

УДК 621.313.16

**ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ЕНЕРГЕТИЧНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ НА КОЛИВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕМЕНТІ КОНВЕЄРА****М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, Л. М. Наумчук, А. О. Грицай**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

вул. Політехнічна, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: sburyan18@gmail.com

У роботі досліджено замкнуту систему керування багатодвигунного стрічкового конвеєра при використанні оптимального за енергетичною ефективністю регулятора напруги. Розроблено модель електромеханічної системи багатодвигунного стрічкового конвеєра з використанням замкнутої системи керування, яка дозволяє проводити дослідження для різних режимів роботи. Проведено аналіз впливу оптимального закону керування на характер коливальних процесів у пружно-в'язкій системі несучого елемента конвеєра. Розглянуто розподіл коливань при пуску стрічкового конвеєра у вантажній і холостій ділянках для трьох варіантів розміщення електродвигунів уздовж траси транспортної системи, а саме: два двигуни в головній частині й один у хвостовій, розташування одного двигуна в головній і одного у хвостовій частинах, розміщення двох двигунів у головній частині та при різних значеннях інтенсивності пуску конвеєра. Проведено математичне моделювання запропонованих варіантів, яке показало зменшення рівня перерегулювання за швидкістю на різних ділянках конвеєра при використанні оптимального регулятора напруги. Отримані результати рекомендуються до використання при проектуванні нових і реконструкції діючих високопродуктивних магістральних конвеєрів.

**Ключові слова:** багатодвигунний стрічковий конвеєр, інтенсивність пуску, оптимальний регулятор напруги, коливальність.

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЯГОВОМ ЭЛЕМЕНТЕ КОНВЕЙЕРА****Н. В. Печеник, С. А. Бурьян, Л. Н. Наумчук, А. О. Грицай**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ул. Политехническая, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: sburyan18@gmail.com

В работе исследована замкнутая система управления многодвигательного ленточного конвейера при использовании оптимального по энергетической эффективности регулятора напряжения. Разработана модель электромеханической системы многодвигательного ленточного конвейера с использованием замкнутой системы управления, которая позволяет проводить исследования для различных режимов работы. Проведен анализ влияния оптимального закона управления на характер колебательных процессов в упруго-вязкой системе несущего элемента конвейера. Рассмотрено распределение колебаний при пуске ленточного конвейера в грузовой и холостой ветвях для трех вариантов размещения электродвигателей вдоль трассы транспортной системы, а именно: два двигателя в главной и один в хвостовой части, расположение одного двигателя в главной и одной в хвостовой частях, размещение двух двигателей в главной части, а также при различных значениях интенсивности пуска конвейера. Проведено математическое моделирование предложенных вариантов, которое показало снижение уровня перерегулирования по скорости на различных участках конвейера при использовании оптимального регулятора напряжения. Полученные результаты рекомендуются к использованию при проектировании новых и реконструкции действующих высокопроизводительных магістральных конвейеров.

**Ключевые слова:** многодвигательный ленточный конвейер, интенсивность пуска, оптимальный регулятор напряжения, колебательность.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Як показує досвід експлуатації транспортних систем у різних галузях промисловості, одними з досить перспективних є системи безперервного транспорту з використанням стрічкових конвеєрів.

Магістральні стрічкові конвеєри забезпечують транспортування сипучих матеріалів на великі, до 4 км в одному ставі, відстані, їх траса може мати різну схему, що дозволяє застосовувати конвеєри до різних умов виробництва й місцевості. Також транспортери обладнані приводними станціями, в яких встановлена потужність електродвигунів сягає до 5 тис. кВт.

Використання багатодвигунного електроприводу високопродуктивних магістральних конвеєрів призводить до зростання усталеної потужності приводної системи транспортної установки [1–3]. Тому досить актуальними є задачі підвищення їх енергоефективності при збереженні потрібних експлуатаційних характеристик.

Для більш повної оцінки енергоефективності даний об'єкт розглядається як єдина електромеханічна система, що дозволяє врахувати вплив механічної частини стрічкового конвеєра на енергетичні характеристики електродвигунів [4–6].

Попередні дослідження були присвячені питанням зменшення рівня втрат в електромеханічній системі стрічкового конвеєра за рахунок використання замкнутої системи керування при наявності оптимального за енергетичною ефективністю закону регулювання напругою [7]. Але при цьому не було враховано процеси пуску конвеєра, які зазвичай супроводжуються коливаннями в пружно-в'язкій системі, високий рівень яких може призвести до порушень у механічних і електромагнітних елементах конвеєра, що неминуче призведе до підвищення зносу несучого елемента транспортера, а з урахуванням його великої вартості – й до суттєвих економічних витрат [8]. Важливою задачею є проведення дослідження впливу даного закону керування на параметри динаміки процесів.

Метою роботи є проведення аналізу впливу оптимального за енергетичною ефективністю закону керування напругою на рівень коливань у пружно-в'язкій системі конвеєра при пуску для вантажної й холостої ділянок для різних варіантів розміщення приводних двигунів.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Зазвичай пуск магістральних стрічкових конвеєрів здійснюється при відсутності вантажу на стрічці, тому при проведенні дослідження було прийнято навантаження  $0,3 M_n$ , що відповідає силам опору механічної частини конвеєра.

В основу дослідження покладено структуру замкнутої системи керування для різної інтенсивності швидкості пуску магістрального конвеєра для вантажної й холостої ділянок при відсутності навантаження на стрічці, схему якої приведено на рис. 1.

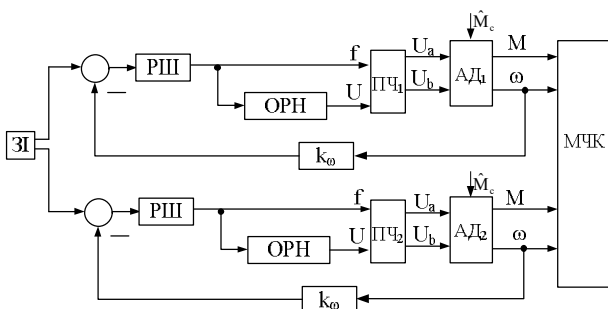


Рисунок 1 – Структурна схема замкнутої моделі стрічкового конвеєра

На схемі прийняті наступні позначення: ЗІ – датчик інтенсивності, призначений для формування різної інтенсивності пуску стрічкового конвеєра; РШ – регулятор швидкості, налаштований на ПІ закон керування; ОРН – оптимальний регулятор напруги, що забезпечує мінімізацію втрат у конвеєрі [7, 8]; ПЧ<sub>1</sub>, ПЧ<sub>2</sub> – перетворювачі частоти першого й другого двигунів; АД<sub>1</sub>, АД<sub>2</sub> – асинхронні двигуни; МЧК – механічна частина конвеєра.

При розробці математичної моделі рухомої частини конвеєра прийнято розрахункову схему з

п'ятьма зосередженими масами та натяжним пристроєм, який розташований у хвостовій частині стрічкового конвеєра. Рівняння руху стрічки конвеєра отримано з урахуванням методики [1], на базі рівняння Лагранжа 2-го роду.

При побудові моделі були прийняті наступні припущення: швидкості переміщення тягового органу по приводних барабанах постійні, коефіцієнти опору вантажної й порожньої ділянок незмінні, проковзування стрічки відносно барабанів відсутнє, конвеєрна траса прямолінійна [6].

Математичну модель асинхронного двигуна описано системою нелінійних диференціальних рівнянь у нерухомій системі координат статора a–b [9, 10].

Використовуючи прикладні програми Matlab (Simulink), розроблено модель електромеханічної системи багатодвигунного стрічкового конвеєра з використанням замкнутої системи керування, яка дозволяє проводити дослідження для різних режимів роботи.

Для дослідження вибрано типовий стрічковий конвеєр протяжністю 1500 м, продуктивністю 890 т/год, який використовується як магістральний на вугільних підприємствах.

Одним з найбільш перспективних варіантів розміщення є установка одного двигуна у хвостовій частині ставу. У результаті тягового розрахунку для стрічкового конвеєра визначено необхідну величину потужності електродвигуна (37 кВт), що встановлюється на холостій ділянці для компенсації її опору руху.

Було проведено дослідження впливу ОРН на вантажну й холосту ділянки, а саме на рівень коливальності в динамічних режимах, при тривалості розгону тягового елемента в середньому від 10 до 20 секунд, що зазвичай відповідає часу плавного пуску таких конвеєрів.

Перехідні процеси різної інтенсивності пусків (криві 1, 2) для вантажної й холостої ділянок у випадку розміщення двох асинхронних електродвигунів по 55 кВт у головній частині стрічкового конвеєра й одного електродвигуна потужністю 37 кВт у хвостовій частині приведені на рис. 2–5.

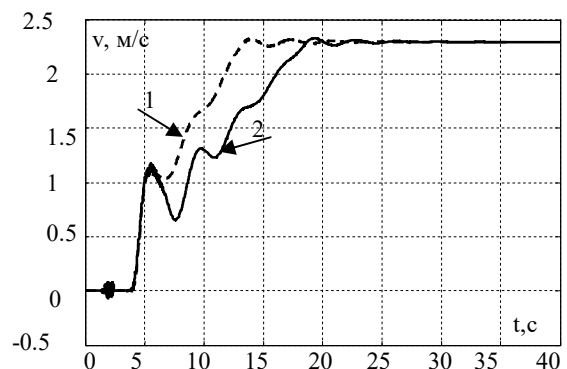


Рисунок 2 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характерами інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

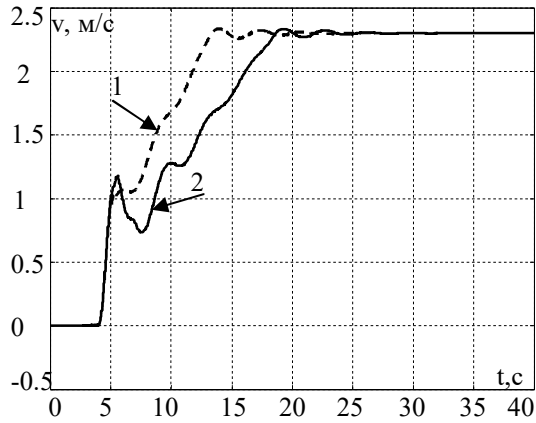


Рисунок 3 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

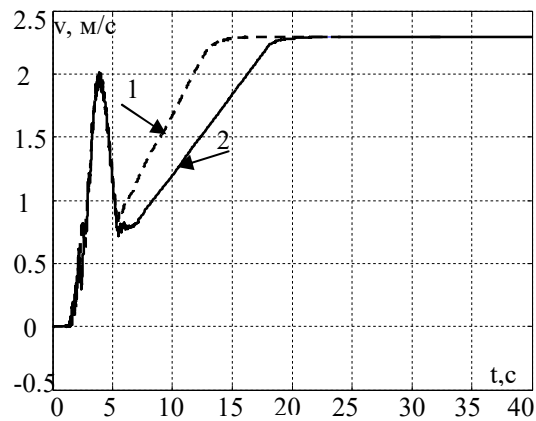


Рисунок 4 – Графіки пуску холостої ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

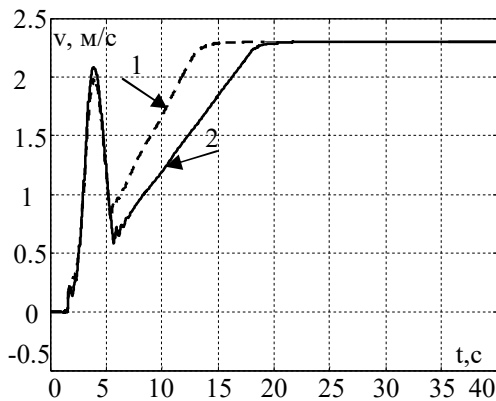


Рисунок 5 – Графіки пуску холостої ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

Отримані результати свідчать про те, що використання ОРН не впливає негативно на показники динаміки конвеєра в режимах пуску.

Проте однією з вимог при проектуванні й експлуатації багатодвигунних магістральних високопродуктивних стрічкових конвеєрів є уніфікація при-

водних блоків, що дозволяє покращити умови експлуатації електромеханічної системи в цілому. Тому для дослідження прийнятий другий варіант при установці трьох приводних блоків по 55 кВт, один з яких розміщений у хвостовій частині конвеєра.

На рис. 6–9 приведено перехідні процеси різної інтенсивності пусків (криві 1, 2) для вантажної та холостої ділянок при даному варіанті розташування типових приводних блоків.

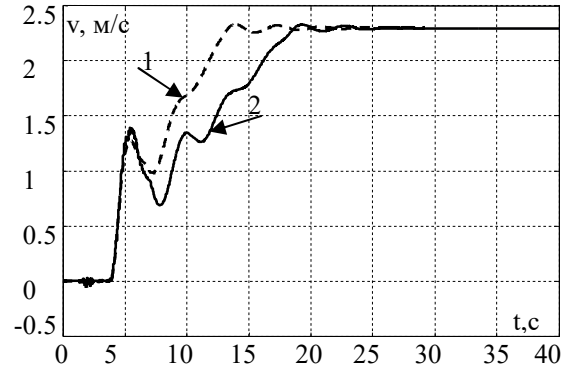


Рисунок 6 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

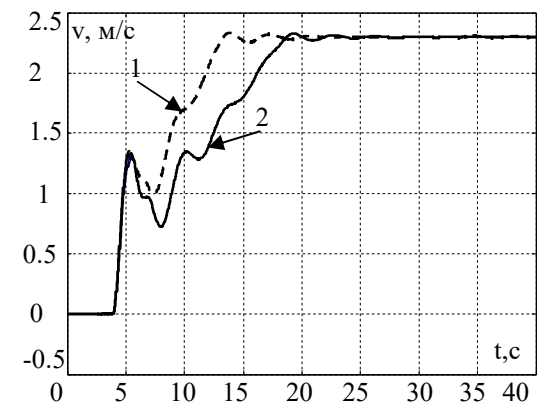


Рисунок 7 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

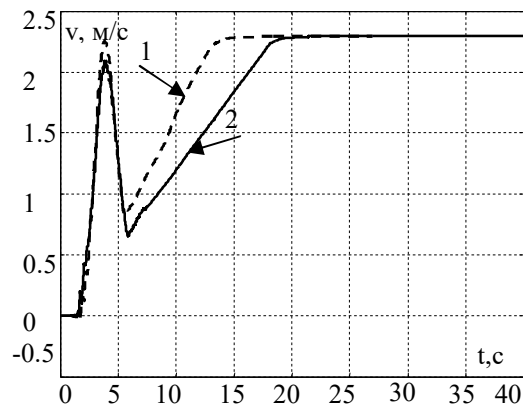


Рисунок 8 – Графіки пуску холостої ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

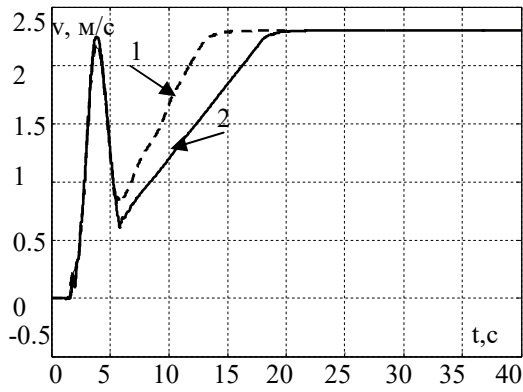


Рисунок 9 – Графіки пуску холостої ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

Використання типових приводних блоків, незважаючи на часткове перевищення встановленої потужності приводної станції, значно спрощує умови експлуатації, обслуговування, а наявність електродвигуна у хвостовій частині дозволяє забезпечити більш плавний процес пуску тягового елемента стрічкового конвеєра.

Як показують результати досліджень для даного випадку, використання прийнятого закону керування не здійснює негативного впливу на характеристики пуску.

На практиці можуть використовуватися дводвигунні електроприводи, розміщені як у головній частині стрічкового конвеєра, так і в головній та хвостовій частинах.

З метою впливу оптимального за енергетичною ефективністю закону керування напругою на характер коливальних процесів у стрічці проведено дослідження у випадку розміщення двох асинхронних електродвигунів типу 4A225M2Y3 у головній частині магістрального конвеєра потужністю по 75 кВт кожен. Результати дослідження з перехідними процесами різної інтенсивності пусків (криві 1, 2) показано на рис. 10–13.

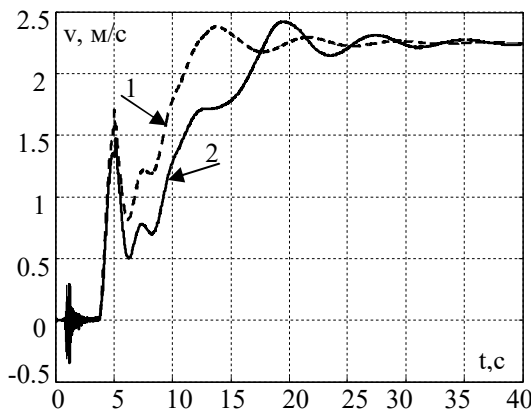


Рисунок 10 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

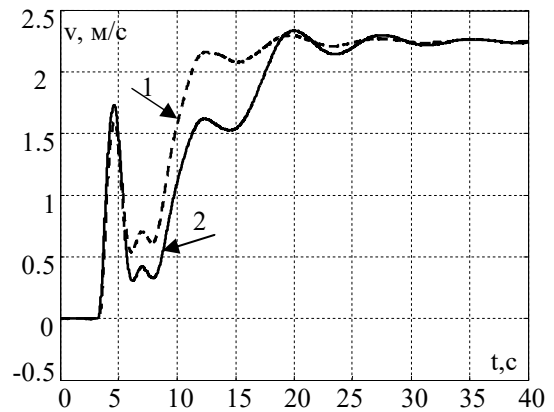


Рисунок 11 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

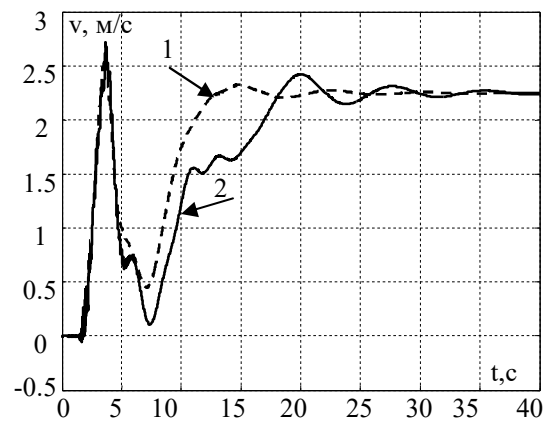


Рисунок 12 – Графіки пуску холостої ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

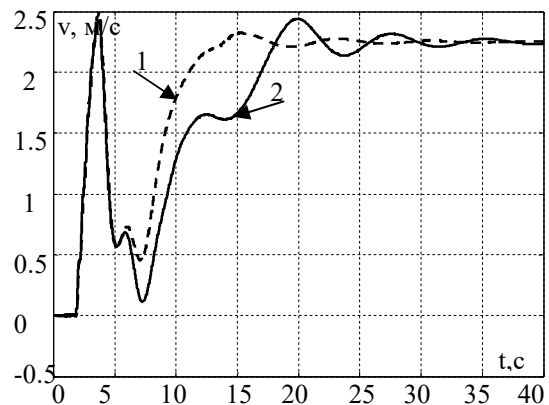


Рисунок 13 – Графіки пуску холостої ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

Як видно з отриманих графіків, ОРН не погіршує рівень коливальності в тяговому елементі при різних варіаціях тривалості пуску, але при такому розміщенні приводних блоків погіршуються показники коливальності процесів як у вантажній, так і в порожній ділянках.

На рис. 14, 15 приведені перехідні процеси різної інтенсивності пусків (криві 1, 2) для вантажної ділянки у випадку розміщення одного електродвигуна в головній частині, а другого – у хвостовій частині стрічкового конвеєра потужністю 75 кВт кожен.

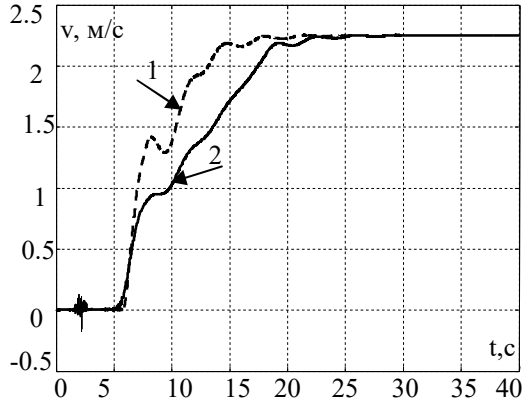


Рисунок 14 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості без оптимального регулятора напруги

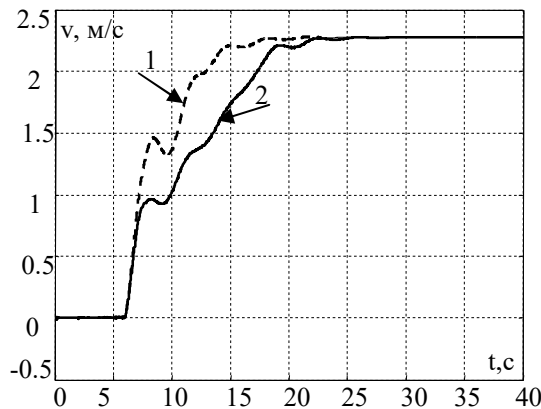


Рисунок 15 – Графіки пуску вантажної ділянки з різними характеристиками інтенсивності швидкості з оптимальним регулятором напруги

Як показує порівняльний аналіз рівня коливальності, для двох випадків розміщення електродвигунів у головній і в головній та хвостовій частинах по 75 кВт розташування одного приводного блоку у хвостовій частині сумісно з оптимальним регулятором напруги значно зменшує рівень коливальних процесів при пуску стрічкового конвеєра й сприяє швидшому затуханню перехідних процесів. Тому при побудові магістрального багатодвигунного конвеєра найбільш перспективним, з точки зору покращення експлуатаційних характеристик стрічки, є варіант розміщення одного приводного блоку у хвостовій частині установки.

На рис. 16 зображено графіки зміни амплітуди коливань у тяговому органі при трьох варіантах розташування приводних двигунів на конвеєрній установці. На даних графіках позначено: X2 – наванта-

жена ділянка стрічки конвеєра; X4 – холоста ділянка стрічки конвеєра, де A – відношення коливань дійсної амплітуди до усталеного значення.

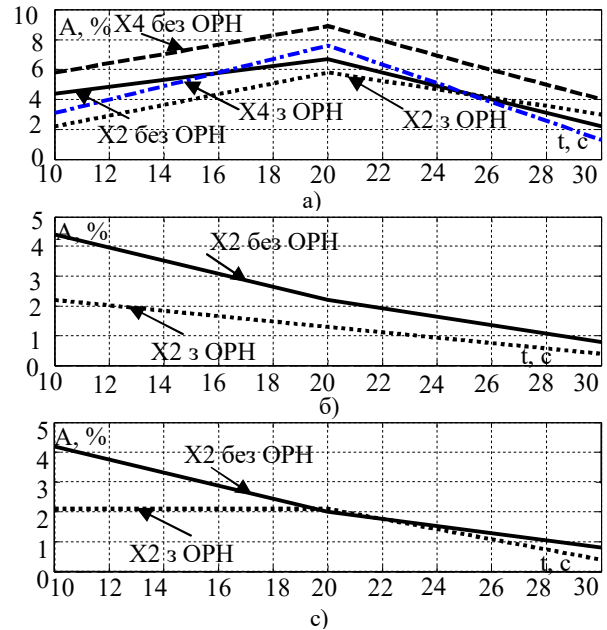


Рисунок 16 – Зміна амплітуди коливань у стрічці: а) два двигуни по 75 кВт у головній частині; б) два двигуни по 55 кВт у головній частині й один на 55 кВт у хвостовій; в) два двигуни по 55 кВт у головній частині й один на 37 кВт у хвостовій

На основі графіків на рис. 16 видно, що застосування оптимального закону керування напругою при різній інтенсивності пуску дозволило знизити рівень перерегулювання при пуску електромеханічної системи магістрально-стрічкового конвеєра, а саме: для варіанту розташування двох електродвигунів по 75 кВт на головній частині в середньому на 4,5 %; для варіанту розташування двох електродвигунів по 55 кВт на головній частині та одного електродвигуна потужністю 55 кВт у хвостовій частині в середньому на 2,5 %; для варіанту розташування двох електродвигунів по 55 кВт на головній частині та одного електродвигуна потужністю 37 кВт на хвостовій частині конвеєра в середньому на 2,3 %.

Також розташування приводних двигунів 2 на початку 1 у кінці дозволяє зменшити практично до 0 рівень перерегулювання холостої ділянки стрічки конвеєрної системи після пуску.

Отримані результати дослідження зміни амплітуди коливань у навантаженій ділянці стрічки системи показано в табл. 1.

Приведені результати свідчать про те, що застосування оптимального за енергетичною ефективністю закону регулювання напругою при використанні багатодвигунного електроприводу зменшує рівень перерегулювання в середньому на 3 % для різних інтенсивностей пуску.

Таблиця 1 – Зміна амплітуди коливань у навантаженій ділянці стрічки системи

Втрати при різній інтенсивності пуску	$\Delta P$ при $t=10$ с	$\Delta P$ при $t=20$ с
два двигуна по 75 кВт на початку конвеєра		
Без ОРН, %	4,4	6,7
3 ОРН, %	2,2	5,8
два двигуна по 55 кВт на початку та один на 55 кВт у кінці конвеєра		
Без ОРН, %	4,4	2,2
3 ОРН, %	2,2	1,3
два двигуна по 55 кВт на початку та один на 37 кВт у кінці конвеєра		
Без ОРН, %	4,2	2
3 ОРН, %	2,1	2,1

Проведений аналіз режимів пуску конвеєра, а також з урахуванням раніше отриманих результатів дослідження відносно статичних режимів [4, 6, 7], дає підстави стверджувати, що вказаний закон регулювання дозволяє зменшити втрати в електромеханічній системі конвеєра в середньому на 2 %, не погіршуючи при цьому динамічних режимів роботи.

**ВИСНОВКИ.** На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що застосування оптимального регулятора напруги не впливає негативно на показники динаміки при пуску магістрального конвеєра, а, навпаки, знижує в середньому на 3 % рівень перерегулювання за швидкістю у стрічці конвеєра та не знижує рівень його експлуатаційної надійності. Додатково забезпечується зменшення втрат електричної енергії до 2 %. Таким чином, вказаний регулятор можна ефективно використовувати в замкнутих системах керування з метою мінімізації втрат енергії не лише в статичних, але й в динамічних режимах роботи високопродуктивних стрічкових конвеєрів.

Отримані результати рекомендуються до використання при проектуванні нових і реконструкції діючих високопродуктивних магістральних конвеєрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дмитриева В.В. Разработка математической модели ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. – М.: МГТУ, 2008.
2. Xia X., Zhang J. Control systems and energy efficiency from the POET perspective // IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency. – Portugal, Vilamoura, 29–31 March, 2010.
3. Middelberg A., Zhang J., Xia X. An optimal control model for load shifting – with application in the energy management of a colliery // Appl Energy. – 2009. – Iss. 86. – PP. 1266–1273.
4. Gerard B. Optimization of overland conveyor performance // Aust Bulk Handl Rev. – 2009. – PP. 26–36.
5. Marais J., Mathews E., Pelzer R. Analysing DSM opportunities on mine conveyor systems // Industrial and Commercial Use of Energy Conference. – 2008. – PP. 28–30.
6. Marx D., Calmeyer J. A case study of an integrated conveyor belt model for mining industry // IEEE AFRICON 2004. – 2004. – Gaborone, Botswana. – PP. 15–17.
7. Печеник Н.В., Бурьян С.А. Энергоэффективные режимы работы электромеханіческих систем ленточных конвейеров // Техническая электродинамика. – 2014. – Вып. 5. – С. 122–124.
8. Печеник М.В., Бур'ян С.О., Наумчук Л.М. Дослідження характеру зміни втрат енергії в електромеханічній системі стрічкового конвеєра під час пуску // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – Вип. 2 (125). – С. 52–56.
9. Бур'ян С.О., Наумчук Л.М. Дослідження енергоефективності електромеханічної системи автоматизації конвеєрної установки при варіаціях моменту навантаження // 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, 2014. – С. 69–70.
10. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 420 p.

FEATURES OF VOLTAGE CONTROL OPTIMAL ENERGY EFFICIENCY LAW INFLUENCE ON OSCILLATORY PROCESSES IN TRACTION CONVEYOR ELEMENTS

M. Pechenik, S. Buryan, L. Naumchuk, A. Grytsay

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

vul. Polytechnichna, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: sburyan18@gmail.com

**Purpose.** Analysis of influence of the optimal energy efficient law of voltage control on fluctuations in elastic-viscous conveyor system at launch for cargo and idle branches for different variants of drive motors placement. **Methodology.** In the article we have used calculations scheme of mechanical conveyor with five concentrated masses and tensioning device, which is located in the tail part of the tape-typed conveyor. Following assumptions were adopted during model constructing process: velocities of traction body displacement upon drums are constant, opposing coefficients of cargo and idle branches are constant, there is no tape sliding with respect to drums, conveyor path is straight. **Results.** We have investigated the closed-loop control system of multi-engine tape-typed conveyor using optimal energy efficient voltage regulator. The model of electromechanical system of multi-engine tape-typed conveyor have developed using closed-loop control system, which allows to proceed researches for different modes of operation. The analysis of

influence of the optimal control law on the nature of fluctuation processes in elastic-viscous system of conveyor bearing element have been carried out. The distribution of vibrations have been researched when launching tape-typed conveyor with cargo and idle branches for three variants of motors placement along the route of the transport system, namely: two motors in the main part and one in the tail section, one engine at main and one in the tail part or placing two engines in the main part also with different values of conveyor starting intensity. **Originality.** For the first time we have been carried out the research and analysis of fluctuation processes in a tape-typed conveyor using the optimal voltage regulator at start-up and without it for different types of intensity. The obtained results show that the usage of optimal voltage regulator does not adversely affect performance dynamics at conveyor launching and does not reduce the level of operational reliability. **Practical value.** Obtained results are recommended for use in the design of new and reconstruction of existing high-performance transmission conveyors.

**Key words:** multi-engine belt conveyor, start-up intensity, optimal voltage regulator, fluctuation.

#### REFERENCES

1. Dmitrieva, V. (2008), *Razrabotka matematicheskoy modeli lentchnogo konveyera s dvuhdvigatelnyim privodom* [Development of a mathematical model of the belt conveyor with multi-motor drives], MG TU, Moscow. (in Russian)
2. Xia, X. and Zhang, J. (2010), "Control systems and energy efficiency from the POET perspective", *IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency*, Vilamoura, Portugal; 29–31 March.
3. Middelberg, A., Zhang, J. and Xia, X. (2009), "An optimal control model for load shifting - with application in the energy management of a colliery", *Appl Energy*, Vol. 86, pp. 1266–1273.
4. Gerard, B. (2009), "Optimization of overland conveyor performance", *Aust Bulk Handl Rev.*, pp. 26–36.
5. Marais, J., Mathews, E. and Pelzer, R. (2008), "Analysing DSM opportunities on mine conveyor systems", *Industrial and Commercial Use of Energy Conference*, pp. 28–30.
6. Marx, D. and Calmeyer, J. (2004), "A case study of an integrated conveyor belt model for mining industry", *IEEE AFRICON 2004*; Gaborone, Botswana, pp. 15–17.
7. Pechenik, N.V. and Buryan, S.A. (2014), "Energy-efficient modes of electromechanical systems of belt conveyors", *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, Vol. 5, pp. 122–124. (in Russian)
8. Pechenik, M.V., Buryan S.O. and Naumchuk L.M. (2014), "The study of the shifts of power loss in electromechanical system conveyor belt during starting", *Elektrotekhnichni ta kompyuterni sistemi. Naukovo-tehnichnyi zhurnal. Tematichnyi vipusk "Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu"*, Vol. 15, no. 91, pp. 155–158. (in Ukrainian)
9. Buryan, S.O. and Naumchuk, L.M. (2014), "Energy research of conveyor installation automation electromechanical system with varying loading", *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modeliuвання ta optymizatsii, Zbirnyk naukovykh prats XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistiv* [Electromechanical and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference proceedings of the 12th International conference of students and young researches], KrNU, Kremenchuk, April 10–11, 2014, pp. 69–70. (in Ukrainian)
10. Leonhard, W. (1996), *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, Berlin.

Стаття надійшла 02.06.2016.