

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**КІР'ЯЗОВ ІВАН МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 004.896:621.86.06:631.24:004.94

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ  
ЗЕРНА НА ЕЛЕВАТОРАХ: МОДЕЛЮВАННЯ ПТЛ ЯК  
ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, ФОРМУВАННЯ КЕРОВАНОЇ ЗМІННОЇ,  
НАПІВНАТУРНЕ ТЕСТУВАННЯ САК**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Хобін Віктор Андрійович**,  
Одеська національна академія  
харчових технологій, м. Одеса,  
завідувач кафедри автоматизації технологічних  
процесів і робототехнічних систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гончаренко Борис Миколайович**,  
Національний університет харчових технологій,  
м. Київ,  
професор кафедри автоматизації та  
комп'ютерних технологій систем управління;

кандидат технічних наук, доцент  
**Решетюк Володимир Михайлович**,  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування, м. Київ,  
доцент кафедри автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

Захист відбудеться «30» жовтня 2019 р. о 13<sup>00</sup> годині в ауд. А-311 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 у Національному університеті харчових технологій за адресою: вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету харчових технологій (вул. Володимирська, 68, м. Київ).

Автореферат розісланий «   » вересня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
К 26.058.05,  
к.т.н., доцент



Л.О. Власенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Україна, будучи одним з найбільших виробників та експортерів зерна на світовому ринку, має розвинену та безперервно зростаючу систему підприємств для його приймання, зберігання, переробки та відвантаження. Спільним та енергоємним технологічним процесом (ТП) для всіх таких підприємств є процес переміщення зерна потоково-транспортними лініями (ПТЛ), у які входять групи послідовно включених конвеєрів різних типів. У системах автоматичного керування (САК) ПТЛ, і створених на релейно-контактній техніці у минулому столітті, і на найсучасніших контролерах у наш час, реалізовувалися тільки функції зблокованих пуску та останову конвеєрів, контролю виникнення аварійних ситуацій (АС) та запобігання переростання їх в аварію шляхом аварійного відключення ПТЛ.

Функція керування завантаженням ПТЛ зерном через складність їхніх властивостей як об'єктів керування (ОК) завжди зберігалася за людиною-оператором. Цю складність обумовлено наявністю в ОК сукупності специфічних особливостей. Основні з них: – ступінь завантаження ПТЛ має обмеження типу «аварійна ситуація»; – значення обмежень апріорі невідомі та змінюються зі зміною великої кількості факторів; – максимальна енергоефективність ПТЛ досягається при завантаженнях, що прагнуть до зазначених обмежень; – властивості ОК за каналами керування суттєво нелінійні та мають великі та такі, що змінюються транспортні запізнювання; – пряма оцінка ступеня завантаження конвеєрів за струмом навантаження їхніх ПЕД малоінформативна. Оператор, керуючи ПТЛ та задаючи ступінь її завантаження зерном, по суті, в умовах невизначеності обирає ступінь компромісу між двома взаємно суперечливими прагненнями: мінімізувати ймовірність АС та підвищити енергоефективність. Практика показує, що в описаних умовах оператор обирає таке завантаження ПТЛ, яке мінімізує АС.

Забезпечити роботу ПТЛ у режимах завантаження, близьких до максимальної енергоефективності та одночасно до АС, можливо тільки за умови створення спеціальної САК, що реалізує функцію оптимізації завантаження. Враховуючи особливості ПТЛ як ОК, така САК буде нетривіальною. Для її розробки буде потрібна, насамперед, розробка математичних моделей (ММ) ОК, які відображали б усі ці особливості. Крім того, ці ММ повинні створити основу для підвищення вірогідності інформації про ступінь завантаження конвеєрів при збереженні струму ПЕД як її джерела та забезпечити можливість остаточного налагодження прикладного програмного забезпечення (ПЗ) САК на етапі її підготовки до впровадження.

**Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами.** Роботу виконано в рамках держбюджетної тематики «Автоматичне керування технологічними процесами: розробка алгоритмів з високим рівнем інтелекту, моделювання та оптимізація систем» кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) відповідно до основного наукового напрямку № 3

ОНАХТ «Створення та розробка нового високоефективного обладнання, теорії, методів його розрахунків і проектування; автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв» та її наукової школи «Моделювання та оптимальне управління технологічними процесами зберігання та переробки сільськогосподарської сировини» (рік заснування – 1960).

#### **Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – розробити комплекс ММ, що описують динаміку процесів перевантаження зерна ПТЛ елеваторів, як ОК, та, за рахунок цього, створити основу для розробки алгоритмів САК завантаженням ПТЛ, розв'язати задачі інформаційного забезпечення та налагодження ПЗ САК.

*Задачі дослідження, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети:*

1) обґрунтувати основу концепції розробки САК завантаженням ПТЛ зерном та сформулювати вимоги до ММ ПТЛ як ОК;

2) розробити ММ динаміки процесів переміщення зерна норіями та скребковими конвеєрами як ОК зі структурою, що змінюється, та обмеженнями типу «аварійна ситуація», реалізувати їх у формі імітаційних моделей;

3) розробити ММ робочих характеристик ПЕД конвеєрів ПТЛ та методику ідентифікації її параметрів за паспортними характеристиками ПЕД, що моделюють, реалізувати її у формі імітаційної моделі;

4) розробити спосіб розрахунку ступеня завантаження конвеєрів за результатами виміру струму їхніх ПЕД та ПЗ для його реалізації на контролері;

5) розробити програмне середовище для зручного компонування імітаційної моделі та моделювання процесів перевантаження зерна ПТЛ будь-якого необхідного складу;

6) розробити програмно-технічний комплекс (ПТК) для реалізації технології напівнатурного моделювання САК та налагодити на ньому всі компоненти прикладного ПЗ автоматизованої системи оптимізації завантаження (АСОЗ) ПТЛ;

7) впровадити АСОЗ на діючому елеваторі, провести її всебічні виробничі випробування для підтвердження адекватності розроблених моделей та коректності способу розрахунку ступеня завантаження конвеєрів.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес перевантаження зерна потоково-транспортними лініями на елеваторах.

**Предмет дослідження** – комплекс ММ, що описують динаміку процесів перевантаження зерна ПТЛ елеваторів.

#### **Методи дослідження:**

– функціонально-структурний аналіз САК як один з інструментів загальної теорії систем (задача 1);

– основи механіки сипких матеріалів (СМ) та теорії асинхронного електроприводу, відповідні методи математичної фізики (задачі 2, 3);

– математичні методи вибору апроксимуючих функцій, аналітичного та чисельного розв'язань систем нелінійних рівнянь (задачі 3, 4);

– розробка імітаційних моделей конвеєрів ПТЛ у середовищі Simulink

пакета MATLAB (ліцензія 1-4 AE K761327 ВД, № 308918) та меню їхніх налаштувань; створення бібліотек цих моделей, компонування моделей на принципах візуального програмування зі схованими векторними зв'язками; планування та проведення комп'ютерних імітаційних експериментів (задачі 2, 3, 5);

– напівнатурне моделювання САК, включаючи розрахунок за імітаційними моделями ОК в реальному часі, перетворення віртуальних змінних моделей ОК в реальні фізичні сигнали для взаємодії цих моделей та реального обладнання САК (задача 6);

– програмування контролерів у середовищі Step7, створення віконних інтерфейсів в SCADA SIMATIC Wincc та контролерно-комп'ютерних мереж (задачі 6, 7).

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

*уперше обґрунтовано* основу концепції розробки САК завантаженням ПТЛ зерном як засобу досягнення взаємосуперечливих вимог її максимальної продуктивності, у т.ч. енергоефективності, та гарантування запобігання аварійних зупинок ПТЛ, пов'язаних з перевищенням завантаження, *що дозволило* сформулювати вимоги до ММ ПТЛ як ОК;

### **уперше розроблено:**

– ММ динаміки процесів переміщення СМ (зокрема зерна) норіями та скребковими конвеєрами як ОК, які враховують розподіленість процесів уздовж напрямку переміщення та зміни властивостей (структури) цих конвеєрів зі статичних на астатичні як причину розвитку завалів зерна в їхніх внутрішніх об'ємах та виникнення АС, *які дозволили* адекватно моделювати роботу ПТЛ в умовах широкої зміни її завантаження, включаючи те, що перевищує припустиме, та характеристик СМ, що транспортується;

– ММ асинхронних ПЕД конвеєрів, що відтворюють топологію їхніх робочих характеристик, та методику ідентифікації параметрів цієї моделі на основі тільки паспортних характеристик ПЕД, що моделюють, *яка дозволила* за величиною моменту опору на валу ПЕД розраховувати значення всіх параметрів його енергоспоживання, включаючи їхню активну та реактивну складові, і, завдяки цьому, витрати на оплату енергії;

– спосіб розрахунку ступеня завантаження конвеєрів СМ за результатами виміру повного струму, що споживається їхнім ПЕД, та варіанти його доцільної реалізації, *який дозволив* розраховувати відносний момент опору на валу цих ПЕД, тобто величину, прямопропорційну їхньому завантаженню СМ для широких діапазонів зміни навантаження на валу ПЕД, зберігши при цьому традиційне джерело інформації;

– програмне середовище імітаційного моделювання процесів перевантаження зерна ПТЛ, *яке дозволило* засобами візуального програмування оперативно компонувати імітаційні моделі ПТЛ необхідного складу та проводити цілеспрямовані комп'ютерні експерименти з налагодження алгоритмів автоматичного керування завантаженням ПТЛ та оцінки економічної ефективності впровадження САК завантаженням цими ПТЛ;

*отримала подальший розвиток* технологія напівнатурного моделювання САК, що реалізована на створеному ПТК для налагодження прикладного ПЗ АСОЗ ПТЛ, яка дозволила провести налагодження ПЗ контролера, що реалізує алгоритми керування АСОЗ ПТЛ, їхньої взаємодії із джерелами інформації, виконавчими пристроями, SCADA та забезпечити максимальну готовність системи до впровадження.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Розроблені ММ робочих характеристик ПЕД конвеєрного обладнання ПТЛ елеваторів та методика ідентифікації їхніх параметрів за мінімумом паспортних даних ПЕД дозволяють істотно підвищити інформативність традиційного каналу виміру ступеня завантаження конвеєрів за величиною повного струму їхніх ПЕД при зміні ступеня завантаження в широкому діапазоні значень.

Розроблені ММ процесів перевантаження зерна дозволили створити програмне середовище імітаційного моделювання, орієнтоване на створення АСОЗ ПТЛ елеваторів з будь-яким складом транспортного обладнання, що має зручний інтерфейс для конфігурування та налаштування параметрів моделі ПТЛ. Програмне середовище застосоване при розробці АСУТП елеватора в м. Хмільнику та може бути застосоване на інших елеваторах, кожний з яких має специфічну конфігурацію ПТЛ, як основа: а) спеціальних комп'ютерних експериментів для розробки алгоритмів керування АСОЗ, їхньої параметричної оптимізації та оцінки техніко-економічної ефективності впровадження для конкретних ПТЛ; б) системи напівнатурного моделювання для проведення остаточного налагодження прикладного ПЗ на етапі підготовки АСОЗ конкретних ПТЛ до впровадження.

Ефективність розробок підтверджено результатами виробничих випробувань АСОЗ ПТЛ відвантаження зерна при її впровадженні на елеваторі в м. Хмільнику. Розробки застосовуються компанією «С-Інжиніринг» (м. Одеса) при розробці АСУТП елеваторів.

Матеріали з моделювання ПТЛ передано на кафедру Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій та використовуються в навчальній дисципліні «Автоматизація технологічних процесів галузі», яку викладають студентам спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

**Особистий внесок здобувача.** У публікаціях за темою дисертації здобувачем в: [8–10] – обґрунтовано мету та задачі автоматизації керування процесом завантаження ПТЛ елеваторів, проблеми, що виникають при цьому, та шляхи їхнього вирішення; [1] – розроблено ММ робочих характеристик асинхронних ПЕД та методику її ідентифікації за паспортним даними ПЕД; [2, 3, 11, 12] – розроблено ММ транспортування зерна конвеєрами, включаючи навантаження на їхні ПЕД; [4, 17] – розроблено інноваційний спосіб контролю ступеня завантаження конвеєрів за величиною струму, що споживається їхнім ПЕД; [5, 13, 14] – розроблено ПТК для налагодження прикладного ПЗ АСОЗ ПТЛ сипкими матеріалами; [6, 15] – описано умови

проведених виробничих випробувань АСОЗ, та узагальнено їхні результати; [7, 16] – зібрано та оброблено інформацію про функціонування АСОЗ.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Автоматика–2010» (м. Харків, 2010 р.), «Автоматика–2011» (м. Львів, 2011 р.), «Автоматика–2013» (м. Миколаїв, 2013 р.); «Сучасні інформаційні та електронні технології (СІЕТ)–2010» (м. Одеса, 2010 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології та автоматизація» (м. Одеса, 2011–2014, 2017 р.р.), наукових конференціях ОНАХТ (м. Одеса, 2011–2014 р.р.).

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано у 17 друкованих працях. Статей – 6, з яких 6 у наукових фахових виданнях України з Переліку, затвердженого МОН України, у тому числі 2 статті в журналі, який індексується в міжнародній наукометричній базі; патентів на винахід – 1; патентів на корисну модель – 1; тез доповідей – 9.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, основної частини, що включає 4 розділи, висновків, списку використаних джерел з 118 найменувань та 6 додатків. Загальний обсяг роботи складає 251 сторінку. Основна частина містить 219 сторінок, включаючи 129 рисунків та 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі обґрунтовано* актуальність дисертаційної роботи, показаний її зв'язок з науковими напрямками та темами, сформульовано мету та задачі дослідження, встановлено межі об'єкту та предмета дослідження, перераховано методи дослідження, які застосовувалися в роботі, її наукові результати, ступінь їхньої новизни та практичне значення, відзначено особистий внесок здобувача в публікаціях за темою дисертації, перелічено конференції, де проводилася апробація результатів, дано загальну інформацію про публікації, структуру та обсяги роботи.

*У першому розділі* розглядаються найбільш загальні питання перевантаження зерна ПТЛ елеваторів, їхнього конвеєрного обладнання, аналізуються функції існуючих систем автоматизованого керування. Формулюються актуальність автоматизації функції керування завантаженням ПТЛ та проблеми, що виникають при цьому, формулюються основа концепції такого керування та вимоги до ММ ПТЛ як ОК, яка повинна забезпечити основу розробки САК. Наводяться та аналізуються відомі ММ конвеєрів ПТЛ перевантаження СМ.

Процеси переміщення зерна ПТЛ є невід'ємною частиною як реалізації ТП усередині елеваторів, так і при русі зерна в ланцюзі логістики від виробника до кінцевого споживача. Оскільки такий ланцюг може містити в собі 3–4 елеватори, то в сукупності обсяги переміщення зерна ПТЛ елеваторів у ході операцій з приймання та відвантаження зерна при його перевантаженні (перевалюванні) багаторазово перевищують обсяги його врожаю. В умовах, ко-

ли Україна нарощує виробництво зерна і, зокрема, його експорт на світові ринки, обсяги його переміщення ПТЛ елеваторів будуть безперервно зростати. Багаторазові переміщення десятків мільйонів тонн зерна вимагають досить значних енергетичних і, отже, фінансових витрат цих елеваторів. Ситуація посилюється тим, що в реальних виробничих умовах ПТЛ працюють з досить істотним недозавантаженням, що збільшує не тільки енергетичні витрати, але й час виконання перевантажувальних операцій.

Керування ступенем завантаження ПТЛ зерном, навіть в сучасних АСУТП, реалізованих на основі комп'ютерно-контролерних мереж, здійснюється «вручну» – оператором автоматизованого робочого місця (АРМ). Цілі такого керування – зниження часу та енерговитрат на виконання перевантажувальних операцій та, одночасно, – запобігання АС, пов'язаних з перевищенням завантаження лінії зерном, є взаємно суперечливими. При неефективному керуванні може бути не досягнуто жодну з них.

Пропонована основа концепції автоматизації керування ступенем завантаження ПТЛ зерном вимагає розробки таких алгоритмів керування, при яких мінімізуються час та енерговитрати на виконання перевантажувальних операцій, та одночасно гарантується запобігання АС, пов'язаних з перевищенням завантаження ПТЛ. Практика розробки таких алгоритмів при керуванні ТП у різних галузях промисловості показує, що шляхи їхнього досягнення пов'язано з підвищенням інтелектуального рівня алгоритмів и вимагає розробку ММ ОК адекватних цілям керування. Тому ММ ОК повинні відображати динаміку процесів, наявність обмежень типу «аварійна ситуація», нелінійностей та запізнювань у каналах керування, високий рівень невизначеності та нестационарності властивостей цих каналів.

Відомі ММ процесів транспортування СМ не можуть бути використані як ММ ОК, оскільки вони навіть у сукупності не відображають комплексу необхідних особливостей процесів, перерахованих вище. Відомі ММ асинхронних ПЕД не можуть бути застосовані при вирішенні задач розробки САК завантаженням ПТЛ і визначення ступеня завантаження конвеєрів через свою функціональну надмірності і складності, вимоги великих обчислювальних ресурсів.

*У другому розділі* розробляється ММ норії як ОК зі структурою, що змінюється. Норії входять до складу будь-яких ПТЛ з переміщення зерна на елеваторах. Як елемент ПТЛ, вони, як правило, є її «вузьким» місцем, що обмежує продуктивність лінії та провокує виникнення АС, пов'язаних із завалами. Одночасно, це найбільш складний для адекватного математичного опису елемент ПТЛ як ОК.

Основу ММ складає рівняння динаміки балансу об'єму  $V_{CM,б}$  СМ у башмаку норії:

$$V_{CM,б} = h_{CM}(t)S_{hcc}(h_{CM}) = \int_0^t (Q'_{BX}(t) - Q_{OTT}(t) + Q_{OC}(t))dt, \quad (1)$$

де  $h_{CM}$ ,  $S_{hcc}$  – рівень СМ у башмаку норії та площа його перерізу;  $Q'_{BX}$ ,  $Q_{OTT}$ ,





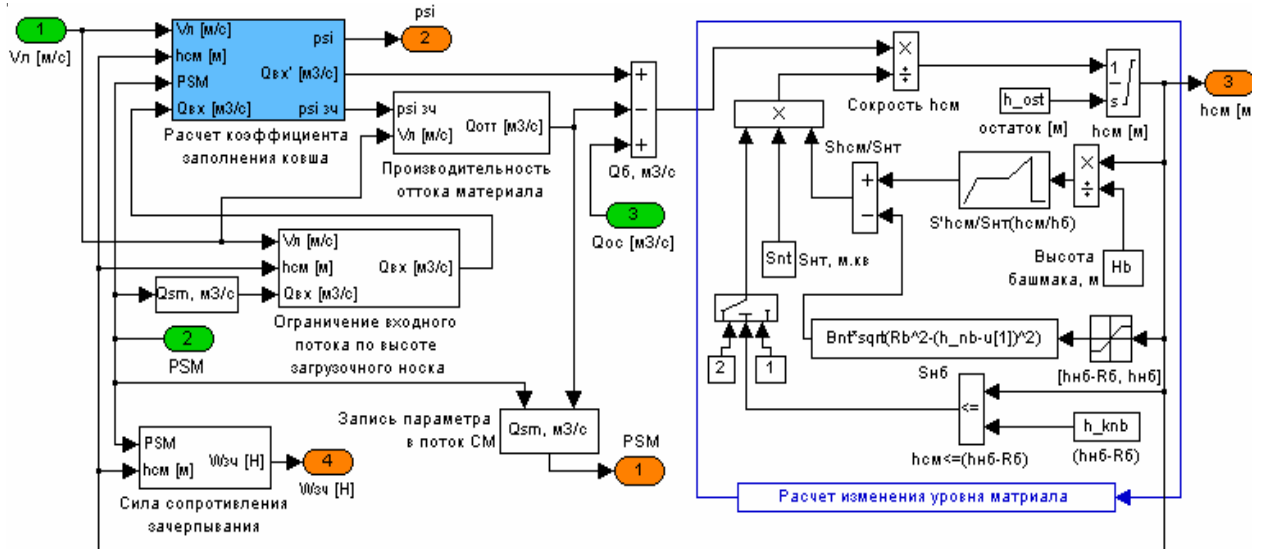


Рис. 2. Блок-схема імітаційної моделі процесів заповнення ковшів та башмака норії СМ, розрахунку рівня  $h_{CM}$  та сили опору зачерпуванню  $W_{зч}$

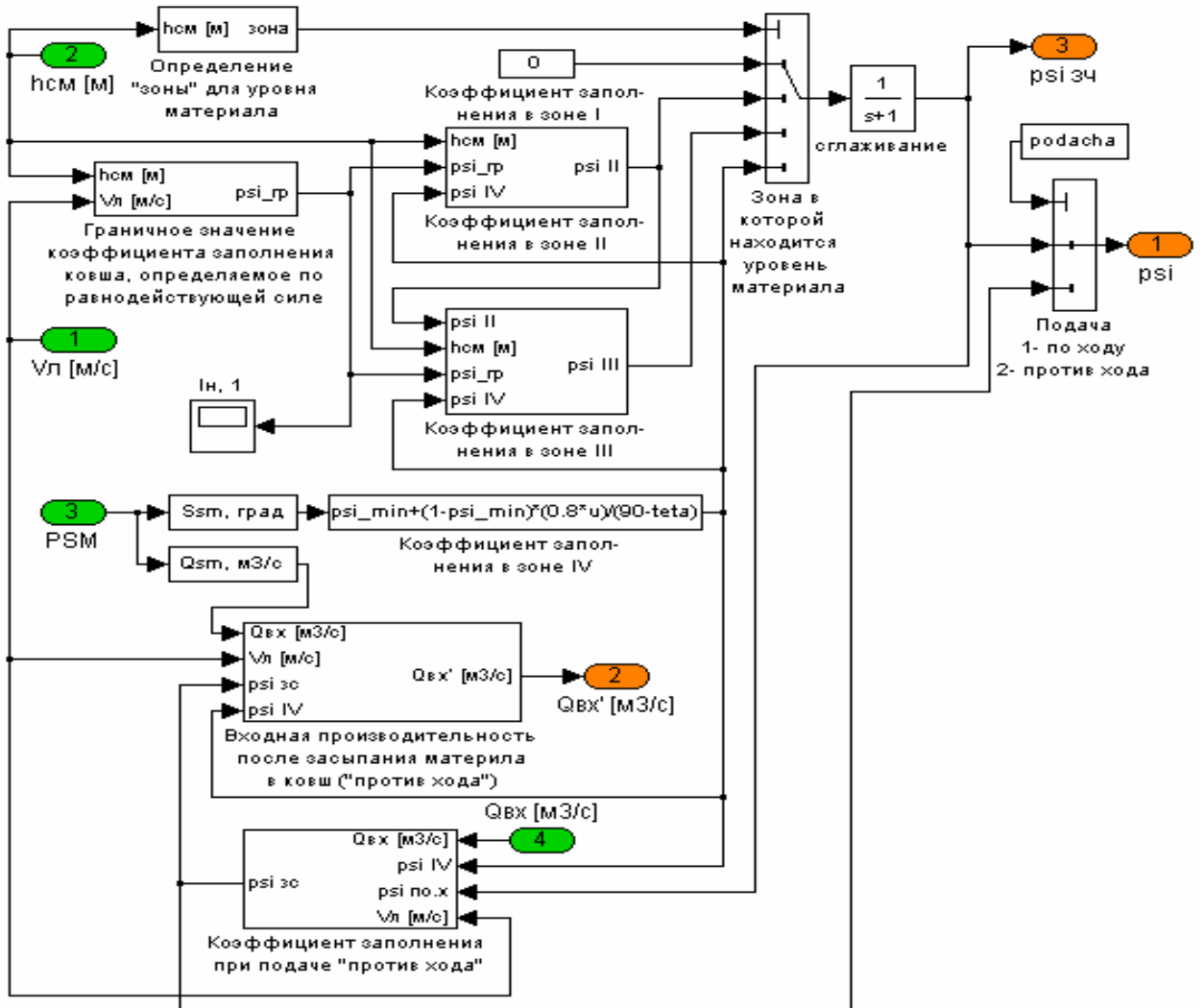


Рис. 3. Блок-схема розрахунку значень витрати  $Q'_{ВХ}$  СМ у башмаку норії та коефіцієнта  $\psi_{зч}$  заповнення ковшів норії в її башмаку (завантаження «за ходом» та «проти ходу»)

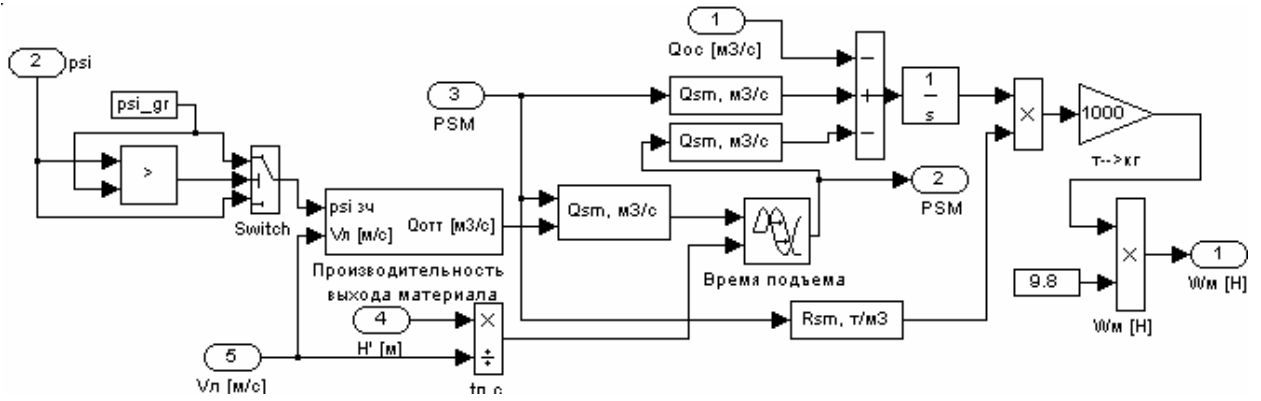


Рис. 4. Блок-схема розрахунку маси СМ, що накопичується в ковшах вертикальної ділянки стрічки, та створюваної при цьому сили опору  $W_M$

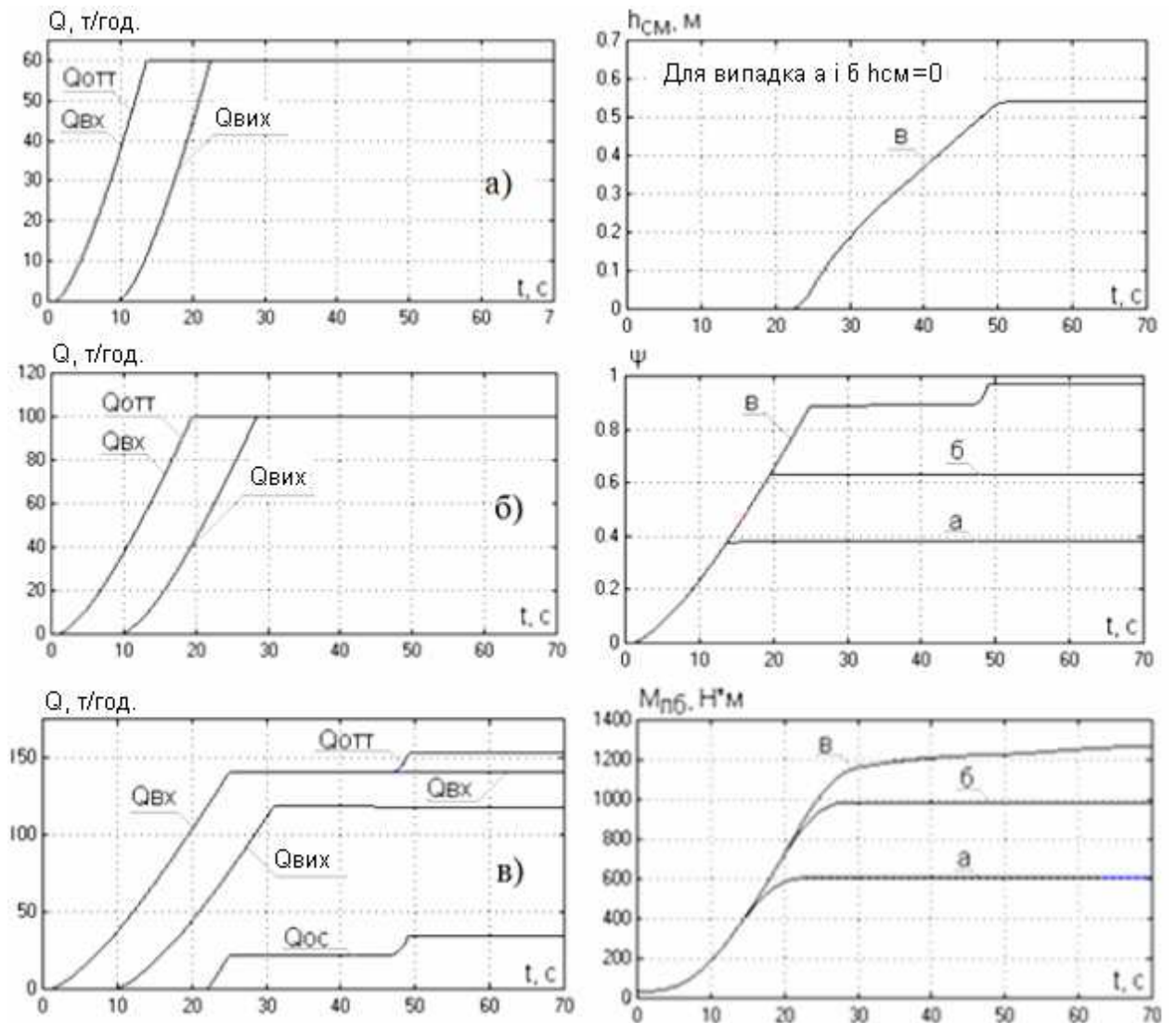


Рис. 5. Динаміка зміни продуктивностей норії: відтоку ( $Q_{OT}$ ), опадання ( $Q_{OC}$ ), на виході ( $Q_{ВИХ}$ ) з моменту початку відкриття підсилювальної засувки та завантаження норії СМ до різних значень вхідної ( $Q_{ВХ}$ ) продуктивності (напрямок подачі СМ – «проти ходу»)

За результатами тестування було зроблено висновок про адекватність моделі.

У *третьому розділі* розробляються ММ скребкового конвеєра як ОК зі структурою, що змінюється, ММ ПЕД конвеєрів, розв'язується задача підвищення інформативності каналів виміру ступеня завантаження конвеєрів. Скребкові конвеєри як і норії, є її «вузьким» місцем, що обмежує продуктивність ПТЛ та провокує виникнення АС, пов'язаних із завалами.

Основу ММ скребкового конвеєра складає рівняння динаміки балансу об'єму СМ у точці завантаження конвеєра:

$$V_{CM.3}(t) = h_{CM.3}^2 B_K t g \beta_{CM} = \int_0^t (Q_{BX}(t) - Q_{OTT}(t)) dt, \quad (2)$$

де  $h_{CM.3}$ ,  $B_K$ ,  $t g \beta_{CM}$  – рівень СМ у точці завантаження, ширина конвеєра, кут природнього укосу СМ, що транспортується;  $Q_{BX}$ ,  $Q_{OTT}$  – об'ємні продуктивності потоків СМ на вході в зону завантаження конвеєра та СМ, що забирається із цієї зони ланцюгом, що рухається.

Межове значення рівня  $h_{CM}^{GP}$  СМ у конвеєрів, починаючи з якого динамічні властивості скребкового конвеєра як ОК змінюються зі статичних на астатичні, та починає розвиватися АС, оцінюється з виразу:

$$h_{CM}^{GP} = \frac{B_K f_o}{f \cdot t g^2 (45^\circ - 0,5 \arctg(f_o)) + b_{CK}}, \quad (3)$$

де  $b_{CK}$  – висота скребків конвеєрного ланцюга;  $f_o$ ,  $f$  – коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя СМ, що транспортується.

Розроблену ММ було реалізовано у формі імітаційної моделі. Деякі результати її тестування, які підтвердили її адекватність, наведено на рис. 6.

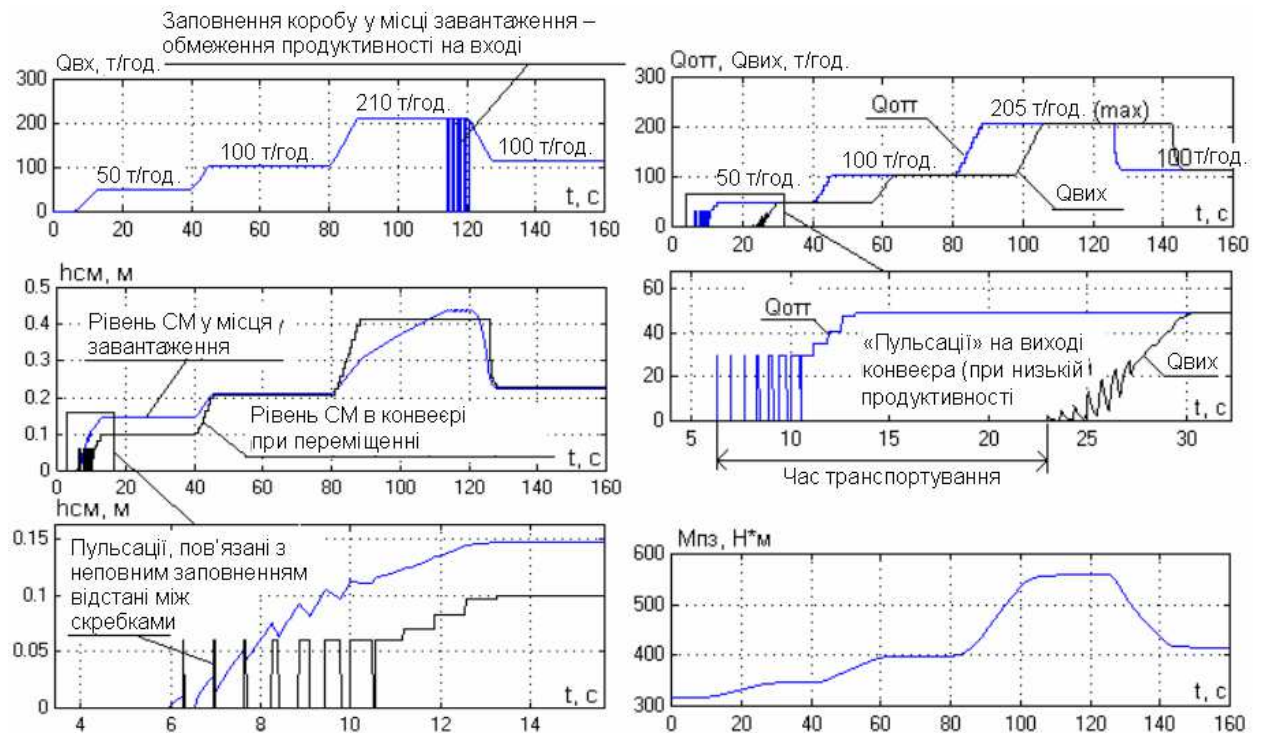


Рис. 6. Динаміка зміни продуктивності  $Q_{BX}$ , рівнів СМ  $h_{CM.3}$  та  $h_{CM}$ , продуктивностей відтоку  $Q_{OTT}$  з місця завантаження та на виході  $Q_{VIX}$  конвеєра, моменту опору  $M_{DV}$  на приводному валу конвеєра

Розроблену ММ асинхронних ПЕД, що відтворює специфічну топологію їхніх робочих характеристик, засновано на ММ коефіцієнтів корисної дії  $\eta_M(P_{II}^O)$  та потужності  $\cos\varphi_M(P_{II}^O)$  ПЕД, вигляд яких прийнято у вигляді наступних функцій відносної корисної потужності  $P_{II}^O$ :

$$\eta_M(P_{II}^O) = 1 - a P_{II}^O - \exp\left\{-\sqrt{P_{II}^O}/b\right\}, \quad (4)$$

$$\cos\varphi_M(P_{II}^O) = \cos\varphi^x + 1 + c P_{II}^O - \exp\left\{-\sqrt{P_{II}^O}/d\right\}, \quad (5)$$

де  $a, b, c, d$  – невідомі, постійні параметри, значення яких визначаються в ході параметричної ідентифікації моделей конкретного типу ПЕД.

Методика ідентифікації цих параметрів зводиться до розв'язання систем трансцендентних рівнянь:

$$\begin{cases} b = \frac{1 - \eta^{max} - a P_{II}^{O*}}{a}, \\ 1 - \eta^{max} = \left(1 + \sqrt{P_{II}^{O*}/2b}\right) \exp\left\{\sqrt{P_{II}^{O*}}/b\right\} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} d = (1 - \cos\varphi^{max} + \cos\varphi^x - c)/c \\ 1 - \cos\varphi^{max} + \cos\varphi^x = (1 + 1/d) \exp\{-1/d\} \end{cases} \quad (7)$$

де  $\eta^{max}$ ,  $\cos\varphi(P_{II}^O)$  – максимальні значення  $\eta(P_{II}^O)$  та  $\cos\varphi(P_{II}^O)$ ;  $P_{II}^{O*} = \operatorname{argmax}\eta(P_{II}^O)$  – відносне значення  $P_{II}^O$ , при якому досягається  $\eta^{max}$ ;  $\cos\varphi^x$  – значення на холостому ході ПЕД. Значення перерахованих параметрів наводяться в паспорті та дублюються на «шильдiku» ПЕД.

Для урахування впливу на  $\eta(P_{II}^O)$  та  $\cos\varphi(P_{II}^O)$  відхилень напруги живлення  $U$  ПЕД від номінального значення  $U^H$  уведено множники  $k_\eta$  та  $k_{\cos\varphi}$ :

$$\eta_M(P_{II}^O, U) = \eta_M(P_{II}^O, U^H) k_\eta = \eta_M(P_{II}^O, U^H) (-3,75U^{O2} + 7,5U^O - 2,75); \quad (8)$$

$$\cos\varphi_M(P_{II}^O, U) = \cos\varphi_M(P_{II}^O, U^H) k_{\cos\varphi} = \cos\varphi_M(P_{II}^O, U^H) (-0,75U^O + 1,75), \quad (9)$$

де  $U^O = U/U^H$ .

Імітаційна модель ПЕД в авторефераті не розглядається. Результати тестування, що підтвердили її адекватність, наведено на рис. 7.

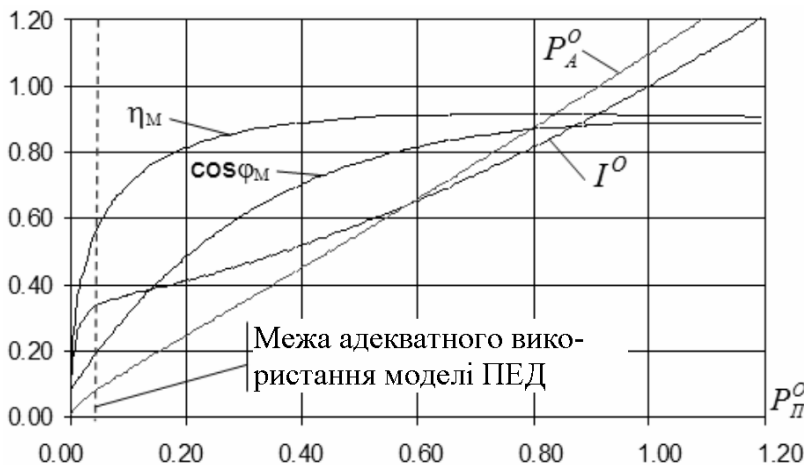


Рис. 7. Ілюстрація відтворення робочих характеристик ПЕД його імітаційною моделлю



Імітаційна модель ПЕД легко інтегрується в імітаційну модель конвеєрів, дозволяючи адекватно описувати їх як ОК. Це дає можливість на основі таких моделей розробляти САК завантаженням ПТЛ, вирішуючи при цьому, зокрема, задачі з мінімізації енергоспоживання ПЕД.

Важливо, що отримана ММ ПЕД дозволяє розв'язати дуже важливу для керування завантаженням ПТЛ інформаційну задачу – для широких діапазонів зміни навантаження конвеєрів, за результатами виміру величини споживаного струму їх ПЕД, розрахувати відносний момент опору  $M^O$  на валу ПЕД або, що теж саме –  $P_{II}^O$ , тобто величину, прямо пропорційну завантаженню робочого органа конвеєра СМ. Вона є оберненою задачі розрахунку  $I_M^O$  за  $P_{II}^O$  або за  $M^O$ , тобто за моделями  $I_M^O(P_{II}^O)$  або  $I_M^O(M^O)$ , та формалізується виразом:

$$M^O = M_P^O = \arg\{I_I^O - I_M^O(M^O)\} = 0\}, \quad (10)$$

де нижні індекси «P» та «I» уведено додатково для демонстрації процедури розв'язання оберненої задачі та позначають розрахункові та обмірювані значення відповідних змінних.

Процедура (10) повинна реалізуватися на керуючому контролері у реальному часі. Моделювання показує, що при малих  $M^O$  для доброї збіжності цієї обчислювальної процедури необхідний дуже дрібний крок квантування  $I^O$ , див. рис. 8. При практичній реалізації САК це створить труднощі, пов'язані зокрема із власними шумами аналого-цифрових перетворювачів.

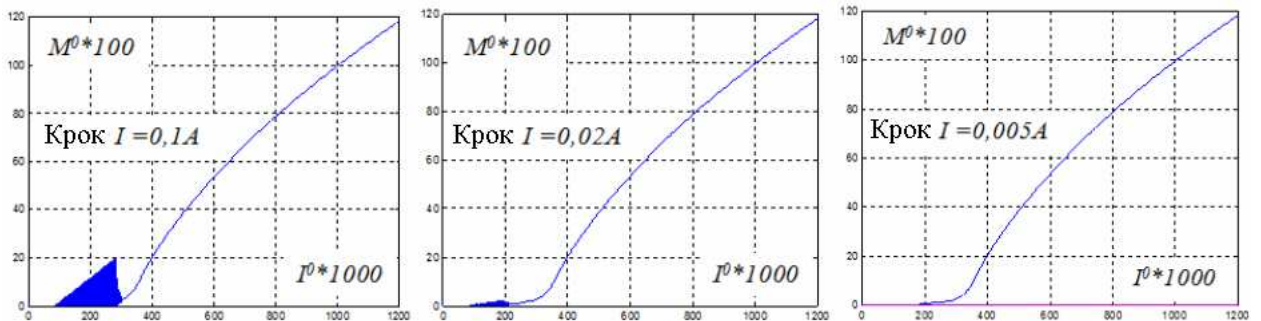


Рис. 8. Результати моделювання процедури розв'язання в реальному часі задачі розрахунку  $M^O$  за  $I^O$  в ітераційному циклі при різних кроках квантування струму  $I$ , що вимірюється (номінальна потужність ПЕД 110 кВт)

У таких умовах доцільний шлях розрахунку  $M^O$  за  $I^O$  полягає у наступному: а) для конкретного ПЕД процедуру (10) реалізувати на комп'ютері (у машинному часі) з досить дрібним кроком, та побудувати графік функції  $M^O = f(I^O)$ ; б) затабулювати графік з доцільним, можливо нерівномірним, кроком, перейшовши до дискретної функції  $M_i^O = f(I_i^O)$ ; в) значення  $M_i^O = f(I_i^O)$  внести до пам'яті контролера; г) розрахунки  $M^O$  за  $I^O$  вести в контролері за  $M_i^O = f(I_i^O)$ , наприклад, на основі кусково-лінійної апроксимації. При необхідності облік коливань напруги живлення  $U$  ПЕД може бути здійснений за рахунок розрахунку множників  $k_{\eta}$  – (8) та  $k_{\cos\varphi}$  – (9).

*У четвертому розділі* розглядається застосування теоретичних розробок для розв'язання задач створення АСОЗ зерном ПТЛ елеваторів, її виробничі випробування, економічна ефективність впровадження розробок.

Практична реалізація АСОЗ для конкретних підприємств завжди унікальна, тому що структура та характеристики обладнання їхніх ПТЛ практично не повторюються. При цьому алгоритми АСОЗ досить складні, оскільки містять у собі, крім двох алгоритмів регулювання з різними типами виконавчих пристроїв, алгоритми їхнього перемикавання з динамічним балансуванням керуючих впливів, алгоритми пошуку гранично-досяжного завантаження норій та алгоритми виявлення АС і т.д., а налагодження АСОЗ на об'єктах пов'язана з роботою ПТЛ в околицях аварійних режимів.

Усе це обумовлює необхідність мати до етапу впровадження високий рівень готовності прикладного ПЗ АСОЗ. Методологічною основою його забезпечення було обрано напівнатурне моделювання. Для його реалізації був створений спеціалізований ПТК.

Основні елементи технічної частини ПТК:

а) ті, що реалізують імітаційну цифрову модель ОК: 1) комп'ютер з установленими на материнській платі картами введення/виведення дискретних та аналогових сигналів PCI-1710, -1720 та -1750; 2) електродвигуновий виконавчий механізм (ЕВМ) SQX82.03; 3) асинхронний трифазний електродвигун; 4) перетворювач частоти Micromaster 440; 5) комутаційна апаратура;

б) ті, що реалізують інтелектуальне ядро системи керування: 1) комп'ютер з адаптером мережі PROFIBUS DP; 2) контролер S7-300.

Основні елементи програмної частини ПТК:

а) ті, що реалізують імітаційну цифрову модель ОК: 1) пакет візуального моделювання Simulink, що працює в режимі реального часу; 2) драйвери карт введення/виведення; 3) спеціально розроблене програмне середовище імітаційного моделювання процесів перевантаження зерна ПТЛ, яке дозволяє оперативно конфігурувати імітаційні моделі будь-яких ПТЛ, «автоматично» передаючи інформацію про СМ на всі моделі конвеєрів (приклад на рис. 9); 4) програма моделювання витікання СМ через регульовану засувку;

б) ті, що реалізують керування процесом: 1) SCADA-система WinCC з діалоговими вікнами для налаштування АСОЗ та візуалізації її роботи; 2) програма логічного заблокованого керування технологічним пуском та зупинкою конвеєрів у складі ПТЛ, їхньою аварійною зупинкою; 3) комплекс програм, що реалізують алгоритми АСОЗ, включаючи програму розрахунку ступеня завантаження конвеєрів за струмом навантаження їхніх ПЕД.

Застосування ПТК для налагодження ПЗ АСОЗ ПТЛ елеватора в м. Хмільник забезпечив найвищий рівень його готовності до впровадження.

Результати всебічних виробничих випробувань АСОЗ остаточно підтвердили правильність прийнятої концепції автоматичного керування завантаженням ПТЛ зерном, адекватність розроблених моделей, коректність та ефективність способу розрахунку ступеня завантаження конвеєрів, технології налагодження прикладного ПЗ АСОЗ з застосуванням ПТК.

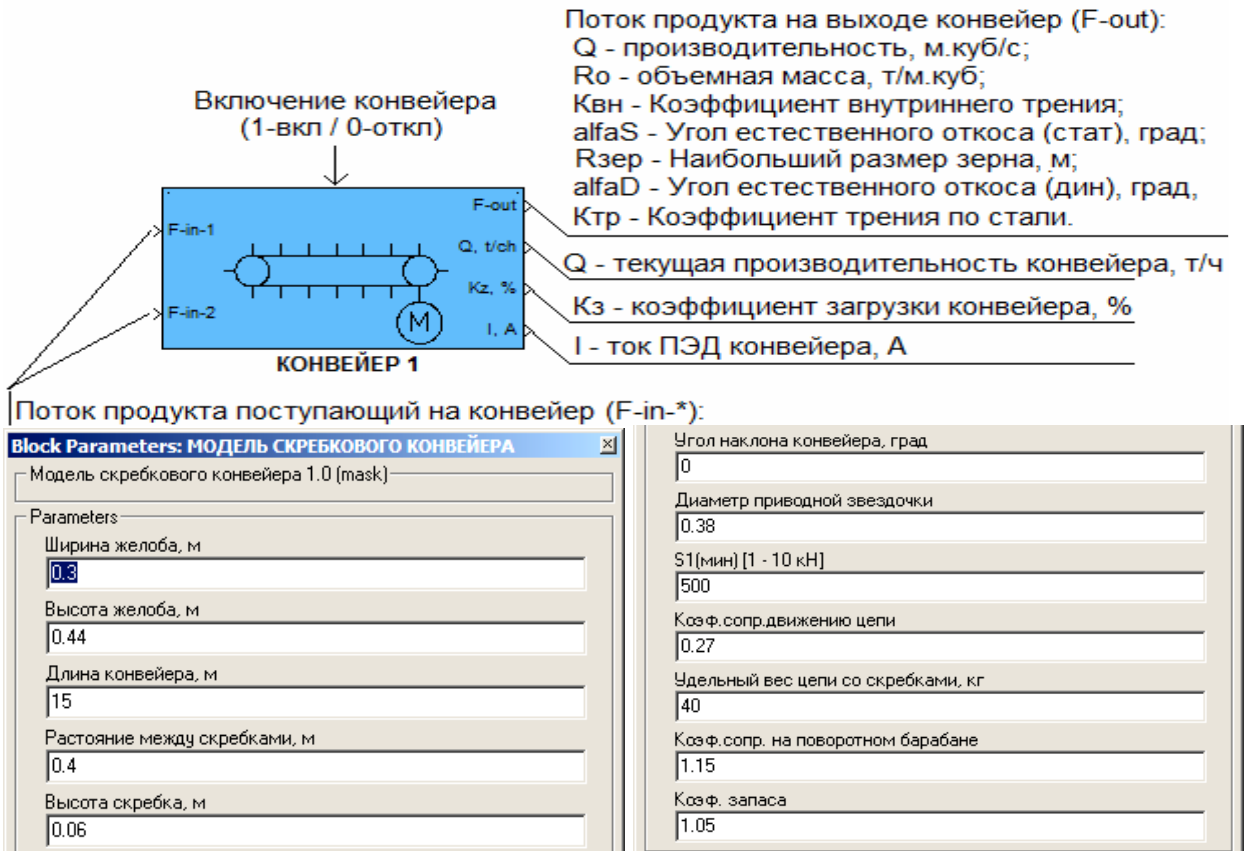


Рис. 9. Иконка та меню параметризації імітаційної моделі скребкового конвеєра, що входить у середовище імітаційного моделювання ПТЛ

Важливо відзначити, що програмне середовище імітаційного моделювання ПТЛ дозволяє на етапі підготовки пропозицій на розробку АСОЗ провести аналіз та обґрунтувати їхні техніко-економічні показники.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено результати розв'язання нової наукової задачі щодо обґрунтування вимог та розробки комплексу нових ММ, що описують динаміку процесів перевантаження СМ, зокрема зерна, конвеєрами ПТЛ елеваторів, включаючи АС, пов'язані з виникненням та розвитком його завалів, як основи для розробки нових ефективних алгоритмів САК завантаженням ПТЛ, а також нові рішення задач інформаційного забезпечення та налагодження ПЗ таких САК.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Обґрунтовано основу концепції автоматичного керування завантаженням ПТЛ зерном як засобу вирішення взаємно суперечливих вимог максимізації енергоефективності та мінімізації ймовірності виникнення АС при переміщенні зерна, пов'язаних із завалами ПТЛ. Вона дозволила цілеспрямовано сформулювати вимоги до ММ ПТЛ як ОК, що і обумовило їхню новизну, необхідність їхньої реалізації у формі імітаційних комп'ютерних моделей.

2. Розроблено ММ динаміки процесів переміщення СМ, зокрема зерна,



норіями та скребковими конвеєрами як ОК, які враховують розподіленість процесів уздовж напрямку переміщення, зміни їхніх властивостей (структури) зі статичних на астатичні як причину виникнення АС та розвитку завалів СМ у внутрішніх об'ємах транспортуючих машин. Моделі дозволяють адекватно моделювати роботу ПТЛ в умовах широкої зміни її завантаження, включаючи перевищує припустиме, та характеристик СМ, що транспортується.

3. Розроблено ММ асинхронних ПЕД, яка відтворює топологію їхніх робочих характеристик, та методику ідентифікації параметрів цієї моделі на основі тільки паспортних характеристик ПЕД, які моделюють. Модель дозволяє за величиною моменту опору на валу ПЕД розраховувати значення всіх параметрів його енергоспоживання, включаючи їхні активну та реактивну складові, і, завдяки цьому – витрати на оплату енергії.

4. Розроблено, на основі ММ асинхронних ПЕД, спосіб розрахунку ступеня завантаження конвеєрів СМ за результатами виміру повного струму, що споживається їхнім ПЕД, та варіанти його доцільної реалізації. Цей спосіб дозволяє розраховувати відносний момент опору на валу цих ПЕД, тобто величину, прямопропорційну їхньому завантаженню СМ для широких діапазонів зміни навантаження на валу ПЕД, зберігши при цьому традиційне джерело інформації.

5. Розроблено програмне середовище імітаційного моделювання процесів перевантаження зерна ПТЛ, яке дозволяє засобами візуального програмування оперативно компонувати імітаційні моделі ПТЛ необхідного складу та проводити цілеспрямовані комп'ютерні експерименти з налагодження алгоритмів автоматичного керування завантаженням ПТЛ та з оцінки економічної ефективності впровадження САК завантаженням цими ПТЛ.

6. Розроблено ПТК та технологію напівнатурного моделювання АСОЗ ПТЛ для налагодження її прикладного ПЗ, яке в контролері реалізує алгоритми керування АСОЗ, забезпечує його взаємодію із джерелами інформації та з виконавчими пристроями, зі SCADA АРМ оператора, застосування яких забезпечує максимальну готовність системи до впровадження.

7. Впровадження АСОЗ ПТЛ відвантаження зерна на елеваторі в м. Хмільнику та результати її всебічних виробничих випробувань підтвердили правильність прийнятої основи концепції автоматичного керування завантаженням ПТЛ зерном, адекватність розроблених моделей, коректність та ефективність способу розрахунку ступеня завантаження конвеєрів, технології та ПТК налагодження прикладного ПЗ АСОЗ ПТЛ.

### **Список опублікованих праць за темою дисертації**

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Хобин В. А. Моделирование рабочих характеристик приводных асинхронных электродвигателей для задач управления загрузкой оборудова-

ния / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2011. – Вип. 40. – Т. 1. – С. 228–234. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

2. Хобин В. А. Математическая модель норрии как объекта управления с изменяющимися свойствами. Моделирование процесса заполнения ковшей / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2012. – Вип. 42. – Т. 1. – С. 358–368. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

3. Хобин В. А. Математическая модель норрии как объекта управления с изменяющимися свойствами. Моделирование процессов транспортирования и сил сопротивления движению ленты / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2013. – Вип. 44. – Т. 1. – С. 241–249. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

4. Пат. на винахід 99525 Україна, МПК (2011.01), B65G 17/00, G01R 29/00. Спосіб контролю ступеня завантаження конвеєра / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобін В. А., Кір'язов І. М. і ін.; заявник та патентовласник ТОВ «С-Інжиніринг». – № а201014455; заявл. 03.12.10; опубл. 25.05.12, Бюл. № 10. – 14 с. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні патенту).*

5. Кирьязов И. Н. Программно-технический комплекс для отладки прикладного ПО автоматизированной системы оптимизации загрузки ПТЛ сыпучими материалами / И. Н. Кирьязов, В. А. Хобин // Автоматизація технологічних та бізнес-процесів. – Одеса, 2014. – № 4. – Т. 6. – С. 29–42. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

6. Кирьязов И. Н. Автоматизированная система оптимизации загрузки поточно-транспортных линий перегрузки зерна: итоги производственных испытаний / И. Н. Кирьязов, С. В. Шестопапов // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск, 2013. – № 7 (172). – С. 43–46. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

7. Кирьязов И. Н. Исследование эффективности функционирования АСОЗ ПТЛ на морском зерновом терминале в г. Николаеве / И. Н. Кирьязов, В. А. Хобин, С. В. Шестопапов, М. Т. Степанов // Автоматизація технологічних та бізнес-процесів. – Одеса, 2017. – № 4. – Т. 9. – С. 62–70. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

8. Хобин В. А. Повышение интеллектуального уровня базовых алгоритмов регулирования: актуальность, сущность, технологии / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Тр. XI Международ. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ–2010»), 24–28 мая 2010 г. – Одесса, 2010. – С. 174.

9. Хобин В. А. Концепция совершенствования алгоритмов регулирования и их самонастройки для САУ объектами технологического типа / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов, С. В. Шестопапов // XVII Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика–2010». Тез. доп. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – С. 305–307.

10. Хобин В. А. Автоматизация как средство повышения эффективности процессов транспортировки зерна на предприятиях: проблемы, пути решения / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов, С. В. Шестопапов // Сб. докл. IV Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2011». – Одесса: ОНАПТ, 2011. – С. 65–67.

11. Хобин В. А. Моделирование процесса транспортирования зерна норийей как объекта управления / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Сб. докл. V Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2012». – Одесса: ОНАПТ, 2012. – С. 67–69.

12. Кирьязов И. Н. Имитационная модель процесса транспортирования зерна норийей как объекта управления / И. Н. Кирьязов, В. А. Хобин // Мат. конф. XVIII Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика–2011». – Львів, 2011. – С. 192–193.

13. Кирьязов И. Н. Программно-техническая среда для отладки алгоритмов управления и прикладного ПО АСУТП перегрузки сыпучих материалов / И. Н. Кирьязов, В. А. Хобин // Мат. конф. XX Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика–2013». – Миколаїв, 2013. – С. 182.

14. Кирьязов И. Н. АСУТП перегрузки сыпучих материалов: программно-техническая среда для отладки алгоритмов управления и прикладного ПО / И. Н. Кирьязов, В. А. Хобин // Сб. докл. VI Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2013». – Одесса: ОНАПТ, 2013. – С. 28.

15. Кирьязов И. Н. Производственные испытания автоматизированной системы оптимизации загрузки поточно-транспортных линий перегрузки зерна / И. Н. Кирьязов, С. В. Шестопапов, В. А. Хобин // Сб. докл. VII Международ. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2014». – Одесса: ОНАПТ, 2014. – С. 25–26.

16. Кирьязов И. Н. Результаты функционирования АСОЗ ПТЛ на морском зерновом терминале в г. Николаеве / И. Н. Кирьязов, С. В. Шестопапов, В. А. Хобин, М.Т. Степанов // Сб. докл. X Международ. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2017». – Одесса: ОНАПТ, 2017. – С. 41–42.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

17. Пат. на корисну модель 56950 Україна, МПК (2011.01), В65G 17/00, G01R 29/00. Спосіб контролю ступеня завантаження конвеєра / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобін В. А., Кір'язов І. М. і ін.; заявник та патентовласник ТОВ «С-Інжиніринг». – № u201014456; заявл. 03.12.10; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2. – 14 с.

## Анотація

**Кір'язов І.М. Автоматичне керування процесами перевантаження зерна на елеваторах: моделювання ПТЛ як об'єкта керування, формування керованої змінної, напівнатурне тестування САК. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за фахом 05.13.07 – Автоматизація процесів керування, Одеська національна академія харчових технологій, Національний університет харчових технологій, Київ, 2019.

Обґрунтовано основу концепції автоматичного керування завантаженням потоково-транспортних ліній (ПТЛ) елеваторів зерном як засобу вирішення взаємно суперечливих вимог максимізації енергоефективності та мінімізації ймовірності виникнення аварійних ситуацій. Вона дозволила цілеспрямовано сформулювати вимоги до математичних моделей (ММ) ПТЛ як об'єктів керування, що й обумовило їхню новизну.

Розроблено ММ динаміки процесів переміщення зерна норіями та скребковими конвеєрами як об'єктами керування зі структурою, що змінюється, та обмеженнями типу «аварійна ситуація». Розроблено ММ робочих характеристик приводних електродвигунів (ПЕД) конвеєрів ПТЛ та методикау ідентифікації її параметрів за їхніми паспортними характеристиками. Моделі реалізовано у формі імітаційних моделей. Розроблено спосіб розрахунку ступеня завантаження конвеєрів СМ за результатами виміру повного струму, що споживається їхнім ПЕД, варіанти його доцільної реалізації та відповідне прикладне ПЗ контролера. Розроблено програмне середовище для компонування моделей та імітаційного моделювання процесів перевантаження зерна ПТЛ будь-якого складу. Розроблено програмно-технічний комплекс (ПТК), на якому реалізовано технологію напівнатурного моделювання САК, за допомогою якого налагоджені всі компоненти прикладного ПЗ автоматизованої системи оптимізації завантаження (АСОЗ) ПТЛ.

Впровадження АСОЗ ПТЛ відвантаження зерна на елеваторі в м. Хмільнику та результати її всебічних виробничих випробувань підтвердили правильність прийнятої основи концепції автоматичного керування завантаженням ПТЛ зерном, адекватність розроблених моделей, коректність та ефективність способу розрахунку ступеня завантаження конвеєрів, технології та ПТК налагодження прикладного ПЗ АСОЗ ПТЛ.

**Ключові слова:** елеватор, потоково-транспортна лінія, керування завантаженням, математична модель об'єкта керування, спосіб розрахунку ступеня завантаження, комплекс налагодження програм керування.

## Abstract

**Kiriazov I.N. Automatic control of grain transferring processes on elevators: TTL modelling as a control object, controlled variable formation,**

**semi-industrial testing of SAC. – Qualifying scientific work as a manuscript.**

The thesis for a degree of Ph.D. in technical science speciality 05.13.07 – Automation of control processes, Odessa national academy of food technologies, National university of food technologies, Kiev, 2019.

Ukraine has a developed and continuously growing system of enterprises for grain acceptance, storage, processing and shipment. A common and power consuming technological process (TP) for all such enterprises is the process of grain transportation by thread-transport lines (TTL), which includes groups of various types conveyors connected in series.

In systems of automatic control (SAC) of TTL, either created utilizing the relay-contact technology in the last century or using most modern controllers at the present time, only the functions of interlocked starting and stopping of the conveyors, control of emergency situations (ES) and prevention of their escalation into accidents by emergency shutdown of the TTL were presented.

The function of grain loading control for TTL always has been retained by the human operator due to the complexity of their properties as control objects (CO). This complexity is determined by presence of a set of specific features in the CO. The main ones are: – the TTL loading degree has limitations of the «emergency situation» type; – the values of the constraints are a-priori unknown and change together with a large number of factors; – the maximum energy-efficiency of the TTL is achieved at the loads that tend to the specified limits; – the properties of the CO through the control channels are essentially nonlinear and have large and varying transport delays; – a direct evaluation of the degree of conveyors load by their DEM load current is not so informative.

It is possible to ensure the TTL operation in loading modes which are close to maximum energy efficient ones and simultaneously to ES only if a special SAC is created, which implements the function of loading optimization. Taking into account the specifics of TTL as a control object, such SAC will be complex. For its development it is required, first of all, the development of mathematical models (MM) of the CO, which would reflect all its features. Apart from that, these MM should provide a basis for increasing the reliability of information on a conveyors loading rate while maintaining DEM current as its source and provide the possibility of final debugging of complex software for the SAC at the stage of its preparation for implementation.

The thesis is devoted to the development of MM of processes of grain transfer utilizing TTL on elevators as CO and solving on their basis the tasks of information support and debugging of the SAC.

The basis of the concept of automatic control of TTL grain loading on elevators as a means of resolving mutually contradictory requirements for maximum energy efficiency and minimum probability of ES occurrence is substantiated. On its basis, the requirements for TTL MM as CO are formulated, in particular, the reflection of the dynamics of the nucleation and development of ES in them, which determined their novelty.

MM as CO of bulk materials dynamics movement processes, in particular

grains, using paternosters and scraper conveyors were developed. These models take into account the distribution of processes along the direction of movement, the changes in their properties (structure) from static to astatic as the cause of emergencies and the development of grain debris in the internal volumes of transporting equipment. The MM of asynchronous DEM of conveyors, reproducing the topology of their performance characteristics, and the method for identifying the parameters of this model based only on the passport characteristics of the simulated DEM were developed. This MM allowed the values of all parameters of its energy consumption, including their active and reactive components, to be calculated using the value of the resistance moment on the DEM shaft and, therefore, the cost of energy.

A method has been developed for calculating the loading rate of conveyors with bulk materials based on the measurement of the total current consumed by their DEM and the options for its feasible implementation. The method makes it possible to calculate the relative moment of resistance on the shaft of these DEM, i.e. the value is directly proportional to their loading rate with bulk materials for wide ranges of load changes on the DEM shaft, while preserving the traditional source of information.

On the basis of conveyors and their electric drives MM, a software environment for simulation of processes of grain transfer using TTL was developed. The software environment allows using visual programming tools to quickly compile TTL imitation models of the required composition and conduct targeted computer experiments to debug the algorithms for automatic control of the TTL loading and to assess the economic efficiency of the implementation of the SAC of loading these TTL.

This environment is integrated into the software and hardware complex (SHC), on the basis of which the technology of semi-industrial trials of ACS, applied for debugging of the application software of the automated loading optimization system (ALOS) of TTL is implemented. This technology allows to debug the controller software that implements the control algorithms of the ALOS TTL, their interaction with information sources, with the executive devices, with SCADA, and ensure the maximum availability of the system for implementation.

The implementation of the ALOS TTL for grain shipment at the elevator in Hmelnik city and the results of its comprehensive production trials confirmed the correctness of the accepted concept of automatic control of the grain loading of TTL, the adequacy of the developed models, the correctness and efficiency of the method for calculating the loading of conveyors, technology and SHC of debugging of the ALOS TTL application software.

**Key words:** elevator, thread-transport line, loading control, control object mathematical model, method of loading rate calculation, control programs debugging complex.