

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

КІРІЯ Руслан Вісаріонович

УДК 004.942:622.647.8 (043.3)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ
СИСТЕМ КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ ЗІ СКЛАДНОЮ
СТРУКТУРОЮ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

Спеціальність 01.05.02 – «Математичне моделювання та
обчислювальні методи»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
Національної академії наук України (ІГТМ НАН України, м. Дніпро)

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Монастирський Віталій Федорович,
Інститут геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова НАН України,
старший науковий співробітник відділу
фізико-механічних основ гірничого транспорту,
м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кіріченко Людмила Олегівна,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, професор кафедри
прикладної математики, м. Харків

доктор технічних наук, професор
Біляєв Миколай Миколайович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна,
завідувач кафедри гідравліки та водопостачання,
м. Дніпро

доктор технічних наук, професор
Положаєнко Сергій Анатолійович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри комп'ютеризованих систем
управління, м. Одеса

Захист відбудеться _____ 2018 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01 Національної металургійної академії України Міністерства освіти і науки України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, т. (056) 7453156.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий _____

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01
кандидат технічних наук, доцент

Т. В. Селівьорстова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Конвеєрний транспорт є однією з головних ланок в технологічних процесах в гірничодобувній, металургійній та інших галузях промисловості. Конвеєрний транспорт є складною багатофункціональною технічною системою з деревовидною розгалуженою змінною структурою, що включає конвеєри, завантажувальні та перевантажувальні вузли, бункери, живильники й перемикачі.

Аналіз роботи систем конвеєрного транспорту показав, що недостатня ефективність їх роботи пов'язана з низькою пропускну здатністю й високою енергоємністю транспортування, що обумовлено простоями конвеєрного обладнання через аварійні, технологічні та організаційні причини і недовантаженням конвеєрів через нерівномірність вантажопотоків, що поступають в систему транспорту.

В даний час для підвищення пропускну здатності систем конвеєрного транспорту застосовуються акумулюючі бункери, які дозволяють за рахунок накопичення деякої кількості вантажу в бункері в процесі роботи конвеєрної лінії збільшити пропускну здатність.

Проте через часті переповнювання акумулюючих бункерів і, як наслідок, простої конвеєрних ліній, а також нерівномірності вантажопотоків, що поступають в систему транспорту, ефективність їх використання в системах конвеєрного транспорту низька.

Одним із шляхів підвищення ефективності використання акумулюючих бункерів і тим самим підвищення пропускну здатності та енергоємності транспортування систем конвеєрного транспорту є управління вантажопотоками за допомогою акумулюючих бункерів і регулювання швидкості стрічки конвеєра з використанням контролерів і частотних перетворювачів.

Для цього необхідно розробити математичні моделі функціонування систем конвеєрного транспорту і на їх основі розробити методи і алгоритми управління системою транспорту, що підвищують її пропускну спроможність і знижують енерговитрати на транспортування вантажу.

У розробку наукових основ моделювання процесів функціонування, розрахунку показників ефективності функціонування та управління системою конвеєрного транспорту внесли істотний внесок такі вчені: М. С. Поляков, О. О. Співаковський, Л. Г. Шахмейстер, Б. О. Кузнєцов, В. Г. Дмитрієв, В. К. Смірнов, В. Ф. Монастирський, В. А. Пономаренко, Л. Н. Ширін, С. В. Корнеєв, Л. М. Алотін, П. Б. Степанов, Б. Г. Клімов, С. О. Каріман, О. М. Шпігановіч, І. В. Бішеле, С. Ж. Саржанов, Є. Л. Креймер, О. П. Владзієвський, Х. Б. Кордонській, Б. О. Севастьянов, Г. М. Черкесов, В. Г. Шорін, А. І. Шендеров, Л. Т. Шаповалов, О. М. Мальгін, В. Я. Копп, О. І. Песчанський, В. В. Ткачов, М. І. Стаднік, Ю. Т. Розумний, А. В. Рухлов, О. В. Козар, Ю. М. Руденко, І. О. Ушаков, Е. Дж. Хенлі, Х. Кумамото, Дж. Ендрені, Wolstenholme E. F., Baral Suresh C.

Аналіз робіт цих авторів показав, що розроблені ними математичні моделі, методи розрахунку та управління стосуються систем конвеєрного транспорту з

невеликою кількістю конвеєрів (менше п'яти) і з простими схемами з'єднання конвеєрів і бункерів. Отримані ними моделі, методи розрахунку й управління не можуть бути використаними для опису процесів функціонування та управління системами конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою змінюваною структурою, що складаються з великої кількості конвеєрів (більше п'яти).

Таким чином, розробка математичних моделей процесів функціонування розгалужених систем конвеєрного транспорту, що складаються з великої кількості конвеєрів і акумулюючих бункерів, з урахуванням імовірнісного характеру простоїв конвеєрного обладнання та нерівномірності вантажопотоків, що надходять до системи транспорту, і на підставі цього створення методів розрахунку і прогнозування показників ефективності функціонування, а також методів і алгоритмів оптимального та адаптивного управління системою конвеєрного транспорту, що підвищують ефективність роботи, тобто підвищують пропускну здатність і знижують енерговитрати на транспортування вантажу, є актуальною науковою проблемою.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до програми «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаюча технологія» держбюджетних НДР: № 30 «Наукові основи адаптивного управління конвеєрними лініями гірничих підприємств» (2007–2010 р.р.), № держреєстрації 0107U0001268; № 36 «Науково-технічне обґрунтування прогресивних рішень по організації конвеєрного транспорту вугільних шахт» (2007–2011 р.р.), № держреєстрації 0107U002004; № 63 «Розвиток наукових основ високоефективних систем і засобів управління основними вантажопотоками підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт» (2012–2016 р.р.), № держреєстрації 0112U000493. У першій і другій НДР автор був відповідальним виконавцем і в третій – науковим керівником.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою шляхом математичного моделювання процесів їх функціонування на основі теорії марковських процесів і методів оптимального управління складними ієрархічними системами.

Ідея роботи полягає у використанні методу динаміки середніх для марковських процесів і самоподібності структури систем конвеєрного транспорту при моделюванні процесів функціонування, визначенні пропускну здатності й енергетичної ефективності функціонування, а також при визначенні параметрів оптимального та адаптивного управління конвеєрним транспортом.

Для досягнення поставленої мети в роботі було сформульовано наступні завдання:

1. Розробити математичні моделі процесу функціонування систем конвеєрного транспорту зі складною самоподібною деревовидною структурою з урахуванням випадкового характеру простоїв конвеєрного обладнання та порівняти результати теоретичних досліджень з результатами імітаційного моделювання.

2. Визначити енергоємність транспортування і показник енергетичної ефективності систем конвеєрного транспорту з різними самоподібними деревовидними структурами.

3. Дослідити вплив величин вантажопотоків, що надходять до системи конвеєрного транспорту, інтенсивностей простоїв і відновлень конвеєрів, параметрів акумулюючих бункерів, які працюють в різних режимах, на показники ефективності функціонування системи конвеєрного транспорту.

4. Дослідити та встановити закономірності процесу функціонування акумулюючих бункерів при різних режимах їх роботи в системі конвеєрного транспорту та порівняти результати теоретичних досліджень з результатами імітаційного моделювання.

5. Розробити методи та обґрунтувати параметри оптимального та адаптивного управління акумулюючими бункерами і системою конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою.

6. Розробити методіку визначення пропускної здатності, критеріїв ефективності функціонування, алгоритмів і параметрів оптимального та адаптивного управління системою конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою.

Впровадити результати досліджень в проектні організації та в промисловості.

Об'єкт досліджень – процеси функціонування систем конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою.

Предмет досліджень. Математичні моделі і методи визначення показників ефективності функціонування, а також методи оптимального та адаптивного управління системою конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою, що підвищують її пропускну здатність і знижують енерговитрати на транспортування вантажу.

Методи досліджень. Роботу було виконано на основі системного підходу, при цьому використовувалися методи аналізу і синтезу складних систем. При розробці математичних моделей функціонування систем конвеєрного транспорту було використано теорію марковських процесів і метод динаміки середніх при визначенні показників ефективності функціонування системи транспорту. При визначенні середніх об'ємів вантажу в акумулюючих бункерах при різних режимах їх роботи в системі конвеєрного транспорту застосовувався принцип Понтрягіна для кусково-марковських процесів. Для перевірки адекватності математичного моделювання використовувалися методи імітаційного моделювання, а також методи математичної статистики при обробці експлуатаційних даних. При розробці методів і принципів адаптивного управління акумулюючими бункерами і системою конвеєрного транспорту використовувалися методи оптимального та адаптивного управління складними системами з ієрархічною структурою.

Наукова новизна полягає в тому, що:

1. Вперше на основі теорії марковських процесів з використанням методу динаміки середніх для систем конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів та із самоподібною деревовидною структурою без бункерів було розроблено математичні моделі і методи визначення їх пропускної здатності та енергоємності транспортування в припущенні, що інтенсивності простоїв конвеєрів на порядок менше за їх інтенсивностей відновлень. При цьому результати імітаційного моделювання, проведеного для різних випадків поєднання нормального й експоненціального законів розподілу інтенсивностей

простоїв і відновлень конвеєрів, відрізняються від результатів, отриманих на основі розроблених методів, не більше ніж на 3 %.

2. Вперше на основі теорії марковських процесів було вдосконалено математичні моделі, які описують процес функціонування системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючими бункером, що працюють в некерованому режимі та в керованому режимі, тобто в режимі підтримки в ньому об'єму вантажу в заданих межах.

При цьому встановлено, що середня пропускна здатність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» за будь-яких співвідношеннях середніх вантажопотоків, що надходить в бункер \bar{m}_Q і розвантажується з нього \bar{Q}_n , зі збільшенням об'єму акумулюючого бункера або об'єму його незаповненою частини спочатку збільшується і при подальшому збільшенні об'єму бункера асимптотично прямує до постійного значення, що дорівнює \bar{Q}_n при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ і \bar{m}_Q при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$. Крім того, пропускна здатність зі збільшенням \bar{Q}_n при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ збільшується, а при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ практично не змінюється.

3. Вперше на основі методу динаміки середніх для марковських процесів та отриманих залежностей середньої пропускної здатності системи «конвеєр – бункер – конвеєр» від величин середніх вантажопотоків, що надходить до акумулюючого бункера і розвантажується з нього, було розроблено методи визначення пропускної здатності та енергоємності транспортування систем конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням акумулюючих бункерів, а також із самоподібною деревовидною структурою з акумулюючими бункерами, що працюють в некерованому режимі і в режимі підтримки в них об'ємів вантажу в заданих межах. При цьому результати теоретичних досліджень відрізняються від експлуатаційних даних не більше ніж на 10 %.

4. Вперше встановлено, що питома енергоємність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» незалежно від режиму роботи акумулюючого бункера при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ із збільшенням вантажопотоку m_Q , що поступає на надбункерний конвеєр, зменшується за гіперболічним законом, практично не залежить від продуктивності живильника Q_n , об'єму бункера V або об'єму незаповненої вантажем частини бункера ΔV , а при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ питома енергоємність із збільшенням m_Q приймає постійне мінімальне значення, із збільшенням продуктивності живильника Q_n зменшується і не залежить від об'єму бункера V або об'єму незаповненої вантажем частини бункера ΔV .

5. Вперше на основі розроблених математичних моделей процесу функціонування акумулюючих бункерів, які працюють в системі конвеєрного транспорту в некерованому режимі, було визначено залежності середнього об'єму вантажу в акумулюючому бункері від середніх вантажопотоків, що надходить в бункер і розвантажується з нього, продуктивності живильника, а також об'єму бункера.

При цьому встановлено, що середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері при зміні продуктивності живильника від нуля до нескінченності зменшується від максимального допустимого значення об'єму вантажу бункера до де-

якого постійного значення і при рівності середніх вантажопотоків, що надходить в бункер і розвантажується з нього, приблизно дорівнює половині максимального допустимого значення об'єму вантажу в бункері.

6. Вперше на основі методу Понтрягіна для марковських процесів було розроблено математичну модель функціонування акумулюючого бункера, що працює в керованому режимі. При цьому отримано системи рівнянь відносно середніх і дисперсій часів заповнення і розвантаження акумулюючого бункера для одношвидкісного і двохшвидкісного живильників.

Встановлено, що зі збільшенням продуктивності живильника середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері спочатку зменшується за гіперболічним законом і при подальшому збільшенні продуктивності живильника асимптотично прямує приблизно до півсуми заданих максимального і мінімального об'ємів вантажу в бункері.

7. Вперше вирішено задачі оптимального і адаптивного управління системою конвеєрного транспорту з акумулюючими бункерами, що працюють в керованому режимі. При цьому оптимальне й адаптивне управління системою конвеєрного транспорту представляють собою задачу управління дворівневою ієрархічною системою, яка дозволяє при зміні структури системи конвеєрного транспорту і величин вантажопотоків, що надходять до системи транспорту, за допомогою вибору швидкостей конвеєрів і живильників, а також максимальних заданих об'ємів вантажу в акумулюючих бункерах забезпечити максимальну пропускну здатність і мінімальну питому енергоємність системи конвеєрного транспорту.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується фундаментальними методами теорії ймовірності, випадкових марковських процесів, методами системного аналізу та оптимального управління, порівнянням результатів аналітичних досліджень з результатами імітаційного моделювання та результатами статистичної обробки даних експлуатації; позитивними результатами дослідно-промислової перевірки запропонованих рекомендацій та їх промисловим впровадженням.

Наукове значення роботи. У роботі на основі теорії випадкових марковських процесів отримали розвиток методи математичного моделювання процесу функціонування системи конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою з акумулюючими бункерами при різних режимах їх роботи. На основі методу динаміки середніх для марковських процесів було розроблено методи визначення пропускну здатності та енергоємності транспортування систем конвеєрного транспорту із самоподібною розгалуженою структурою, що зводяться до рекурентних співвідношень. На основі методу Понтрягіна для марковських процесів отримано системи рівнянь відносно середніх і дисперсій часу заповнення і розвантаження акумулюючого бункера, що працює в режимі підтримки в ньому об'єму вантажу в заданих межах для одношвидкісного і двохшвидкісного живильників. Це дозволило визначити середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері в залежності від продуктивності живильника, а також величини середніх вантажопотоків, що надходить в бункер і розвантажується з нього.

На основі теорії оптимального управління складними ієрархічними системами було розроблено методи оптимального та адаптивного управління системами конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою, що дозволяють підвищити пропускну здатність і знизити енерговитрати на транспортування вантажу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

- методики визначення пропускну здатності, енергоємності транспортування, структури алгоритмів і параметрів адаптивного управління системою конвеєрного транспорту, що дозволяє підвищити її пропускну здатність до 50 % і зменшити енерговитрати на транспортування вантажу до 30 %, яку було передано до вищих навчальних закладів України;

- рекомендацій по проектуванню та підвищенню ефективності роботи систем підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт, які було впроваджено в проектних організаціях на гірничих підприємствах України;

- нових технічних рішень на рівні винаходів і корисних моделей з управління акумулюючими бункерами, конвеєрами і системою конвеєрного транспорту гірничих підприємств.

Реалізація результатів роботи

Розроблену «Методику визначення пропускну здатності, енергоємності транспортування, структури алгоритмів і параметрів адаптивного управління системою конвеєрного транспорту» було передано до Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» МОН України та Національної металургійної академії України МОН України (2017 р.).

Розроблено:

- «Рекомендації щодо визначення критеріїв ефективності, параметрів і вибору структури алгоритмів адаптивного управління, а також засобів регулювання швидкості приводу стрічкових конвеєрів» і передано ДВАТ «проектний інститут Дніпрогіршахт» (2010 р.);

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи системи підземного конвеєрного транспорту» ш/у «Луганське» ДП «Луганськвугілля» (2011 р.);

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту шахти «Машенська» ш/у «Луганське» і передано ДП «Луганськвугілля» (2011 р.), очікуваний річний економічний ефект становить 400 тис. грн;

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту на шахті «Алмазна» ш/у «Добропольское» і передано ПСП ШУ «Добропольское» ТОВ «ДТЕК Добропіллявугілля» (2015 р.);

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту на шахтах ДП «Красноармійськвугілля» (2016 р.).

Апробація результатів дисертаційної роботи.

Основні положення роботи та результати досліджень доповідались і отримали схвалення на засіданнях:

- Міжнародної науково технічної конференції «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (Севастополь, 2007, 2008, 2009, 2012, 2013 роки); Міжнародної

конференції «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2011 р.); Міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2012, 2014 роки); XI Міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, 2013 р.);

– науково-технічної ради науково-проектного центру ДТЕК (Дніпропетровськ, 2014 р.).

Особистий внесок автора. Основні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто та опубліковані в 41 роботі. При цьому роботи [13, 15, 18, 19, 22, 23, 27, 28, 29, 31] опубліковані в єдиному авторстві. В роботах, опублікованих в співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [1] – розроблено методику оцінки показника надійності стрічкового конвеєра, отримано значення інтенсивностей простоїв і відновлень стрічкових конвеєрів в умовах їх експлуатації на гірничих підприємствах; [2] – розробка методики та розрахунок критеріїв ефективності роботи крутопохилого конвеєра; [3] – розроблено метод визначення параметрів адаптивного управління системою підземного конвеєрного транспорту з бункерами; [4] – отримано рівняння Колмогорова, що описує випадковий процес зміни кількості вантажу в усереднюючому бункері, отримано рішення цього рівняння, визначено середній об'єм вантажу в бункері; [5] – розроблено метод визначення енергоємності транспортування систем конвеєрного транспорту деревовидної самоподібної структури з керованими бункерами; [6] – з використанням методу динаміки середніх для марковських процесів розроблено метод визначення пропускної здатності системи конвеєрного транспорту самоподібної деревовидної структури з бункерами, що працюють в некерованому режимі; [7] – розроблено методику визначення критеріїв надійності та відносного енергоспоживання конвеєрів; [8] – розроблено алгоритм адаптивного управління системою конвеєрного транспорту з бункерами, що працюють в керованому режимі; [9] – розроблено математичну модель функціонування акумулюючого бункера, що працює в системі конвеєрного транспорту в керованому режимі у разі двохшвидкісного живильника; [10] – з використанням методу динаміки середніх для марковських процесів розроблено метод визначення пропускної здатності системи конвеєрного транспорту самоподібної деревовидної структури з бункерами, що працюють в керованому режимі; [11] – розроблено метод визначення пропускної здатності системи конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів і бункерів у разі необмеженого об'єму бункера, визначено мінімальний об'єм акумулюючого бункера; [12] – розроблено метод управління швидкістю стрічки конвеєра, який забезпечує мінімальні енерговитрати на транспортування вантажу; [14] – розроблено алгоритм імітаційного моделювання функціонування усереднюючого та акумулюючого бункерів, що працюють в системі конвеєрного транспорту; [16] – встановлено залежність потужності приводу конвеєра при регулюванні і нерегулюванні швидкості стрічки; [17] – розроблено методологію адаптивного управління системою конвеєрного транспорту, яка заснована на принципі управління складними ієрархічними системами; [20] – запропоновано метод управління усереднюючим бункером, що працює в режимі підтримки в ньому об'єму вантажу в заданих

межах, розроблено алгоритм оптимального та адаптивного управління бункером; [21] – розроблено спрощену марковську модель системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючим бункером, що працює в некерованому режимі; [24] – поставлено задачу оптимального та адаптивного управління системою підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт із складною самоподібною деревовидною структурою, визначено глобальну функцію цілі; [25] – проведено фрактальний аналіз структурних схем конвеєрного транспорту гірничих підприємств; розроблено метод визначення середньої пропускної здатності систем конвеєрного транспорту з різною самоподібною структурою; [26] – отримано аналітичну залежність об'єму вантажу в бункері, що працює в системі конвеєрного транспорту в некерованому режимі, від об'єму бункера і продуктивності живильника; [30] – розроблено математичну та імітаційну моделі функціонування усереднюючого та акумулюючого бункерів конвеєрних ліній вугільних шахт; [32] – запропоновано систему адаптивного управління конвеєрними лініями гірничих підприємств без бункерів, розроблено загальний алгоритм їх оптимального управління; [33] – поставлено задачу оптимального та адаптивного управління системою конвеєрного транспорту гірничих підприємств; [34] – з використанням методу Ховарда для марковських процесів отримано систему рівнянь, що визначає середню кількість вантажу в акумулюючому бункері, який працює в системі конвеєрного транспорту в некерованому режимі; [35] – поставлено задачу оптимального управління підземним конвеєрним транспортом з бункерами, визначено глобальну функцію цілі та локальні критерії ефективності цієї задачі; [36] – розроблено математичну модель системи конвеєрного транспорту з послідовним з'єднанням бункерів, що працюють в некерованому режимі; [37] – розроблено математичну модель функціонування системи підземного конвеєрного транспорту та поставлено задачу оптимального управління, визначено загальний критерій оптимізації; [38–41] – брав участь в розробці формул винаходів.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 41 друкарській роботі, в числі яких 1 монографія, 27 статей в наукових фахових виданнях, із яких 1 стаття в закордонному виданні та 10 статей у виданнях, які входять до Міжнародних наукометричних баз, в тому числі 4 в Scopus, тези 9 доповідей на наукових конференціях, 4 патенти України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань і 5 додатків; містить 386 сторінок машинописного тексту, в тому числі 93 рисунка, 8 таблиць, 30 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі виконано огляд й аналіз структури та ефективності процесу функціонування систем конвеєрного транспорту із розгалуженою структурою на прикладі гірничих підприємств. Визначено основні чинники, що знижують їхню пропускну здатність і підвищують енерговитрати на транспортування вантажу. До цих факторів в першу чергу відносяться: простої конвеєрного обладнання через аварійні, технологічні та організаційні причини; нерів-

номірність вантажопотоків, що надходять в систему транспорту; місце розташування і величина об'ємів акумулюючих бункерів, а також постійна зміна структури транспорту.

Дано огляд і аналіз робіт з моделювання функціонування систем конвеєрного транспорту та акумулюючих бункерів, які працюють в різних режимах, а також аналіз робіт по енергетичній ефективності, методам і засобам систем управління конвеєрним транспортом.

В результаті сформульовано проблеми, ідея та задачі досліджень.

Системи конвеєрного транспорту є одним з основних видів транспорту в гірничодобувній, металургійній та інших галузях промисловості.

Основною перевагою конвеєрного транспорту перед іншими видами транспорту є висока продуктивність, надійність і здатність транспортувати насипні вантажі як по горизонтальних, так і по похилих ділянках, здатність до автоматизації, низька трудомісткість обслуговування.

Основним недоліком конвеєрного транспорту є недовантаженням конвеєрів через простої конвеєрного обладнання та нерівномірність вантажопотоків, що надходять в систему транспорту.

Системи конвеєрного транспорту мають складну розгалужену структуру, що включає бункери, живильники і перевантажувальні вузли. Відмова будь-якого конвеєра може привести до простою конвеєрних ліній і, як наслідок, до суттєвого зниження продуктивності системи конвеєрного транспорту.

Застосування резервних конвеєрних ліній через велику вартість капітальних витрат неможливо. Тому для підвищення пропускної здатності та зниження енерговитрат на транспортування вантажу в системах конвеєрного транспорту застосовують акумулюючі бункери.

Однак через часті переповнення акумулюючих бункерів і, як наслідок, збільшення енерговитрат на транспортування вантажу через недовантаження конвеєрних ліній в системах конвеєрного транспорту ефективність їх застосування низька. Тому для підвищення ефективності застосування акумулюючих бункерів в системах конвеєрного транспорту необхідно розробити методи і способи підвищення їх пропускної здатності та енергоємності транспортування вантажу. Одним із шляхів підвищення ефективності функціонування систем конвеєрного транспорту є управління об'ємом вантажу в акумулюючих бункерах і регулювання швидкості живильників і стрічки конвеєрів за допомогою контролерів і частотних перетворювачів.

Застосування комп'ютерного управління дозволить вибрати оптимальні параметри і режими функціонування систем конвеєрного транспорту і тим самим підвищити їх пропускну здатність і знизити енергоємність транспортування вантажу. Для цього необхідно мати математичні моделі процесу функціонування систем конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою з урахуванням простоїв конвеєрного обладнання і нерівномірності вантажопотоків, що надходять до системи транспорту, і на основі цього розробити методи визначення показників ефективності, а також методи оптимального та адаптивного управління конвеєрним транспортом.

Огляд і аналіз науково-технічної літератури щодо систем конвеєрного транспорту показав, що існуючі математичні моделі надійності та функціонування систем конвеєрного транспорту, а також методи розрахунку показників ефективності їх функціонування та управління ними можуть застосовуватися лише для простих схем транспорту з невеликою кількістю конвеєрів (менше п'яти).

При цьому ці моделі та методи не можуть бути використані для розрахунку і прогнозування показників ефективності, а також для визначення параметрів оптимального управління системами конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою з великою кількістю конвеєрів (більше п'яти).

Для дослідження таких складних систем конвеєрного транспорту з бункерами можуть застосовуватися методи системного аналізу та оптимального управління.

Крім того, при управлінні системою конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою і великою кількістю конвеєрів через недостатність апріорної інформації неможливо практично реалізувати алгоритми оптимального управління. В цьому випадку можна застосувати метод адаптивного управління, при якому недостатність інформації визначають за поточними значеннями параметрів функціонування системи конвеєрного транспорту.

Таким чином, необхідно розробити математичні моделі та визначити показники ефективності процесів функціонування систем конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою і на підставі цього створити методи розрахунку і прогнозування показників ефективності, а також методи оптимального та адаптивного управління системами конвеєрного транспорту, що підвищують їх пропускну здатність і знижують енерговитрати на транспортування вантажу.

У другому розділі розглянуто математичні моделі функціонування систем конвеєрного транспорту без бункерів і математичні моделі функціонування систем конвеєрного транспорту з акумулюючими бункерами.

Структурний аналіз систем конвеєрного транспорту показав, що вони представляють собою оргграф (спрямований граф) із самоподібною деревовидною структурою (рис. 1, 2). Таку структуру конвеєрного транспорту можна пояснити повторенням технологічного циклу видобутку корисних копалин. У результаті кожна нова ділянка конвеєрного транспорту приєднується до вже існуючої системи, утвореної в результаті безлічі технологічних циклів, що повторюються.

Цей процес можна порівняти з процесом зростання дерева, де циклом є зміна пір року: весна – літо – осінь – зима. Тому математичне моделювання в роботі стосується тільки систем конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою. При цьому системи конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів є окремими випадками (рис. 1, 2).

При математичному моделюванні процесу функціонування систем конвеєрного транспорту передбачається, що інтервали часу роботи і простоїв конвеєрів незалежні та розподілені за експоненціальним законом з відомими параметрами розподілу. В цьому випадку функціонування систем конвеєрного транспорту будь-якої структури є випадковим марковським процесом з безперервним часом і дискретними фазовими станами, що описуються рівняннями Колмогорова відносно ймовірностей $P_i(t)$ знаходження системи в даний момент часу t в i -му стані:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^s P_j(t)\lambda_{ji} - P_i(t)\sum_{j=1}^s \lambda_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, s), \quad (1)$$

де λ_{ij} – інтенсивність простоїв або відновлень при переході системи конвеєрного транспорту з i -го стану в j -й стан, хв^{-1} .

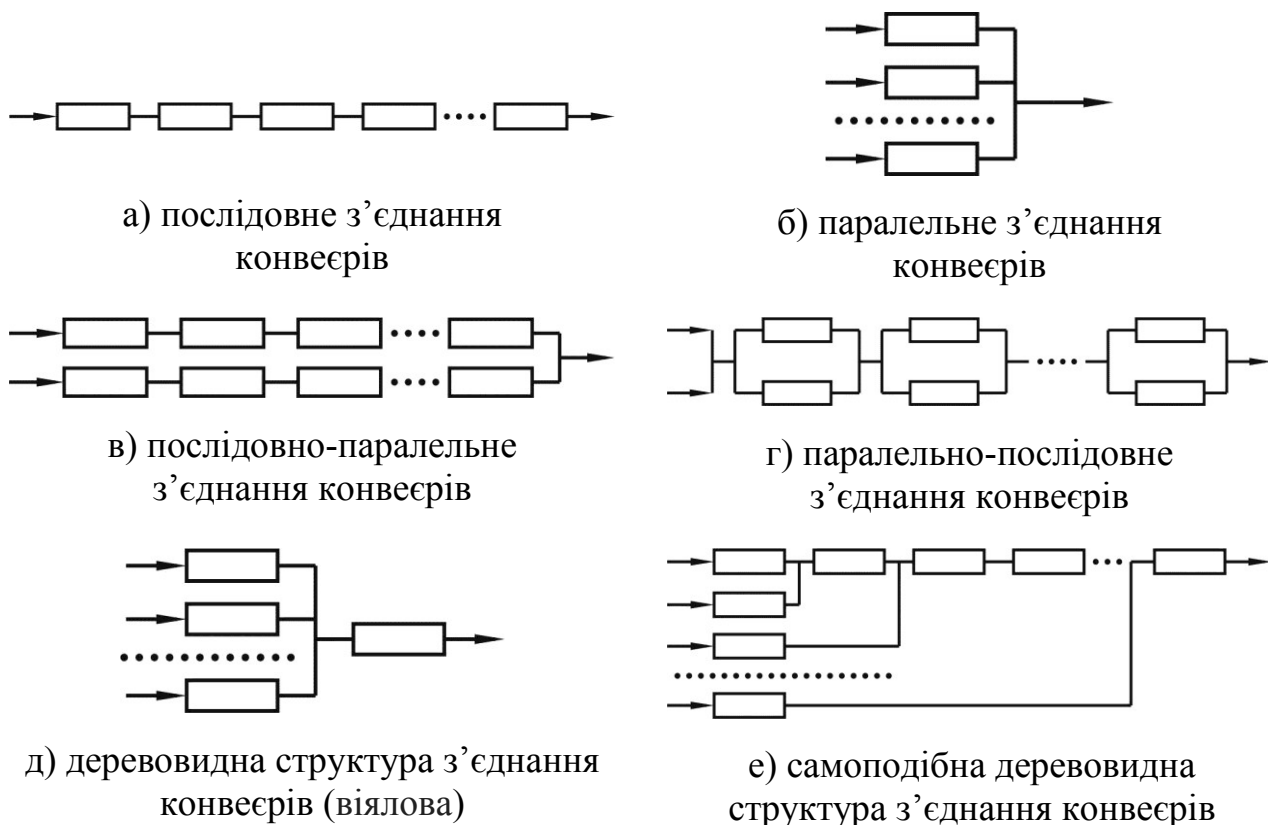


Рис. 1. Структурні схеми конвеєрного транспорту без бункерів

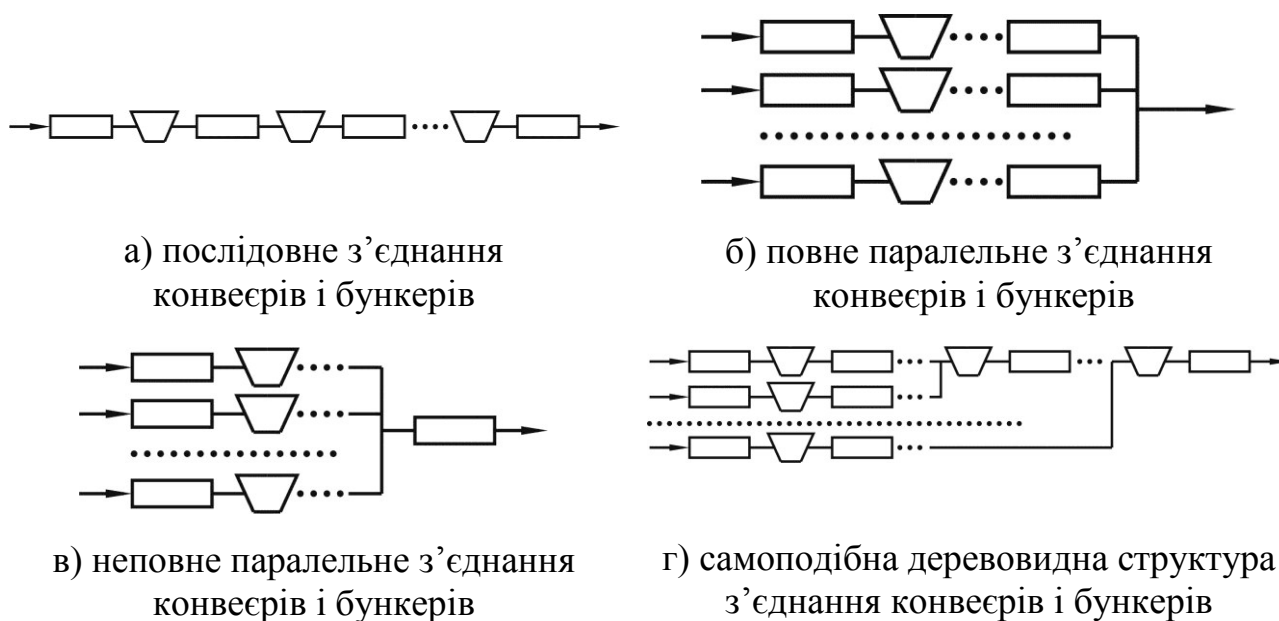


Рис. 2. Структурні схеми конвеєрного транспорту з бункерами

За допомогою рівняння Колмогорова (1) можна визначити коефіцієнт готовності і середню пропускну здатність системи конвеєрного транспорту без бункерів і з акумулюючими бункерами для простої схеми послідовного з'єднання конвеєрів і бункерів.

Для систем конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою і з великою кількістю конвеєрів простій одного або декількох конвеєрів не приводить до зупинки всієї системи конвеєрного транспорту, тобто її коефіцієнт готовності дорівнює одиниці. Такі системи називаються системами з неповними відмовами. В цьому випадку система конвеєрного транспорту характеризується показниками ефективності, тобто середньою пропускну здатністю і середньою енергоємністю транспортування.

Середня пропускну здатність будь-якої системи конвеєрного транспорту без бункерів визначається за формулою

$$m_c = \sum_{i=1}^s P_i Q_i, \quad (2)$$

де Q_i – пропускну здатність системи конвеєрного транспорту, яка знаходиться в i -му стані, т/хв; P_i – імовірність знаходження системи конвеєрного транспорту в i -му стані; s – кількість можливих фазових станів системи конвеєрного транспорту.

Системи конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою мають велику кількість фазових станів, тому для них скласти систему рівнянь Колмогорова практично неможливо.

Тому в роботі при моделюванні функціонування систем конвеєрного транспорту без бункерів і з бункерами було використано метод динаміки середніх для марковських процесів. Цей метод полягає в тому, що складається не рівняння Колмогорова відносно невідомих імовірностей станів системи конвеєрного транспорту, а потім після визначення цих імовірностей обчислюються середні значення показників ефективності функціонування системи транспорту, а відразу складається рівняння відносно показників ефективності функціонування системи конвеєрного транспорту, зокрема, відносно середньої пропускну здатності і енергоємності транспортування та їх дисперсій.

Крім того, в роботі для отримання характеристик систем конвеєрного транспорту крім методів динаміки середніх використовуються властивості самоподібності деревовидної структури системи транспорту.

У роботі було розроблено метод визначення середньої пропускну здатності систем конвеєрного транспорту без бункерів з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів, а також із самоподібною деревовидною структурою (рис. 3). Прямокутниками позначені конвеєрні лінії, які являють собою систему послідовно з'єднаних конвеєрів.

В результаті середня пропускну здатність системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою (див. рис. 1, е) визначається за формулою

$$m_c = m_n^{(s)}. \quad (3)$$

У формулі (3) $m_n^{(s)}$ визначається із рекурентних співвідношень:

$$m_i^{(s)} = \frac{m_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_i^{(c)}} + \frac{m_{Q_{i+1}}}{1 + \gamma_{i+1}^{(z)}}, \text{ де } \gamma_i^{(c)} = \frac{\lambda_i^{(c)}}{\mu_i^{(c)}}; \gamma_{i+1}^{(z)} = \frac{\lambda_{i+1}^{(z)}}{\mu_{i+1}^{(z)}} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Тут $m_i^{(s)}$ – середня пропускна здатність на виході з i -го рівня самоподібного деревовидного графа, т/хв; $\gamma_i^{(c)}$ – коефіцієнт простою i -ї конвеєрної лінії стоволового шляху; $\gamma_{i+1}^{(z)}$ – коефіцієнт простою $(i + 1)$ -ї конвеєрної лінії забійного шляху; $m_{Q_{i+1}}$ – середня величина вантажопотоку, що надходить на $(i+1)$ -у конвеєрну лінію забійного шляху, т/хв; n – кількість забійних шляхів в системі конвеєрного транспорту.

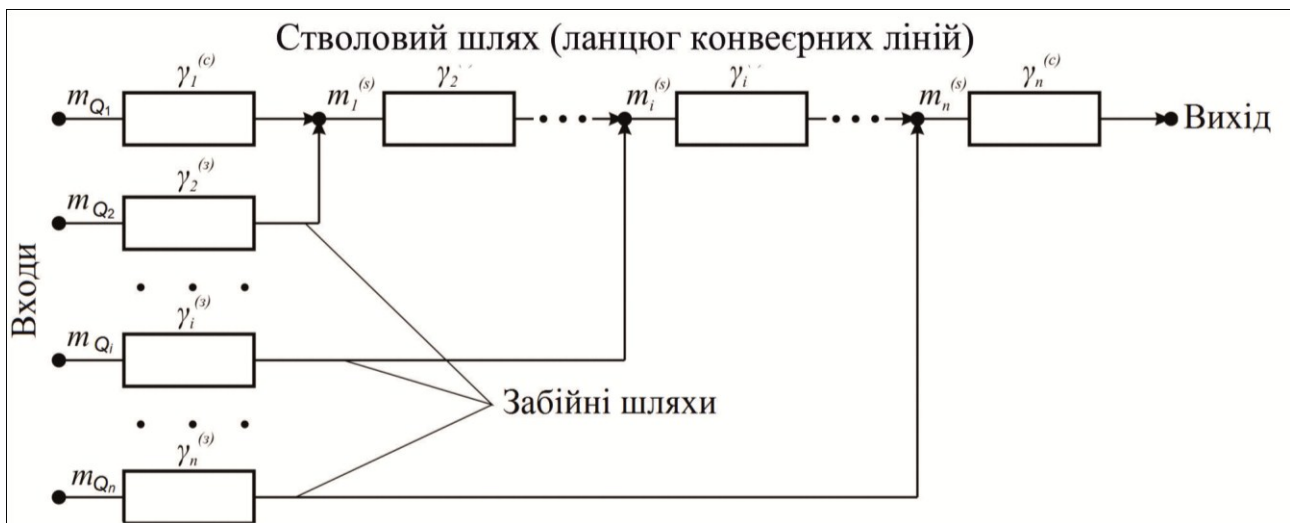


Рис. 3. Розрахункова схема системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою без бункерів

Значення середньої пропускної здатності системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою без бункерів, яку обчислено за допомогою розробленого методу, відрізняється від значення середньої пропускної здатності, яку отримано за допомогою імітаційного моделювання, не більше ніж на 3%.

Для визначення середньої пропускної здатності систем конвеєрного транспорту з акумулюючими бункерами спочатку визначалася пропускна здатність найпростішої системи «конвеєр – бункер – конвеєр» при різних режимах роботи акумулюючого бункера.

В даний час в системах конвеєрного транспорту широке застосування отримали акумулюючі бункери, що працюють в некерованому режимі та в режимі підтримки в них об'ємів вантажу в заданих межах, тобто у керованому режимі.

При некерованому режимі роботи акумулюючого бункера надбункерний конвеєр зупиняється, як тільки об'єм вантажу в бункері досягне максимального допустимого значення V_{\max} , і включається, як тільки об'єм вантажу в бункері стане менше за це максимальне допустиме значення. При цьому розвантаження

бункера буде працювати постійно, навіть при порожньому бункері. В цьому режимі роботи акумулюючого бункера в разі великої висоти бункера виникає небезпека прямого падіння вантажу на живильник і, як наслідок, його часті відмови. Крім того, в цьому режимі роботи бункера збільшується кількість простотів забійних шляхів через часті зупинки надбункерної конвеєрної лінії.

У разі роботи акумулюючого бункера в керованому режимі, якщо кількість вантажу в бункері досягає заданого максимального значення V_{32} , то живильник вмикається і вимикається при досягненні мінімального заданого об'єму вантажу в бункері V_{31} . При цьому надбункерний конвеєр працює постійно і вимикається тільки при досягненні об'єму вантажу в бункері, що дорівнює максимальному допустимому значенню V_{\max} (рис. 4).

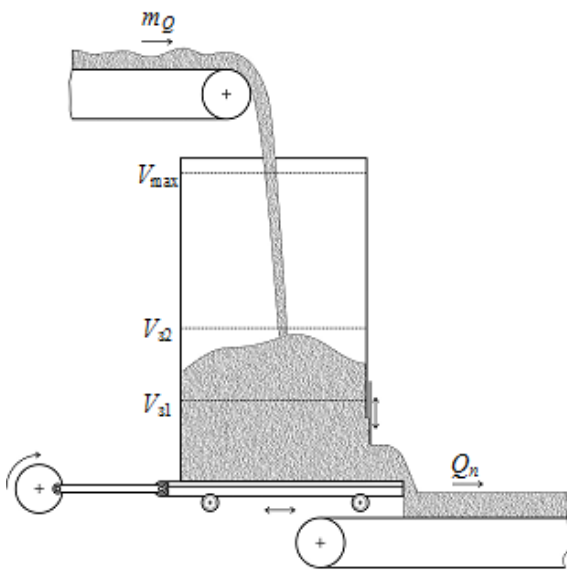


Рис. 4. Схема роботи акумулюючого бункера в керованому режимі

При роботі акумулюючого бункера в керованому режимі підтримується безперервна робота надбункерних конвеєрних ліній та очисних забоїв і тим самим збільшується продуктивність системи конвеєрного транспорту. Крім того, при цьому режимі роботи бункера зберігається певна кількість вантажу в бункері й тим самим збільшується надійність живильника.

Акумулюючий бункер, який працює в керованому режимі, в основному застосовується на магістральних конвеєрних лініях і на збірних конвеєрах, а акумулюючі бункери, що працюють в некерованому режимі, застосовуються

на дільничних конвеєрних лініях з об'ємом бункера, меншим за 200 м^3 .

У роботі на основі теорії марковських процесів і теорії ймовірності розроблено математичні моделі процесу функціонування простішої системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючим бункером, що працює в некерованому та керованому режимах. В результаті отримано аналітичні залежності середньої пропускної здатності m_c від величини середнього вантажопотоку \bar{m}_Q , що надходить в бункер, і середнього вантажопотоку \bar{Q}_n , що розвантажується із бункеру, і також від об'єму бункера V .

Для бункера, що працює в некерованому режимі, середня пропускна здатність визначається за формулами:

$$\text{при } \bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n \quad m_c = \left[\frac{e^{A_1 \rho V} + \frac{\bar{m}_Q}{(\bar{m}_Q - \bar{Q}_n)} (e^{A_1 \rho V} - 1)}{1 + \frac{e^{A_1 \rho V}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_Q}{(\bar{m}_Q - \bar{Q}_n)} (e^{A_1 \rho V} - 1)} \right] \bar{Q}_n; \quad (4)$$

$$\text{при } \bar{m}_Q < \bar{Q}_n \quad m_c = \left[\frac{1 + \frac{(Q_n - \bar{Q}_n)(1 - e^{A_2 \rho V})}{(\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)}}{1 + \gamma_2 e^{A_2 \rho V} + \frac{(Q_n - \bar{Q}_n)(1 - e^{A_2 \rho V})}{(\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)}} \right] \bar{m}_Q, \quad (5)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{\mu_1 [m_Q - (1 + \gamma_1) \bar{Q}_n]}{(m_Q - \bar{Q}_n) \bar{Q}_n}; \quad A_2 = \frac{\mu_2 [\bar{m}_Q (1 + \gamma_2) - Q_n]}{\bar{m}_Q (Q_n - \bar{m}_Q)}; \quad \bar{m}_Q = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad \bar{Q}_n = \frac{Q_n}{1 + \gamma_2};$$

$$\gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}; \quad \gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}.$$

Тут λ_1 , μ_1 і λ_2 , μ_2 – інтенсивності простоїв і відновлень надбункерного і підбункерного конвеєрів відповідно, хв^{-1} ; V – об'єм акумулюючого бункера, м^3 ; γ_1 – коефіцієнт простою надбункерного конвеєра; γ_2 – коефіцієнт простою підбункерного конвеєра; m_Q – середня величина вантажопотоку, що надходить на надбункерний конвеєр, т/хв ; Q_n – продуктивність живильника, т/хв ; V – об'єм бункера, м^3 ; ρ – питома маса вантажу, що транспортується, т/м^3 .

При роботі акумулюючого бункера в керованому режимі середня пропускна здатність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» визначається за формулами:

$$\text{при } \bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n \quad m_c = \left(1 - \frac{\gamma_1}{1 + \gamma_1} e^{-\frac{\rho \Delta V_1}{\bar{Q}_n} \mu_1} \right) \bar{Q}_n; \quad (6)$$

$$\text{при } \bar{m}_Q < \bar{Q}_n \quad m_c = \left(1 - \frac{\gamma_2}{1 + \gamma_2} e^{-\frac{\rho \Delta V_2}{\bar{m}_Q} \mu_2} \right) \bar{m}_Q, \quad (7)$$

де $\Delta V_1 = V - V_{3_1}$; $\Delta V_2 = V - V_{3_2}$.

Тут V_{3_1} – мінімальний заданий об'єм вантажу в бункері, м^3 ; V_{3_2} – максимальний заданий об'єм вантажу в бункері, м^3 ; ΔV_1 , ΔV_2 – максимальна і мінімальна частини об'єму акумулюючого бункера, що незаповнені вантажем, відповідно.

На рисунках 5 і 6 показано графіки залежності середньої пропускної здатності m_c системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючим бункером, що працюють в некерованому режимі, від об'єму бункера V при різних значеннях продуктивності живильника Q_n .

На рис. 5 кривим 1, 2, 3 відповідають значення $Q_n = 1; 2; 3$ т/хв . На рис. 6 кривим 1, 2, 3 відповідають значення $Q_n = 4; 5; 6$ т/хв . При цьому квадратиками на графіках показано результати імітаційного моделювання.

У разі роботи акумулюючого бункера в керованому режимі графіки залежності середньої пропускної здатності m_c від об'єму незаповненою вантажем частини бункера ΔV мають той самий вид, що і графіки в разі роботи бункера в некерованому режимі (див. рис. 5 і рис. 6).

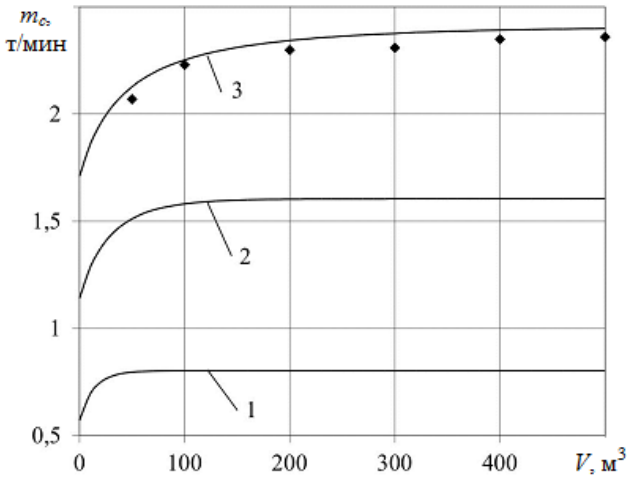


Рис. 5. Графіки залежності m_c від V при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$

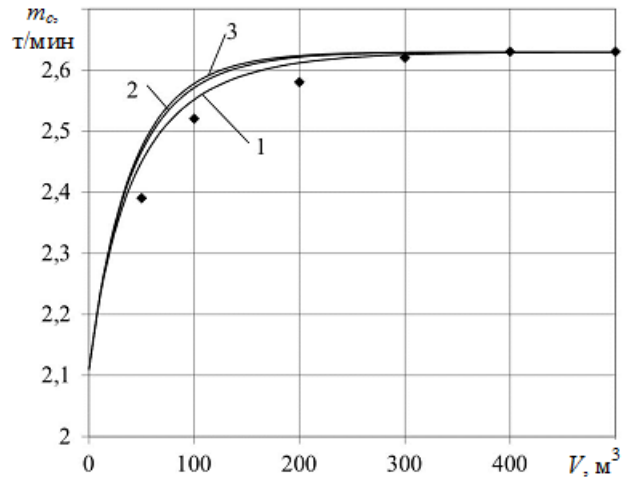


Рис. 6. Графіки залежності m_c від V при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$

В результаті досліджень встановлено, що середня пропускна здатність m_c системи «конвеєр – бункер – конвеєр» в разі роботи акумулюючого бункера в некерованому та керованому режимах при будь-яких співвідношеннях середніх вантажопотоків, що надходить в бункер \bar{m}_Q і розвантажується з нього \bar{Q}_n , зі збільшенням об'єму бункера V або незаповненою вантажем частини бункера ΔV спочатку збільшується, а потім при збільшенні V і ΔV асимптотично прямує до постійного значення, що дорівнює \bar{Q}_n при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ і \bar{m}_Q при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$. При цьому пропускна здатність m_c зі збільшенням \bar{Q}_n при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ збільшується, а при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ середня пропускна здатність m_c практично не змінюється. Результати теоретичних досліджень відрізняються від результатів імітаційного моделювання не більше ніж на 3 %.

Дослідження показали, що пропускна здатність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» при роботі акумулюючого бункера в некерованому та керованому режимах зі збільшенням інтенсивностей простоїв надбункерного і підбункерного конвеєрів зменшується.

Крім того, визначено максимальний об'єм акумулюючого бункера, більш за який пропускна здатність акумулюючого бункера, що працює в системі конвеєрного транспорту, практично не збільшується. При цьому максимальний об'єм акумулюючого бункера визначається за формулою

$$V_{\max} = \frac{\bar{m}_Q}{\rho} \cdot \frac{\ln[\lambda_2 / ((\lambda_2 + \mu_2)\epsilon)]}{\mu_2} + V_{\min}, \quad (8)$$

де V_{\min} – мінімальний допустимий об'єм вантажу в акумулюючому бункері, м^3 ; ϵ – задана точність ($\epsilon = 0,01$), т/хв.

Аналогічно, з використанням методу динаміки середніх для марковських процесів та урахуванням самоподібності структури системи конвеєрного транспорту отримано залежності середньої пропускної здатності систем конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів і бункерів, а також системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою з бункерами, що працюють в некерованому та керованому режимах.

У разі роботи акумулюючих бункерів в некерованому режимі середня пропускна здатність m_c системи конвеєрного транспорту із самоподібною дєреводною структурою (рис. 7) визначається за формулою

$$m_c = m_{c_n}.$$

В останній формулі m_{c_n} визначається з рекурентних співвідношень:

$$\text{при } m_i^{(s)} \geq \bar{Q}_{n_i}^{(c)} \quad m_{c_i} = \left[\frac{\frac{e^{A_{1i}\rho V_i^{(c)}}}{\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} (e^{A_{1i}\rho V_i^{(c)}} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{1i}\rho V_i^{(c)}}}{\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} (e^{A_{1i}\rho V_i^{(c)}} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_i}^{(c)}; \quad (9)$$

$$\text{при } m_i^{(s)} < \bar{Q}_{n_i}^{(c)} \quad m_{c_i} = \left[\frac{1 + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} (1 - e^{A_{2i}\rho V_i^{(c)}})}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)} e^{A_{2i}\rho V_i^{(c)}} + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} (1 - e^{A_{1i}\rho V_i^{(c)}})} \right] m_i^{(s)}, \quad (10)$$

$$\text{де } A_{1i} = \frac{\mu_{c_i}^{(c)} [m_i^{(s)} - (1 + \gamma_{\vartheta_i}^{(c)}) \bar{Q}_{n_i}^{(c)}]}{[m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)}] \bar{Q}_{n_i}^{(c)}}; \quad A_{2i} = \frac{\mu_{i+1}^{(c)} [m_i^{(s)} (1 + \gamma_{i+1}^{(c)}) - Q_{n_i}^{(c)}]}{m_i^{(s)} (Q_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})}; \quad \gamma_{\vartheta_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1;$$

$$m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\vartheta_i}^{(3)}}; \quad \bar{Q}_{n_i}^{(c)} = \frac{Q_{n_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}}; \quad m_{c_0} = 0; \quad \mu_{c_i}^{(c)} = \frac{i}{\sum_{k=1}^i 1/\mu_k^{(c)}}; \quad (i=1,2,\dots,n).$$

Тут m_{Q_i} – середня величина вантажопотоку, що надходить до i -го забійного шляху, т/хв; $Q_{n_i}^{(c)}$ – продуктивність живильника i -го акумулюючого бункера ствольного шляху, т/хв; $\gamma_i^{(c)}$ – коефіцієнт простою i -ї конвеєрної лінії ствольного шляху; $\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}$ – еквівалентний коефіцієнт простою системи транспорту до i -го бункера ствольного шляху; $\gamma_{\vartheta_i}^{(3)}$ – еквівалентний коефіцієнт простою i -го забійного шляху системи транспорту; $\mu_i^{(c)}$ – інтенсивність відновлень i -ї конвеєрної лінії ствольного шляху, хв⁻¹; $\mu_{c_i}^{(c)}$ – середня інтенсивність відновлень системи конвеєрного транспорту до i -го бункера, хв⁻¹; n – кількість забійних шляхів.

Еквівалентні коефіцієнти простоїв забійних шляхів з бункерами визначаються за формулою:

$$\gamma_{\vartheta_i}^{(3)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(3)}} - 1 \quad (\gamma_{\vartheta_1}^{(c)} = \gamma_{\vartheta_1}^{(3)}), \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (11)$$

де $m_{c_i}^{(3)}$ – середня пропускна здатність i -го забійного шляху системи транспорту, т/хв.

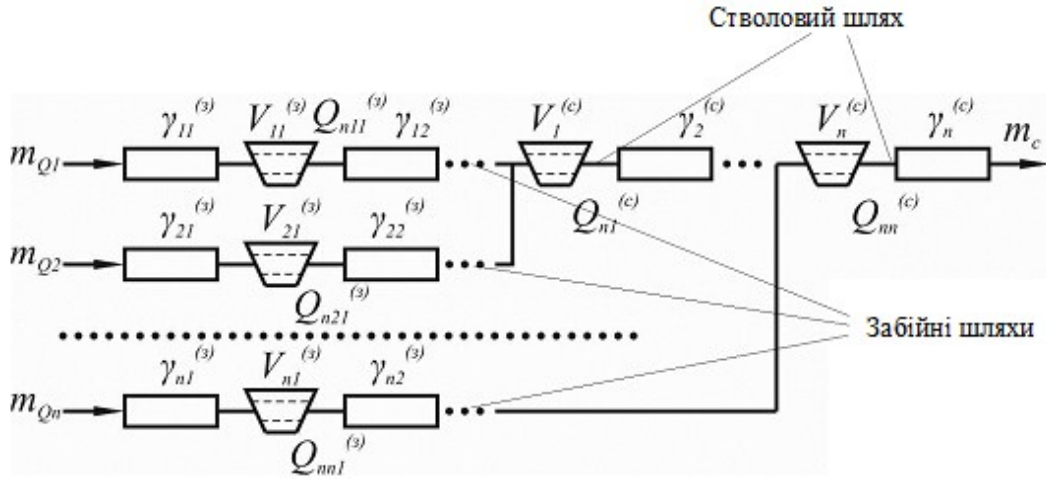


Рис. 7. Розрахункова схема системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою з бункерами

У разі роботи бункерів в керованому режимі середня пропускна здатність m_c системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою (див. рис. 7) визначається за формулою

$$m_c = m_{c_n}.$$

В останній формулі m_{c_n} визначається з рекурентних співвідношень:

$$\text{при } m_i^{(s)} \geq \bar{Q}_{n_i}^{(c)} \quad m_{c_i} = \left(1 - \frac{\gamma_{\varepsilon_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{\varepsilon_i}^{(c)}} e^{-\frac{\rho \Delta V_{1_i}^{(c)}}{\bar{Q}_{n_i}^{(c)}} \mu_{c_i}^{(c)}} \right) \bar{Q}_{n_i}^{(c)}; \quad (12)$$

$$\text{при } m_i^{(s)} < \bar{Q}_{n_i}^{(c)} \quad m_{c_i} = \left(1 - \frac{\gamma_{i+1}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}} e^{-\frac{\rho \Delta V_{2_i}^{(c)}}{m_i^{(s)}} \mu_{i+1}^{(c)}} \right) m_i^{(s)}, \quad (13)$$

$$\text{де } \gamma_{\varepsilon_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}}; \quad m_{c_0} = 0; \quad \bar{Q}_{n_i}^{(c)} = \frac{Q_{n_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}}; \quad \gamma_i^{(c)} = \frac{\lambda_i^{(c)}}{\mu_i^{(c)}};$$

$$\mu_{c_i}^{(c)} = i \left(\sum_{k=1}^i \frac{1}{\mu_k^{(c)}} \right)^{-1}; \quad \Delta V_{1_i}^{(c)} = V_i^{(c)} - V_{1_i}^{(c)}; \quad \Delta V_{2_i}^{(c)} = V_i^{(c)} - V_{2_i}^{(c)} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Тут $\gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}$ – еквівалентні коефіцієнти простоїв забійних шляхів; $V_i^{(c)}$ – об’єми акумулюючих бункерів стоволового шляху, м^3 ; $V_{1_i}^{(c)}$ – мінімальні задані об’єми вантажу в бункерах стоволового шляху, м^3 ; $V_{2_i}^{(c)}$ – максимальні задані об’єми вантажу в бункерах стоволового шляху, м^3 ; $\Delta V_{1_i}^{(c)}, \Delta V_{2_i}^{(c)}$ – мінімальні та максимальні об’єми незаповнених вантажем частин акумулюючих бункерів стоволового шляху відповідно, м^3 .

Розрахунки показали, що середня пропускна здатність системи конвеєрного транспорту з бункерами, що працюють в керованому режимі, на 15% більше за середню пропускну здатність тієї ж системи конвеєрного транспорту з некерованими бункерами.

Отримані теоретичні результати добре збіглися з даними експлуатації. Похибка не перевищує 10 %.

У третьому розділі дано поняття енергоємності транспортування і визначено показник енергетичної ефективності процесу функціонування систем конвеєрного транспорту.

Енергоємність транспортування стрічкового конвеєра визначається потужністю електроприводу конвеєра, що йде на подолання сил опору руху вантажу та стрічки по ставу стрічкового конвеєра, на подолання сили тяжіння при підйомі вантажу, а також на втрати енергії в приводі конвеєра.

Енергоємність транспортування системи конвеєрного транспорту визначається сумарною потужністю приводів конвеєрів і живильників, що йде на транспортування вантажу, яка залежить від простоїв конвеєрного обладнання, що виникають з аварійних, технологічних і організаційних причин, а також залежить від величини вантажопотоків, що надходять до системи транспорту. При збільшенні пропускної здатності системи конвеєрного транспорту енергоємність транспортування збільшується. При цьому, якщо пропускна здатність мінімальна, то енерговитрати на транспортування вантажу також мінімальні.

В роботі за показник енергетичної ефективності функціонування системи конвеєрного транспорту приймається комплексний показник E , що дорівнює відношенню середньої енергоємності транспортування до середньої пропускної здатності системи транспорту. Тобто показник енергетичної ефективності функціонування системи конвеєрного транспорту – це питома енергоємність транспортування вантажу, яка визначається за формулою

$$E = \frac{w_c}{60m_c} \text{ (кВт}\cdot\text{год/т)}, \quad (14)$$

де m_c – середня пропускна здатність (середня продуктивність) системи конвеєрного транспорту, т/хв; w_c – середня енергоємність транспортування системи конвеєрного транспорту, кВт.

Аналогічно, як і при визначенні середньої пропускної здатності, середня енергоємність транспортування системи конвеєрного транспорту визначається як математичне очікування від випадкової величини енергоємності транспортування за формулою

$$w_c = \sum_{k=0}^s P_k w_k . \quad (15)$$

Тут w_k – енергоємність транспортування системи конвеєрного транспорту, що знаходиться в k -му стані (кВт), яка визначається за формулою

$$w_k = \sum_{j=0}^{m_k} N_j , \quad (16)$$

де N_i – потужність, що споживається приводом i -го стрічкового конвеєра, коли система знаходиться в k -му стані, кВт; m_k – кількість працюючих конвеєрів в системі конвеєрного транспорту, що знаходиться в k -му стані.

Потужність, споживана приводом стрічкового конвеєра, залежить від погонного навантаження, параметрів конвеєра й визначається за формулою

$$N_i = \frac{L_i}{1000\eta_i} \left[v_{\lambda_i} q_{\Gamma_i} (k_{1i} \omega'_i \cos \alpha_i + \sin \alpha_i) + k_{1i} v_{\lambda_i} (q'_{p_i} + q''_{p_i} + 2q_{\lambda_i}) \omega'_i \cos \alpha_i \right], \quad (17)$$

де L_i – довжина i -го конвеєра, м; η_i – коефіцієнт корисної дії приводу i -го конвеєра; v_{λ_i} – швидкість стрічки i -го конвеєра, м/с; q_{Γ_i} , q_{λ_i} – відповідно погонні ваги насипного вантажу і стрічки i -го конвеєра, Н/м; q'_{p_i} , q''_{p_i} – відповідно погонні ваги частин, що обертаються, роликкоопор верхніх і нижніх гілок стрічки i -го конвеєра, Н/м; α_i – кут нахилу i -го конвеєра, град; k_{1i} – коефіцієнт, що враховує місцевий опір i -го конвеєра; ω'_i – коефіцієнт опору руху стрічки з вантажем по роликкоопорах i -го конвеєра.

Середня енергоємність транспортування w_c системи конвеєрного транспорту так само, як і середня пропускна здатність m_c , залежить від структурної схеми системи конвеєрного транспорту, погонного навантаження, параметрів конвеєрів, а також від інтенсивностей простоїв і відновлень конвеєрів.

Для визначення енергоємності транспортування систем конвеєрного транспорту також використовувався метод динаміки середніх для марковських процесів з урахуванням самоподібності структури конвеєрного транспорту.

В результаті отримано рекурентні формули, що визначають енергоємність транспортування систем конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів, а також із самоподібною деревовидною структурою без бункерів і з бункерами.

В разі системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою без бункерів (див. рис. 3) середня енергоємність транспортування визначається за формулою

$$w_c = w_n^{(s)}. \quad (18)$$

Тут $w_n^{(s)}$ визначається із рекурентних співвідношень:

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)} + w_i^{(c)}}{1 + \gamma_i^{(c)}} + \frac{w_{i+1}^{(s)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(s)}}; \quad w_0^{(s)} = w_{n+1}^{(s)} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

де $w_i^{(s)}$, $w_{i-1}^{(s)}$ – відповідно середня енергоємність транспортування i -го і $(i-1)$ -го рівнів графа системи конвеєрного транспорту самоподібною деревовидною структурою, кВт; $w_i^{(c)}$ – середня енергоємність транспортування i -го конвеєра ствольного шляху, кВт; $w_i^{(s)}$ – середня енергоємність транспортування i -го конвеєра забійного шляху, кВт; n – кількість забійних шляхів.

В разі системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою з бункерами (див. рис. 7) при різних режимах їх роботи енергоємність транспортування визначається за формулою

$$w_c = w_n^{(s)}. \quad (19)$$

У формулі (19) $w_n^{(s)}$ визначається із рекурентних співвідношень:

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_{\alpha_{i-1}}^{(c)}} + w_{i+1}^{(c)} + w_{i+1}^{(z)},$$

$$\text{де } \gamma_{\alpha_{i-1}}^{(c)} = \frac{m_i^{(s)}}{m_{c_i}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\alpha_i}^{(z)}}; \quad \gamma_{\alpha_i}^{(z)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}} - 1; \quad w_0^{(s)} = w_1^{(z)} \quad (i=1,2,\dots,n).$$

Тут $w_i^{(s)}$, $w_{i-1}^{(s)}$ – середні енергоємності транспортування системи транспорту до i -го та $(i-1)$ -го бункерів стоволового шляху, кВт; $w_{i+1}^{(c)}$ – середня енергоємність транспортування $(i+1)$ -ї конвеєрної лінії стоволового шляху, кВт; $w_{i+1}^{(z)}$ – середня енергоємність транспортування $(i+1)$ -го забійного шляху, кВт.

На основі отриманих аналітичних залежностей досліджено вплив середніх вантажопотоків, що надходять до системи конвеєрного транспорту, об'ємів акумулюючих бункерів і об'ємів вантажу в них, продуктивностей живильників, інтенсивностей простоїв і відновлень конвеєрів на середню пропускну здатність, середню енергоємність транспортування і питому енергоємність системи конвеєрного транспорту з бункерами.

На рисунках 8–13 показано графіки залежностей середньої пропускну здатності m_c , середньої енергоємності транспортування w_c і питомої енергоємності E системи «конвеєр – бункер – конвеєр» від середньої величини вантажопотоку m_Q , що надходить на надбункерних конвеєр, при різних значеннях об'єму акумулюючого бункера V , що працює в некерованому режимі, і різних значеннях об'єму незаповненою вантажем частини бункера ΔV , що працює в керованому режимі (див. рис. 8-10), де 1 – $V = \Delta V = 50 \text{ м}^3$; 2 – $V = \Delta V = 100 \text{ м}^3$; 3 – $V = \Delta V = 200 \text{ м}^3$; 4 – $V = \Delta V = 300 \text{ м}^3$, а також при різних значеннях продуктивності живильника Q_n (див. рис. 11–13), де 1 – $Q_n = 4 \text{ т/хв}$; 2 – $Q_n = 5 \text{ т/хв}$; 3 – $Q_n = 6 \text{ т/хв}$.

В результаті досліджень встановлено, що середня пропускну здатність m_c і середня енергоємність транспортування w_c системи «конвеєр – бункер – конвеєр» при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ зі збільшенням середнього вантажопотоку m_Q , що надходить на надбункерний конвеєр, збільшуються за лінійним законом незалежно від режиму роботи акумулюючого бункера. При цьому середня пропускну здатність m_c зі збільшенням m_Q при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ практично не змінюється, а середня енергоємність транспортування w_c зі збільшенням m_Q спочатку зменшується, а потім прямує до постійного значення. Крім того, середня пропускну здатність m_c і середня енергоємність транспортування w_c при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ не залежать від V або ΔV і Q_n , при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ зі збільшенням V або ΔV і Q_n – збільшуються. Питома енергоємність E системи «конвеєр – бункер – конвеєр» незалежно від режиму роботи акумулюючого бункера при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ зі збільшенням m_Q зменшується за гіперболічним законом і при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ зі збільшенням m_Q асимптотично прямує до постійного значення. При цьому при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ питома енергоємність E практич-

но не залежить від значень V або ΔV і Q_n , при $\bar{m}_O \geq \bar{Q}_n$ питома енергоемність E зі збільшенням Q_n зменшується і практично не залежить від значень V і ΔV .

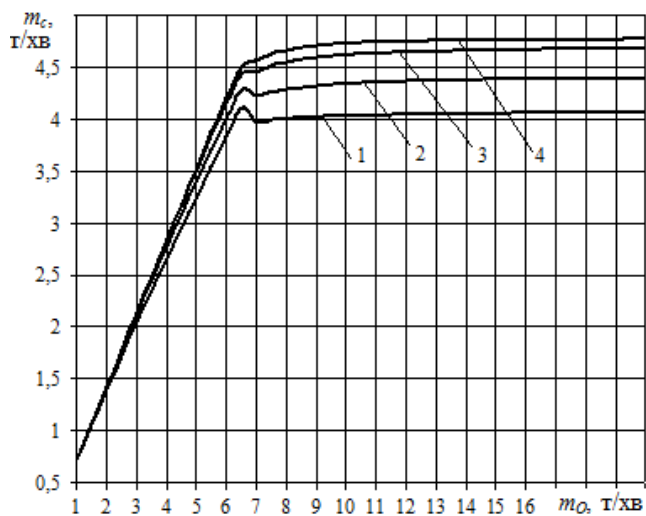


Рис. 8. Графіки залежності m_c від m_O при різних V і ΔV

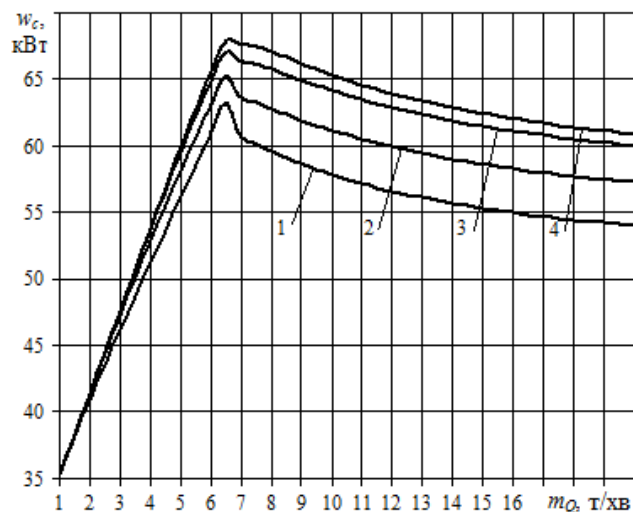


Рис. 9. Графіки залежності w_c від m_O при різних V і ΔV

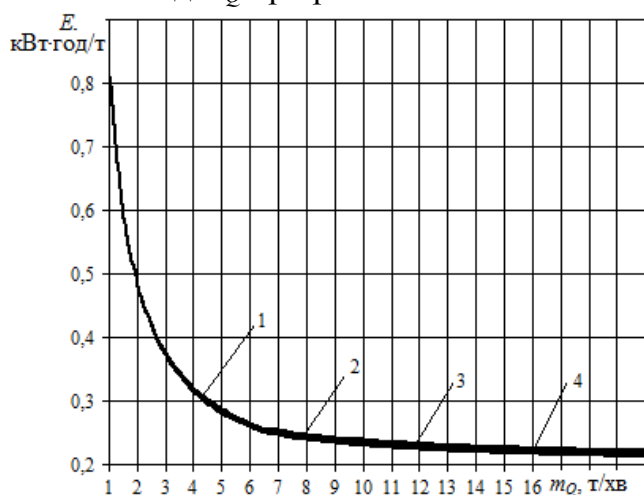


Рис. 10. Графіки залежності E від m_O при різних V і ΔV

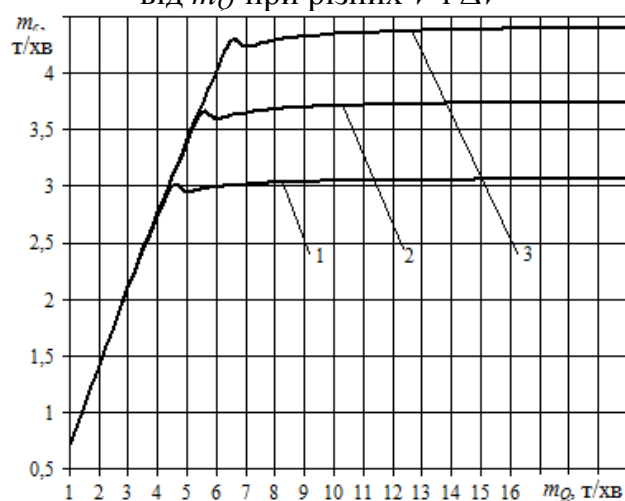


Рис. 11. Графіки залежності m_c від m_O при різних Q_n

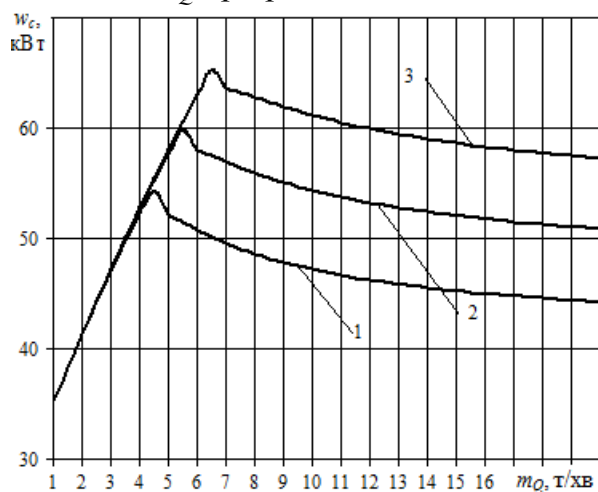


Рис. 12. Графіки залежності w_c від m_O при різних Q_n

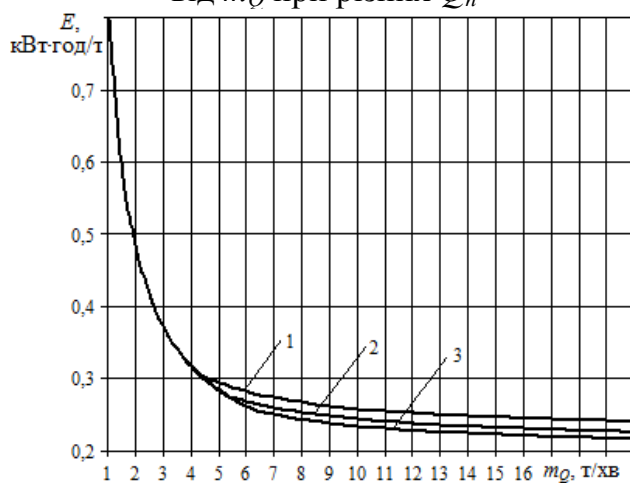


Рис. 13. Графіки залежності E від m_O при різних Q_n

Також в результаті досліджень встановлено, що в разі рівності середніх вантажопотоків, що надходить до акумулюючого бункера і розвантажується з нього, середня пропускна здатність набуває максимального значення, а питома енергоємність системи конвеєрного транспорту набуває мінімального значення. При цьому питома енергоємність системи конвеєрного транспорту з бункерами, що працюють в керованому режимі, на 15 % більша за питому енергоємність тієї ж системи конвеєрного транспорту з некерованими бункерами.

В четвертому розділі дано класифікацію бункерів конвеєрного транспорту та аналіз їх роботи.

Розроблено алгоритми імітаційного моделювання функціонування акумулюючих бункерів, за допомогою яких проведено аналіз роботи бункерів в різних режимах в системі конвеєрного транспорту.

На основі розробленої в другому розділі математичної моделі функціонування системи «конвеєр – бункер – конвеєр» у випадках роботи акумулюючого бункера в некерованому та керованому режимах визначено середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері V_c при різних співвідношеннях середнього вантажопотоку \bar{m}_Q , що поступає в бункер, і середнього вантажопотоку \bar{Q}_n , що розвантажується з нього.

В результаті встановлено, що в разі роботи акумулюючого бункера в некерованому режимі із збільшенням продуктивності живильника Q_n середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері V_c зменшується від значення, що дорівнює об'єму бункера V при $Q_n = 0$, до деякого постійного значення при $Q_n \rightarrow \infty$.

При цьому в разі рівності середнього вантажопотоку, що поступає в бункер, і середнього вантажопотоку, що розвантажується з бункера, тобто при $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$, середній об'єм вантажу в бункері $V_c = V/2$.

На основі аналізу результатів досліджень отримано значення максимальної продуктивності живильника акумулюючого бункера, що працює в системі конвеєрного транспорту в некерованому режимі, яке визначається за формулою

$$Q_{\max} = \bar{m}_Q \frac{(\lambda_2 + \mu_2)}{\mu_2} \left[1 - \frac{\lambda_2 \bar{m}_Q}{\mu_2 (\lambda_2 + \mu_2) \rho V_{\min}} \right]^{-1}. \quad (20)$$

Крім того, в результаті аналізу встановлено, що чим ближче до місця надходження вантажу в систему конвеєрного транспорту розташований акумулюючий бункер, що працює в некерованому режимі, тим середній об'єм вантажу в бункері більше, а чим ближче акумулюючий бункер розташований до виходу із системи конвеєрного транспорту, тобто ближче до приствольового двору, тим середній об'єм вантажу в бункері менше.

В разі роботи акумулюючого бункера в керованому режимі процес його функціонування являє собою кусково-марковський процес, що складається з процесу завантаження при непрацюючому живильнику ($Q_n = 0$) і процесу розвантаження бункера при працюючому живильнику ($Q_n > 0$) (рис. 14). При цьому якщо припустити, що об'єм вантажу в бункері $V(t)$ є ергодичним випадковим процесом, то середній об'єм вантажу в бункері в цьому режимі роботи визначається з виразу

$$V_c = \frac{V_{31}t_3 + V_{32}t_p}{t_c} + \frac{\bar{m}_Q(t_3^2 + \sigma_3^2) - (\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)(t_p^2 + \sigma_p^2)}{2\gamma t_c}, \quad (21)$$

де $t_c = t_3 + t_p$ – загальний середній час циклу завантаження і розвантаження бункера, с; $t_3 = M[\zeta_3]$ і $t_p = M[\zeta_p]$ – середні часи завантаження і розвантаження бункера відповідно, с; ξ_c – час циклу завантаження і розвантаження бункера, с; ξ_3, ξ_p – час завантаження і розвантаження бункера відповідно, с; σ_3, σ_p – середні квадратичні відхилення часів завантаження і розвантаження бункера відповідно, с.

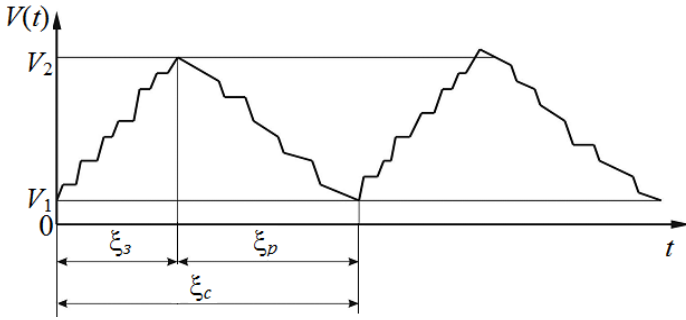


Рис. 14. Реалізація випадкового процесу зміни об'єму вантажу в бункері, що працює в керованому режимі

Для визначення середніх часів завантаження t_3 і розвантаження t_p акумулюючого бункера та їх середніх квадратичних відхилень σ_3 і σ_p в роботі на підставі методу Понтрягіна для марковських процесів з безперервним часом і двофазовим станом отримано системи рівнянь відносно середніх часів завантаження θ_{3i} і розвантаження бун-

кера θ_{pi} та їх середніх квадратичних відхилень σ_{3i} і σ_{pi} , які відповідають різним початковим станам надбункерного і підбункерного конвеєрів.

Для середніх часів завантаження і розвантаження бункера маємо

$$\begin{cases} q_1 \frac{d\theta_1}{dm} = 1 - (\lambda_1 + \lambda_2)\theta_1 + \lambda_1\theta_2 + \lambda_2\theta_3, \\ q_2 \frac{d\theta_2}{dm} = 1 + \mu_1\theta_1 - (\lambda_2 + \mu_1)\theta_2 + \lambda_2\theta_4, \\ q_3 \frac{d\theta_3}{dm} = 1 + \mu_2\theta_2 - (\lambda_1 + \mu_2)\theta_3 + \lambda_1\theta_4, \\ q_4 \frac{d\theta_4}{dm} = 1 + \mu_2\theta_2 + \mu_1\theta_3 - (\mu_1 + \mu_2)\theta_4, \end{cases} \quad (22)$$

де $q_1 = m_q - Q_n$; $q_2 = -Q_n$; $q_3 = m_q$; $q_4 = 0$.

В рівняннях (22) $\theta_i = \theta_{3i}$ при $Q_n = 0$; $\theta_i = \theta_{pi}$ при $Q_n > 0$.

Тут $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – середні часи заповнення заданої кількості вантажу в бункер, які відповідають в початковий момент часу першому, другому, третьому і четвертому станам надбункерного і підбункерного конвеєрів системи «конвеєр – бункер – конвеєр» відповідно; m – поточне значення кількості вантажу в бункері.

При цьому перший стан конвеєрних ліній цієї системи відповідає роботі надбункерного конвеєра і роботі підбункерного конвеєра; другий стан відповідає роботі надбункерного конвеєра і простою підбункерного конвеєра; третій стан відповідає постою надбункерного конвеєра і роботі підбункерного конвеєра; четвертий стан відповідає простою надбункерного конвеєра і простою підбункерного конвеєра.

Початкові умови для системи рівнянь (22) приймають вигляд: при $m = 0$ $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0$.

Для середніх квадратичних відхилень часів завантаження і розвантаження бункера маємо

$$\sigma_i = \sqrt{\alpha_i - \theta_i^2} \quad (i=1,2,\dots,4). \quad (23)$$

Тут α_i – початкові другі моменти часу завантаження і розвантаження бункера, що відповідають різним початковим станам надбункерного і підбункерного конвеєрів, які визначаються із системи рівнянь

$$\begin{cases} q_1 \frac{d\alpha_1}{dm} = 2\theta_1 - (\lambda_1 + \lambda_2)\alpha_1 + \lambda_1\alpha_2 + \lambda_2\alpha_3, \\ q_2 \frac{d\alpha_2}{dm} = 2\theta_2 + \mu_1\alpha_1 - (\lambda_2 + \mu_1)\alpha_2 + \lambda_2\alpha_4, \\ q_3 \frac{d\alpha_3}{dm} = 2\theta_3 + \mu_2\alpha_2 - (\lambda_1 + \mu_2)\alpha_3 + \lambda_1\alpha_4, \\ q_4 \frac{d\alpha_4}{dm} = 2\theta_4 + \mu_2\alpha_2 + \mu_1\alpha_3 - (\mu_1 + \mu_2)\alpha_4. \end{cases} \quad (24)$$

Для системи рівнянь (24) початкові умови мають вигляд: при $m=0$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$.

Визначаючи з цих рівнянь значення θ_{zi} і θ_{pi} для періодів завантаження та розвантаження акумулюючого бункера, обчислимо значення середніх часів завантаження t_3 і розвантаження t_p акумулюючого бункера як математичне сподівання величин θ_{zi} і θ_{pi} .

Проте отримання аналітичного розв'язку систем рівнянь (22) і (24) пов'язано з великими математичними труднощами.

Для отримання достатньо простого аналітичного виразу для визначення середнього об'єму вантажу в бункері V_c був розроблений наближений метод, заснований на синтезі розв'язку часткових задач визначення середніх часів завантаження та розвантаження акумулюючого бункера при різних станах надбункерного та підбункерного конвеєрів.

В результаті отримано наближену формулу, яка визначає середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері, що працює в керованому режимі:

$$V_c = \frac{V_{31}t_3 + V_{32}t_p}{t_c} + \frac{\bar{m}_Q t_3^2 - (Q_n - \bar{m}_Q)t_p^2}{2\rho t_c} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{Q_n}{\rho} \cdot \frac{t_p^2}{t_c}, \quad (25)$$

$$\text{де } t_3 = \frac{\rho(V_{32} - V_{31})}{\bar{m}_Q} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)\mu_1}; \quad t_p = \frac{\rho(V_{32} - V_{31})}{Q_n - \bar{m}_Q} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)\mu_1} \cdot \frac{Q_n \bar{m}_Q}{(Q_n - \bar{m}_Q)(Q_n - \bar{m}_Q)}.$$

На рисунку 15 показано графіки залежності середнього об'єму вантажу в бункері V_c від продуктивності живильника Q_n при різних значеннях інтенсивності простоїв надбункерної конвеєрної лінії: 1 – $\lambda_1 = 0,025$; 2 – $\lambda_1 = 0,05$; 3 –

$\lambda_1 = 0,1 \text{ хв}^{-1}$. При цьому вхідні дані приймали значення: $m_Q = 3,7 \text{ т/хв}$; $V_{31} = 4 \text{ м}^3$; $V_{32} = 100 \text{ м}^3$; $\mu_1 = 0,06139 \text{ хв}^{-1}$; $\lambda_2 = 0,017 \text{ хв}^{-1}$; $\mu_2 = 0,069 \text{ хв}^{-1}$.

Там же показано результати імітаційного моделювання при тих же значеннях λ_1 : $\bullet - \lambda_1 = 0,025 \text{ хв}^{-1}$; $\blacktriangle - \lambda_1 = 0,05 \text{ хв}^{-1}$; $\blacklozenge - \lambda_1 = 0,1 \text{ хв}^{-1}$.

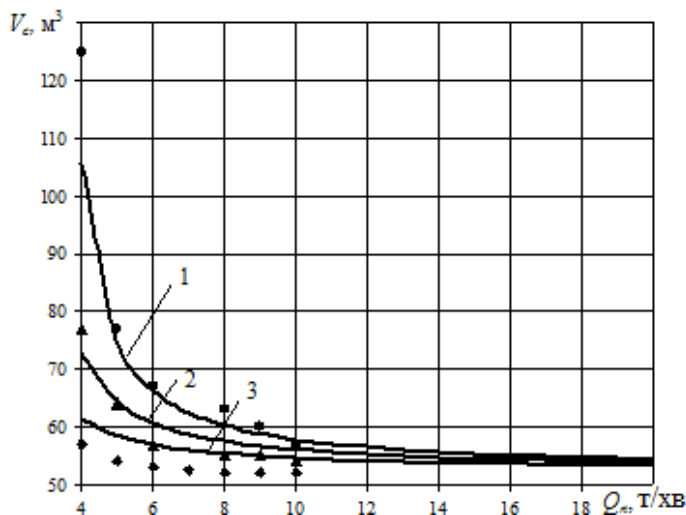


Рис. 15. Графік залежності V_c від Q_n при різних значеннях λ_1

Із рис. 15 видно, що середній об'єм акумулюючого бункера V_c із збільшенням продуктивності живильника Q_n зменшується за параболічним законом і при $Q_n \rightarrow \infty$ асимптотично прямує приблизно до півсуми мінімального V_{31} і максимального V_{32} заданих об'ємів вантажу в бункері, тобто $V_c \rightarrow (V_{31} + V_{32})/2 = 52 \text{ м}^3$.

Дослідження показали, що середній об'єм вантажу в бункері V_c із збільшенням інтенсивності простоїв надбункерного конвеєра λ_1 зменшується, а із збільшенням інтенсивності

простоїв підбункерного конвеєра λ_2 – збільшується. При цьому із збільшенням максимального заданого об'єму вантажу в бункері V_{32} середній об'єм вантажу в бункері V_c також збільшується.

Крім того, було отримано аналітичні вирази для визначення середнього об'єму вантажу в бункері, що працює в керованому режимі, у разі двохшвидкісного живильника, а також у разі завантаження бункера двома паралельними конвеєрами при тому ж режимі роботи бункера.

При цьому встановлено, що у разі двохшвидкісного живильника із збільшенням продуктивності другого живильника Q_{n2} середній об'єм вантажу в бункері V_c зменшується і надалі із збільшенням Q_{n2} незалежно від продуктивності першого живильника Q_{n1} ($Q_{n1} < Q_{n2}$) прямує приблизно до півсуми заданих максимального V_{32} і мінімального V_{31} об'ємів вантажу в бункері, тобто до $(V_{32} + V_{31})/2$. При цьому із збільшенням меншої продуктивності живильника Q_{n1} середній об'єм вантажу в бункері V_c практично не змінюється.

Результати теоретичних досліджень відрізняються від результатів імітаційних досліджень не більше ніж на 5 %.

В п'ятому розділі дано загальну схему управління системою конвеєрного транспорту, а також методи та способи підвищення енергетичної ефективності її функціонування.

При цьому поставлено й вирішено задачі оптимального і адаптивного управління системою конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою.

Через складність систем конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою здійснити управління ними можливо лише при ієрархічній структурі управління.

На верхньому рівні управління вирішується задача автоматизованого управління конвеєрними лініями, тобто управління здійснюється з участю людини-оператора у діалоговому режимі. При цьому, як правило, за допомогою перемикачів вантажопотоку міняється конфігурація конвеєрного транспорту, тобто змінюється його структура.

На нижніх рівнях управління вирішується задача управління бункерами, швидкостями конвеєра і живильника.

При цьому інформація про значення параметрів функціонування системи конвеєрного транспорту, яка необхідна для управління на нижньому рівні, поступає з верхнього рівня управління.

Основною задачею управління конвеєрним транспортом на верхньому рівні управління є забезпечення його максимальної пропускної здатності при мінімальних енерговитратах на транспортування вантажу.

Задача управління системою конвеєрного транспорту є задачею оптимального управління складною системою й відноситься до системного аналізу.

Одним із шляхів вирішення цієї задачі являється управління вантажопотоками за допомогою акумулюючих бункерів і регулювання швидкості стрічки конвеєрів із використанням контролерів і частотних перетворювачів.

На верхньому рівні управління конвеєрним транспортом з розгалуженою структурою через складність умов експлуатації та велику кількість вхідних даних дуже важко отримати достовірну інформацію про змінні зовнішні умови та параметри, що характеризують стан системи транспорту в кожний момент часу.

Тому для підвищення ефективності роботи системи конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою в складних умовах експлуатації необхідно передбачити її адаптивне управління, яке дозволить у разі зміни структури системи, величин вантажопотоків, що надходять до системи транспорту, простоїв конвеєрів через різні причини відповідно змінити швидкості конвеєрів і живильників, а також регулювати кількість вантажу в акумулюючих бункерах так, щоб критерій ефективності функціонування системи конвеєрного транспорту був би оптимальним.

Як наголошувалося вище, одним з методів зниження енерговитрат при транспортуванні вантажу є зменшення швидкості стрічки конвеєра при зменшенні величини вантажопотоку, що надходить до системи конвеєрного транспорту, тобто управління погонним навантаженням конвеєра за рахунок регулювання швидкості руху стрічки за допомогою частотно-керованого приводу.

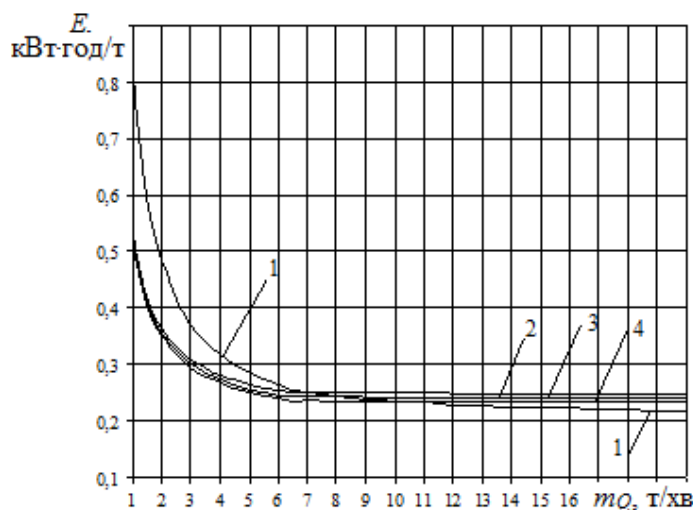
При цьому методом оптимальним управлінням швидкістю стрічки конвеєра з погляду енерговитрат буде таке управління, при якому швидкість стрічки буде мінімальною, а погонне навантаження на конвеєрі підтримуватиметься максимальним:

$$q_{\Gamma} = q_{\Gamma \max} = \text{const.} \quad (26)$$

Дослідження показали, що втрати електроенергії при частотному регулюванні швидкості стрічки конвеєра у разі зменшення в два рази величини ванта-

жопотоку, що поступає на конвеєр, знижуються на 30 % в порівнянні з нерегульованою швидкістю конвеєра

На рисунку 16 показано графіки залежності питомої енергоємності E системи «бункер – конвеєр – бункер» з акумулюючим бункером, що працює в некерованому режимі, від середнього вантажопотоку m_c , який поступає на надбункерний конвеєр, при різних значеннях максимальної приймальної здатності надбункерного конвеєра $Q_{m1} = 5; 6; 7$ т/хв. При цьому продуктивність живильника $Q_n = 6$ т/хв.



1 – незмінна швидкість стрічки надбункерного і підбункерного конвеєрів;
2, 3, 4 – при управлінні швидкістю надбункерного конвеєра

Рис. 16. Графіки залежності E від середньої величини вантажопотоку m_Q

Дослідження показали, що питома енергоємність E системи «конвеєр – бункер – конвеєр» при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ у разі регулювання швидкості підбункерного конвеєра в середньому на 30 % менша за енергоємність E цієї ж системи у разі нерегульованої швидкості стрічки підбункерного конвеєра.

Як було сказано раніше, акумулюючі бункери можуть використовуватись для управління вантажопотоками, що дозволить зменшити простої та енергетичні втрати в системі конвеєрного транспорту. Для цього необхідно управляти кількістю вантажу в бункері за допомогою живильника, тобто за допо-

могою включення і виключення живильника підтримувати мінімальний середній об'єм вантажу в бункері залежно від величини вантажопотоку, що надходить в бункер. Такий режим роботи акумулюючого бункера, тобто керований режим, було розглянуто вище.

На основі результатів досліджень процесів функціонування акумулюючого бункера, що працює в керованому, було вирішено задачу і розроблено алгоритм оптимального і адаптивного управління акумулюючим бункером. При цьому за критерій ефективності управління приймався мінімальний середній об'єм вантажу в бункері $V_{c_{\min}}$, який дорівнює

$$V_{c_{\min}} = \frac{V_{31} + V_{32}}{2} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)\mu_1} \cdot \frac{\bar{m}_Q}{2\rho}. \quad (27)$$

Проте оптимальне та адаптивне управління кожним акумулюючим бункером ще не є достатнім для суттєвого підвищення ефективності роботи системи конвеєрного транспорту. Для цього необхідно погоджувати управління кожним бункером з управлінням всією системою конвеєрного транспорту. При цьому повинна забезпечуватися максимальна ефективність роботи системи конвеєрного транспорту, тобто ця система управління повинна забезпечувати

максимальну пропускну здатність і мінімальні витрати електроенергії на транспортування вантажу.

Класичні методи розв'язку поставленої задачі оптимального управління у разі розгалуженої та складної структури системи конвеєрного транспорту з кількістю бункерів і конвеєрів $n > 5$ призводять до громіздких обчислювальних процесів і на практиці застосовуватися не можуть.

В цьому випадку задачу оптимального управління системою конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою на верхньому рівні можна представити як дворівневу ієрархічну систему оптимального управління (рис. 17).

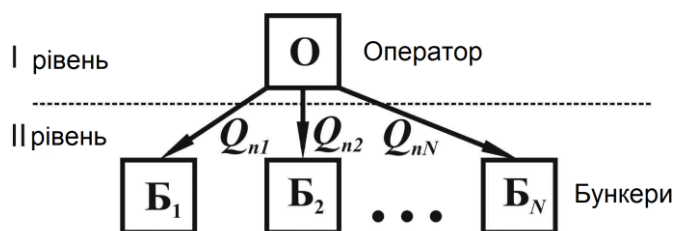


Рис. 17. Структурна схема управління системою конвеєрного транспорту з бункерами

На першому I рівні цієї системи оптимального управління системою конвеєрного транспорту, виходячи з поточної інформації про величини вантажопотоків m_{Q_i} , що надходять до системи транспорту, про стан конвеєрів і технологічного обладнання системи конвеєрного транспорту, вирішується

задача структурного синтезу, тобто вибирається схема конвеєрного транспорту, при якій середня пропускну здатність системи m_c набуває максимального значення. При цьому передбачається, що всі акумулюючі бункери працюють в некерованому режимі. Потім на першому I рівні вирішується задача параметричного синтезу. При цьому вибираються різні альтернативи параметрів системи конвеєрного транспорту, тобто різні швидкості конвеєра v_{λ_i} і продуктивності живильників Q_{n_i} .

Потім цю інформацію, тобто значення v_{λ_i} і Q_{n_i} , передають на другий II рівень оптимального управління системою конвеєрного транспорту, тобто на рівень управління бункерами за допомогою контролерів, які визначають максимальні задані об'єми вантажу в акумулюючих бункерах V_{2_i} .

Вхідними змінними цієї системи оптимального управління конвеєрним транспортом є середні значення вантажопотоків m_{Q_i} , що надходять до системи транспорту.

Вихідними змінними системи оптимального управління є середнє значення пропускну здатності m_c і середнє значення енергоємності транспортування w_c системи конвеєрного транспорту.

Законом управління системою конвеєрного транспорту є залежність m_c і w_c від вхідних фазових і керованих параметрів, а також від параметрів конвеєрів, об'ємів акумулюючих бункерів і швидкостей живильників (див. формули (9)–(13), (18) (19)):

$$m_c = f_m(m_{Q_i}, \lambda_i, \mu_i, Q_{n_i}, V_i, V_{1_i}, V_{2_i}); \quad (28)$$

$$w_c = f_w(m_{Q_i}, \lambda_i, \mu_i, Q_{n_i}, V_i, V_{1_i}, V_{2_i}, N_i), \quad (29)$$

де λ_i, μ_i – інтенсивності простоїв і відновлень конвеєрів, хв^{-1} ; V_i – об'єми акумулюючих бункерів, м^3 ; N_i – потужності, що споживаються приводами конвеєрів, кВт.

Глобальною функцією цілі, тобто критерієм ефективності цієї дворівневої системи оптимального управління конвеєрним транспортом, є питома енергоємність транспортування, тобто комплексна величина K , яка визначається за формулою (14):

$$K = E \rightarrow \min. \quad (30)$$

Крім того, локальними функціями цілі в цій задачі є середні об'єми вантажу в акумулюючих бункерах, які повинні приймати мінімальні значення $V_{i_{\min}}$:

$$V_{c_i} \rightarrow V_{i_{\min}} = \frac{V_{1_i} + V_{2_i}}{2} + \frac{\lambda_{c_i}}{(\lambda_{c_i} + \mu_{c_i})\mu_{c_i}} \cdot \frac{m_i^{(s)}}{2\rho} \quad (i=1,2,\dots,n), \quad (31)$$

де λ_{c_i}, μ_{c_i} – еквівалентні значення інтенсивностей простоїв і відновлень надбункерних конвеєрних ліній, хв^{-1} ; $m_i^{(s)}$ – середні значення вантажопотоків, що поступають в керовані акумулюючі бункери, т/хв ; n – кількість керованих акумулюючих бункерів в системі конвеєрного транспорту.

Обмеженнями в цій задачі оптимального управління є:

- обмеження по продуктивності живильників;
- обмеження на об'єми вантажу в акумулюючих бункерах.

В задаче оптимального управління системою конвеєрного транспорту для управління об'ємом вантажу в бункері за допомогою контролера необхідно знати величини середніх вантажопотоків, що поступають до акумулюючих бункерів $m_i^{(s)}$ і розвантажуються з них \bar{Q}_{n_i} . Проте через простої конвеєрного обладнання і нерівномірності вантажопотоків, що поступають в систему транспорту, визначити їх значення теоретично неможливо, а практичне їх визначення за допомогою терезів вимагає величезних матеріальних витрат. Тому для управління акумулюючими бункерами системи конвеєрного транспорту застосовується адаптивне управління.

В цьому випадку для визначення середнього вантажопотоку $m_i^{(s)}$, що поступає до i -го бункера, і середнього значення вантажопотоку на виході з i -го бункера \bar{Q}'_{n_i} спочатку за допомогою датчиків часу визначаються поточні часи k -го циклу завантаження T_{3k} і розвантаження T_{pk} в i -му акумулюючому бункері, що працює в системі конвеєрного транспорту.

В результаті $m_i^{(s)}$ і \bar{Q}'_{n_i} визначаються за формулами:

$$\bar{m}_i^{(s)} = \frac{\sqrt{(\mu_{c_i} T_{3_i} - 1)^2 m_{\varepsilon_i}^2 + 4\rho(V_{2_i}^{(0)} - V_{1_i})\mu_{c_i} m_{\varepsilon_i}} - (\mu_{c_i} T_{3_i} - 1)m_{\varepsilon_i}}{2} \quad (i = 1, 2, \dots, n); \quad (32)$$

$$\bar{Q}'_{n_i} = \bar{m}_i^{(s)} + \frac{\rho(V_{2_i}^{(0)} - V_{1_i}) + \frac{1}{\mu_{c_i}} \left(1 - \frac{\bar{m}_i^{(s)}}{m_{\varepsilon_i}}\right) \cdot \frac{Q_{n_i} \bar{m}_i^{(s)}}{(Q_{n_i} - \bar{m}_i^{(s)})}}{T_{p_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (33)$$

де $V_{2_i}^{(0)}$ – значення початкових максимальних об'ємів вантажу в акумулюючих бункерах.

Тут $m_{\varepsilon_i} = m_Q$ для послідовного з'єднання бункерів; $m_{\varepsilon_i} = m_{Q_i}$ для паралельного з'єднання бункерів; $m_{\varepsilon_i} = \sum_{k=1}^i m_{Q_k}$ для системи конвеєрного транспорту із самоподібною деревовидною структурою.

Максимальні значення заданих об'ємів вантажу в акумулюючих бункерах, що працюють в керованому режимі, при яких середні об'єми вантажу в бункерах V_{c_i} приймають мінімальні значення $V_{i_{\min}}$, визначаються із системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{V_{1_i} \bar{t}_{3_i} + V_{2_i}^* \bar{t}_{p_i}}{\bar{t}_{3_i} + \bar{t}_{p_i}} + \frac{\bar{m}_i^{(s)} \bar{t}_{3_i}^2 - (Q_{n_i} - \bar{m}_i^{(s)}) \bar{t}_{p_i}^2}{2\rho(\bar{t}_{3_i} + \bar{t}_{p_i})} + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}'_{n_i})}{\rho} \frac{\bar{t}_{3_i}^2}{\bar{t}_{3_i} + \bar{t}_{p_i}} = \\ = \frac{V_{1_i} + V_{2_i}^*}{2} + \left(1 - \frac{\bar{m}_i^{(s)}}{m_{\varepsilon_i}}\right) \cdot \frac{1}{\mu_{c_i}} \cdot \frac{\bar{m}_i^{(s)}}{2\rho} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (34)$$

де

$$\bar{t}_{3_i} = \frac{\rho(V_{2_i}^* - V_{1_i})}{\bar{m}_i^{(s)}} + \frac{1}{\mu_{c_i}} \left(1 - \frac{\bar{m}_i^{(s)}}{m_{\varepsilon_i}}\right); \quad \bar{t}_{p_i} = \frac{\rho(V_{2_i}^* - V_{1_i})}{(\bar{Q}'_{n_i} - \bar{m}_i^{(s)})} + \frac{1}{\mu_{c_i}} \left(1 - \frac{\bar{m}_i^{(s)}}{m_{\varepsilon_i}}\right) \cdot \frac{Q_{n_i} \bar{m}_i^{(s)}}{(\bar{Q}'_{n_i} - \bar{m}_i^{(s)})(Q_{n_i} - \bar{m}_i^{(s)})}.$$

При імітаційному моделюванні використовувався пакет Anylogic Free Release, а отримані алгоритми оптимального й адаптивного управління реалізовано на алгоритмічному язиці Паскаль в системі програмування Delphi.

На основі отриманих рішень задач оптимального й адаптивного управління системою конвеєрного транспорту було розроблено «Методику визначення пропускної здатності, енергоємності транспортування, структури алгоритмів і параметрів адаптивного управління системою конвеєрного транспорту», яку передано до Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» МОН України та Національної металургійної академії України МОН України (2017 р.).

Використання цієї методики в промисловості дозволить за рахунок управління об'ємами вантажу в акумулюючих бункерах і швидкістю живильників з використанням контролерів і частотних перетворювачів підвищити пропускну здатність систем конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою до 50 % і знизити енерговитрати на транспортування гірської маси до 30 %.

ВИСНОВОК

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій дано рішення актуальної наукової проблеми розробки математичних моделей процесів функціонування систем конвеєрного транспорту зі складною розгалуженою структурою з акумулюючими бункерами з урахуванням імовірнісного характеру простоїв конвеєрного обладнання і визначення показників ефективності сис-

тем транспорту і на підставі цього створення методів оптимального та адаптивного управління, що підвищують ефективність їх роботи.

Основні наукові і практичні результати роботи зводяться до наступного:

1. Аналіз роботи систем конвеєрного транспорту показав, що через розгалуженість їх структури та простої конвеєрного обладнання їх пропускна здатність низька, а через нерівномірність вантажопотоків, що надходять до системи транспорту, енерговитрати на транспортування вантажу високі.

Крім того, системи конвеєрного транспорту з розгалуженою структурою через повторення технологічного процесу транспортування вантажу мають самоподібну структуру, що змінюється, у вигляді деревовидного графа.

2. На основі теорії марковських процесів з використанням методу динаміки середніх для систем конвеєрного транспорту з послідовним, паралельним з'єднанням конвеєрів та із самоподібною деревовидною структурою без бункерів було розроблено математичні моделі і методи визначення їх пропускної здатності й енергоємності транспортування в припущенні, що інтенсивності простоїв конвеєрів на порядок менше за їх інтенсивності відновлень. При цьому результати імітаційного моделювання, проведеного для різних випадків поєднання нормального й експоненціального законів розподілу інтервалів часу простоїв і відновлень конвеєрів, відрізняються від результатів, отриманих на основі розроблених методів, не більше ніж на 3 %.

3. На основі теорії марковських процесів розроблено математичні моделі, які описують процес функціонування системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючими бункером, що працюють в некерованому режимі та в режимі підтримки в ньому об'єму вантажу в заданих межах, тобто у керованому режимі.

При цьому встановлено, що середня пропускна здатність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» за будь-яких співвідношеннях середніх вантажопотоків, що надходить в бункер \bar{m}_Q і розвантажується з нього \bar{Q}_n , зі збільшенням об'єму акумулюючого бункера або об'єму незаповненої вантажем частини акумулюючого бункера спочатку збільшується і потім асимптотично прямує до постійного значення, що дорівнює \bar{Q}_n при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ і \bar{m}_Q при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$. Крім того, пропускна здатність із збільшенням \bar{Q}_n при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ збільшується, а при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ практично не змінюється.

4. Визначено максимальний об'єм акумулюючого бункера, що працює в системі конвеєрного транспорту, більше за який пропускна здатність бункера не збільшується. При цьому максимальний об'єм акумулюючого бункера прямо пропорційний середньому вантажопотоку, що надходить в бункер, залежить від інтенсивностей простоїв і відновлень підбункерного конвеєра і не залежить від продуктивності живильника.

5. На основі методу динаміки середніх для марковських процесів та отриманих залежностей середньої пропускної здатності системи «конвеєр – бункер – конвеєр» від величини середніх вантажопотоків, що надходить до акумулюючого бункера і розвантажується з нього, було розроблено методи визначення пропускної здатності та енергоємності транспортування і показник енер-

гетичної ефективності систем конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням акумулюючих бункерів, а також із самоподібною деревовидною структурою з акумулюючими бункерами, що працюють в некерованому та керованому режимах.

При цьому результати теоретичних досліджень відрізняються від експлуатаційного даних не більше ніж на 10 %.

6. Питома енергоємність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» незалежно від режиму роботи акумулюючого бункера при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ із збільшенням вантажопотоку m_Q , що поступає на надбункерний конвеєр, зменшується за гіперболічним законом, практично не залежить від продуктивності живильника Q_n , об'єму бункера V або об'єму незаповненої вантажем частини бункера ΔV , а при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ питома енергоємність із збільшенням m_Q приймає постійне мінімальне значення, із збільшенням продуктивності живильника Q_n зменшується і не залежить від об'єму бункера V або об'єму незаповненої вантажем частини бункера ΔV .

7. На основі розроблених математичних моделей процесу функціонування акумулюючих бункерів, які працюють в системі конвеєрного транспорту в некерованому режимі, визначено залежності середнього об'єму вантажу в акумулюючому бункері від середніх вантажопотоків, що надходить в бункер і розвантажується з нього, продуктивності живильника, а також об'єму бункера.

При цьому встановлено, що середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері при зміні продуктивності живильника від нуля до нескінченності зменшується від максимального допустимого значення об'єму вантажу в бункері до деякого постійного значення і при рівності середніх вантажопотоків, що надходить в бункер і розвантажується з нього, приблизно дорівнює половині максимального допустимого значення об'єму вантажу в бункері.

8. На основі методу Понтрягіна для марковських процесів розроблено математичну модель функціонування акумулюючого бункера, що працює в режимі підтримки в ньому об'єму вантажу в заданих межах. При цьому отримано системи рівнянь відносно середніх і дисперсій часів заповнення і розвантаження акумулюючого бункера для одношвидкісного і двохшвидкісного живильників.

Встановлено, що зі збільшенням продуктивності живильника середній об'єм вантажу в акумулюючому бункері спочатку зменшується за гіперболічним законом і при подальшому збільшенні продуктивності живильника асимптотично прямує приблизно до півсуми заданих максимального і мінімального об'ємів вантажу в бункері.

9. При регулюванні швидкості стрічки конвеєра при постійному максимальному погонному навантаженні на стрічці в разі зменшення в два рази величини вантажопотоку, що надходить на конвеєр, втрати електроенергії при регулюванні швидкості стрічки конвеєра зменшуються на 30 % в порівнянні з втратами при нерегульованій швидкості стрічки. При цьому в разі регулювання швидкості стрічки конвеєра питома енергоємність стрічкового конвеєра набуває постійного мінімального значення, яке не залежить від величини вантажопотоку, що надходить на конвеєр.

10. Поставлено і вирішено задачі та розроблено структури алгоритмів оптимального й адаптивного управління акумулюючим бункером, що працює в системі конвеєрного транспорту в керованому режимі. При цьому за критерій ефективності управління приймався середній об'єм вантажу в бункері, а параметром управління був максимальний заданий об'єм вантажу в бункері.

11. Поставлено і вирішено задачі та розроблено структури алгоритмів оптимального й адаптивного управління системою конвеєрного транспорту з акумулюючими бункерами. Оптимальне та адаптивне управління системою конвеєрного транспорту являють собою задачу управління дворівневою ієрархічною системою, яка дозволяє при зміні структури системи конвеєрного транспорту і величин вантажопотоків, що надходять до системи транспорту, за допомогою вибору швидкостей конвеєрів і живильників, а також максимальних заданих об'ємів вантажу в акумулюючих бункерах забезпечити максимальну пропускну здатність і мінімальну питому енергоємність системи конвеєрного транспорту. При цьому глобальною функцією цілі є мінімальне значення питомої енергоємності системи конвеєрного транспорту, а локальними критеріями ефективності управління є мінімальні середні об'єми вантажу в акумулюючих бункерах.

12. Розроблено «Методику визначення пропускну здатності, енергоємності транспортування, структури алгоритмів і параметрів адаптивного управління системою конвеєрного транспорту», яку передано до Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» МОН України та Національної металургійної академії України МОН України (2017 р.).

Застосування розробленої методики в промисловості дозволить за допомогою контролерів і частотного управління електроприводами конвеєрів і живильників збільшити пропускну здатність системи конвеєрного транспорту до 50% і зменшити енерговитрати на транспортування вантажу до 30 %.

Розроблено:

- «Рекомендації щодо визначення критеріїв ефективності, параметрів і вибору структури алгоритмів адаптивного управління, а також засобів регулювання швидкості приводу стрічкових конвеєрів» і передано ДВАТ «проектний інститут Дніпрогірпрошахт» (2010 р.);

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи системи підземного конвеєрного транспорту» ш/у «Луганське» ДП «Луганськвугілля» (2011 р.);

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту шахти «Мащенська» ш/у «Луганське» і передано ДП «Луганськвугілля» (2011 р.), очікуваний річний економічний ефект становить 400 тис. грн;

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту на шахті «Алмазна» ш/у «Добропольское» і передано ПСП ШУ «Добропольское» ТОВ «ДТЕК Добропіллявугілля» (2015 р.);

- «Рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем конвеєрного транспорту на шахтах ДП «Красноармійськвугілля» (2016 р.).

Результати роботи можуть бути використаними в гірничодобувній, металургійній та будівельній галузях промисловості.

ОСНОВНИ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОФОРМЛЕНІ В ТАКИХ РОБОТАХ

Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Методика определения показателей качества ленточных конвейеров для условий их эксплуатации в АК «АЛРОСА» / В. Ф. Монастырский, В. С. Воронцов, В. Ю. Максютенко, Р. В. Кирия [и др.] // Горный журнал. – 2011. – №12. – С. 67–70. МНБ: Scopus, РИНЦ.
2. Крутонаклонные конвейеры для транспортирования крупнокусковых грузов в горнодобывающей промышленности / В. Ф. Монастырский, Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец, Д. А. Номеровский // Горный журнал. – 2013. – №12. – С. 78–81. МНБ: Scopus, РИНЦ.
3. Монастырский В. Ф. Адаптивное управление подземным конвейерным транспортом с бункерами / В. Ф. Монастырский, Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. Н. Амосова. – Россия, Якутск, 2013. – Том 10, №5. – С. 50–52. МНБ: РИНЦ.
4. Larionov G. On parameters influence evaluating method application in some geotechnical tasks / G. Larionov, R. Kirija, D. Braginet // Mining of mineral deposits. Annual scientific-technical collection. – Netherlands: CRC Press / Balkema, 2013. – P. 247–255. МНБ: Scopus.
5. Кирия Р. В. Определение критерия эффективности системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт в режиме поддержания заданного уровня груза в аккумулирующих бункерах / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1'(90). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 135–145. МНБ: Index Copernicus.
6. Кирия Р. В. Математические модели функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2'(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 74–86. МНБ: Index Copernicus.
7. Критерии выбора крутонаклонных конвейеров / В. Ф. Монастырский, Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец, Д. А. Номеровский // Горный журнал. – Россия, Москва, 2014. – №1. – С. 27–30. МНБ: Scopus, РИНЦ.
8. Кирия Р. В. Алгоритм управления системой подземного конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (99). – Дніпропетровськ, 2015. – С. 10–22. МНБ: Index Copernicus.
9. Кирия Р. В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера в режиме поддержания заданного объема груза в случае двухскоростного питателя / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (103). – Дніпропетровськ, 2016. – С. 106–115. МНБ: Index Copernicus.
10. Kiriya R. V. Modeling of functioning processes of underground conveyor transport of coal mines with controlled accumulative hoppers / R. V. Kiriya,

J. V. Babenko // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6 (107). – Дніпро, 2016 – С. 88–97. МНБ: Index Copernicus.

Статті у наукових фахових виданнях:

11. Кирия Р. В. Минимальный объем аккумулирующего бункера / Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 69. – С. 43–50.

12. Снижение энергозатрат при транспортировании насыпных грузов с помощью управления скоростью ленты конвейера / В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко, Р. В. Кирия, И. А. Бужинский // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2007. – №10. – С. 35–37.

13. Кирия Р. В. Увеличение пропускной способности конвейерных линий при использовании аккумулирующих бункеров / Р. В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 68. – С. 158–166.

14. Кирия Р. В. Имитационные модели функционирования усредняющих и аккумулирующих бункеров конвейерных линий угольных шахт / Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец, Т. Ф. Мищенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 77. – С. 100–109.

15. Кирия Р. В. Применение фракталов к определению пропускной способности систем конвейерного транспорта горных предприятий / Р. В. Кирия // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2(67). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 167–174.

16. Монастырский В. Ф. Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях / В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко, Р. В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 88. – С. 185–191.

17. Методология адаптивного управления конвейерным транспортом / В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко, Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010 – Вып. 91. – С. 245–254.

18. Кирия Р.В. Математическая модель функционирования усредняющего бункера в условиях угольных шахт / Р.В. Кирия // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4(75). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 159–168.

19. Кирия Р. В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера конвейерных линий угольных шахт / Р. В. Кирия // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2(79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 152–161.

20. Кирия Р. В. Управление бункерами, работающими в системах конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, В. Ю. Максютенко, Д. Д. Брагинец // Збірник наукових праць НГУ. – № 37. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 230–236.

21. Разработка быстрого алгоритма определения пропускной способности системы «конвейер – бункер – конвейер» / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Л. В. Камкина, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1'(84). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 147–155.

22. Кирия Р. В. Определение пропускной способности подземного конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2013. – №42. – С. 85–94.

23. Кирия Р. В. Определение критерия эффективности функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – №16. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 13–21.

24. Кирия Р. В. Повышение эффективности функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, В. Ф. Монастырский, Т. Ф. Мищенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 131. – С. 183–201.

25. Кирия Р. В. Математическое моделирование процессов функционирования систем конвейерного транспорта самоподобной структуры / Р. В. Кирия, А. И. Михалев // Системные технологии моделирования сложных систем: Монография под общей редакцией проф. А. И. Михалева. – Днепр: НМетАУ-ИВК «Системные технологии», 2016. – С. 328–348.

26. Кирия Р. В. Определение среднего объема груза в аккумулирующем бункере, работающем в системе подземного конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, Ю. В. Бабенко, Т. Ф. Мищенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (109). – Дніпро, 2017. – С. 3–13.

27. Кирия Р. В. Применение метода Понтрягина при определении среднего объема груза в аккумулирующем бункере, работающем в режиме поддержания в нем объема груза в заданных пределах / Р. В. Кирия // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (111). – Дніпро, 2017. – С. 105–120.

Статті в закордонних виданнях:

28. Kiriya R. Optimal control of underground conveyor transport system in coal mines / R. Kiriya // Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Control. Annual proceeding. – Netherlands: CRC Press / Balkema, 2016. – P. 217–223.

Матеріали наукових конференцій:

29. Кирия Р. В. Моделирование функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции, 10–15 сентября. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 113–114.

30. Кирия Р. В. Моделирование процессов функционирования усредняющих и аккумулирующих бункеров конвейерных линий угольных шахт / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Д. Д. Брагинец // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции, 8–12 сентября. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 99–100.

31. Кирия Р.В. Применение фракталов при определении пропускной способности систем конвейерных линий / Р.В. Кирия // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции, 7–12 сентября 2009 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – С. 127–129.

32. Кирия Р.В. Адаптивное управление конвейерными линиями горных предприятий / Р.В. Кирия, В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко // Форум гірників – 2011: Матеріали міжнародної конференції, 12–15 жовтня. – Дніпропетровськ: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2011. – С. 87–94.

33. Кирия Р. В. Применение генетического алгоритма при оптимизации процесса управления горнотранспортными системами / Р. В. Кирия, А. И. Михалев, Ю. В. Бабенко // Теорія прийняття рішень: Праці VI міжнародної школи-семінару, 1–6 жовтня 2012 р. – Ужгород: УжНУ, 2012. – С. 140.

34. Кирия Р. В. Применение метода Ховарда при моделировании функционирования аккумулирующих бункеров в системах конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, В. Ю. Максютенко, Т. Ф. Мищенко // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы Международной научно-технической конференции, 3–7 сентября. – Севастополь, СевНТУ, 2012. – С. 85–88.

35. Бабенко Ю. В. Проблемы оптимального управления конвейерными ГТС различной структуры / Ю. В. Бабенко, Р. В. Кирия, А. И. Михалев // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції, 20–22 листопада 2013 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2013. – С. 7–8.

36. Кирия Р. В. Математическая модель функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции, 9–13 вересня. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 111–114.

37. Бабенко Ю. В. Моделирование и оптимизация параметров аккумулирующих бункеров систем подземного конвейерного транспорта / Ю. В. Бабенко, Р. В. Кирия, А. И. Михалев // Теорія прийняття рішень: Праці VII міжнародної школи-семінару, 29 вересня – 4 жовтня 2014 р. – Ужгород: УжНУ, 2014. – С. 25.

Патенти:

38. Патент на корисну модель № 67202 UA, МПК В65G 65/30 (2006.01). Спосіб управління бункерами, що працюють у системах конвеєрного транспорту вугільних шахт / В. Ю. Максютенко, Р. В. Кірія, Д. Д. Брагінець, А. М. Смірнов, О. Л. Кравчук, Р. В. Касандін, С. В. Уколов; заявник і патенто-власник Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – u 2011 08134; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. №3. – 4 с.

39. Патент на винахід № 102910 UA, МПК В65G 65/30 (2006.01). Спосіб управління завантаженням і розвантаженням бункера насипним матеріалом / В. Ф. Монастирський, В. Ю. Максютенко, Р. В. Кірія, Д. Д. Брагінець, Б. І. Мостовий, А. М. Смірнов; заявник і патентовласник Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – а 2012 00330; заявл. 11.01.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. №16 – 4 с.

40. Патент на винахід № 113708 C2 UA, МПК (2016.01) В65G 65/30 (2006.01) G05D 9/00. Спосіб управління завантаженням та розвантаженням паралельно встановлених бункерів насипним матеріалом / В. Ф. Монастирський, Р. В. Кірія, Д. А. Номеровський, Б. І. Мостовий, А. М. Смірнов; заявник і патентовласник Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – а 2016 03109; заявл. 25.03.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. №4. – 4 с.

41. Патент на корисну модель № 119593 UA, МПК В65G 65/30 (2006.01). Спосіб адаптивного управління шахтним конвеєрним транспортом / Р. В. Кірія, А. М. Смірнов, В. Ф. Монастирський, Б. І. Мостовий; заявник і патентовласник Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – u 2017 04394; заявл. 03.05.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. №18. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Кірія Р. В. Моделювання процесів функціонування систем конвеєрного транспорту зі складною структурою і методи підвищення їх ефективності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, 2018.

Дисертаційна робота присвячена актуальній науково-технічній проблемі моделювання процесів функціонування систем конвеєрного транспорту **зі** складною розгалуженою структурою без бункерів і **з** акумулюючими бункерами, що працюють в різних режимах, і на підставі цього розробці методів підвищення ефективності їх роботи за рахунок оптимального управління бункерами і живильниками.

На основі теорії марковських процесів розроблено математичні моделі найпростішої системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючим бункером, що працює в некерованому режимі та в режимі підтримки в ньому об'єму вантажу в заданих межах, тобто в керованому режимі.

З використанням методу динаміки середніх для марковських процесів для систем конвеєрного транспорту з послідовним, паралельним з'єднанням конвеєрів та із самоподібною структурою без бункерів і з бункерами отримано рекурентні залежності, що визначають середню пропускну здатність, середню енергоємність транспортування та середню питому енергоємність системи транспорту.

Із використанням методу Понтрягіна отримано системи рівнянь для середніх і дисперсій часів завантаження і розвантаження акумулюючого бункера,

який працює в некерованому та керованому режимах, що дозволило визначити середній об'єм вантажу в бункері.

Вирішено задачі та отримано алгоритми оптимального та адаптивного управління системою конвеєрного транспорту з акумулюючими бункерами, що працюють в керованому режимі.

Розроблено методику визначення пропускної здатності, енергоємності транспортування, структури алгоритмів і параметрів адаптивного управління системою конвеєрного транспорту, використання якої дозволить за допомогою контролерів і частотного управління електроприводами конвеєрів і живильників збільшити пропускну здатність системи конвеєрного транспорту до 50 % і зменшити енерговитрати на транспортування вантажу до 30 %.

Результати роботи у вигляді рекомендацій при проектуванні та експлуатації систем конвеєрного транспорту передано до проектних організацій і на гірничі підприємства України. Розроблена методика передана для використання в процесі навчання студентів гірничих, металургійних і машинобудівних спеціальностей вузів.

Ключові слова: система конвеєрного транспорту, акумулюючі бункери, процеси функціонування, марковські процеси, середня пропускна здатність, питома енергоємність, критерій ефективності, оптимальне і адаптивне управління.

АННОТАЦИЯ

Кирия Р. В. Моделирование процессов функционирования систем конвейерного транспорта со сложной структурой и методы повышения их эффективности. – Квалификационный научный труд на правах рукописи..

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – «Математическое моделирование и вычислительные методы». – Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова Национальной академии наук Украины, Днепр, 2018.

Диссертационная работа посвящена актуальной научно-технической проблеме моделирования процессов функционирования систем конвейерного транспорта со сложной разветвленной структурой без бункеров и с аккумулялирующими бункерами, работающими в различных режимах, и на основании этого разработке методов повышения эффективности их работы за счет оптимального управления бункерами и питателями.

На основе теории марковских процессов разработаны математические модели простейшей системы «конвейер – бункер – конвейер» с аккумулялирующим бункером, работающим в неуправляемом режиме и в режиме поддержания в нем объема груза в заданных пределах, т.е. в управляемом режиме.

С использованием метода динамики средних для марковских процессов для систем конвейерного транспорта с последовательным, параллельным соединением конвейеров и с самоподобной структурой без бункеров и с бункерами получены рекуррентные зависимости, определяющие среднюю пропускную

способность, среднюю энергоемкость транспортирования и среднюю удельную энергоемкость системы транспорта.

С использованием метода Понтрягина получены системы уравнений для средних и дисперсий времен загрузки и разгрузки аккумулирующего бункера, работающего в неуправляемом и управляемом режимах, что позволило определить средний объем груза в бункере.

Решены задачи и получены алгоритмы оптимального и адаптивного управления системой конвейерного транспорта с аккумулирующими бункерами, работающими в управляемом режиме.

Разработана методика определения пропускной способности, энергоемкости транспортирования, структуры алгоритмов и параметров оптимального и адаптивного управления системой конвейерного транспорта, применение которой позволит с помощью контроллеров и частотного управления электроприводами конвейеров и питателей увеличить пропускную способность системы конвейерного транспорта до 50 % и уменьшить энергозатраты на транспортирование груза до 30 %.

Результаты работы в виде рекомендаций при проектировании и эксплуатации систем конвейерного транспорта переданы в проектные организации и на горные предприятия Украины. Разработанная методика передана для использования в процессе обучения студентов горных, металлургических и машиностроительных специальностей вузов.

Ключевые слова: система конвейерного транспорта, аккумулирующие бункеры, процессы функционирования, марковские процессы, средняя пропускная способность, удельная энергоемкость, критерий эффективности, оптимальное и адаптивное управление.

THE SUMMARY

Kiriya R.V. Conveyor transport systems function process modeling of ramified structure and methods to improve their efficiency. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for scientific degree of Doctor of Technical Science on specialty 01.05.02 – “Mathematical modeling and computation methods”. – N. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2018

The dissertation work is devoted to the mathematical modeling of conveyor transport systems function processes of the ramified structure with accumulate bunkers and without ones working in different modes, and also methods to increasing its efficiency.

There are mathematical models of the simplest system “conveyor – bunker - conveyor” on the Markov’s processes theory basis are developed. It done for two accumulate bunker working modes: without control and under control ones (maintenance of the freight in defined limits).

For the conveyor transport systems with successive, parallel conveyors connection and with self-similar structure without bunkers and with bunkers the middle dy-

namics Markov's processes method was used. Recurrent dependences, determining average capacity, middle energetic transportation capacity and middle specific capacity of the system of transport, are obtained.

The systems of equalizations for middle and dispersions of times of level freight and unloading of accumulate bunker working in out of control and guided modes are got. The using of the Pontryagin's method allowed to define the middle volume of freight in a bunker.

Tasks had solved and as result the optimal control and adaptive one algorithms of the conveyor transport system with accumulate bunkers working in the guided mode are got.

The design methodic for carrying capacity, energy capacity, algorithm structures and parameters, optimal and adaptive conveyor transport system management is proposed. Its application will allow increasing the conveyor transport system carrying capacity up to 50% and decreasing load transportation specific capacity down to 30%. It will be done when optimum and adaptive control conveyor transport system management and controllers and frequency management methods for electric conveyor and feeder engines will be used.

Obtained results in recommendations for design and exploitation conveyor transport system species are passed into design, construct and mine organizations of Ukraine. It passes to studying process for mine, metallurgical and technologies skills of education institutes.

Keywords: conveyor transport system, accumulated bunkers, functioning processes, Markov's processes, average capacity, specific energy capacity, efficiency criterion, optimum and adaptive management.