

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

ШЕСТОПАЛОВ Станіслав Володимирович



УДК 004.896:621.86.06-048.34:
631.24:658.58(043.3)

**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ
ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА НА ЕЛЕВАТОРАХ:
ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ПТЛ ПРИ
ОБМЕЖЕННЯХ ТИПУ «АВАРІЙНА СИТУАЦІЯ»**

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
Жученко Олексій Анатолійович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», м. Київ,
доцент кафедри автоматизації хімічних
виробництв

Захист відбудеться «30» жовтня 2019 р. о 15⁰⁰ 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. Процеси перевантаження зерна, які реалізуються потоково-транспортними лініями (ПТЛ) елеваторів, складають основу їхніх технологічних процесів (ТП) та забезпечують його приймання, подачу на підробіток та перероблення, відвантаження. У елеваторів, які виконують функції зернових терміналів та орієнтованих на формування великих партій зерна для їхнього відвантаження на залізничний, річковий та морський транспорт, частка таких процесів максимальна. Час виконання операцій перевантаження та енерговитрати на них, за інших рівних умов, визначаються ступенем завантаження ПТЛ зерном. В даний час системи автоматичного керування (САК) завантаженням відсутні, а ця функція реалізується людиною-оператором, який дистанційно змінює положення засувки, через які зерно подається із сховищ на ПТЛ.

Створення САК завантаженням ПТЛ, які дозволили б мінімізувати витрати часу та енергії на перевантаження зерна на основі традиційних алгоритмів керування, неможливо. Головні причини цього – властивості ПТЛ як об'єкта керування (ОК): 1) максимально-припустимий ступінь завантаження ПТЛ апіорі невідомий, тому що він залежить від великої кількості факторів, які змінюються, пов'язаних зі станом її обладнання та характеристиками переміщувального зерна; 2) при перевищенні ступенем завантаження припустимого значення виникають різні аварійні ситуації (АС), при яких аварійний захист, запобігаючи переростання АС в аварію, припиняє процес транспортування зерна; 3) властивості каналів керування завантаженням у край несприятливі – в момент початку розвитку АС вони змінюються зі статичних на астатичні, мають дуже велике транспортне запізнювання (загальноприйнятий показник « τ/T » змінюється від 1 до 20 та більше), є істотно нелінійними (коефіцієнт передачі росте з ростом завантаження) та нестационарними.

АС включають два види. Перша (АС1) обумовлена перевищенням припустимого значення *об'ємної* продуктивності. Вона проявляється у формі виникнення та розвитку завалів зерна в робочому просторі конвеєрів, зокрема – норій, або проміжних бункерів ПТЛ, а відповідний аварійний захист реалізується на основі реле підпору зерна. Друга (АС2) обумовлена перевищенням припустимого значення *масової* продуктивності та виявляється в перегріванні приводних електродвигунів (ПЕД) конвеєрів ПТЛ, а аварійний захист реалізується на основі реле теплового захисту ПЕД.

Дисертаційна робота присвячено розробці САК цільова функція якої – реалізація у реальному часі умовної оптимізації завантаження (продуктивності) ПТЛ при обмеженнях типу «аварійна ситуація», для ОК, властивості якого перераховано вище.

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 і задачі дослідження

Мета дослідження – підвищити продуктивність, енергетичну ефективність, запобігти аварійні зупинки ПТЛ елеваторів у процесах перевантаження зерна за рахунок розробки інноваційної САК їхнім завантаженням.

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

1) обґрунтувати концепцію автоматичного керування завантаженням ПТЛ, коли АС обумовлена завалом зерна в башмаку її норії (АС1);

2) обґрунтувати концепцію автоматичного керування завантаженням ПТЛ, коли АС обумовлена перегріванням ПЕД її конвеєрів (АС2);

3) розробити структуру та алгоритми САК зі структурою, що комутується, які ефективно реалізують у реальному часі функції регулювання та умовної оптимізації завантаження ПТЛ при великих запізнюваннях в основних каналах керування та обмеженнях АС1;

4) розробити імітаційну модель САК зі структурою, що комутується, для ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику, моделюванням підтвердити відповідність реалізованого алгоритму керування його концепції та провести всебічний аналіз ефективності САК;

5) провести тестування та аналіз ефективності підсистеми автоматичного регулювання ступеня навантаження ПЕД норії з одноконтурною та каскадною структурами;

6) розробити прикладне програмне забезпечення (ПЗ) автоматизованої системи оптимізації завантаження (АСОЗ) ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику та налагодити його на програмно-технічному комплексі (ПТК), який реалізує технологію напівнатурного моделювання САК;

7) впровадити АСОЗ на елеваторі в м. Хмільнику, провести її виробничі випробування для остаточного підтвердження ефективності розробок дисертації.

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес перевантаження зерна поточно-транспортними лініями елеваторів.

Предмет дослідження – система автоматичного керування технологічним процесом перевантаження зерна, яка реалізує в реальному часі при обмеженнях типу «аварійна ситуація» функції регулювання та умовної оптимізації завантаження ПТЛ.

Методи дослідження:

– функціонально-структурний аналіз САК як один з інструментів загальної теорії систем (задачі 1 і 2); – методи теорії автоматичного керування (ТАК) та її підрозділів, у тому числі теорії систем із запізнюванням у контурі керування, теорії систем зі змінною структурою, теорії систем гарантуючого керування (СГК), теорії оптимізації (задача 3); – імітаційне моделювання САК (задачі 4, 5); – програмування та налагодження програм алгоритмів керування у середовищі Step7 контролерів Siemens (задача 6); – напівнатурне моделювання САК (задача 6); – планування та проведення виробничих експериментів (задача 7).

Наукова новизна отриманих результатів:

уперше обґрунтовано:

– концепцію автоматичного керування завантаженням ПТЛ, коли АС обумовлена завалом зерна в башмаку її норії, *яка дозволила* розробити структурну схему САК зі структурою, що комутується, яка реалізує функції регулювання та умовної оптимізації завантаження ПТЛ при великих запізнюваннях в основних каналах керування, яка гарантує запобігання її аварійних зупинок при виникненні цієї АС;

– концепцію автоматичного керування завантаженням ПТЛ, коли АС обумовлена перегріванням ПЕД конвеєрів, *яка дозволила* розробити структурну схему САК, яка реалізує функцію регулювання теплового стану найбільш перегрітого ПЕД на рівні, який гарантує запобігання його аварійного відключення, а у випадку недостатності ресурсів на регулювання – своєчасний запуск технологічної зупинки ПТЛ;

уперше розроблено:

– структурну схему та алгоритми керування САК зі структурою, що комутується, та налаштовувальними параметрами регуляторів для ПТЛ відвантаження зерна зі стрічковими конвеєрами та норією, коли АС обумовлена завалом зерна в башмаку її норії, *які дозволили* реалізувати відповідну концепцію керування, забезпечивши стійкість контурів керування;

– імітаційну математичну модель (ММ) САК зі структурою, що комутується, та налаштовувальними параметрами регуляторів для ПТЛ відвантаження зерна зі стрічковими конвеєрами та норією, коли АС обумовлена завалом зерна в башмаку її норії, *яка дозволила* проводити цілеспрямовані комп'ютерні експерименти з тестування, доопрацювання та оптимізації алгоритмів керування цією САК;

– структурну схему та алгоритми керування САК зі структурою, що комутується, для ПТЛ довільної конфігурації, коли АС обумовлена перегріванням ПЕД конвеєрів, *які дозволили* реалізувати відповідну концепцію керування;

отримала подальший розвиток технологія напівнатурного моделювання САК для остаточного налагодження прикладного ПЗ контролера, який реалізує розроблені алгоритми керування, *яка дозволила* в ході лабораторних

експериментів відтворити у реальному часі всі можливі режими роботи АСОЗ ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику та забезпечити максимальну готовність її до впровадження.

Практичне значення отриманих результатів

АСОЗ пройшла виробничі випробування і впроваджена на ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику, що дозволило знизити час виконання перевантажувальних операцій на 25–30 %, а витрати на електроенергію – на 20–25 % у порівнянні з «ручним» дистанційним керуванням зі спеціального комп'ютерного вікна АСУТП.

Апробовані структурні схеми та алгоритми керування АСОЗ використовуються компанією «С-інжиніринг» (м. Одеса) при розробці АСОЗ ПТЛ зернових терміналів з іншими конфігураціями ПТЛ. Одночасно, функціональні можливості АСОЗ розширюються, зокрема виконується відвантаження зерна одночасно з декількох джерел (силосів, проміжних ємностей, сушарки) з дотриманням заданої масової пропорційності його потоків. У таких умовах актуальність автоматизації процесу завантаження ПТЛ росте, тому що складність розв'язання такої задачі керування для оператора суттєво зростає.

Матеріали з АСОЗ 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: у [1, 2, 10–13, 19] – обґрунтовано концепцію автоматичного керування завантаженням ПТЛ, коли АС обумовлена завалом зерна в башмаку її норії, проблеми керування, які виникають, та шляхи їх вирішення; у [3, 5, 15, 16, 20] – обґрунтовано концепцію автоматичного керування завантаженням ПТЛ та алгоритм програмно-логічного керування при екстремальних навантаженнях у передаварійних режимах, коли АС обумовлена перегріванням ПЕД її конвеєрів, проблеми керування, які виникають, та шляхи їх вирішення; у [6–8, 14] – для випадка, коли АС обумовлена завалом зерна в башмаку її норії, розроблено структурну схему та алгоритми керування САК зі структурою, що комутується, та налаштувальними параметрами регуляторів для ПТЛ відвантаження зерна зі стрічковими конвеєрами та норією; у [4, 17] – для АСОЗ, впроваджених на елеваторі в м. Хмільнику та на морському зерновому терміналі в м. Миколаєві, обґрунтовано та реалізовано плани їх виробничих випробувань, описано їх результати; у [9, 18] – зібрано та оброблено інформацію про функціонування АСОЗ.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідалися й 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 і електронні технології (СІЕТ) – 2010» (м. Одеса, 2010 р.)

на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація» (м. Одеса, 2011–2014, 2017 р.р.), наукових конференціях ОНАХТ (м. Одеса, 2011–2017 р.р.).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано в 20 друкованих працях. Статей – 7, з яких 7 у наукових фахових виданнях України з Переліку, затвердженого МОН України, у тому числі 3 статті в журналі, який індексується в міжнародній наукометричній базі; патентів на винахід – 2; патентів на корисну модель – 2; тез доповідей – 9.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, основної частини, яка включає 4 розділи, висновків, списку використаних джерел з 117 найменувань та 6 додатків. Загальний обсяг роботи складає 203 сторінки. Основна частина містить 161 сторінку, включаючи 46 рисунків та 1 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі розглядаються загальні питання керування процесами перевантаження зерна на елеваторах, включаючи особливості ОК, якими є ПТЛ елеваторів, існуючі системи управління та їхні основні функції.

Обсяги переміщення зерна ПТЛ елеваторів багаторазово перевищують обсяги його врожаю, що вимагає досить значних енергетичних витрат. У реальних виробничих умовах ПТЛ працюють з досить суттєвим недозавантаженням, що збільшує не тільки енергетичні витрати, але і час виконання перевантажувальних операцій, що може спричинити штрафні санкції до елеватора з боку перевізників зерна.

Керування ступенем завантаження ПТЛ зерном, як у застарілих системах дистанційного автоматизованого керування (системах ДАК), реалізованих на релейно-контактній техніці, так і в сучасних АСУТП, реалізованих на основі комп'ютерно-контролерних мереж, здійснюється оператором АРМ «вручну». Причини цього – складність ОК (див. розділ «Актуальність роботи»). На практиці, оператори, як головну мету керування, обирають запобігання АС, завантажуючи ПТЛ зерном значно нижче не тільки їхніх гранично-припустимих, але і паспортних (номінальних) значень.

Оптимізувати досягнення суперечливої мети керування ступенем завантаження ПТЛ зерном можливо тільки при автоматизації відповідної функції керування. При цьому очевидно, що алгоритми САК, які буде реалізовувати цю функцію, не будуть тривіальними, а їхня розробка буде наукомісткою.

Она зажадає використання ММ ОК, адекватних цієї новій задачі, та підвищення інформативності існуючої оцінки ступеня завантаження ПЕД конвеєрів. Такі ММ ОК та спосіб підвищення інформативності за споживаним ПЕД струмом розроблено І.М. Кір'язовим. На них і базується дана робота.

У *другому розділі* на прикладі ПТЛ відвантаження зерна з елеватора в м. Хмільнику та на основі прийнятих концепцій керування завантаженням ПТЛ зерном при АС1 та АС2 проведено розробку структурних схем САК та алгоритмів керування, у тому числі – з підвищеними запасом стійкості та динамічною точністю.

При виникненні АС1 функція АСУТП «Контроль аварійних ситуацій, пов'язаних з рухом зерна за маршрутом, та аварійна зупинка ПТЛ» при $S^{ДП}=1$ через 2–5 секунд вимикає, рахуючи за ходом руху зерна, усі конвеєри ПТЛ перед норією, де виникла АС1, а при $S^{ТЗ}=1$ – вимикає всі конвеєри, включаючи аварійний, де виникла АС2. Аварійні вимикання суттєво знижують не тільки показники техніко-економічної ефективності роботи ПТЛ, але і ресурс усіх вузлів конвеєрів.

Структурну схему розробленої САК зі структурою, що комутується, яка забезпечує роботу ПТЛ в околиці її гранично-припустимого завантаження та, одночасно, гарантує запобігання її аварійних зупинок за АС1, наведено на рис. 1.

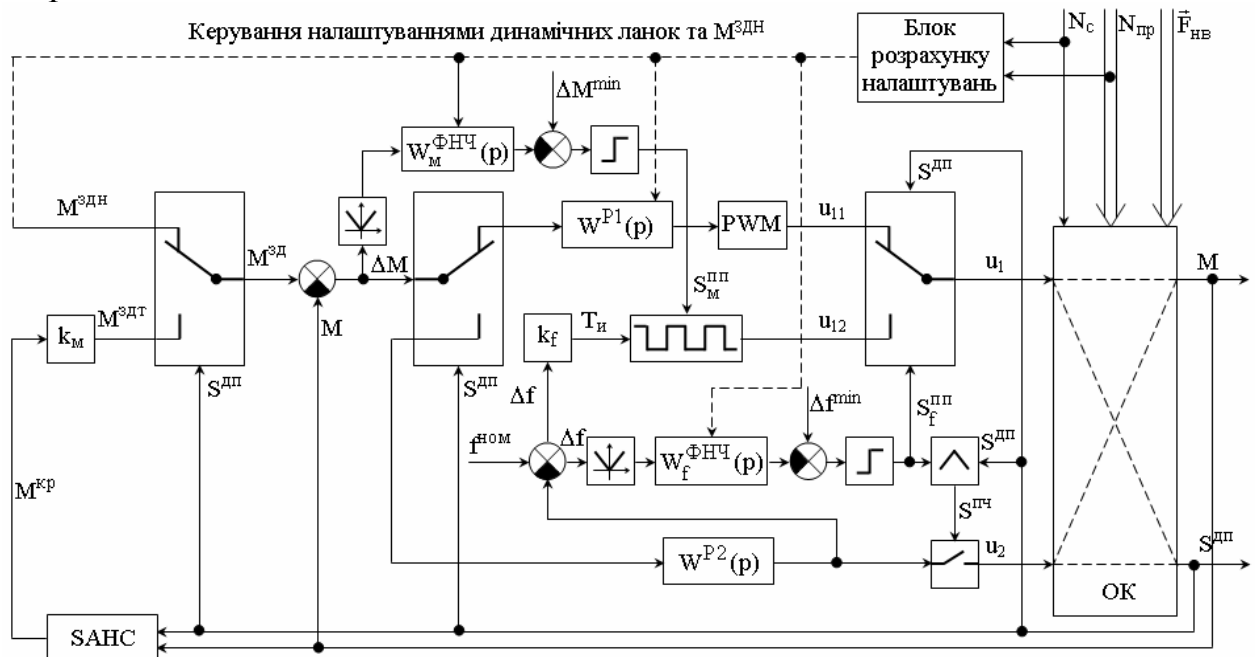


Рис. 1. Структурна схема САК оптимізації завантаження ПТЛ зі структурою, що комутується

Опис змінних до рис. 1:

- змінна ОК, яку оптимізують, та пов'язані з нею змінні: $M(t)$ – ступінь завантаження зерном норії (відносні момент опору або корисна потужність на валу її ПЕД), а після закінчення перехідних процесів за $M(t)$ – ступінь завантаження всієї ПТЛ; $M^{кр}(t)$ – критичне значення $M(t)$, при якому «спрацю-

вус» датчик підпору; $M^{3Д}(t)$ – задане значення $M(t)$; $M^{3ДН}$ – початкове значення $M^{3Д}(t)$; $M^{3ДГ}(t)$ – поточне значення $M^{3Д}(t)$;

- збуджуючі дії на ОК: N_C – номер силосу, з якого йде відвантаження зерна; $N_{ПР}$ – номер продукту, тобто номер типу зерна, під яким він записаний у базі даних; $\vec{F}_{НВ}$ – неконтрольовані зміни характеристик зерна, які призводять до змін його витрати через засувки та критичних значень заповнення ковшів норії, зокрема зміни його насипної маси та гідравлічного радіусу, точності позиціонування засувок, параметрів технічного стану норії, які впливають на критичні значення заповнення її ковшів і т.п.

- керуючі дії: $u_1(t)$ – така, що змінює положення підсилосної засувки, яка змінює витрату зерна в ПТЛ; $u_2(t)$ – така, що змінює частоту ПЧ, який живить ПЕД підсилосних конвеєрів; $u_{11}(t)$ – варіант u_1 , яка формується в контурі регулювання завантаження норії; $u_{12}(t)$ – варіант u_1 , яка формується в контурі регулювання частоти живлення ПЕД підсилосних конвеєрів у режимі ліквідації АС1;

- змінні, пов'язані з керуючими діями: $T_1(t)$ – час (тривалість) керуючого імпульсу u_{12} на зміну положення засувки; $f(t)$, $f_{НОМ}$, $\Delta f(t)$ – відповідно: частота напруги живлення ПЕД підсилосних конвеєрів, її номінальне значення та їхня різниця; $\Delta M^{МНН}$, $\Delta f^{МНН}$ – значення осереднених на ковзному інтервалі часу модулів змінних $\Delta M(t)$ та $\Delta f(t)$, при яких перехідні процеси в контурах регулювання « $u_{12} - M$ » та « $u_2 - M$ » можна вважати закінченими;

- логічні змінні: $S^{ДП}$ – інформація з датчика підпору зерна в башмаку норії; $S^{ПЧ}$ – команда, яка перекомутує контур регулювання (стабілізації) $M(t)$ у САК з « $M - u_1$ » на « $M - u_2$ »; $S_M^{МНН}$ та $S_f^{МНН}$ – змінні-індикатори завершення перехідних процесів у контурах регулювання M та f відповідно.

Процедура оптимізації, яка реалізується САК, зводиться до періодичного пошуку $M^{КР}(t)$. Перед початком пошуку, у сталому режимі роботи, її контур стабілізації завантаження, який включає канал « $M - u_1$ », розмикається, після чого реалізується процес збільшення $u_1(t)$ аж до виникнення події $S^{ДП} = 1$. На схемі САК цю її структуру не відображено, тому що вона є максимально простою, але суттєво утрудняє розуміння схеми.

Алгоритм керування, що реалізується САК зі структурою, що комутується (крім оптимізації), який, у тому числі, запобігає аварійні зупинки при подіях $S^{ДП} = 1$, обумовлені і пошуком $M^{КР}(t)$, і дією $\vec{F}_{НВ}$, описується виразами (1)–(12):

$$u_1(t) = \begin{cases} u_{11}(t), & \text{при } S^{ДП} = 0 \wedge S_f^{МНН} = 0 \\ u_{12}(t), & \text{при } S_M^{МНН} = 1 \wedge S_f^{МНН} = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

де « \wedge » та « \vee » – символи логічних функцій «І» та «АБО»;

$$u_{11}(t) = \begin{cases} PWM(W^{P1}(p)\Delta M(t)), & \text{при } S^{ДП} = 0 \\ 0, & \text{при } S^{ДП} = 0 \wedge S_f^{ПП} = 1 \\ 0, & \text{при } S^{ДП} = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

PWM (Pulse-width modulation) – символ широтно-імпульсної модуляції;

$$\text{де } \Delta M(t) = M^{ЗД}(t) - M(t) = \begin{cases} M^{ЗДН}(N_3) - M(t), & \text{при } t = 0 \\ M^{ЗДТ}(t) - M(t), & \text{при } S^{ДП} = 1 \vee t > t \Rightarrow S^{ДП} = 1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$M^{ЗДТ}(t) = k_M M^{КР}(t); \quad M^{КР}(t) = SAHC(M(t) \Rightarrow S^{ДП} = 1), \quad (4)$$

де k_M – коефіцієнт зниження навантаження ПЕД відносно $M^{КР}(t)$; $W^{P1}(p)$ – передатна функція (варіант) регулятора головного контуру стабілізації M ; *SAHC* (sample and hold circuit) – символ функції «вибірка-зберігання»;

$$W^{P1}(p) = T_{IM} p \frac{W_1^{ПП}(p)}{1 + W_1^{ПП}(p)W^{ПК}(p)}, \quad (5)$$

де $p \equiv d/dt$ – оператор диференціювання; T_{IM} – час переміщення виконавчим механізмом підбункерної засувки між її крайніми положеннями; $W^{ПП}(p)$, $W^{ПК}(p)$ – передатні функції ПІ-регулятора та коригувального зв'язку «випереджувач Сміта»;

$$W_1^{ПП}(p) = k_{P1}(1 + 1/T_{I31}p), \quad (6)$$

$$W^{ПК}(p) = \left(1 - e^{-\tau_{u_1-M}^{MO} p} \right) W_{u_1-M}^{MO}(p), \quad (7)$$

де $W_{u_1-M}^{MO}(p)$, $e^{-\tau_{u_1-M}^{MO} p}$ – передатні функції моделі ОК за каналом « $u_1 - M$ » без запізнювання та моделі його запізнювання. Так як значення коефіцієнта передачі об'єкту $k_0(N_C, N_{ПР})$ та його часу запізнювання $\tau_{u_1-M}^{MO}(N_C)$ залежать від N_C та $N_{ПР}$, то і значення коефіцієнта передачі $k_{P1}(N_C, N_{ПР})$ та час ізодрому регулятора $T_{I31}(N_C)$ також повинні залежати від цих збурювань (контрольованих);

$$u_{12} = \begin{cases} \text{sign } \Delta f, & \text{при } S_M^{ПП} = 0 \wedge k_f \Delta f = T_1 - t' \geq 0 \\ 0, & \text{при } T_1 - t' < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

де $k_f = T_I/\Delta f$ – коефіцієнт перерахунку Δf в T_I ; t' – час, відлічуваний від моменту початку формування керуючого імпульсу u_{12} ;

$$u_2(t) = \begin{cases} W^{P2}(p)\Delta f(t), & \text{при } S^{\text{ДП}} = 1 \vee S_f^{\text{ПП}} = 1 \\ f_{\text{НОМ}} = 50\text{Гц}, & \text{при } S^{\text{ДП}} = 0 \wedge S_f^{\text{ПП}} = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

де $f(t) = f_{\text{НОМ}} - f(t)$, $W^{P2}(p) = W_2^{\text{П}}(P) = k_{p2}(1 + 1/T_{\text{I32}}p)$; k_{p2} , T_{I32} – коефіцієнт передачі та час ізодрому регулятора;

$$S^{\text{ПЧ}} = \begin{cases} 0, & \text{при } S^{\text{ДП}} = 0 \wedge S_f^{\text{ПП}} = 0 \\ 1, & \text{при } S^{\text{ДП}} = 1 \vee S_f^{\text{ПП}} = 1 \end{cases}; \quad (10)$$

$$S_f^{\text{ПП}} = \begin{cases} 0, & \text{при } W_f^{\text{ФНЧ}}(p)|(f_{\text{НОМ}} - u_2(t))| \leq \Delta f^{\text{MIN}} \\ 1, & \text{при } W_f^{\text{ФНЧ}}(p)|(f_{\text{НОМ}} - u_2(t))| > \Delta f^{\text{MIN}}; \end{cases} \quad (11)$$

$$S_M^{\text{ПП}} = \begin{cases} 0, & \text{при } W_M^{\text{ФНЧ}}(p)|\Delta M(t)| \leq \Delta M^{\text{MIN}} \\ 1, & \text{при } W_M^{\text{ФНЧ}}(p)|\Delta M(t)| > \Delta M^{\text{MIN}}; \end{cases} \quad (12)$$

де $W_f^{\text{ФНЧ}}(p) = 1/(T_{\text{CFf}}p + 1)^2$, $W_M^{\text{ФНЧ}}(p) = 1/(T_{\text{CFM}}p + 1)^2$ – передатні функції усереднюючих фільтрів низьких частот; $T_{\text{CF}}(N_C)$ – постійні часу фільтрів, $T_{\text{CF}} \approx 0,25\Delta t$; Δt – необхідний інтервал часу усереднення.

Сутність комутації структури полягає в наступному. У ситуації $S^{\text{ДП}}=1$ запобігання розвитку АС1 та аварійної зупинки ПТЛ забезпечується за рахунок перемикавання каналу керування завантаженням ПТЛ з основного на допоміжний. Основний канал керування реалізується підсилюючою засувкою та має більше $\tau_{u_1 - M}^{\text{МО}}(N_C)$, але час його роботи нічим не обмежений. Допоміжний канал реалізується за рахунок зміни швидкості конвеєра, який подає зерно в норію, практично не має запізнювання, але час його роботи обмежений через позаштатну роботу ПЕД цього конвеєра.

Повернення з допоміжного каналу керування на основний вимагає «безударності» зворотного перемикавання. Для цього в САК (тимчасово) забезпечується режим переходу частоти живлення ПЕД зі зниженого на номінальне значення (50 Гц), керуючим впливом у якому є положення засувки. При цьому відбувається перерахунок та зміна положення засувки таким чином, щоб при її новому положенні заданий ступінь завантаження досягався б при роботі конвеєра в номінальному режимі.

У дисертації, для підвищення якості регулювання $M(t)$ в основному контурі, пропонується його перетворення до каскадної структури, де в якості проміжної змінної узятий ступінь навантаження ПЕД підсилюючого конвеєра, на який безпосередньо надходить зерно із силосу. Це дозволяє частково компенсувати запізнювання в цьому контурі.

Безаварійне за АС2 керування ПТЛ в умовах функціонування САК оп-

тимізації її завантаження забезпечується додатковим введенням зовнішнього контуру зворотного зв'язку, у якому реалізується функція обмеження та стабілізації теплового стану найбільш перегрітого ПЕД ПТЛ на припустимому рівні. Структурну схему розробленої САР з реле теплового захисту ПЕД типу SIMOCODE.pro з функцією розрахунку часу τ^{CP} , який залишився до його аварійного відключення через перегрів, наведено на рис. 2.

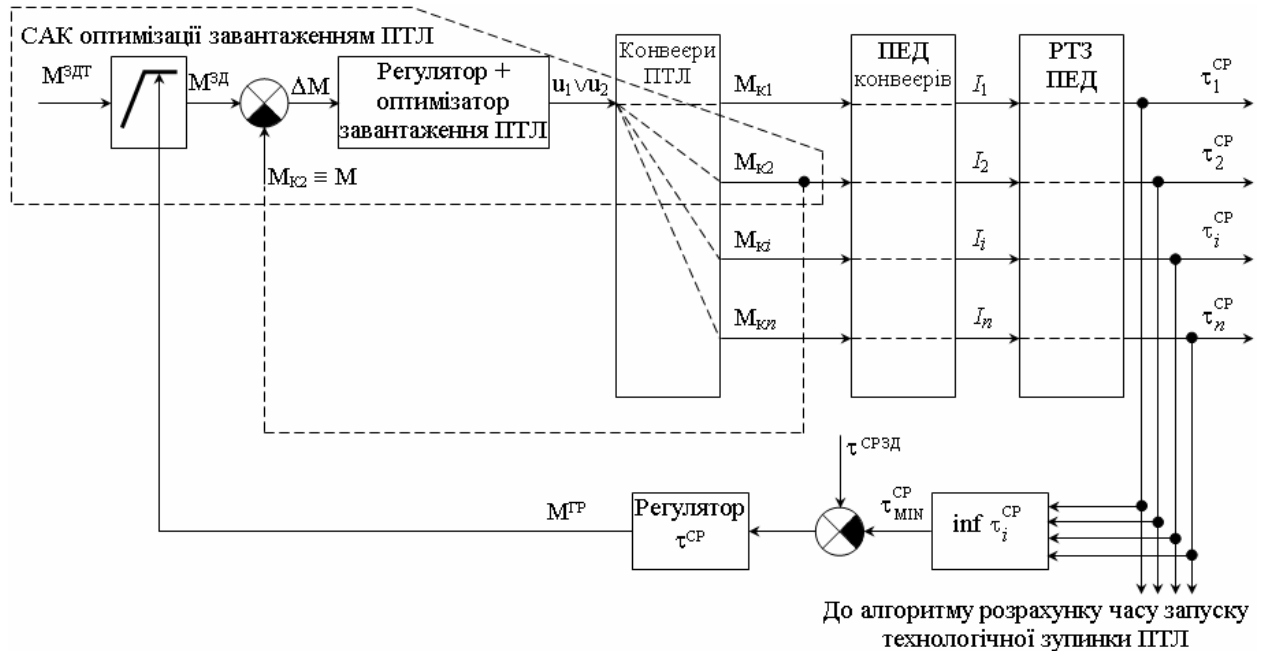


Рис. 2. Структурна схема САР теплового стану ПЕД ПТЛ

Опис змінних до рис. 2:

- змінна, яку регулюють: $\tau_{MIN}^{CP} = \inf \tau_i^{CP}$ – мінімальний інтервал часу, який залишився до аварійного вимкнення найбільш перегрітого ПЕД із всіх конвеєрів ПТЛ, де $i \in 1 \dots n$ номер конвеєра, включаючи норію;
- регулююча дія: $M^{ГР}$ – граничне (припустиме) значення завантаження ПТЛ зерном, яке визначається в процесі регулювання;
- проміжні змінні: $M_{Кi}$ відносні моменти (навантаження) на валах ПЕД; I_i – струми навантаження цих ПЕД.

В екстремальній ситуації, коли стабілізація теплового режиму ПЕД виявляється неможливою, запобігти аварійну зупинку дозволяє випереджувальний на час τ^0 запуск алгоритму технологічної зупинки. Час τ^0 для мінімізації ризику необґрунтованості зупинки, повинен дорівнювати часу, необхідному на закриття підсиленої засувки та на послідовне розвантаження від зерна ланцюга конвеєрів, включаючи тот, ПЕД якого перегрівається.

У третьому розділі для ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику розробляється імітаційна модель САК зі структурою, що комутується, див. рис. 3, та проводиться її тестування. Схема моделі САК містить у собі 9 функціональних блоків, 8 з яких, крім блоку «Об'єкт керування», розроблені автором.

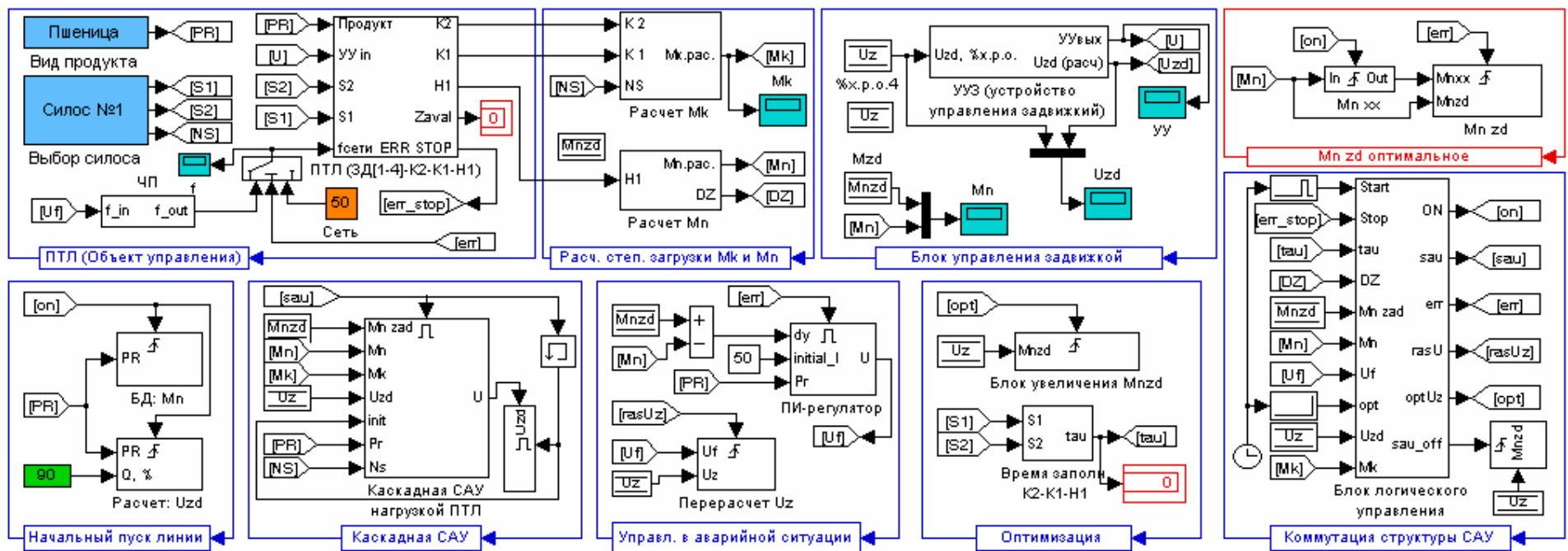


Рис. 3. Схема моделирования САК зі структурою, що комутується, яка забезпечує оптимізацію завантаження ПТЛ та безаварійність її функціонування (максимально високий ієрархічний рівень)

Налаштування алгоритмів САР для ОК з дуже великими співвідношеннями « τ/T » каналів регулювання, які мають ПТЛ елеваторів, не має теоретично обґрунтованих методик. Тому налаштування контуру стабілізації навантаження ПЕД норії здійснювалася в два етапи. На першому етапі здійснювалася розрахунок початкових наближень налаштувань за відомими методиками з їхньою екстраполяцією в область фактичних τ/T . На другому – проводився інтерактивний комп'ютерний експеримент на імітаційній моделі САР у якому експериментатор цілеспрямовано коригував налаштування.

Тестування САК також здійснювалося в кілька етапів:

– підтвердження адекватності алгоритму керування ПТЛ зі структурою, що комутується, реалізованого в імітаційній моделі, запатентованому, ілюстрація результатів – рис. 4;

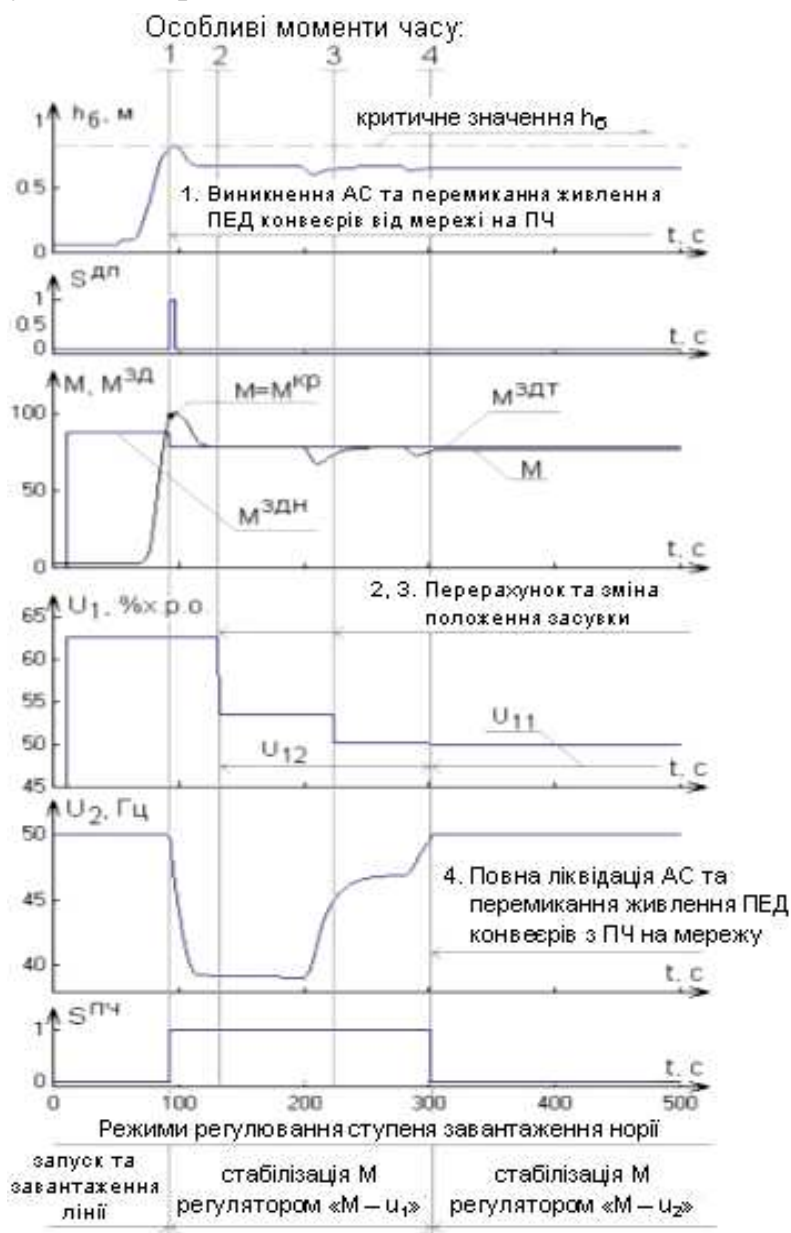


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання САК зі структурою, що комутується, при перевірці адекватності алгоритму керування, реалізованого в моделі, запатентованому (h_6 – рівень зерна в башмаку норії)

– тестування САР навантаження норії з одноконтурною та каскадною структурами в пускових та сталих режимах роботи ПТЛ, ілюстрація результатів – рис. 5а;

– тестування САК зі структурою, що комутується, яка оптимізує завантаження ПТЛ зерном при обмеженнях типу АС1, в режимах пуску, оптимізації та стабілізації завантаження, ілюстрація результатів – рис. 5б.

Загальний висновок – всі алгоритми керування САК працездатні та готові до реалізації в складі прикладного ПЗ промислового контролера.

У четвертому розділі розглядаються розробка прикладного ПЗ АСОЗ ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику, його налагодження, та результати виробничих випробувань АСОЗ.

Розроблена АСОЗ включила до себе результати всіх досліджень та розробок з оптимізації завантаження ПТЛ при обмеженнях типу АС1. Її нижній ієрархічний рівень управління реалізовано на контролері Siemens S300, середовище програмування SIMATIC Step7 v5.5. Верхній рівень (АРМ операторів) реалізовано на комп'ютері, середовище програмування SCADA SIMATIC WinCC v7.1. Технічну та програмну частини АСОЗ було інтегровано в діючу на підприємстві АСУТП.

Розроблені ПЗ та комп'ютерно-контролерна мережа АСОЗ пройшли лабораторні налагодження та тестування на спеціалізованому ПТК, який реалізує принцип напівнатурного моделювання. Це дозволило здійснити роботи з впровадження АСОЗ без яких-небудь доробок ПЗ та алгоритмів керування, включаючи базу даних налаштувань регуляторів.

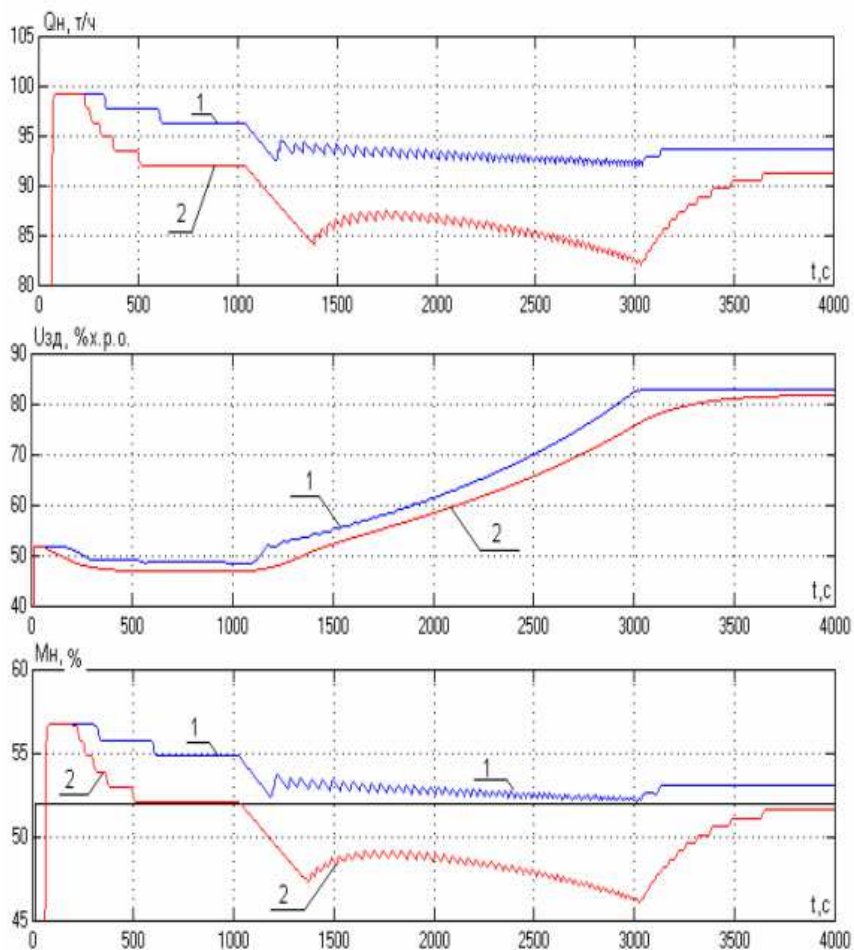
Виробничі випробування АСОЗ здійснювалися в режимі її штатної експлуатації технічним персоналом елеватора у широкому спектрі технологічних ситуацій, включаючи найнесприятливі. Ілюстрація результатів – рис. 6. Вони остаточно підтвердили коректність усіх досліджень та розробок дисертації.

Основними джерелами економічної ефективності при експлуатації АСОЗ є: а) підвищення продуктивності ПТЛ та зниження часу перевантажувальних операцій, не менш, ніж на 10–15 % та запобігання аварійних зупинок; б) зниження енерговитрат на перевантажувальні операції до 12–18 %.

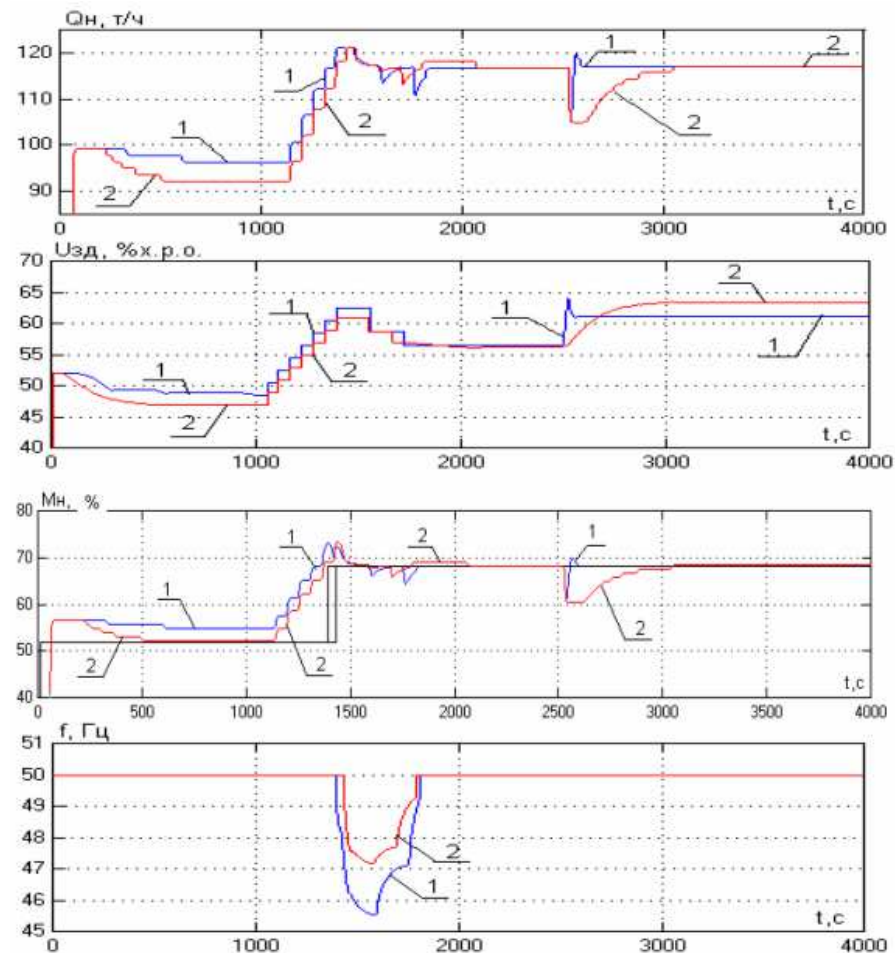
Максимального ефекту можна буде досягти при застосуванні АСОЗ на високопродуктивних зернових терміналах з відвантаженням зерна на морський транспорт.

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено обґрунтування та вирішення нової наукової задачі – оптимізації завантаження ПТЛ елеваторів зерном при обмеженнях типу «аварійна ситуація». АС виникають при перевищенні завантаженням її апріорі невідомих критичних значень (перевантаження ПТЛ) і, без їхньої своєчасної ліквідації призводять до спрацьовування відповідних аварійних захистів та екстремому припиненню роботи ПТЛ. Вирішення задачі зажадало



а)



б)

Рис. 5. Фрагменти результатів тестування: а) підсистеми регулювання (САР) моменту навантаження ПЕД норії; б) САК зі структурою, що комутується, яка оптимізує завантаження ПТЛ зерном. Умови тестування: структура САР: 1) каскадна двоконтурна; 2) одноконтурна; номер силосу, який розвантажується, та довжина ділянок транспортування зерна конвеєрами: № 2, 92 м ($\tau \approx 39$ с, $\tau/T \approx 9$); зерно, яке транспортується, та його щільність: пшениця, $0,75$ т/м³

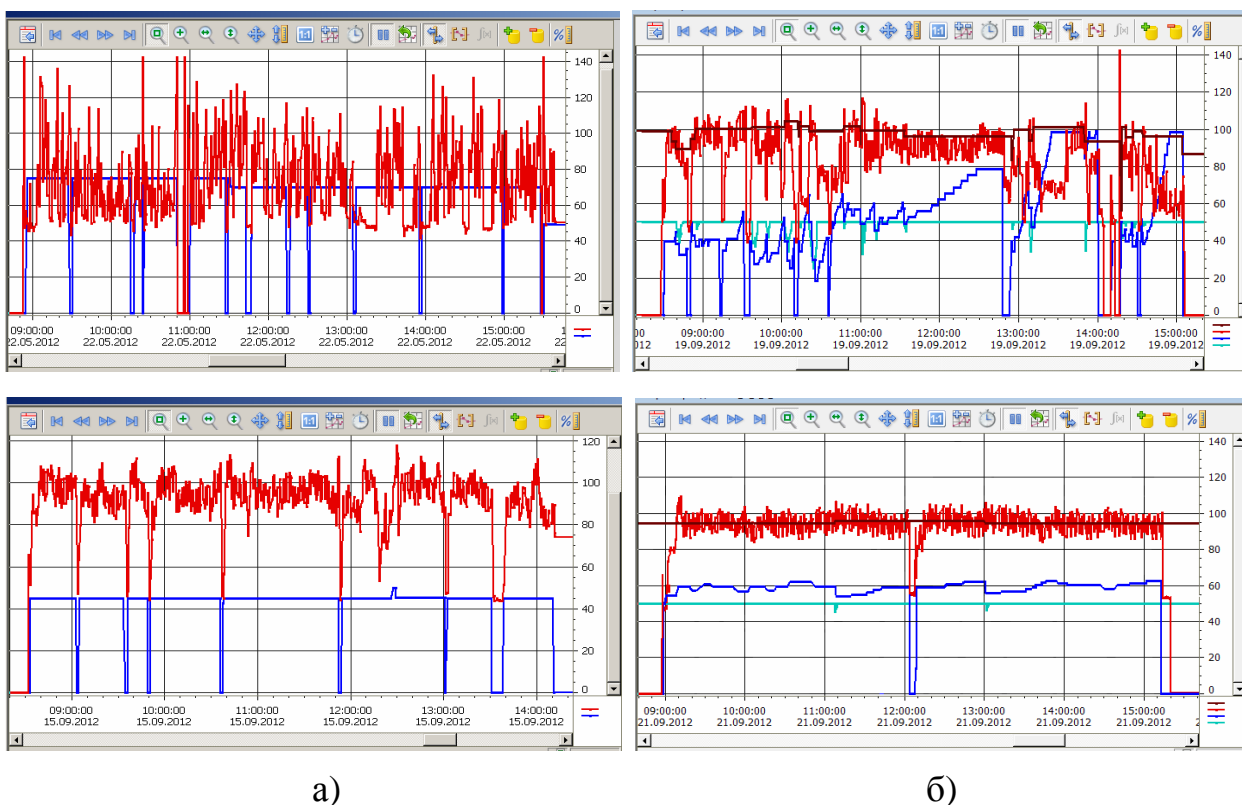


Рис. 6. Фрагменти вікон архівів SCADA, які ілюструють результати керування завантаженням ПТЛ: а) оператором з АРМ; б) АСОЗ

обґрунтування концепцій та розробки спеціальних САК, зокрема зі структурою, що комутується, які забезпечують, в умовах експлуатації, які змінюються, завантаження ПТЛ, близьке до гранично-припустимого, гарантуючи при цьому запобігання спрацьовування аварійних захистів.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Обґрунтовано концепції автоматичного керування завантаженням ПТЛ зерном, близьким до максимального з гарантованим запобіганням спрацьовування аварійних захистів, спричинених її перевантаженням, коли АС обумовлено завалом зерна в башмаку її норії та перегріванням ПЕД її конвеєрів.

2. Розроблено структури та алгоритми САК, які реалізують концепції керування, включаючи алгоритми комутації структури САК, які дозволяють ефективно реалізувати в реальному часі функції регулювання та умовної оптимізації завантаження ПТЛ при великих запізнюваннях в основних каналах керування і при обмеженнях типу «аварійна ситуація, обумовлена завалом зерна в башмаку норії».

3. Розроблено імітаційну модель САК зі структурою, що комутується, для оптимізації завантаження ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику. На основі моделі проведено дослідження (тестування) САК, і підтверджена відповідність реалізованого в ній базового алгоритму керування обґрунтованої концепції, а також його ефективність у перехідних (пускових) та сталих режимах роботи ПТЛ.

4. Проведено (на основі імітаційної моделі) дослідження (тестування) підсистеми автоматичного регулювання навантаження ПЕД норії в складі САК зі структурою, що комутується, і оптимізацією завантаження ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику, показане підвищення її ефективності при переході від одноконтурної структури підсистеми регулювання до каскадної.

5. Розроблено прикладне ПЗ АСОЗ ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику. ПЗ в повному обсязі налагоджене на ПТК, який реалізує технологію напівнатурного моделювання, та підготовлено до впровадження.

6. АСОЗ впроваджено на ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику, проведено її усебічні виробничі випробування, результати яких підтвердили правильність прийнятої концепції автоматичного керування завантаженням ПТЛ при обмеженнях типу «аварійна ситуація, обумовлена завалом зерна в башмаку норії», ефективність розробленої САК зі структурою, що комутується, та технологій налагодження її прикладного ПЗ.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Пат. на винахід 95887 Україна, МПК (2011.01), В65G 17/00, В65G 47/46 (2006.01), В65G 65/42 (2006.01), G01G 11/12 (2006.01). Спосіб автоматичного управління завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобін В. А., Кір'язов І. М., Шестопалов С. В. і ін.; заявник та патентовласник ТОВ «С-Інжиніринг». – № а201015861; заявл. 29.12.10; опубл. 12.09.11, Бюл. № 17. – 24 с. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні патенту)*.

2. Хобін В. А. Концепция эффективного управления производительностью поточно-транспортных линий при перегрузке зерна / В. А. Хобін, С. В. Шестопалов // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск, 2011. – № 10 (148). – С. 26–29. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті)*.

3. Пат. на винахід 98736 Україна, МПК (2012.01) В65G 17/00, В65G 47/00, В65G 43/00, H02H 5/04 (2006.01). Спосіб автоматичного управління потоково-транспортною лінією сипких матеріалів / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобін В. А., Кір'язов І. М., Шестопалов С. В. і ін.; заявник та патентовласник ТОВ «С-Інжиніринг». – № а201105403; заявл. 27.04.11; опубл. 11.06.12, Бюл. № 11. – 7 с. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні патенту)*.

4. Хобін В. А. Концепция эффективного управления производительностью поточно-транспортных линий при перегрузке зерна / В. А. Хобін, С. В. Шестопалов // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса:

2011. – Вип. 40. – Т. 1. – С. 223–228. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

5. Шестопапов С. В. 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).*

6. Хобін В. А. Управление поточно-транспортными линиями при экстремальных нагрузках в предаварийных режимах / В. А. Хобин, С. В. Шестопапов // *Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України*. – Одеса: 2013. – Вип. 44. – Т. 1. – С. 249–256. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

7. Хобін В. А. Оптимизация загрузки ПТЛ элеваторов зерном на основе САУ с коммутируемой структурой / В. А. Хобин, С. В. Шестопапов // *Автоматизация технологических та бизнес-процесів*. – Одеса, 2015. – № 3. – Т. 7. – С. 17–26. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

8. Хобін В. А. Оптимизация завантаження ПТЛ елеваторів зерном: формалізація та підвищення ефективності алгоритму керування / В. А. Хобін, С. В. Шестопапов // *Автоматизация технологических та бизнес-процесів*. – Одеса, 2017. – № 3. – Т. 9. – С. 51–58. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів та написанні статті).*

9. 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 // *Автоматизация технологических та бизнес-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:

10. Шестопапов С. В. Самонастройка регуляторов в САУ технологическими объектами: принципиальные особенности объектов, сложности и путь решения задачи / В. А. Хобин, С. В. Шестопапов // *Тр. XI Международ. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» («СИЭТ–2010»)*, 24–28 мая 2010 г. – Одесса, 2010. – С. 175.

11. Хобін 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.

12. Шестопапов С. В. Оптимизация производительности процесса перегрузки зерна в условиях ограничения типа «аварийная ситуация» / С. В.

Шестопалов, В. А. Хобин // Мат. конф. XVIII Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика–2011». – Львів, 2011. – С. 194–195.

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

14. Шестопалов С. В. Система автоматической оптимизации процесса перегрузки зерна поточно-транспортными линиями / В. А. Хобин, С. В. Шестопалов // Сб. докл. V Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация – 2012». – Одесса: ОНАПТ, 2012. – С. 78–80.

15. Шестопалов С. В. Управление ПТЛ сыпучих материалов при работе приводных электродвигателей ее конвейеров в окрестности предельно допустимого нагрева / В. А. Хобин, С. В. Шестопалов // XIX Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика – 2013». Мат. конф. – Миколаїв, 2013. – С. 183.

16. Шестопалов С. В. Управление приводными электродвигателями конвейеров в окрестности их предельно допустимого нагрева / В. А. Хобин, С. В. Шестопалов // Сб. докл. VI Всеукр. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и автоматизация–2013». – Одесса: ОНАПТ, 2013. – С. 45.

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

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

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. Пат. на корисну модель 57903 Україна, МПК (2011.01), В65G 17/00. Спосіб автоматичного керування завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобин В. А., Кір'язов І. М., Шестопалов С. В. і ін.; заявник та патентовласник ТОВ «С-Інжиніринг». – № u201015862; заявл. 29.12.10; опубл. 10.03.11, Бюл. № 5. – 22 с.

20. Пат. на корисну модель 66456 Україна, МПК (2011.01), В65G 17/00. Спосіб автоматичного управління потоково-транспортною лінією сипких матеріалів / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобин В. А., Кір'язов І. М., Шестопалов С. В. і ін.; заявник та патентовласник ТОВ «С-Інжиніринг». – № u201105396; заявл. 27.04.11; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. – 12 с.

Анотація

Шестопалов С.В. Автоматичне керування процесами перевантаження зерна на елеваторах: оптимізація завантаження ПТЛ при обмеженнях типу «аварійна ситуація». – 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.

У дисертації представлено нові концепції та конкретні рішення задачі автоматичного керування завантаженням потоково-транспортних ліній (ПТЛ) елеваторів зерном як задачі умовної оптимізації при обмеженнях типу «аварійна ситуація» з гарантованим запобіганням спрацьовування аварійних захистів, яку реалізують у реальному часі.

Керування завантаженням ПТЛ, коли аварійну ситуацію (АС) обумовлено завалом зерна в башмаку її норії (АС1), реалізується системою автоматичного керування (САК) зі структурою, що комутується, яка містить у собі два контури регулювання завантаження. В основному контурі регулювання завантаження здійснюється зміною відкриття підсиленої засувки, у допоміжному – зміною швидкості руху стрічки підсиленого конвеєра. Перемикання з основного контуру на допоміжний відбувається при виявленні АС1, яка створюється або цілеспрямовано – пошуковим алгоритмом оптимізації, або мимовільно – через дію збурювань. Після ліквідації АС1, для повернення з допоміжного контуру регулювання на основний реалізується контур стабілізації частоти живлення приводного електродвигуна (ПЕД) на номінальному значенні, регулювальним органом у якому є підсилена засувка. Для підвищення якості регулювання запропоноване перетворення основного контуру САК до каскадної структури.

Керування завантаженням ПТЛ, коли АС обумовлено перегріванням ПЕД її конвеєрів (АС2), реалізується стабілізацією на припустимому рівні теплового стану найбільш перегрітого ПЕД. В умовах САК зі структурою, що комутується, ця стабілізація забезпечується введенням зовнішнього, щодо цієї САК, контуру зворотного зв'язку з регулятором теплового стану. В екстремальній ситуації, коли стабілізація теплового режиму ПЕД виявляється неможливою, запобігти аварійну зупинку дозволяє випереджувальний запуск алгоритму технологічної зупинки.

На основі САК зі структурою, що комутується, розроблено автоматизовану систему оптимізації завантаження (АСОЗ) ПТЛ відвантаження зерна елеватора в м. Хмільнику. Її алгоритми керування налагоджено та протестовано на імітаційній моделі, а прикладне ПЗ – на програмно-технічному комплексі, який реалізує технологію напівнатурного моделювання. АСОЗ уведено в експлуатацію, проведено її всебічні виробничі випробування, результати

яких підтвердили ефективність наукових та технічних рішень, розроблених у дисертації.

Ключові слова: перевантаження зерна, елеватори, потоково-транспортні лінії, аварійні ситуації, аварійні зупинки, оптимізація завантаження, керування, автоматизація.

Abstract

Shestopalov S.V. Automatic control of grain transferring processes on elevators: optimization of TTL loading with limitations of «emergency situation» type. – 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.

The grain transferring processes by thread transport lines (TTL) on elevators ensure its acceptance, submission for processing and shipment. At elevators that function as grain terminals, the share of such processes is maximal. The time for carrying out the overload operations and the energy consumption for them are determined by the degree of loading of the TTL with grain. At present, automatic control systems (ACS) of loading control are absent, and this function is implemented by the human operator.

The solution to the problem of automatic control of the TTL grain loading on elevators which would allow minimizing the time and energy consumptions for transferring operations, is impossible on the basis of traditional algorithms. The main reasons are as follows: 1) the maximum allowable loading rate of the TTL a-priori is unknown and varies with changes in the characteristics of the grain being transported and the state of the equipment; 2) if the TTL loading level exceeds its permissible value (if the TTL is overloaded), emergency situations (ES) arise; 3) the properties of the control channels of TTL loading control are highly unfavorable for effective control – they have a very large transport delay, are essentially non-linear and non-stationary, at the time of beginning of the ES development they can change from static to astatic ones.

ES include two types. The first one (ES1) – is due to exceeding the permissible value of volumetric productivity. It manifests itself in the form of the occurrence and development of grain obstruction in the working spaces of the conveyors. The second one (ES2) is caused by excess of the permissible level of conveyors DEM overheating. It is utterly important that with increasing the TTL loading rate, up until the maximum permissible, energy costs and time for transfer operations are reduced, but, simultaneously, ES occurrence probability increases.

The thesis presents new concepts and concrete solutions to solve this contradiction based on the development of the loading ACS with special functional orientation. Its target function is a real-time implementation of TTL loading conditional optimization with limitations of «emergency situation» type together with

guaranteed prevention of emergency trips protection. The TTL loading control concept, when ES is caused by a grain obstruction in the paternoster boot drum (ES1) is implemented in the ACS with a switching structure which includes two loading control channels – main and auxiliary. The main control channel has a transport delay of a significant value, but the time of its operation is unlimited. The auxiliary channel is implemented by changing the speed of the conveyor belt movement. It has almost no delay, but its operation is limited due to the abnormal operation of this conveyor. ES1 is created either on purpose – by the optimization search algorithm, or spontaneously – because of the disturbances impact. At the moment of ES1 detection, the structure of the ACS is switched, under which temporary replacement of the TTL loading control channel from main to auxiliary, which allows rapid elimination of the ES1. The return from auxiliary control channel to the main one requires «unstressed» switching.

To increase the quality of control it is proposed to convert the main ACS channel to the cascade structure.

TTL loading control concept when the ES is caused by conveyors DEM overheating (ES2), is implemented by stabilizing at the permissible level of the thermal state (the permissible time remaining before the thermal protection is activated) of the most overheated DEM TTL. In the conditions of the implemented ACS with switching structure, this stabilization is provided by introducing external, in relation to the ACS, feedback loop with the thermal state controller. In an extreme situation, when the stabilization of DEM thermal state is impossible, to prevent an emergency stop, initializes the preemptive start of the technological shutdown algorithm.

For the complex debugging of control algorithms of the ACS with a switching structure which implement the task of TTL grain loading optimization on the elevator in Hmelnik city, its simulation model has been developed and, based on it, the testing of the automatic control system has been carried out. It confirmed the correspondence of the basic control algorithm of the adopted concept implemented in it, as well as the efficiency of the transition from a single-loop structure of the load rate control system to a cascade structure.

Based on the ACS with a switching structure, automated loading optimization system (ALOS) for TTL of grain transferring on elevator in the Hmelnik city was developed. Its application software has been fully debugged and is ready for implementation at the software and hardware complex that implements the semi-industrial trials technology. The ALOS was put into operation. Its comprehensive production trials were carried out. The results confirmed the effectiveness of the concept of TTL loading control under constraints such as «emergency situation caused by grain obstruction in the boot drum of the paternoster», developed ACS with switching structure and debugging technologies of its application software.

Key words: grain transferring, elevators, thread-transport lines, emergency situations, emergency stops, loading optimization, control, automation.