

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СТЕПАНОВ Михайло Тимофійович

УДК 664.723.047.5-933.6

**ГАРАНТУЮЧЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ СУШІННЯ ЗЕРНА
В ШАХТНИХ ПРЯМОТОЧНИХ ЗЕРНОСУШАРКАХ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2005

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти і науки України на кафедрі автоматизації виробничих процесів

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Хобін Віктор Андрійович,
Одеська національна академія харчових технологій, професор кафедри автоматизації виробничих процесів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України,
академік МАКНС

Богаєнко Іван Миколайович,
НВК “Київський інститут автоматики”,
НАН України та Держпромполітики України,
м. Київ, заступник ген. директора
кандидат технічних наук, доцент

Харабет Олександр Миколайович,
Одеський національний політехнічний університет,
доцент кафедри автоматизації
теплоенергетичних процесів

Провідна установа: Національний університет харчових технологій, кафедра автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій
Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться “28” квітня 2005 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 при Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1, тел. 288-205.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1.

Автореферат розіслано “25” березня 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ямпольський Ю.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сушіння зерна є основним технологічним процесом (ТП) зі збереження і поліпшення його показників якості. Однак цей процес досить енергоємний і вибагливий до дотримання великої кількості обмежень, встановлених регламентом. Широко застосовувані на Україні зерносушарки (ЗС) шахтного типу як об'єкти управління (ОУ) є нестационарними, піддані координатним та параметричним збуренням, мають вельми значні запізнення за деякими каналами управління, а їх найбільш ефективні режими роботи лежать в області гранично припустимих. При цьому кількість регламентованих параметрів процесу сушіння перевищує кількість управляючих дій. Усе це робить проблему забезпечення високої якості просушеного зерна, при одночасному зниженні енергоємності процесу, нетривіальною.

Ефективним способом її розв'язання, є удосконалення систем автоматичного управління (САУ), яке слід здійснювати за рахунок підвищення “інтелектуального” рівня їх алгоритмів управління, в тому числі – розширення їх функціональних можливостей. При цьому наявність великої кількості обмежень у регламенті процесу сушіння визначає актуальність введення в САУ ЗС функції гарантування, тобто реалізації САУ ЗС у класі систем гарантуючого управління (СГУ), а дуже великі запізнення в каналах управління ЗС вимагають удосконалення алгоритмів гарантуючого управління (АГУ) за рахунок введення в них функції прогнозування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі автоматизації виробничих процесів (АВП) Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) відповідно до основного наукового напрямку № 3 ОНАХТ “Створення і розробка нового високоефективного обладнання, теорії, методів його розрахунків і проектування; автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв”. Базу для підготовки дисертації склали науково-дослідні роботи (НДР), які проведено за держбюджетними темами: “Дослідження і розробка інтелектуальних систем управління, що гарантують зниження енергоємності і дотримання регламентів у зернопереробній і харчовій промисловості”, № ДР 0196U004198 і “Синтез віртуальних аналогів складних технологічних процесів харчових виробництв як основи нового покоління систем інтелектуального високоефективного управління” № ДР 0103U003435. Здобувач брав участь у цих НДР як виконавець.

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження – підвищити ефективність роботи шахтних прямоточних зерно-

сушарок, знизивши питомі витрати енергії, втрати якості зерна і підвищивши продуктивність, за рахунок удосконалення структури й алгоритмів систем автоматизації на основі принципів гарантуючого управління і прогнозування.

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

1. Розробити варіанти алгоритмів гарантуючого управління з прогнозуванням, провести їх порівняльні дослідження, вибрати раціональні для застосування.
2. Допрацювати математичну модель (ММ) процесу сушіння зерна в шахтній прямо-точній зерносушарці, розробити її цифрову імітаційну форму, провести тестування і перевірку на адекватність.
3. Розробити систему гарантуючого управління режимами сушіння зерна в шахтній прямо-точній зерносушарці, провести її дослідження і налагодити алгоритми на імітаційній моделі, провести виробничі випробування експериментального зразка.

Об'єкт дослідження – системи автоматичного управління шахтними зерносушарками.

Предмет дослідження – імітаційні моделі процесу сушіння зерна, алгоритми і системи гарантуючого управління зерносушарками.

Методи дослідження:

- при розробці алгоритмів гарантуючого управління з прогнозуванням використовувалися методи теорії автоматичного управління і її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем і теорії цифрових систем управління, теорії сплайнів, теорії імовірностей, теорії випадкових процесів і її підрозділів – теорії викидів випадкових процесів і оцінювання випадкових процесів, чисельні методи рішення задач оптимізації;
- при розробці імітаційної моделі зерносушарки використовувалися методи теорії сушіння, чисельні методи рішення систем диференціальних рівнянь з розподіленими параметрами;
- для розробки і дослідження алгоритмів управління застосовувалося імітаційне моделювання на ЕОМ з використанням новітніх пакетів прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше розроблено:

- альтернативні варіанти алгоритмів гарантуючого управління з прогнозуванням;
- функціонально повну цифрову імітаційну модель процесу сушіння зерна в шахтній прямо-точній зерносушарці з розподіленими параметрами;
- СГУ режимами сушіння зерна в шахтних прямо-точних зерносушарках з комутованою структурою контурів регулювання й алгоритмами з прогнозуванням.

Одержали подальший розвиток:

- математична модель (ММ) процесів сушіння зерна за рахунок обліку енергії відриву молекул води від зерна, обмежень на відносну вологість відпрацьованого сушильного агенту, зміни швидкості видалення вологи з зерна в міру його висушування, перерозподілу сушильного агенту по шарах зерна, коректного розрахунку часу перебування зерна в зонах сушіння при зміні продуктивності сушарки;
- алгоритм управління для пускових режимів роботи СГУ з формуванням базової траєкторії перехідного процесу.

Практичне значення отриманих результатів

Практична значущість полягає в:

- підвищенні ефективності процесу сушіння зерна в шахтних прямоточних зерносушарках за рахунок підвищення їх продуктивності, зниження питомих енерговитрат, збереження якості зерна;
- можливості застосування розроблених алгоритмів гарантуючого управління для підвищення ефективності гарантуючого управління іншими об'єктами з великим запізненням.

Розроблена СГУ режимами сушіння зерна в шахтних прямоточних зерносушарках пройшла виробничу перевірку в складі САУ шахтної зерносушарки на Помічянському елеваторі. Результати випробувань підтвердили працездатність і ефективність системи. Це дозволяє рекомендувати СГУ режимами сушіння зерна для застосування на підприємствах зернопереробної промисловості. Очікуваний економічний ефект для однієї зерносушарки ДСП-32от складає 30...60 тис. грн./рік.

Отримана імітаційна модель шахтної зерносушарки може використовуватися для попередньої оцінки ефективності процесу сушіння зерна, а також як тренажер для підготовки оперативного персоналу, що обслуговує зерносушарки.

Особистий внесок здобувача

У публікаціях, виконаних у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [1] проведено цифрову реалізацію моделей СГУ, їх оптимальний параметричний синтез і порівняльний аналіз; у [2] розроблено алгоритми гарантуючого управління з прогнозуванням на основі кубічного сплайну, проведено дослідження альтернативних варіантів прогнозування в складі СГУ; у [4] конкретизовано структуру й алгоритми СГУ режимами сушіння в шахтних прямоточних зерносушарках, проведено дослідження роботи системи на моделі зерносушарки в різних умовах. Здобувачем особисто: допрацьовано математичну модель шахтної зерносушарки, виконано її програмну реалізацію у формі імітаційної моделі; виконано

програмну реалізацію і дослідження алгоритмів роботи СГУ в пускових режимах; підготовлено програмне забезпечення для проведення виробничих випробувань СГУ режимами сушіння.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на конференціях: “Автоматика-2001” (м. Одеса, 2001 р.), “Автоматика і комп'ютерні технології в промисловості й АПК” (м. Кіровоград, 2002 р.), “Автоматика-2004” (м. Київ, 2004 р.), наукових конференціях ОНАХТ (м. Одеса, 2000 – 2004 р.р.).

Публікації. Оpubліковано 6 друкованих праць (4 статті, 2 тези доповідей).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 127 найменувань, додатків і викладена на 161 сторінці. Вона містить 51 рисунок, 6 таблиць і 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі розглядається задача підвищення ефективності роботи шахтних прямооточних зерносушарок за рахунок удосконалення САУ режимами сушіння зерна й актуальність її розв'язання в класі систем гарантуючого управління.

У ряді основних ТП зернопереробної галузі проаналізовано процес сушіння зерна в шахтних зерносушарках і виявлено, що шахтні зерносушарки як ОУ мають такі особливості: 1) висока енергоємність установок; 2) розподіленість тепло-масообмінних процесів, що приводить до значних запізнень за каналами управління температури і, особливо, вологості зерна; 3) великі діапазони зміни вологості зерна, атмосферного повітря, продуктивності ЗС, що визначає інтенсивність координатних і параметричних збурень; 4) найбільш ефективні режими роботи знаходяться на границях гранично припустимих значень технологічних параметрів, а їх порушення приводять до значних втрат якості зерна; 5) кількість регламентованих параметрів перевершує кількість управляючих дій. Ці особливості визначають значну залежність ефективності роботи шахтних зерносушарок від ефективності управління, і роблять актуальним підвищення “інтелектуального” рівня алгоритмів САУ ЗС за рахунок введення в них функції гарантування.

Проведений аналіз САУ режимами сушіння зерна в шахтних зерносушарках показав, що існуючі системи управління зерносушарками, зокрема шахтними типу ДСП-32от, зводяться в основному до стабілізуючих САР. При цьому за рахунок нестачі управляючих дій частина регламентованих змінних залишається без управління, що негативно позначається на ефективності ведення процесу. Використання найпростіших (типових) алгоритмів

у цих системах не передбачає можливості інтенсифікувати процес і вести його в області найбільш ефективних гранично припустимих режимів. Усе це підвищує актуальність використання СГУ для управління зерносушарками типу ДСП-32от.

У розділі розглянуто принципи побудови, алгоритми і варіанти структур СГУ, актуальних для об'єктів зернопереробної промисловості. Алгоритми гарантування утворюють у системі додатковий замкнутий контур управління, динаміка якого в значній мірі залежить від запізнення в ОУ. Наявність великого запізнення в каналі управління, що характерно для шахтних зерносушарок, погіршує якість роботи системи й ефективність розв'язання задачі гарантуючого управління. Компенсувати вплив запізнення можливо за рахунок введення в АГУ функції прогнозування гарантуючого управління на час, порівняний з часом запізнення, вперед.

Тому що вихідним етапом синтезу САУ є розробка моделі ОУ, то частину розділу присвячено розгляду ММ динаміки процесу сушіння зерна в шахтних зерносушарках. Існуючі моделі недостатньо повно відображують властивості зерносушарок як ОУ. Це не дозволяє безпосередньо на їх основі вести синтез СГУ, і вимагає доопрацювання існуючих моделей для урахування особливостей зерносушарки ДСП-32от як ОУ.

В другому розділі представлено етапи і результати розробки алгоритмів гарантуючого управління з прогнозуванням.

У випадку, коли обмеження на регульовану змінну $y(t)$ накладене “зверху”, $y^{rp} \equiv y^{rp+}$ і в міру наближення $y(t)$ до y^{rp+} ефективність роботи об'єкту монотонно зростає, а порушення обмеження (подія S) приводить до значних несприятливих наслідків, припустиме задане значення $y^{3дд+}(t)$ контуру регулювання в СГУ визначається з умови:

$$y^{3дд+}(t) = \operatorname{argmin} \left\{ y^{rp+} - y(t) \right\} \Big| \hat{P}_S(y^{rp+}, y^{3дд+}, T, t) = P_S^r(y^{rp+}, T) \quad (1)$$

де $\hat{P}_S(y^{rp}, T, t)$ – оцінка поточного значення імовірності відсутності порушення обмеження ($\bar{S}$);

$P_S^r(y^{rp}, T)$ – гарантована імовірність $\bar{S}$;

T – інтервал часу, на якому гарантується $\bar{S}$.

Для СГУ ефективність розв'язання задачі (1) багато в чому залежить від запізнення в каналі управління ОУ. Воно не дозволяє системі вчасно реагувати на зміну $y^{3дд+}(t)$, що знижує ефективність її роботи. Підвищення якості роботи системи можливе за рахунок використання в розрахунку $y^{3дд+}(t)$ прогнозування значень математичних очікувань $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{\dot{m}}_y(t)$ на час $\tau_{пр}$, що порівняне з часом запізнення в каналі управління τ_0 .

Попередні дослідження показали, що окремі ділянки траєкторії руху $y(t)$ можуть бути представлені безперервними, багаторазово диференційованими функціями (сплайнами). Це дало можливість для прогнозування змінних $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{\dot{m}}_y(t)$, як моделей траєкторій їх зміни використовувати кубічний і гармонічний сплайни. При використанні кубічного сплайну окремі ділянки траєкторії зміни $\hat{m}_y(t)$ описуються виразом:

$$\hat{m}_y(t+\Delta\tau_{\text{пр}})=\hat{\bar{m}}_y(t)+\hat{d}(t)(t+\Delta\tau_{\text{пр}})^3+\hat{c}(t)(t+\Delta\tau_{\text{пр}})^2+\hat{b}(t)(t+\Delta\tau_{\text{пр}})+\hat{a}(t), \quad \Delta\tau_{\text{пр}} \in [0, \tau_{\text{пр}}], \quad (2)$$

де параметри моделі оцінюються в поточний момент часу $t = t_0$ за значеннями $\hat{m}_y(t_0)$ та її похідними відповідно до виразів:

$$\begin{aligned} \hat{d}(t_0) &= \ddot{\bar{m}}_y(t_0)/6, \quad \hat{c}(t_0) = (\ddot{\bar{m}}_y(t_0) - \ddot{\bar{m}}_y(t_0)t_0)/2, \quad \hat{b}(t_0) = \dot{\bar{m}}_y(t_0) - \ddot{\bar{m}}_y(t_0)t_0 + \ddot{\bar{m}}_y(t_0)t_0^2/2, \\ \hat{a}(t_0) + \hat{\bar{m}}_y(t_0) &= \hat{m}_y(t_0) - \dot{\bar{m}}_y(t_0)t_0 + \ddot{\bar{m}}_y(t_0)t_0^2/2 - \ddot{\bar{m}}_y(t_0)t_0^3/6, \end{aligned} \quad (3)$$

а у випадку цифрової реалізації алгоритму управління, параметри кубічного сплайну можуть визначатися за значеннями решітчастої функції $\hat{m}_y(nT_{\text{КВ}})$, $n=0, \infty$, з кроком квантування $T_{\text{КВ}}$:

$$\begin{aligned} \hat{a}(nT_{\text{КВ}}) + \hat{\bar{m}}_y(nT_{\text{КВ}}) &= \hat{m}_y(nT_{\text{КВ}}), \\ \hat{b}(nT_{\text{КВ}}) &= (-22\hat{m}_y(nT_{\text{КВ}}) + 36\hat{m}_y((n-1)T_{\text{КВ}}) - 18\hat{m}_y((n-2)T_{\text{КВ}}) + 4\hat{m}_y((n-3)T_{\text{КВ}}))/-12T_{\text{КВ}}, \\ \hat{c}(nT_{\text{КВ}}) &= (-12\hat{m}_y(nT_{\text{КВ}}) + 30\hat{m}_y((n-1)T_{\text{КВ}}) - 24\hat{m}_y((n-2)T_{\text{КВ}}) + 6\hat{m}_y((n-3)T_{\text{КВ}}))/-12T_{\text{КВ}}^2, \\ \hat{d}(nT_{\text{КВ}}) &= (-2\hat{m}_y(nT_{\text{КВ}}) + 6\hat{m}_y((n-1)T_{\text{КВ}}) - 6\hat{m}_y((n-2)T_{\text{КВ}}) + 2\hat{m}_y((n-3)T_{\text{КВ}}))/-12T_{\text{КВ}}^3. \end{aligned} \quad (4)$$

При використанні гармонічного сплайну окремі ділянки траєкторії зміни $\hat{m}_y(t)$ описуються узагальненою синусоїдою:

$$\hat{m}_y(t+\Delta\tau_{\text{пр}}) = \hat{\bar{m}}_y(t) + \hat{A}_m(t) \sin(\hat{\omega}_m(t)(t+\Delta\tau_{\text{пр}}) + \hat{\phi}_m(t)), \quad \Delta\tau_{\text{пр}} \in [0, \tau_{\text{пр}}], \quad (5)$$

де параметри моделі оцінюються в поточний момент часу $t = t_0$ відповідно до виразів:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_m(t_0) &= \sqrt{\hat{\ddot{m}}_y(t_0)/\hat{m}_y(t_0)}, \quad \hat{\phi}_m(t_0) = -\arctg(\hat{\dot{m}}_y(t_0)/\hat{\omega}_m(t_0)\hat{m}_y(t_0)), \\ \hat{A}_m(t_0) &= \hat{\dot{m}}_y(t_0)/\hat{\omega}_m(t_0)\cos\phi_m(t_0), \quad \hat{\bar{m}}_y(t_0) = \hat{m}_y(t_0) - \hat{A}_m(t_0)\sin\hat{\phi}_m(t_0). \end{aligned} \quad (6)$$

Результати тестування обраних алгоритмів прогнозування для детермінованих і випадкових процесів (рис. 1) показали їх ефективність і можливість введення в алгоритми гарантуючого управління для дослідження в рамках СГУ. На рис. 2 представлено приклади структурних схем СГУ, в алгоритми яких включено функцію прогнозування.

При використанні для прогнозування $\hat{m}_y(t)$ і $\hat{m}_{\dot{y}}(t)$ кубічного сплайну (2) вираз для розрахунку зпрогнозованого на $\tau_{\text{пр}}$ значення середньої інтенсивності S , що реалізується в МОЧП приймає вид:

$$\begin{aligned} \hat{n}_s^+(y^{\text{ГР}^+}, t+\tau_{\text{пр}}) = & \frac{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)}{2\pi\hat{\sigma}_y^{\text{II}}(t)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^+ \left[\frac{y^{\text{ГР}^+} - \hat{m}_y(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_y^{\text{II}}(t)} \right]^2 \right\} \times \\ & \times \left\{ \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)} \right)^2 \right) + \sqrt{2\pi} \frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)} \Phi \left(\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\hat{\sigma}_y^{\text{II}}$, $\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}$ - середньоквадратичні відхилення $y(t)$ і $\dot{y}(t)$, що розраховані з урахуванням помилок прогнозування.

Замінивши в (6) оцінку поточного значення $\hat{n}_s^+(y^{\text{ГР}^+}, t+\tau_{\text{пр}})$ його припустимим значенням $n_s^{\text{д}^+}(y^{\text{ГР}^+}) = -\ln P_s^{\text{Г}}(y^{\text{ГР}^+}, T)/T$, поточне значення оцінки $\hat{m}_y(t)$ – заданим, гранично близьким до $y^{\text{ГР}^+}$ значенням $y^{\text{зд}^+}(t)$, і розв'язавши (7) відносно $y^{\text{зд}^+}$, отримаємо вираз для МРЗП:

$$\begin{aligned} y^{\text{зд}^+}(t+\tau_{\text{пр}}) = & y^{\text{ГР}^+} - \hat{d}(t_0)(t_0 + \tau_{\text{пр}})^3 - \hat{c}(t_0)(t_0 + \tau_{\text{пр}})^2 - \hat{b}(t_0)(t_0 + \tau_{\text{пр}}) - \hat{a}(t_0) - \hat{\sigma}_y^{\text{II}}(t) \times \\ & \times \sqrt{2 \ln \left| \frac{-T \hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)}{2\pi \hat{\sigma}_y^{\text{II}}(t) \ln P_s^{\text{Г}}(y^{\text{ГР}^+}, T)} \right\{ \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)} \right)^2 \right) + \frac{\sqrt{2\pi} \hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)} \Phi \left(\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{\text{пр}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)} \right) \right\}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогічним чином отримуються вирази, що реалізуються модулями МОЧП і МРЗП при використанні гармонічного сплайну.

Помилки, що виникають при прогнозуванні $\Delta \hat{m}_y^{\text{пр}}(t)$ і $\Delta \hat{m}_{\dot{y}}^{\text{пр}}(t)$, враховуються в (7) і (8) за рахунок використання значень $\hat{\sigma}_y^{\text{II}}(t)$ і $\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t)$, розрахованих з урахуванням цих помилок:

$$\hat{\sigma}_y^{\text{II}}(t) = \sqrt{\hat{\sigma}_y^2(t) + \hat{\sigma}_{\Delta \hat{m}_y^{\text{пр}}}^2(t)}, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}(t) = \sqrt{\hat{\sigma}_{\dot{y}}^2(t) + \hat{\sigma}_{\Delta \hat{m}_{\dot{y}}^{\text{пр}}}^2(t)}, \quad (9)$$

$$\text{де } \hat{\sigma}_{\Delta \hat{m}_y^{\text{пр}}}^2(t) = \frac{1}{T_{\text{кст}}} \int_t^{t+T_{\text{кст}}} (\Delta \hat{m}_y^{\text{пр}})^2 dt, \quad \hat{\sigma}_{\Delta \hat{m}_{\dot{y}}^{\text{пр}}}^2(t) = \frac{1}{T_{\text{кст}}} \int_t^{t+T_{\text{кст}}} (\Delta \hat{m}_{\dot{y}}^{\text{пр}})^2 dt,$$

$T_{\text{кст}}$ – інтервал квазістаціонарності $\hat{\sigma}_y^{\text{II}}$ і $\hat{\sigma}_{\dot{y}}^{\text{II}}$.

Вирази (7) і (8) складають основу АГУ з прогнозуванням.

Після попередніх досліджень для визначення ефективності нових АГУ з прогнозуванням у порівнянні з існуючими алгоритмами було відібрано 14 варіантів СГУ. Дослідження систем проводилися для таких умов: 1) передаточна функція тестового ОУ – $W(p) = k_0 e^{-\tau_0 p} / (T_0 p + 1)^2$; 2) регулятор – реальний ПД регулятор, з обмеженнями на інтегральну складову і управляючу дію; 3) параметри тестового ОУ для пускових режимів роботи прийнято квазістаціонарними, конкретні значення яких рівномірно розподілено в діапазонах $\tau_0 \in [0.7 \tau_0^H \dots 1.3 \tau_0^H]$, $k_0 \in [0.7 k_0^H \dots 1.3 k_0^H]$, для сталих режимів приймалися постійними, або що змінюваними періодично з різними періодами в цих же діапазонах; 4) координатні збурення – стохастичні у вигляді випадкового процесу з нормальним законом розподілу, для пускових режимів роботи початкове значення збурень $f_k(0)$ задавалося рівномірно розподіленим на інтервалі $f_k(0) \in [m_{f_k} - 3\sigma_{f_k} \dots m_{f_k} + 3\sigma_{f_k}]$. Основні показники ефективності для пускових, і сталих режимів: середнє віддалення регульованої змінної від граничного значення – $M[y^{rp+} - y(t)]$, загальне число подій $S - N_s$, середня розрахункова імовірність відсутності S на інтервалі $T - \hat{P}_S^P(T)$ і середня фактична імовірність – $\hat{P}_S^\Phi(T)$. Коректність порівняння ефективності СГУ в перехідних і сталих процесах забезпечувалася попередньою оптимізацією налаштувальних параметрів АГУ за критерієм близькості середнього значення регламентованої змінної $y(t)$ до обмеження y^{rp+} , зі штрафом при виникненні S . При цьому, для більш адекватної оцінки можливостей систем, оптимізація в сталих режимах проводилася на інтервалі $T_{\text{мод}} = 1500 \tau_0^H$, а розрахунок показників якості – на інтервалі $T_{\text{мод}} = 10000 \tau_0^H$.

Для підвищення ефективності роботи СГУ в пускових режимах розроблено спеціальні алгоритми формування базової траєкторії перехідного процесу, що дозволяють в умовах істотної невизначеності швидко переводити ОУ з режимів холостого ходу на робоче навантаження, при цьому забезпечуючи відсутність S . Для систем, де $y^{злд+}(t)$ розраховується безпосередньо за МПР (рис. 2а), формування базової траєкторії ПП здійснюється за рахунок зміни за заданою траєкторією експонентного характеру величини y^{rp+} , а в системах, де $y^{злд+}(t)$ розраховується в контурі стабілізації $\hat{n}_s^+(y^{rp+}, t)$ (рис. 2б), формування базової траєкторії ПП виконується за рахунок зміни за такою траєкторією сталої часу у ФНЧ, на виході якого формується $y^{злд+}(t)$. На рис. 3 і 4 представлено фрагменти моделювання декількох варіантів систем для пускових і сталих режимів роботи, а деякі їх чисельні результати наведено в табл. 1.

Дослідження альтернативних варіантів СГУ показали перевагу використання АГУ з

прогнозуванням і формуванням базової траєкторії пускових ПП. Ці АГУ дозволили зменшити $M[y^{TP+} - y(t)]$, підвищити $\hat{P}_S(T)$ і мінімізувати N_s для пускових і сталих режимів роботи.

Третій розділ присвячено розробці математичної моделі шахтної зерносушарки ДСП-32от як ОУ та представленню її в цифровій імітаційній формі.

Розроблено і реалізовано в пакеті Simulink системи MATLAB імітаційну модель шахтної зерносушарки ДСП-32от з розподіленими параметрами, що базується на отриманих аналітичним шляхом диференціальних рівняннях тепло-масообмінних процесів, теплового і матеріального балансів. Модель відтворює процес функціонування зерносушарки в часі і здійснює розрахунок техніко-економічних показників її функціонування. Вона складається з об'єднаних у єдину структуру моделей тепло-масообмінних процесів, що відбуваються в зонах сушіння й охолодження зерна, моделі ефективності функціонування і моделі підготовки сушильного агенту, що включає в себе модель тепло-масообмінних процесів, що відбуваються у топці і змішувачі (рис. 5).

Модель підготовки сушильного агенту враховує нелінійні властивості топки як ОУ, залежність параметрів СА від параметрів повітря навколишнього середовища і палива, що спалюється в топці, особливості взаємозв'язку і динаміки зміни температур сушильного агенту на виході з топки і змішувача. Зокрема в моделі відбито зміну температури сушильного агенту на виході з топки, як за рахунок швидкого прогрівання повітря всередині топки, так і за рахунок більш повільного прогрівання внутрішніх частин стін топки (рис. 6).

Модель тепло-масообмінних процесів, що відбуваються в зонах сушіння (охолодження) відображує динаміку зміни параметрів зерна і СА при їх русі в шахтах зерносушарки. Кожна зона умовно розбивається на елементарні шари, взаємозалежні між собою. Шар являє собою горизонтальну ділянку зони, через який рухається зерно і СА. Висота шару порівнянна з кроком розташування коробів у шахті зерносушарки. Такий підхід дозволяє отримати модель зони сушіння з розподіленими параметрами за координатою переміщення зерна, а використання спеціального алгоритму для розрахунку часу перебування зерна в шахтах зерносушарки дозволяє коректно моделювати роботу установки в умовах змінної продуктивності. У цьому випадку розрахунок вологості на виході з j -го шару i -ої зони здійснюється на основі виразів:

$$W_{3i,j}^K(t) = \frac{1}{\tau_{np}} \int_t^{t+\tau_{np}} \frac{G_{cai,j}(t) d_{cai,j}^K(t) - d_{cai,j}^H(t)}{G_{3i,j}^H(t)} (100 - W_{3i,j}^K(t)) dt + W_{3i,j}^H(t - \tau_{np}); \quad (10)$$

$$\tau_{\text{пр}} = \arg \left\{ \int_0^t (v(t) - v(t - \tau'_{\text{пр}})) dt = h_{i,j} \right\} = \arg \left\{ \int_0^t v(t) dt - \int_{0 - \tau'_{\text{пр}}}^{t - \tau'_{\text{пр}}} v(t) dt = h_{i,j} \right\}, \quad (11)$$

де $\tau_{\text{пр}}$ – час перебування зерна в j -ому шарі;

$G_{\text{cai},j}(t)$ – масові витрати СА в j -ому шарі i -ої зони, кг/с;

$G_{\text{zi},j}^{\text{H}}(t)$ – масові витрати зерна на вході в j -ий шар i -ої зони, кг/с;

$d_{\text{cai}}^{\text{H}}(t)$, $d_{\text{cai},j}^{\text{K}}(t)$ – вологовміст сушильного агента відповідно на вході і виході i -ої зони, г/кг;

$W_{\text{zi},j}^{\text{H}}(t)$ – вологість зерна на вході в j -ий шар i -ої зони, %;

$h_{i,j}$ – висота j -го шару в i -ій зоні, м;

$v(t)$ – швидкість руху зерна, м/с.

У моделях тепло-масообмінних процесів, що відбуваються в зонах сушіння й охолодження зерна, враховуються нерівномірності розподілу масових витрат СА за висотою шахт для кожної зони. У шарах, де середня температура і відносна вологість СА менші, масові витрати більші, і навпаки, при цьому забезпечується чітка відповідність між масовими витратами сухого СА, що поступив в зону і вийшов з неї. У моделі також враховано витрати енергії на відрив вологи від зерна і зміна швидкості видалення вологи з зерна в міру його висушування. Зміна швидкості сушіння досягається за рахунок наближеного відтворення двох періодів сушіння. Перший, коли водяна пара в повітрі безпосередньо над зерном знаходиться в стані насичення, і другий, коли при досягненні вологістю зерна деякого критичного значення, відносна вологість повітря над зерном зменшується в міру видалення вологи з зерна. Для коректної роботи в моделі передбачено обмеження відносної вологості відпрацьованого СА.

Модель ефективності функціонування здійснює розрахунок основних техніко-економічних показників роботи зерносушарки (маса просушеного зерна, середня продуктивність, сумарні і питомі витрати палива та електроенергії), як у планових одиницях, прийнятих технологіями, так і у фізичних.

Результати, які отримано в ході тестування моделей окремих частин зерносушарки, і моделі зерносушарки в цілому, підтверджують її адекватність об'єкту оригіналу. На рис. 7 представлено фрагмент моделювання роботи ЗС при постійних значеннях температур СА і змінної продуктивності.

У четвертому розділі проведено розробку СГУ режимами сушіння зерна в шахтній

зерносушарці ДСП-32от і приведено результати виробничих випробувань її експериментального зразка. На рис. 8 представлено структурну схему розробленої СГУ. Система передбачає управління п'ятьма регламентованими змінними: температурою СА на вході в першу зону сушіння T_{ca1} , температурою СА на вході в другу зону сушіння T_{ca2} , температурою зерна на виході першої зони сушіння T_{z1} , температурою зерна на виході другої зони сушіння T_{z2} , кінцевою вологістю зерна W_{zk} . Вона забезпечує підтримку їх поточних значень поблизу верхньої границі регламенту $T_{ca1}^{гр+}$, $T_{ca2}^{гр+}$, $T_{z1}^{гр+}$, $T_{z2}^{гр+}$ і $W_{zk}^{гр+}$, при цьому гарантуючи з заданою імовірністю відсутність виходу за цю границю. Для цього в модулі МРЗП розраховується гранично припустиме задане значення для кожного регламентованого параметру, а в модулі МОІХ – оцінки середньоквадратичного відхилення і середньоквадратичного відхилення першої похідної цього параметру. Для управління температурами зерна T_{z1} і T_{z2} реалізовано каскадний принцип побудови систем управління, де для T_{z1} управляючою дією є ступінь відкриття засувки підсмоктування повітря навколишнього середовища, а для T_{z2} – ступінь відкриття регулюючого органу подачі палива у форсунку. В якості проміжних точок виступають відповідно температури T_{ca1} і T_{ca2} . Управління W_{zk} здійснюється за рахунок зміни продуктивності зерносушарки, а саме зміною часу перебування випускного механізму в закритому стані.

Дотримання регламентів за температурами сушильних агентів здійснюється за рахунок переключення режимів роботи каскадних контурів, для чого в системі передбачено модуль порівняння (МП). У МП, на основі гранично припустимого заданого значення температури сушильного агента $T_{ca}^{ззд+}$ і значення формованого головним регулятором $T_{ca}^{здгр}$ розраховується задане значення внутрішньому регулятору за формулою:

$$T_{ca}^{зд} = \begin{cases} T_{ca}^{ззд+}, & T_{ca}^{ззд+} \leq T_{ca}^{здгр} \\ T_{ca}^{здгр}, & T_{ca}^{ззд+} > T_{ca}^{здгр} \end{cases} \quad (12)$$

Такий підхід дозволяє, в умовах нестачі управляючих дій, комутувати структуру контуру регулювання і вести управління за тією температурою, імовірність порушення регламенту для якої є вищою. При цьому підтримуються ефективні температурні режими сушіння при дотриманні регламентів процесу. Система передбачає роботу, як при фіксованих граничних значеннях технологічних параметрів, так і в умовах їх автоматичного перерахунку на основі поточних значень параметрів зерна і часу його перебування в шахтах.

На базі імітаційної моделі ЗС ДСП-32от було відпрацьовано алгоритми СГУ і проведено порівняльний аналіз ефективності функціонування між різними варіантами систем: 1 – штатна САУ; 2 – САУ зі стабілізуючою САР по W_{zk} і САР каскадної структури по T_{z1} і

T_{32} , з проміжними точками з T_{ca1} і T_{ca2} ; 3 – СГУ при фіксованих граничних значеннях технологічних параметрів; 4 – СГУ з автоматичним перерахунком граничних значень технологічних параметрів. У табл. 2 наведено деякі числові результати моделювання, що дозволяють оцінити перевагу СГУ режимами сушіння зерна.

Експериментальний зразок СГУ режимами сушіння зерна пройшов виробничі випробування на Помічянському елеваторі. Систему було реалізовано на базі контролера RTU-188 MX фірми Fastwel і ПЕОМ Pentium-200МГц. Випробування підтвердили переваги СГУ режимами сушіння, було відзначено підвищення продуктивності ЗС (10...15 %), зниження питомих витрат електроенергії (7...10 %) і дизельного пального (3...5 %).

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено розв'язання нового наукового завдання, що полягає в розробці САУ процесами сушіння зерна в шахтних прямоточних зерносушарках на основі принципів гарантуючого управління. Застосування цих принципів дозволило в залежності від конкретної технологічної ситуації автоматично встановлювати структуру системи управління, вести процес у найбільш інтенсивних, енергозберігаючих режимах з гарантованим дотриманням накладених регламентом обмежень. Така система забезпечує зниження питомих витрат енергії на сушіння і втрат якості зерна, підвищує продуктивність зерносушарки. У ході виконання роботи було отримано такі найбільш важливі наукові і практичні результати:

1. Розроблено і досліджено в складі СГУ різної структури варіанти АГУ з прогнозуванням для ОУ з великим запізненням. Проведені дослідження альтернативних варіантів СГУ показали перевагу АГУ з прогнозуванням. Введення в алгоритми гарантуючого управління функції прогнозування дозволило підвищити динамічну точність СГУ об'єктами з запізненням і знизити імовірність порушення обмежень регламентів, накладених на регульовані змінні.

2. Удосконалено алгоритми роботи СГУ в пускових режимах з формуванням базової траєкторії ПП. Алгоритми забезпечують швидкий і плавний перехід ОУ з режимів холостого ходу на робоче навантаження, безударність замикання контурів гарантування на вже працюючому ОУ, підвищують імовірність дотримання регламентів у пускових режимах.

3. Розроблено цифрову імітаційну модель процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці ДСП-32от з розподіленими параметрами, що відображує особливості ЗС як ОУ. Модель базується на отриманих аналітичним шляхом рівняннях теплового і матеріального

балансів для окремих шарів зерна, взаємопов'язаних між собою, і відтворює процес функціонування зерносушарки в часі, здійснюючи, у тому числі, розрахунок техніко-економічних показників ведення процесу. Модель використовувалася для порівняльного аналізу альтернативних САУ і передпускового налагодження алгоритмів СГУ.

4. Розроблено СГУ режимами сушіння в шахтній зерносушарці з комутованою структурою контурів регулювання температур зерна на виході першої і другої зон сушіння та алгоритмами з прогнозуванням. Система пройшла виробничу перевірку в складі САУ шахтної зерносушарки на Помічянському елеваторі. Результати випробувань підтвердили працездатність і ефективність системи. Це дозволяє рекомендувати СГУ режимами сушіння зерна для застосування в складі промислових САУ зерносушарками типу ДСП-32от.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Хобин В.А., Степанов М.Т. Системы гарантирующего управления: анализ замкнутых альтернативных структур // Тр. Одес. политех. ун-та: научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса, 2001. – Вып. 3(15). – 305 с. – Яз. рус., укр. – С. 163 – 166.

2. Хобин В.А., Степанов М.Т. Алгоритмы гарантирующего управления с прогнозированием // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. / Кіровоград. держ. техн. ун-т. – Кіровоград, 2002. – Вип. 11. – С. 58 – 61.

3. Степанов М.Т. Имитационная математическая модель процесса сушки зерна. // Нове в технології зберігання та переробки зерна:– Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. / М-во освіти і науки України. – Одеса, 2002. – Вип. 24. – С. 380 – 384.

4. Хобин В.А., Степанов М.Т. Система гарантирующего управления шахтной зерносушилкой ДСП-32от: – Зб. наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. техн. / М-во освіти і науки України. – Одеса, 2003. – Вип. 25. – С. 137 – 142.

5. Хобин В.А., Степанов М.Т. Системы гарантирующего управления: анализ замкнутых альтернативных структур // Матер. Міжнар. конф. з управління “Автоматика-2001” (Одеса, Україна, 10 – 14 вересня 2001). – Одеса, 2001. – В 2-х т. –Т. 1. – 221 с. – Мови укр., рос., англ. – С. 122 – 123.

6. Хобин В.А., Степанов М.Т. Системы гарантирующего управления зерносушилками // Тез. докл. 11-ой междунар. конф. по автоматическому управлению “Автоматика-2004”. – Киев, 27 – 30 сентября 2004. – Т. 2. – С. 65.

Степанов М.Т. Гарантирующее управление процессами сушки зерна в шахтных прямоточных зерносушилках. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2005.

Диссертация посвящена разработке системы гарантирующего управления процессами сушки зерна в шахтных прямоточных зерносушилках с коммутируемой структурой контуров регулирования температур зерна на выходе первой и второй зон сушки и алгоритмами с прогнозированием. Система в зависимости от конкретной технологической ситуации автоматически изменяет свою структуру и обеспечивает ведение процесса в наиболее интенсивных, энергосберегающих режимах с гарантированным соблюдением наложенных регламентом ограничений. Алгоритмом предусмотрена возможность задания граничных значений технологических параметров, как в ручном режиме, так и в автоматическом на основе текущих значений параметров зерна и времени его пребывания в шахтах.

Для эффективного управления процессами сушки в шахтных прямоточных зерносушилках и другими ОУ с большими запаздываниями разработаны и исследованы в составе СГУ различной структуры варианты АГУ с прогнозированием, в которых прогнозирование гарантирующего управления ведется на основе кубического и гармонического сплайнов. Проведены всесторонние исследования альтернативных вариантов СГУ при работе в переходных и установившихся режимах в условиях интенсивных координатных возмущений и существенно нестационарных свойств ОУ. Результаты исследований показали эффективность АГУ с прогнозированием. Введение в алгоритмы гарантирующего управления функции прогнозирования позволило повысить динамическую точность СГУ объектами с запаздыванием и снизить вероятность нарушения регламентов, наложенных на регулируемые переменные.

Усовершенствованы алгоритмы работы СГУ в пусковых режимах с формированием базовой траектории ПП. Алгоритмы обеспечивают в условиях, действующих на ОУ координатных и параметрических возмущений, быстрый и плавный перевод ОУ из режимов холостого хода на рабочую нагрузку, безударность замыкания контуров гарантирования на уже работающем ОУ, повышают вероятность соблюдения регламентов в пусковых режимах.

Для анализа эффективности различных вариантов САУ и предпусковой отладки алгоритмов СГУ разработана цифровая имитационная модель процесса сушки зерна в шахт-

ной зерносушилке ДСП-32от с распределенными параметрами, отражающая особенности ЗС как ОУ. Модель базируется на полученных аналитическим путем уравнениях тепло-массообменных процессов, теплового и материального балансов и воспроизводит процесс функционирования зерносушилки во времени, осуществляя, в том числе, расчет технико-экономических показателей ведения процесса. Она состоит из объединенных в единую структуру моделей тепло-массообменных процессов, происходящих в зонах сушки и охлаждения зерна, модели эффективности функционирования и модели подготовки сушильного агента, включающей в себя модель тепло-массообменных процессов, происходящих в топке и смесителе. В модели учтены неравномерность распределения массовых расходов сушильного агента по высоте шахт для каждой зоны, затраты энергии на отрыв молекул воды от зерна, изменение скорости удаления влаги из зерна по мере его высушивания, ограничение на относительную влажность отработанного сушильного агента.

Применяется корректный расчет времени пребывания зерна в зонах сушки при изменении производительности сушиллки.

Результаты, полученные в ходе тестирования моделей отдельных частей зерносушиллки и модели зерносушиллки в целом, подтверждают ее адекватность объекту оригиналу.

Проведенные на модели исследования различных вариантов САУ процессами сушки для различных условий ведения технологического процесса показали преимущество СГУ. Эта система в сравнении с другими обеспечила при отсутствии нарушений регламента повышение производительности зерносушиллки и снижение удельных затрат топлива и электрической энергии.

Эффективность СГУ процессами сушки зерна в шахтных прямоточных зерносушилках была подтверждена в ходе производственных испытаний экспериментального образца, реализованного на современной программно-технической базе.

Ключевые слова: система гарантирующего управления, прогнозирование, шахтная зерносушиллка, имитационная модель, сплайн.

Степанов М.Т. Гарантующе управління процесами сушіння зерна в шахтних прямоточних зерносушарках. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2005.

Дисертацію присвячено розробці системи гарантующого управління процесами сушіння зерна в шахтних прямоточних зерносушарках з комутованою структурою контурів

регулювання температур зерна на виході першої і другої зон сушіння та алгоритмами з прогнозуванням. Система в залежності від конкретної технологічної ситуації автоматично змінює свою структуру і забезпечує ведення процесу в найбільш інтенсивних, енергозберігаючих режимах з гарантованим дотриманням накладених регламентом обмежень. Для ефективного управління процесом сушіння розроблено варіанти АГУ з прогнозуванням, у яких прогнозування гарантуючого управління ведеться на основі кубічного і гармонічного сплайнів. СГУ процесом сушіння пройшла всебічне тестування на цифровій імітаційній моделі шахтної зерносушарки ДСП-32от, результати якого показали ефективність системи. Експериментальний зразок СГУ успішно пройшов виробничі випробування.

Ключові слова: система гарантуючого управління, прогнозування, шахтна зерносушарка, імітаційна модель, сплайн.

Stepanov M.T. The guaranteeing control of grain drying processes in mine direct-flow grain-dryers. – Manuscript.

Thesis on competition for scientific degree of candidate technical sciences – speciality 05.13.07 – automation of technological processes – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2005.

The thesis is devoted to development of guaranteeing control system by processes of grain drying in mine direct-flow grain-dryers with switched structure of regulation temperatures contours of a grain on output of the first and second zones of drying and with prediction algorithms. The system depending on a concrete technological situation automatically changes the structure and provides conducting process in the most intensive, energy-efficient conditions with guaranteed observance of the regulation restrictions. For efficient control of drying process, variants AGC with prediction are developed. In AGC prediction of guaranteeing control is conducted on the basis of cubic and harmonic splines. SGC of drying process has passed all-round testing on digital imitation model mine grain-dryers ДСП-32от which results have shown the system effectiveness. Experimental sample SGC has passed industrial tests successfully.

Keywords: system of guaranteeing control, prediction, mine grain-dryer, imitation model, spline.