of the conveyor, the diagram of loading of the mechanism is constructed; research of character of change of amplitude of the maximum error at artificial change of the static moment is carried out. It is noted that due to the sequential processing of parts on the line, their weight decreases, which reduces the maximum error in the speed of the traction element. Using the obtained results, the study of the behavior of the system for two cases, at maximum and minimum line performance, based on the obtained dependences, it was concluded that the system remains stable in the presence of high-frequency change of artificial load. In case of high productivity, the transport system works steadily, its parameters do not exceed the established requirements (the maximum dynamic error does not exceed 3 % of nominal speed of the transport mechanism) use of the conveyor with vector control in the automated metalworking line is considered expedient. The obtained results allowed recommending the use of belt conveyors with vector-controlled asynchronous electric motors for transportation of parts during the design of automated metalworking lines.

**Keywords:** complex, asynchronous motor, metalworking, conveyor, automated line, vector control, speed control, angular velocity.

**Pechenyk Mykola V.** — Cand. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive;

**Burian Serhii O.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive, e-mail: sburyan18@gmail.com ;

**Maliborskyi Stanislav A.** — Student of the Department of Electrical Engineering and Automation

**Н. В. Печеник<sup>1</sup>**  
**С. А. Бурьян<sup>1</sup>**  
**С. А. Малиборский<sup>1</sup>**

## **Анализ характера отработки динамической погрешности по скорости электромеханической системы при искусственном изменении нагрузки в автоматизированных комплексах металлообработки**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
 «Киевский Политехнический Институт имени Игоря Сикорского»

Сформирована цель работы и задача исследования особенностей использования конвейеров с гибким тяговым элементом в современных системах автоматизированной металлообработки. Представлена технологическая схема металлообрабатывающего комплекса, который выполняет операции без вмешательства человека. В статье представлены актуальность использования конвейеров в процессах, требующих точной отработки при искусственном перемещении груза. На основе пакета прикладных программ MatLab Simulink получена модель электромеханической системы конвейера с векторно-управляемым асинхронным электродвигателем. Выполнены исследования статических и динамических характеристик транспортного механизма комплекса металлообработки. На основе анализа статических и динамических режимов работы конвейера, построена диаграмма нагрузки механизма, проведено исследование характера изменения амплитуды максимальной погрешности при искусственном изменении статического момента. Отмечено, что в результате последовательной обработки детали на линии их вес уменьшается, что приводит к уменьшению максимальной погрешности по скорости тягового элемента. С помощью полученных результатов выполнены исследования поведения системы для двух случаев — при максимальной и минимальной производительности линии. По полученным зависимостям определено, что система остается устойчивой при наличии высокочастотного изменения искусственной нагрузки. В случае высокой производительности транспортная система работает устойчиво, параметры ее не выходят за пределы установленных требований (максимальная динамическая погрешность не превышает 3 % от номинальной скорости транспортного механизма) использование конвейера с векторным управлением в автоматизированной линии металлообработки считается целесообразным. Полученные результаты позволили рекомендовать при проектировании автоматизированных линий металлообработки использование ленточных конвейеров с векторно-управляемыми асинхронными электродвигателями для транспортировки деталей.

**Ключевые слова:** комплекс, асинхронный двигатель, металлообработка, конвейер, автоматизированная линия, моделирование, векторное управление, управление скоростью, угловая скорость.

**Печеник Николай Валентинович** — канд. техн. наук, профессор кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

**Бурьян Сергей Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: sburyan18@gmail.com ;

**Малиборский Станислав Александрович** — студент факультета электроэнерготехники и автоматики