

**М. В. Печеник<sup>1</sup>**  
**С. О. Бур'ян<sup>1</sup>**  
**Л. М. Казьміна<sup>1</sup>**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ РОЗПОДІЛУ ВТРАТ ПІД ЧАС ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНВЕЄРА**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Показано актуальність дослідження змін енергетичних втрат в електромеханічній системі конвеєрів і в період їх завантаження до рівня об'ємної продуктивності, включаючи підвищення рівня їх енергоефективності, відповідно до аналізу вітчизняних і зарубіжних наукових і патентних джерел, пов'язаних з дослідженням режимів роботи безперервної транспортної системи з гнучким тяговим елементом. Розглянуто режим доставки вантажу на конвеєрну стрічку після досягнення його номінальної лінійної швидкості, тобто після перехідного процесу запуску конвеєра.*

*Дослідження проводилося на основі моделі багатомоторного високопродуктивного конвеєра, в якому для зниження рівня середньої напруги гнучкого елемента в замкненому контурі один з двигунів розміщений в хвостовій частині транспортного механізму. Беручи до уваги вимоги до проектування сучасних електроприводів, розглянуто варіант використання уніфікованих електроприводів з асинхронними електродвигунами однакової потужності.*

*Наведено результати дослідження зміни енергії і ефективності в електромеханічній системі для двох найімовірніших варіантів завантаження стрічкового конвеєра. Розглянуто два варіанти розподілу втрат енергії, а саме: перший варіант — за відсутності регулятора напруги, який дозволяє мінімізувати втрати в електромеханічному перетворювачі, що виникають через зміни технологічних параметрів стрічкового конвеєра і другий варіант — з оптимальним регулятором напруги в структурі системи управління.*

*Проведено відповідний аналіз розподілу втрат для обох варіантів і визначена доцільність використання закону управління енергією, оптимального для енергоефективності приводних елементів безперервних транспортних систем.*

**Ключові слова:** стрічковий конвеєр, електромеханічна система, оптимальний регулятор напруги, втрати енергії, інтенсивність завантаження.

### **Вступ**

Високопродуктивні стрічкові магістральні конвеєри є одними з перспективних засобів переміщення вантажів на великі відстані. У зв'язку з наявністю приводної станції великої потужності, яка може досягати до трьох-чотирьох тис. кВт, мають місце суттєві втрати енергії впродовж всього технологічного циклу [1], [2]. Тому однією з найактуальніших задач формування системи електроприводу є підвищення рівня енергетичної ефективності в електромеханічній транспортній системі, як на окремих етапах, так і впродовж всього періоду експлуатації. Проведені раніше дослідження показали, що застосування оптимального стосовно енергетичної ефективності закону керування напругою дозволяє суттєво зменшити втрати, як в статичних, так і в динамічних режимах роботи, в тому числі і у разі коливань навантаження [3]. Одним з характерних етапів технологічного циклу транспортної системи безперервної дії є період завантаження конвеєра, час якого може становити 15...20 хв після досягнення тяговим елементом номінальної швидкості. Для цього режиму характерне коливання навантаження на валу електродвигуна, яке змінюється в досить широкі межі і досягає величини від  $0,5M_n$  до  $1,3M_n$ . Однак, для оцінки енергетичної ефективності цього режиму необхідно провести дослідження розподілу втрат енергії в період всього вищевказаного технологічного етапу.

*Метою роботи є дослідження характеру втрат енергії в електромеханічній системі стрічкового конвеєра в процесі його завантаження.*

## Результати дослідження

Зазвичай в транспортних системах приводні блоки розташовують в головній частині конвеєра, або один з них в хвостовій частині, який компенсує опір холостої вітки і сприяє зменшенню середнього натягу тягового елемента вздовж замкнутого контуру. Уніфікація приводних блоків покращує умови експлуатації всієї транспортної системи. Тому для дослідження взято варіант установки трьох приводних блоків по 55 кВт, один з яких розміщений у хвостовій частині стрічкового конвеєра.

В дослідженні використовувалася замкнена система регулювання ПЧ-АД. Електродвигуни, перетворювач частоти і регулятор швидкості описані відомими методами [4], [5]. Використано оптимальний регулятор напруги, який забезпечує мінімізацію втрат в конвеєрі [6]. З урахуванням методики [1], на основі рівняння Лагранжа 2-го роду, складена математична модель руху стрічки з урахуванням пружно-в'язких властивостей тягового елемента. В дослідженні враховувалися такі припущення: траса конвеєра прямолінійна, швидкості переміщення стрічки по приводних барабанах постійні, коефіцієнти опору вантажної і порожньої віток незмінні, відсутнє проковзування стрічки відносно барабанів.

Застосовано 6-масову розрахункову схему магістрального стрічкового конвеєра, натяжний пристрій розміщений у хвостовій частині конвеєрної системи [3]. Враховуючи сили внутрішнього опору замкнутого контуру та сили опору переміщення натяжного вантажу, отримано систему диференціальних рівнянь, яка описує рух тягового елемента завантаженого багатодвигунного конвеєра.

$$(2m_{\text{ван.}} + 2m_{\text{пор.}} + m_{\text{пр.1}})\ddot{X}_1 + m_{\text{ван.}}\ddot{X}_2 + m_{\text{пор.}}\ddot{X}_5 + 2\eta\dot{X}_1 - \eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_5 + 2CX_1 - CX_2 - CX_5 + 0,5lw\text{sgn}\dot{X}_1(G_{\text{ван.}} + G_{\text{пор.}}) = \frac{M_{\text{ПП1}} \text{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)}{R_6}, \quad (1)$$

$$m_{\text{ван.}}\ddot{X}_1 + 4m_{\text{ван.}}\ddot{X}_2 + m_{\text{ван.}}\ddot{X}_3 - CX_1 + 2CX_2 - CX_3 + G_{\text{ван.}}lw\text{sgn}\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_1 + 2\eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_3 = 0; \quad (2)$$

$$(2m_{\text{ван.}} + 2m_{\text{пор.}} + m_{\text{пр.3}})\ddot{X}_3 + m_{\text{пор.}}\ddot{X}_4 + m_{\text{ван.}}\ddot{X}_2 + 2\eta\dot{X}_3 - \eta\dot{X}_4 - \eta\dot{X}_2 + (2C + 0,25C_{\kappa})X_3 - (C + 0,25C_{\kappa})X_4 - CX_2 - 0,5C_{\kappa}X_6 + 0,5lw\text{sgn}\dot{X}_3(G_{\text{ван.}} + G_{\text{пор.}}) = \frac{M_{\text{ПП3}} \text{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_3)}{R_6}; \quad (3)$$

$$m_{\text{пор.}}\ddot{X}_5 + 4m_{\text{пор.}}\ddot{X}_4 + m_{\text{пор.}}\ddot{X}_3 - CX_5 + (2C + 0,25C_{\kappa})X_4 - (C + 0,25C_{\kappa})X_3 - \eta\dot{X}_5 + 2\eta\dot{X}_4 - \eta\dot{X}_3 + G_{\text{пор.}}lw\text{sgn}\dot{X}_4 = 0; \quad (4)$$

$$(2m_{\text{ван.}} + 2m_{\text{пор.}} + m_{\text{пр.2}})\ddot{X}_5 + m_{\text{пор.}}\ddot{X}_4 + m_{\text{ван.}}\ddot{X}_1 + 2\eta\dot{X}_5 - \eta\dot{X}_4 - \eta\dot{X}_1 + 2CX_5 - CX_4 - CX_1 + 0,5G_{\text{пор.}}lw\text{sgn}\dot{X}_5 + G_{\text{ван.}}lw\text{sgn}\dot{X}_5 = \frac{M_{\text{ПП2}} \text{sgn}(\dot{X}_{c2} - \dot{X}_5)}{R_6}; \quad (5)$$

$$\frac{G_{\text{нп.}}}{g}\ddot{X}_6 - 0,5C_{\kappa}X_4 + 0,5C_{\kappa}X_3 + C_{\kappa}X_6 + G_{\text{нп.}} + G_{\text{нп.}}f\text{sgn}\dot{X}_6 = 0, \quad (6)$$

де  $w$  — коефіцієнт опору руху стрічки;  $m_{\text{ван.}} = G_{\text{ван.}}/6g$ ;  $m_{\text{пор.}} = G_{\text{пор.}}/6g$  — маси вантажної і порожньої віток конвеєра;  $\eta$  — коефіцієнт в'язкості стрічки;  $C$  — коефіцієнт жорсткості певної ділянки стрічки;  $C_{\kappa}$  — коефіцієнт жорсткості канату;  $f$  — приведений коефіцієнт опору руху натяжних вантажів;  $R_6$  — радіус барабану;  $G_{\text{нп.}}$  — вага натяжного пристрою;  $M_{\text{ПП1}}$ ,  $M_{\text{ПП2}}$  — моменти двигуна, приведені до валу приводних барабанів;  $M_{\text{ПП3}}$  — момент двигуна, приведенний до валу натяжного барабану;  $l$  — довжина конвеєрної стрічки;  $X_6$ ,  $\dot{X}_6$  — положення і швидкість переміщення натяжного вантажу;  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  — переміщення п'яти мас;  $\dot{X}_1$ ,  $\dot{X}_2$ ,  $\dot{X}_3$ ,  $\dot{X}_4$ ,  $\dot{X}_5$  — швидкості п'яти мас;  $m_{\text{пр.1}}$ ,  $m_{\text{пр.2}}$ ,  $m_{\text{пр.3}}$  — маси обертових частин електродвигунів, редуктора, муфт і барабанів, приведені до валу приводних барабанів;  $\ddot{X}_1$ ,  $\ddot{X}_2$ ,  $\ddot{X}_3$ ,  $\ddot{X}_4$ ,  $\ddot{X}_5$  — прискорення п'яти мас;  $\ddot{X}_6$  — прискорення натяжного вантажу;  $\dot{X}_{c1}$ ,  $\dot{X}_{c2}$ ,  $\dot{X}_{c3}$  — коефіцієнти жорсткості силової трансмісії.

Для дослідження вибрано стрічковий конвеєр довжиною 1000 м, шириною стрічки 2 м, швидкість руху 4 м/с, який обладнаний трьома асинхронними двигунами по 55 кВт. На основі математичного опису електромеханічної системи конвеєра розроблено модель в середовищі пакета прик-

ладних програм Matlab (Simulink) для дослідження характеру втрат в період завантаження тягово-го елемента. Результати дослідження для випадків двох характерних варіантів інтенсивностей завантаження конвеєра (1, 2) показані на рис. 1, 2.

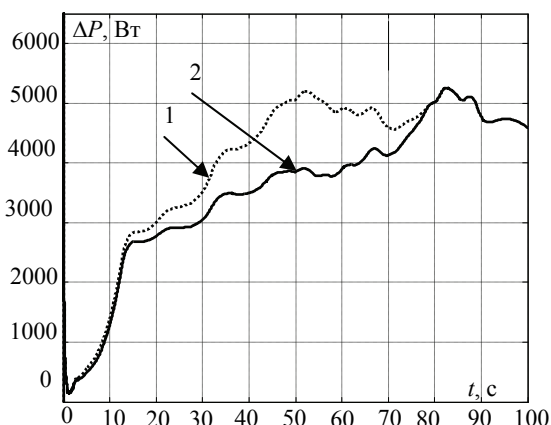


Рис. 1. Графіки втрат без ОПН за коливань навантаження

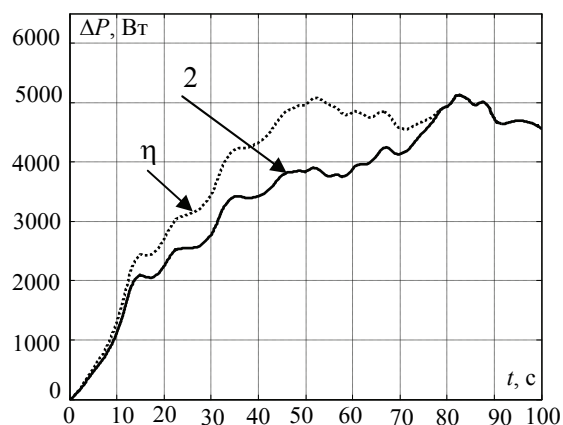


Рис. 2. Графіки втрат з ОПН за коливань навантаження

Аналіз отриманих результатів при застосуванні оптимального регулятора напруги (ОРН) показує, що у випадку двох інтенсивностей величина втрат потужності  $\Delta P$  зменшується в межах від 3 % до 14 %.

Результати дослідження характеру зміни коефіцієнта корисної дії ККД для двох аналогічних варіантів інтенсивностей завантаження конвеєра (1), (2) показані на рис. 3, 4.

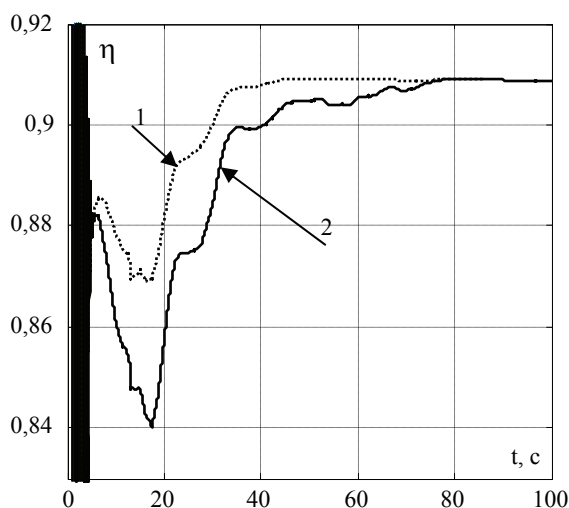


Рис. 3. Графіки ККД без ОПН у разі коливань навантаження

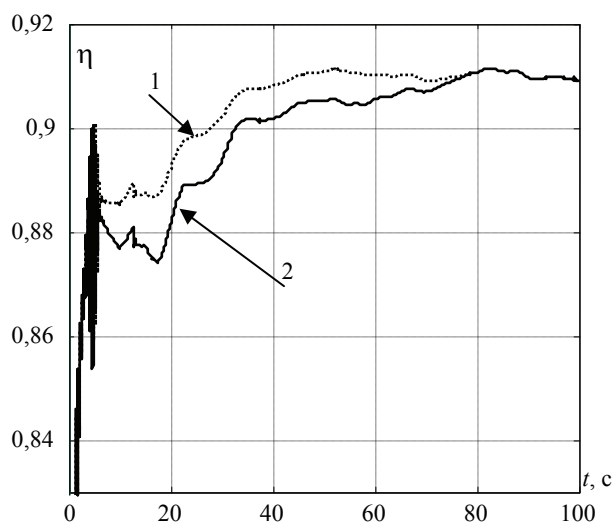


Рис. 4. Графіки ККД з ОПН у разі коливань навантаження

Як впливає з графіків зміни величини ККД, на початку надходження вантажу на стрічку, використання оптимального за енергетичною ефективністю закону регулювання напруги дозволяє збільшити ККД в електромеханічній системі з 0,84 до 0,87. На 50 секунді завантаження і далі, за його наближення до номінального значення, величини ККД в першому і другому випадках вирівнюються.

### Висновки

Встановлено, що використання оптимального регулятора напруги дає можливість знизити рівень втрат в електромеханічній системі в період завантаження конвеєра в межах від 3 % до 14 %, а також підвищити енергетичну ефективність транспортної системи в цілому. Тому, можна рекомендувати використання оптимального закону регулювання напруги для проектування і модернізації систем керування магістральними стрічковими конвеєрами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Дмитриева, *Разработка математической модели ленточного конвейера с двухдвигательным приводом*. Москва: МГТУ, 2008 г.
- [2] 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, pp. T5 105-113, 2010.
- [3] М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, та Л. М. Наумчук, «Дослідження енергоефективних режимів роботи багатодвигунного стрічкового конвеєра,» *Технічна електродинаміка*, № 3, с. 82-84, 2016.
- [4] С. О. Бур'ян, та Л. М. Наумчук, «Дослідження енергоефективності електромеханічної системи автоматизації конвеєрної установки при варіаціях моменту навантаження,» в *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук*. 10-11 квітня 2014 р., Кременчук, КрНУ, с. 69-70, 2014.
- [5] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Berlin: Springer, Verlag, 420 p., 1996.
- [6] М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, та Л. М. Наумчук, «Дослідження втрат енергії в електромеханічній системі конвеєра при плавній зміні навантаження,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, № 2/2015 (30), с. 67-73, 2015.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

**Печеник Микола Валентинович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: pechenikMV@ukr.net ;

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

**Казьміна Людмила Миколаївна** — аспірантка кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: naumchuk\_lyuda@ukr.net .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

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

## Investigation of Distribution of Energy Loss When Loading Conveyor

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

*The urgency of the investigation of the energy losses change in the electromechanical system of the conveyor number and in the period of its loading to the level of volumetric productivity, including the increase of their energy efficiency level, according to the analysis of domestic and foreign scientific and patent literature relating to the investigation of the operation modes of the continuous transport system with a flexible traction element. The mode of cargo delivery to the conveyor belt after reaching its rated linear speed, i.e. after the transient process of starting the conveyor, is considered.*

*The research was carried out based on the model of a multi-motor high-performance conveyor, in which, in order to reduce the level of the flexible element average tension in a closed loop, one of the motors is placed in the tail part of the transport mechanism. Taking into account the requirements for designing modern electric drives, a variant of using unified electric drive units with asynchronous electric motors of the same power is considered.*

*The results of the investigation the energy and efficiency losses change in the electromechanical system for the two most probable variants of belt conveyor loading are presented. Two variants of the energy loss distribution are considered, namely: the first variant - in the absence of a voltage regulator, which allows minimizing the losses in the electromechanical converter that arise due to changes in the technological parameters of the belt conveyor and the second variant - with an optimal voltage regulator in the control system structure.*

*An appropriate analysis of the distribution of losses for both variants is carried out and the expediency of using the energy management law optimal for the energy efficiency of the drive elements of continuous transport systems is determined.*

**Keywords:** belt conveyor, electromechanical system, optimum voltage regulator, loss of energy, intensity of loading.

**Pechenyk Mykola V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive, e-mail: pechenikMV@ukr.net ;

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

**Kazmina Liudmyla M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive, e-mail: naumchuk\_lyuda@ukr.net

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

## **Исследование характера распределения потерь при загрузке конвейера**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
 «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Показана актуальность исследования изменений энергетических потерь в электромеханической системе конвейеров и в период их загрузки до уровня объемной производительности, включая повышение уровня их энергоэффективности, в соответствии с анализом отечественных и зарубежных научных и патентных источников, связанных с исследованием режимов работы непрерывной транспортной системы с гибким тяговым элементом. Рассмотрен режим доставки груза на конвейерную ленту по достижению его номинальной линейной скорости, то есть после переходного процесса запуска конвейера.*

*Исследование проводилось на основе модели многомоторного высокопроизводительного конвейера, в котором для снижения уровня среднего напряжения гибкого элемента в замкнутом контуре один из двигателей помещается в хвостовую часть транспортного механизма. Принимая во внимание требования к проектированию современных электроприводов, рассмотрен вариант использования унифицированных электроприводов с асинхронными электродвигателями одинаковой мощности.*

*Приведены результаты исследования изменения энергии и эффективности в электромеханической системе для двух наиболее вероятных вариантов загрузки ленточного конвейера. Рассмотрены два варианта распределения потерь энергии, а именно: первый вариант — при отсутствии регулятора напряжения, который позволяет минимизировать потери в электромеханическом преобразователе, возникающие из-за изменений технологических параметров ленточного конвейера и второго варианта — с оптимальным регулятором напряжения в структуре системы управления.*

*Проведен соответствующий анализ распределения потерь для обоих вариантов и определена целесообразность использования закона управления энергией, оптимального для энергоэффективности приводных элементов непрерывных транспортных систем.*

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, электромеханическая система, оптимальный регулятор напряжения, потери энергии, интенсивность загрузки.

**Печеник Николай Валентинович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: pechenikMV@ukr.net ;

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

**Казьмина Людмила Николаевна** — аспирант кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: naumchuk\_lyuda@ukr.net