

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ХОБІН Віктор Андрійович

УДК 62-50:621.926(088.8)

**СИСТЕМИ ГАРАНТУЮЧОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ АГРЕГАТАМИ:
ОСНОВИ ТЕОРІЇ, ПРАКТИКА ЗАСТОСУВАННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Одеса – 2003

Дисертацією є рукопис.

Р о б о т а в и к о н а н а в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти та науки України на кафедрі автоматизації виробничих процесів

Науковий консультант -

д.т.н., професор, Заслужений діяч науки та техніки України **Жуковський Едуард Йосипович**, Одеська національна академія харчових технологій, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів

Офіційні опоненти:

- д.т.н., професор, Заслужений діяч науки та техніки України **Ладанюк Анатолій Петрович**, Український національний університет харчових технологій, м. Київ, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій;

- д.т.н., професор, Лауреат державної премії України **Любчик Леонід Михайлович**, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри комп'ютерної математики та математичного моделювання;

- д.т.н., професор **Демченко Владислав Олексійович**, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів

Провідна установа - Науково-виробнича корпорація "Київський інститут автоматики", НАН України та Держпромполітики України

Захист відбудеться "29" січня 2004 р. о 13³⁰ годин 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 "17" грудня 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ямпольський Ю.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одними з основних факторів, що різко знижують конкурентноздатність вітчизняної продукції переробних галузей АВК на внутрішньому і зовнішньому ринках, є її висока собівартість і нестабільність якості. Вони значною мірою обумовлені порушеннями поточних режимів роботи оснащення і ведення технологічних процесів, пов'язаними з виходами режимних змінних за встановлені регламентами обмеження. Порушення регламентів приводять до зниження показників якості продукції, аварійним зупинкам обладнання, втратам сировини і готової продукції, перевитраті енергоресурсів, прискоренню фізичного зношування обладнання, необхідності мати великий штат технологічного персоналу і ремонтних служб. Проблема збільшується, якщо найбільш ефективні режими роботи обладнання і ведення технологічних процесів близькі до гранично припустимих, а вони, як об'єкти управління, є істотно нестационарними і піддані інтенсивним неконтрольованим збуренням. Такі умови характерні для об'єктів управління “технологічного типу”, у тому числі, для об'єктів переробних галузей АВК. Для останніх це обумовлюється дуже широкими діапазонами змін властивостей вихідної рослинної сировини, рецептури виробленої продукції, інтенсивними змінами властивостей робочих органів і активних зон технологічного обладнання, нестабільністю характеристик енергоносіїв через відносно малу потужність підприємств і слабкість їх енергогосподарства.

Одним з ефективних, у тому числі мало витратних, і таких, що дають швидку віддачу, шляхів рішення цієї проблеми є удосконалення систем автоматичного управління (САУ). Це удосконалення повинне, насамперед, торкатися функціональної структури САУ в напрямку найбільш повного задоволення потреб практики. Однією з нових системоутворюючих функцій, потреба в реалізації якої назріла, є функція гарантованого, з наперед заданою імовірністю, дотримання обмежень, встановлених регламентами на змінні об'єкти управління. *Розробка наукових основ систем автоматичного управління, що реалізують функцію гарантування - систем гарантуючого управління, включаючи застосування їх на практиці, складає суть наукової проблеми, що розв'язується в роботі.*

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі автоматизації виробничих процесів Одеської національної академії харчових технологій у рамках її основного наукового напрямку № 3 “Створення і розробка нового високоефективного обладнання, теорії, методів його розрахунку і проектування; автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв”. Основу для підготовки дисертації склали науково-дослідні роботи (НДР). *Основні госпдогвірні НДР:* № 29/83 “Дослідження системи управління безперервним дозуванням компонентів комбікормів і розробка ефективних алгоритмів управління, орієнтованих на застосування мікропроцесорних засобів” № Г.Р. 01.83.0069183; № 31/87 “Розробити і впровадити

системи управління дробарками і пресами-грануляторами, що забезпечують експлуатацію машин в умовах безлюдної технології” № Г.Р. 01.87.0047663. Підставою для їх виконання були: “Програма робіт на 1982 – 1990 р.р. зі створення нових і удосконалення діючих АСУ на хлібоприймальних і зернопереробних підприємствах”, прийнята спільним наказом 372/381 Міністерства приладобудування засобів автоматизації і систем управління і Міністерства заготівель СРСР від 16.11.82 і Цільова комплексна програма 0.Ц.047 Державного комітету СРСР з науки і техніки, президії АН СРСР і Держплану СРСР “Автоматизація в галузях народного господарства на базі мікропроцесорної техніки машин і технологічних процесів у всіх ланках управління” від 30.12.1983, № 766/164/333, термін завершення 1990 рік. *Держ-бюджетні НДР*: “Дослідження і розробка інтелектуальних систем управління, що гарантують зниження енергоємності і дотримання регламентів у зернопереробній і харчовій промисловості”, № Г.Р. 0196U004198, № 7/2000-П “Розробити основи теорії й алгоритми управління, що гарантують стійкість ресурсозберігаючих харчових технологій”, № Г.Р. 0100U004571. Вони виконувалися в рамках координаційного плану Міністерства освіти і науки України. Автор був науковим керівником перерахованих НДР.

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження – засобами автоматичного управління гарантувати дотримання регламентів ведення технологічних процесів і роботи технологічних агрегатів, забезпечивши за рахунок цього підвищення якості продукції, зниження питомих витрат енергії і втрат сировини, запобігання виникнення аварійних ситуацій і пов'язаних з ними негативних наслідків.

Задачі дослідження, розв'язання яких вимагає досягнення поставленої мети:

1. Обґрунтувати об'єктивну необхідність розробки систем гаранті-гарантуючого управління (СГУ), визначити їх місце серед традиційних систем і взаємодію з ними.
2. Розробити теоретичні основи СГУ, у т.ч. розробити імовірнісну модель порушень регламенту, адаптувати її до задач управління, сформулювати концепцію, провести класифікацію, розробити варіанти структур СГУ і базові алгоритми гарантуючого управління.
3. Допрацювати базові алгоритми, забезпечивши стійкість і високі динамічні властивості контурів гарантування, провести параметричну оптимізацію і порівняльний аналіз СГУ з цими алгоритмами, у т.ч. для екстремальних умов.
4. На основі застосування принципів змінності структури, прогнозування, адаптації, координації контурів регулювання і гарантування, розробити алгоритми, що підвищують ефективність систем автоматичного регулювання, як складової СГУ і, за рахунок цього, СГУ вцілому.
5. На прикладах конкретних застосувань СГУ в системах автоматизації технологічних агрегатів комбікормової промисловості показати їх ефективність і на практиці підтвердити досягнення поставленої мети.

Об'єкт дослідження – системи й алгоритми автоматичного управління нестационарними

об'єктами з інтенсивними неконтрольованими збуреннями, для яких порушення їх регламентованими змінними встановлених обмежень приводять до виникнення аварійних, зокрема – потенційно небезпечних ситуацій і (чи) до істотних економічних втрат.

Предмет дослідження – основи теорії і практика застосування нового класу автоматичних систем – систем гарантуючого управління технологічними процесами.

Методи дослідження: – загальної теорії систем і системного аналізу (задача 1); – теорії випадкових процесів і її підрозділів – теорій викидів випадкових процесів і оцінювання випадкових процесів (задача 2); – теорії автоматичного управління і її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем, теорії систем зі змінною структурою, теорії адаптивних, самоналаштувальних і оптимальних систем; теорії цифрових систем управління (задачі 2 – 5); – теорії ідентифікації (задача 4); – імітаційного цифрового моделювання (задачі 3 – 5).

Наукова новизна отриманих результатів. Обумовлюється новизною цільової функції систем автоматичного управління і їх функціональної організації, як обов'язковим атрибутом нового класу САУ, у даному випадку – систем гарантуючого управління.

Нові наукові положення, що виносяться на захист, і ступінь їх новизни

Вперше обґрунтовано, розроблено:

– функціональну структуру систем управління, що включає нову функцію – функцію гарантованого (з наперед заданою імовірністю) дотримання обмежень, встановлених регламентами на ведення технологічних процесів і (чи) роботи технологічних агрегатів, позиціонування СГУ щодо систем регулювання й оптимізації;

– концепцію побудови систем гарантуючого управління, їх класифікацію і варіанти структури;

– альтернативні варіанти імовірнісних математичних моделей порушень регламенту, орієнтовані на застосування в режимі реального часу, альтернативні алгоритми гарантуючого управління, що відповідають їм, і їх Парето-оптимальні множини;

– принцип і альтернативні варіанти алгоритмів координації роботи контурів регулювання і гарантування в СГУ;

– алгоритм адаптації параметрів регулятора регламентованої змінної СГУ на основі дворового застосування розширеного методу типової статистичної ідентифікації;

– системи гарантуючого управління технологічними агрегатами, що реалізують процеси подрібнення, багатокомпонентного безперервного вагового дозування, гранулювання при виробництві комбікормів, що забезпечують зниження питомих енерговитрат, втрат сировини і готової продукції, підвищення продуктивності і показників якості продукції, запобігання аварійних зупинок обладнання і їх негативних наслідків.

Отримали подальший розвиток:

- метод типової статистичної ідентифікації, можливості застосування якого розширено на моделі об'єктів і САР з запізненням;
- структура й алгоритми регуляторів, що забезпечують у системах автоматичного регулювання підвищення динамічної точності і запасу стійкості, зниження імовірності порушення регламенту.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність *теоретичної частини роботи* – можливість використання її результатів інженерами-розробниками систем автоматичного управління об'єктами технологічного типу, як методичні рекомендації, що забезпечують підтримку в питаннях прийняття рішень про доцільність введення функції гарантування в систему, комплексі питань з вибору структури й алгоритмів СГУ, підвищенню ефективності її функціонування. Практична цінність *прикладної частини роботи* – отримання економічного і соціального ефекту від впровадження СГУ ТА, що було практично підтверджено результатами виробничих випробувань і впроваджень СГУ молотковими дробарками, комплексами вагового безперервного дозування, пресами-грануляторами на Бориспільському і Київському комбикормових заводах, на комбикормових заводах Куліндорівського, Новополтавського, Ужгородського, Новопокровського, Прилуцького і Резекненського КХП. Підтверджений сумарний річний економічний ефект склав 480 тис. карбованців СРСР. Ефект було досягнуто за рахунок роботи ТА в найбільш економічних режимах, запобігання порушень технологічних і експлуатаційних регламентів, що приводять до виникнення аварійних ситуацій.

Особистий внесок здобувача. Здобувач є єдиним автором всіх наукових ідей, що складають основу СГУ, що відповідають теоретичним розробкам і науковим положенням, що виносяться на захист. Дослідження для окремих (часткових) випадків СГУ, розробка технічних і програмних засобів для їх реалізації, виробничі випробування і впровадження виконувалися разом з його аспірантами. Вони також були основними співвиконавцями НДР, безпосередньо пов'язаними з темою дисертації, де здобувач був науковим керівником, і співавторами відповідних публікацій. Зі списку публікацій, приведених в авторефераті, 17 (у тому числі 12 з числа основних) підготовлені без співавторів. У публікаціях зі співавторами здобувачу належить вибір наукового напрямку, обґрунтування планів і методів досліджень, розробка математичних моделей і алгоритмів управління, висновки за результатами досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень оприлюднено: а) *на Всесоюзних науково-технічних нарадах і конференціях*: “Управление производством и автоматизированные системы управления”, Москва, 1980 р.; “Основные направления развития “АСУ-пищепром” и повышение эффективности использования вычислительной техники в пищевой промышленности в XI пятилетке”, Одеса, 1981 р.; “Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсифи-

кации процессов пищевых производств”, Москва, 1982 р.; “Математическое моделирование сложных химико-технологических систем”, Одеса, 1985 р.; “Проблемы автоматизации в агропромышленном комплексе”, Кишинів, 1987 р.; “Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов”, Суздаль, 1988 р.; “Автоматизация производства и управления в перерабатывающей промышленности агропромышленного комплекса”, Одеса, 1989 р.; “Технология сыпучих материалов”, Ярославль, 1989 р.; “Автоматизация технологических процессов и производств в пищевой промышленности”, Москва, 1989 р.; “Контроль, управление и автоматизация в современном производстве”, Мінськ, 1990 р.; б) *на науково-технічних конференціях країн СНД*: “Контроль и управление в технических системах”, Вінниця, 1992 р., 1993 р.; “Автоматизация биотехнических систем в условиях рыночной экономики и конверсии”, Москва, 1994 р.; “Совершенствование процессов и аппаратов химических, пищевых и нефтехимических производств”, Одеса, 1996 р.; в) *на міжнародних науково-технічних конференціях*: “Автоматизация на процесите в хранително-вкусовата промышленность”, Пловдив, Болгарія, 1981 р.; “11th International Conference on Measurement of Foods and Mass”, Amsterdam, Netherlands, 1986 р.; г) *на національних науково-технічних конференціях і міжнародних конференціях з автоматичного управління (“Автоматика”)* – Львів, 1995 р.; Севастополь, 1996 р.; Черкаси, 1997 р.; Харків, 1999 р.; Львів, 2000 р.; Одеса, 2001 р.; д) *на науково-технічних конференціях профессорско-викладацького складу ОНАХТ – 1983 – 2003 р.р.*; е) *на семінарах 20.04 “Кібернетика й автоматичне управління” наукової ради з проблеми “Кібернетика АН УРСР*, Одеса, 1984 – 1990 р.р.

Публікації. Безпосередньо за тематикою дисертації опубліковано 100 друкованих праць. З них: монографій – 1; публікацій у наукових спеціальних виданнях України й інших країн – 39; авторських свідоцтв – 10; депонованих рукописів – 7; тез доповідей на наукових конференціях – 42; програмних модулів – 1.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних джерел з 329 найменувань і 10 додатків. Її основна частина викладена на 311 сторінках і містить 125 рисунків і 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть і стан наукової проблеми, її значення для практики, обґрунтовано об'єктивну необхідність проведення дослідження, дано загальну характеристику дисертації.

У першому розділі розглядаються питання діалектики розвитку систем автоматичного управління, об'єктивна обумовленість реалізації ними функції гарантування, її зв'язку з іншими функціями САУ, особливості моделей об'єкту для розробки алгоритмічної структури СГУ.

На основі функціонально-структурної методології системного підходу аналізується діалек-

тика розвитку систем автоматичного управління як окремого випадку антропогенних систем. Рушійною силою цього розвитку є невідповідність (протиріччя) між зростаючими потребами практики в підвищенні ефективності САУ і їх можливостями, обумовленими функціонально-структурною організацією системи. Функціональну організацію зручно розглядати як результат декомпозиції цільової функції САУ і відображати у виді функціональної структури. Її верхній ієрархічний рівень складають системоутворюючі функції. Традиційними для САУ ТА є функції логічного управління, регулювання, локальної оптимізації і координації.

Розвиток систем означає розширення складу реалізовуваних ними функцій для кращого задоволення потреб практики, тобто підвищення їх функціональної цілісності. Максимального ефекту можна чекати від розширення складу системоутворюючих функцій, але воно є найбільш трудомістким, зокрема – наукомістким, тому що торкається в цілому як функціональної, так і структурної організації системи. Структурна організація (“форма”) характеризує особливості реалізації набору функцій, що входять у функціональну організацію (“зміст”) системи. Вона містить у собі три ієрархічних рівні: алгоритмічну структуру, технічну структуру і програмно-технічну базу. Важливо, що, володіючи максимальною відносною самостійністю розвитку, програмно-технічна база інтелектуального ядра систем автоматичного управління, використовуючи сучасні комп’ютерні й інформаційні технології, зняла практично всі обмеження на складність реалізовуваних алгоритмів, і, отже, на реалізацію систем будь-якої функціональної організації. З визначеною часткою умовності формування цільової функції САУ ТА і вплив її на функціонально-структурну організацію ілюструється рисунком 1.

Підвищення конкурентноздатності продукції можливо за рахунок підвищення функціональної цілісності САУ ТА, що вимагає розширення складу функцій, реалізованих САУ ТА. Однією з таких нових функцій повинна стати функція гарантування – гарантованого дотримання встановлених регламентами обмежень. Вона повинна бути віднесена до системоутворюючих функцій. Це пояснюється тим, що, як і для систем, що реалізують традиційні функції САУ ТА, тобто систем логічного управління, регулювання, оптимізації, система, що реалізує функцію гарантування, принципово може функціонувати (реалізувати ці функції) автономно від інших. Для всіх САУ основним фактором формування управляючих дій є забезпечення бажаного стану об’єкту, що безпосередньо визначається метою управління (див. рис. 2).

На рис. 3 приведено фрагмент функціональної структури САУ ТА з функцією гарантування. Поява у функціональній організації нової системоутворюючої функції вказує на якісний скачок у розширенні функціональних можливостей і цілісності САУ. Це дає підстави розглядати системи, що реалізують цю функцію, як *новий клас САУ* – клас систем гарантуючого управління.

Реалізація САУ з новою функцією, а тим більше їх широке застосування, вимагає розвитку її структурної організації і, насамперед, її верхнього ієрархічного рівня – алгоритмічної структури.

Оскільки ця функція нова, то буде потрібна і нова наукова основа для розробки алгоритмічної структури – структур СГУ і її алгоритмів, що реалізують функцію гарантуючого управління.

Результати будь-яких теоретичних досліджень і розробок, їх конструктивність стосовно практичного застосування, істотно визначаються їх “вихідними даними”, у нашому випадку – комплексом моделей об’єкту управління. У розділі сформульовані найбільш загальні властивості моделей об’єктів технологічного типу, включаючи моделі каналів об’єкту управління, неконтрольованих координатних і параметричних збурень, шумів вимірювання, ефективності функціонування, порушень регламенту, що відображують невизначеність їх структури, параметрів, координат. Важливо, що оскільки поточний стан об’єкту для СГУ безпосередньо виміряним бути не може, те першою задачею теоретичних досліджень повинна бути задача отримання моделі порушення регламенту (МПР), на основі якої цей стан може бути оцінено.

В другому розділі розробляються теоретичні основи СГУ – основа їх алгоритмічної структури. Як “основи цих основ” обрано теорію викидів випадкових процесів. Відповідно до неї порушення змінною $x(t)$ свого регламенту D_x , що включає (у загальному випадку) два обмеження, “верхнє” – $x^{\Gamma^+}(t)$ і “нижнє” – $x^{\Gamma^-}(t)$ розглядається як викид випадкового процесу (ВП) $x(t)$ за будь-яке обмеження (подія S), див. рис. 4.

У загальному випадку, якщо задано дві безперервні однозначні функції $\inf D_x = x^{\Gamma^-}(t)$ та $\sup D_x = x^{\Gamma^+}(t)$, то середнє число викидів траєкторії ВП $x(t)$ з границь $x^{\Gamma^-}(t) < x(t) < x^{\Gamma^+}(t)$ буде визначатися виразом:

$$\begin{aligned} N_s(x^{\tilde{a}\tilde{d}^-}, x^{\tilde{a}\tilde{d}^+}, t_0, T) &= N_s^-(x^{\tilde{a}\tilde{d}^-}, t_0, T) + N_s^+(x^{\tilde{a}\tilde{d}^+}, t_0, T) = \\ &= \int_{t_0}^{t_0+T} dt \int_0^{\infty} \dot{\eta}(t) \left[p(x^{\tilde{a}\tilde{d}^+}(t), \dot{x}^{\tilde{a}\tilde{d}^+}(t) + \dot{\eta}(t)) + p(x^{\tilde{a}\tilde{d}^-}(t), \dot{x}^{\tilde{a}\tilde{d}^-}(t) - \dot{\eta}(t)) \right] d\dot{\eta}. \end{aligned} \quad (1)$$

де $N_s^{\pm}(x^{\tilde{a}\tilde{d}^{\pm}}, t_0, T)$ – середні кількості “додатних” та “від’ємних” викидів $x(t)$ за $x^{\Gamma^+}(t)$ і $x^{\Gamma^-}(t)$ (т), тобто викидів, для яких у момент перетину границь значення похідної $\dot{x}(t)$ відповідно $\dot{x}(t) > 0$ і $\dot{x}(t) < 0$; $\eta(t) = x(t) - x^{\Gamma^+}(t)$; $\dot{\eta}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}^{\tilde{a}\tilde{d}^+}(t)$; $\dot{x}(t) = dx/dt$; $\dot{x}^{\tilde{a}\tilde{d}^+}(t) = dx^{\tilde{a}\tilde{d}^+}/dt$; $\dot{\eta}(t) = d\eta(t)/dt$; $p(x^{\Gamma^+}(t), \dot{x}^{\tilde{a}\tilde{d}^+}(t) + \dot{\eta}(t))$ – спільна щільність імовірності процесів $x^{\Gamma^+}(t)$ і $\dot{x}^{\tilde{a}\tilde{d}^+}(t) + \dot{\eta}(t)$ у той самий момент часу $t \in [0, T]$.

Вираз (1) можна розглядати як математичну основу МПР. Але розрахунок управляючих дій, що гарантують дотримання обмежень у реальному часі, вимагає конкретизації виразу (1) для умов, що характерні для роботи САУ. Головні з них: а) зміни змінної $x(t)$ можна описати квазістаціонарним за її випадковою складовою нормальним ВП, що диференціюється; б) застосування

МПР у реальному часі обумовлює оперування зі статистичними оцінками необхідних характеристик ВП, що розраховуються на ковзаючих інтервалах часу $T_{\text{кст}} \ll T$, і тому відрізняються від фактичних поточних значень цих характеристик; в) випадкові події S можна розглядати як потік рідких подій (тільки тоді має сенс вести технологічний процес) і імовірність їх появи може бути описано законом Пуассона; г) для збереження структурної стійкості СГУ функція імовірності порушень за своїми аргументами, зокрема за оцінкою поточного середнього значення, повинна бути монотонною, що вимагає її спеціального коректування.

З урахуванням перерахованих особливостей вираз (1) приймає вигляд:

$$\hat{N}_s^\pm(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, t_0, T_{\tilde{e}\tilde{n}\tilde{\delta}}) = \int_{t_0}^{t_0+T_{\tilde{e}\tilde{n}\tilde{\delta}}} \hat{n}_s^\pm(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T_{\tilde{e}\tilde{n}\tilde{\delta}}} \frac{\hat{\sigma}_{\dot{x}}(t)}{2\pi\hat{\sigma}_x(t)} \left(1 - \hat{r}^2(t)\right)^{1/2} \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2} \text{sign}\Delta x \pm \left(\frac{x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}(t) - \hat{m}_x(t)}{\hat{\sigma}_x(t)}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2} B^2(t) \pm \sqrt{2\pi} B(t) \hat{O}(\pm B(t))\right] dt, \quad (2)$$

$$\hat{P}_s(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, t_0, T) = \exp\left\{-\hat{N}_s^\pm(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, t_0, T)\right\} = \exp\left\{-\hat{n}_s^\pm(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, t_0, T_{\tilde{e}\tilde{n}\tilde{\delta}}) \frac{\hat{O}}{\hat{O}_{\tilde{e}\tilde{n}\tilde{\delta}}}\right\},$$

$$\text{де } B(t) = \left(1 - \hat{r}^2(t)\right)^{-1/2} \left(\frac{\hat{m}_{\dot{x}}(t)}{\hat{\sigma}_{\dot{x}}(t)} + \text{sign}\Delta x \pm \frac{x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}(t) - \hat{m}_x(t)}{\hat{\sigma}_x(t)} \hat{r}(t)\right);$$

$$\Delta x^\pm = \begin{cases} x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^+} - m_x, N_s^+ \\ m_x - x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^-}, N_s^- \end{cases};$$

$\text{sign}(\)$ – знакова функція;

$\Phi(\dots)$ – інтеграл імовірності;

$\hat{P}_s(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, t_0, T)$ – оцінка імовірності події \bar{S} , тобто того, що на інтервалі T не буде жодного викиду $x(t)$ за $x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}$;

$\hat{m}_x(t)$, $\hat{m}_{\dot{x}}(t)$, $\hat{\sigma}_x(t)$, $\hat{\sigma}_{\dot{x}}(t)$, $\hat{r}(t)$ – оцінки на $T_{\text{кст}}$ характеристик ВП $x(t)$, відповідно: математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень змінної $x(t)$ і її першої похідної $\dot{x}(t)$, коефіцієнту кореляції $x(t)$ і $\dot{x}(t)$;

$T_{\text{кст}}$ – інтервал часу, по можливості більш короткий, для якого може бути прийнято гіпотезу про квазістаціонарності перерахованих оцінок.

Вирази (2) розглядаються як МПР досить загального виду.

Задати припустимі значення $N_s^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}$ та $n_s^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}$ можна, ввівши поняття гарантованої імовірності відсутності порушень (події \bar{S}) на T – $P_s^{\tilde{a}}(x^{\tilde{a}\tilde{\delta}^\pm}, T)$:

$$n_s^{\ddot{a}\pm}(x^{rp\pm}) = N_s^{\ddot{a}\pm}(x^{rp\pm}, T) / T = -\ln P_s^{\ddot{a}}(x^{\ddot{a}\pm}, T) / T = -\ln P_s^{\ddot{a}}(x^{\ddot{a}\pm}, T_{\hat{e}\ddot{n}\delta}) / T_{\hat{e}\ddot{n}\delta}. \quad (3)$$

В окремому, але дуже важливому для практики випадку, коли регламентована змінна $x(t)$ є одночасно регульованою, $x(t) \equiv y(t)$, з обмеженням, наприклад, $y^{rp+}(t)$, робота САР забезпечує $m_y \approx y^{3d}$. Це дає можливість, вирішивши зворотню стосовно (2) задачу, знайти поточне гранично припустиме значення y^{3d} , при якому $\hat{P}_s(y^{\ddot{a}\pm}, T_{\hat{e}\ddot{n}\delta}) = P_s^{\ddot{a}}(y^{\ddot{a}\pm}, T_{\hat{e}\ddot{n}\delta})$:

$$y^{c\ddot{a}\ddot{a}\pm}(t) = \arg \left\{ \hat{n}_s^{\pm}(y^{\ddot{a}\pm}, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_{\dot{y}}, y^{c\ddot{a}}, \hat{m}_{\dot{y}}, \hat{r}, T_{\hat{e}\ddot{n}\delta}, t) = n_s^{\ddot{a}\pm}(y^{\ddot{a}\pm}) \right\}. \quad (4)$$

Розмаїття особливостей: а) встановленого технологічного й експлуатаційного регламентів; б) обмежень, яких необхідно дотримуватись; в) наслідків цих порушень; г) об'єкту управління, і, насамперед, особливостей зміни ефективності його роботи при змінах режиму в межах регламенту; д) змінних, на які накладені обмеження; е) варіантів розрахунку гарантуючого управління; ж) конкретного вигляду моделі порушення регламенту, що при цьому використовується, обумовили необхідність класифікації систем гарантуючого управління. Класифікація створила основу для конкретизації систем, у тому числі, і для їх подальших розробок і досліджень у даній роботі – це замкнуті СГУ. Вони, як і інші замкнуті САУ, найбільш ефективні для управління об'єктами технологічного типу. На рис. 5 приведено приклади структурних схем замкнутих СГУ, що розроблено відповідно до класифікації СГУ, для випадку, коли $x(t) \equiv y(t)$. Вони охоплюють найбільш актуальні задачі практики й ілюструють можливості управління об'єктом, як на основі тільки алгоритмів гарантування, так і при їх взаємодії з алгоритмами регулювання й оптимізації. Априорі очевидно, що в складі СГУ об'єктами технологічного типу (як і в складі систем оптимізації) функцію регулювання доцільно зберігати.

Розробка альтернативних варіантів алгоритмів гарантуючого управління (АГУ) ґрунтується на МПР наступного етапу їх конкретизації. Цей етап зводиться, насамперед, до вибору конкретного виду моделі зміни в часі математичного очікування $m_y(t)$ регламентованих змінних $y(t) = m_y(t) + \tilde{y}^0(t)$, як випадкових процесів, і використання в алгоритмах управління процедур його прогнозування. Розглянемо тут найбільш важливі приклади АГУ, що реалізовані модулями МОЧН і МРЗД:

- $m_y(t)$ – *квазістаціонарне та квазіпостійне на $T_{кт}$* :

$$\hat{n}_s^{\pm}(y^{\ddot{a}\pm}, t) = \frac{\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)}{2\pi\hat{\sigma}_y(t)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^{\pm} \left(\frac{y^{\ddot{a}\pm} - \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y(t)} \right)^2 \right\}, \quad (5)$$

$$y^{c\ddot{a}\ddot{a}\pm}(t) = y^{\ddot{a}\pm} \mp \hat{\sigma}_y(t) \left| \sqrt{2 \ln \left(T \hat{\sigma}_{\dot{y}}(t) / 2\pi\hat{\sigma}_y(t) \ln \left(1 / P_s^{\ddot{a}}(y^{\ddot{a}\pm}, T) \right) \right)} \right|; \quad (6)$$

$$\hat{n}_s^\pm(y^{\tilde{a}\tilde{\delta}+}, t) = \frac{\hat{\sigma}_{\dot{y}}}{2\pi\hat{\sigma}_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^\pm \left[\frac{y^{\tilde{a}\tilde{\delta}\pm} - \hat{m}_y(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{\hat{\sigma}_y} \right]^2 \right\} \times \left\{ \exp \left(-\frac{\hat{m}_{\dot{y}}^2(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{2\hat{\sigma}_{\dot{y}}^2} \right) \mp \sqrt{2\pi} \frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)} \hat{O} \left(\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}} \right) \right\}; \quad (11)$$

$$y^{\tilde{c}\tilde{a}\tilde{a}+}(t) = y^{\tilde{a}\tilde{\delta}} - \hat{d}(t_0)(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})^3 - \hat{c}(t_0)(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})^2 - \hat{b}(t_0)(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}}) - \hat{a}(t_0) - \quad (12)$$

$$- \hat{\sigma}_y(t) \sqrt{2 \ln \left| \frac{-T\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)}{2\pi\hat{\sigma}_y(t) \ln P_s^{\tilde{a}}(y^{\tilde{a}\tilde{\delta}+}, T)} \left\{ \exp \left(-\frac{\hat{m}_{\dot{y}}^2(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{2\hat{\sigma}_{\dot{y}}^2(t)} \right) + \frac{\sqrt{2\pi}\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)} \hat{O} \left(\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t_0 + \tau_{i\tilde{\delta}})}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)} \right) \right\} \right|}.$$

$$\text{де } \hat{d}(t_0) = \ddot{\hat{m}}_y(t_0)/6; \quad \hat{c}(t_0) = (\ddot{\hat{m}}_y(t_0) - \ddot{\hat{m}}_y(t_0)t_0)/2; \quad \hat{b}(t_0) = \dot{\hat{m}}_y(t_0) - \ddot{\hat{m}}_y(t_0)t_0 + \ddot{\hat{m}}_y(t_0)t_0^2/2;$$

$$\hat{a}(t_0) = \hat{m}_y(t_0) - \hat{m}_y(t_0)\dot{\hat{m}}_y(t_0)t_0 + \ddot{\hat{m}}_y(t_0)t_0^2/2 - \ddot{\hat{m}}_y(t_0)t_0^3/6.$$

Розглянуті моделі зміни $m_y(t)$ і АГУ є альтернативними, тому що вибір тієї чи іншої моделі, а, отже, і алгоритму залишається за суб'єктом – розробником системи. Ці алгоритми вимагають допрацювання, тому що вони не враховують принципово важливу обставину. Вони створюють у СГУ додатковий зворотний зв'язок (“контур гарантування”), разом з яким з'являються проблеми забезпечення стійкості цього контуру і підвищення його динамічної точності. Надалі АГУ (5 – 12) будемо називати базовими, тобто у певному сенсі – найпростішими.

У третьому розділі проводяться допрацювання базових АГУ, параметрична оптимізація і порівняльний аналіз СГУ на їх основі. Дослідження обмежене найбільш актуальними для практики структурами, які можна розглядати як складові їх більш складних варіантів. Досліджуються однімірні СГУ, у яких регламентована змінна має одне обмеження (“зверху”) і є регульованою, а ефективність роботи об'єкту монотонно зростає в міру наближення його режиму до обмеження. Досліджуються також САУ, у яких одночасно реалізуються функції регулювання, пошуку дрейфуючого екстремуму ефективності і гарантування дотримання обмеження.

Дослідження показали, що стійкість і високі динамічні властивості контуру гарантування може бути забезпечено за рахунок введення обмежень на величину і швидкість наростання $u^\Gamma(t)$ (у досліджуваних варіантах СГУ $u^\Gamma(t) \equiv u^{\text{здд}}(t)$). Вирішити ці задачі більш ефективно можна, використовуючи в алгоритмі управління інформацію не про саму регламентовану змінну, а про її помилку регулювання. Це вносить ефект прогнозування.

Відібрані для тестування і вибору перспективних до застосування 14 варіантів СГУ відрізнялися за п'ятьма ознаками структури й алгоритмів, див. табл. 1.

Класифікація досліджуваних СГУ за особливостями структури й алгоритмів і їх кодування

№ позиції в кодї СГУ	Особливості структури та алгоритму СГУ		Ідентифікатор
1	Головний признак структури	стабілізація \hat{n}_s	1
		безпосередній розрахунок $u^{здд}$	2
2	Особливість моделі порушення регламенту, що використовується в алгоритмі	стаціонарне m_y ($m_y = \text{const}$)	1
		нестаціонарне m_y ($m_y = \text{var}$)	2
3	Застосування в алгоритмі та особливості прогнозування траєкторій руху $\hat{m}_y(t)$, $\hat{m}_{\dot{y}}(t)$ або $y(t)$, $\dot{y}(t)$	без прогнозування	0
		з прогнозуванням за гармонійним сплайном	1
		з прогнозуванням за кубічним сплайном 1	2
		з прогнозуванням за кубічним сплайном 2	3
4	Застосування в алгоритмі управління осереднення змінних y та (чи) \dot{y}	змінні y та \dot{y} не використовуються	0
		використовуються оцінки \hat{m}_y , $\hat{m}_{\dot{y}}$	1
		осереднення не використовується	2
		використовується оцінка тільки m_y	3
5	Змінні, що використовуються для розрахунку оцінок середньоквадратичних відхилень	змінна y , що регулюється	1
		помилка регулювання Δy	2

Коректність порівняння їх ефективності в сталих і перехідних процесах забезпечувалася попередньою оптимізацією налаштувальних параметрів АГУ за критерієм близькості середнього значення регламентованої змінної $y(t)$ до обмеження $y^{гр+}$ (зі штрафом при його порушенні) і широтою досліджень, коли параметри об'єкту бралися: а) фіксованими; б) з “розрахунковими” діапазонами змін, при яких проводилася параметрична оптимізація регулятора; в) “екстремальними”, при яких САР втрачала стійкість. Порівняння проводилося за двома основними взаємопротирічними показниками – імовірністю безаварійної роботи $\hat{P}_S(T_{\text{нв}})$ і середнім видаленням регульованої змінної від свого обмеження $M[y^{гр+} - y(t)]$ (див. рис. 6). Їх взаємопротирічність дозволила виділити область компромісів по Парето (ОКП). Аналіз ОКП показує:

– ОКП для різних режимів роботи СГУ (сталий, перехідний) і різних умов не збігаються.

Разом з тим принципових розбіжностей (антагонізму) між ОКП немає. Це є непрямим свідченням того, що всі розглянуті варіанти СГУ працездатні, а багато хто з них жорстко конкурують між собою за ефективністю застосування;

– для сталих режимів і фіксованих параметрів об'єкту найбільшу близькість у до $y^{ГР}$ здатні забезпечити СГУ з безпосереднім розрахунком $y^{ЗДД+}$, а найбільшу імовірність безаварійної роботи – СГУ, де $y^{ЗДД+}$ розраховується в контурі зворотного зв'язку стабілізації \hat{n}_s . Для змінних параметрів об'єкту (з розрахунковим діапазоном їх зміни) ОКП складають тільки СГУ зі стабілізацією \hat{n}_s . Разом з тим, СГУ з безпосереднім розрахунком $y^{ЗДД}$ значно простіші в застосуванні, тому що практично не вимагають настроювання;

– для перехідних (пускових) процесів область компромісів по Парето виродилася в множини з одним компонентом. Як і у випадку сталих процесів, кращі показники дають СГУ, що реалізують принцип визначення $y^{ЗДД+}$ в контурі зворотного зв'язку, де здійснюється стабілізація $\hat{n}_s(t)$. Якщо пусковий режим здійснюється без використання спеціальних алгоритмів, що формують базову траєкторію перехідного процесу, то перевагу мають СГУ, у яких розрахунок \hat{n}_s здійснюється на основі моделі порушення регламенту зі стаціонарним математичним очікуванням ($m_y = \text{const}$). Якщо базова траєкторія формується, то перевагу вже мають СГУ, у яких розрахунок $\hat{n}_s(t)$ здійснюється за моделлю з нестаціонарним m_y і з прогнозуванням траєкторії руху $y(t)$ на час $\tau_{\text{ПН}}$ вперед.

Ілюстрацію роботи СГУ дають рис. 7 – 8, при цьому останній – для екстремальних умов, коли “внутрішня” САР стає нестійкою.

Задача оптимізації режимів роботи технологічних агрегатів, функція ефективності $E(t)$ яких дрейфує неконтрольованим чином, пов'язана з перебуванням і відстеженням екстремуму цієї функції $E^*(t)$. В тому випадку, коли на змінні об'єкту накладено обмеження, то одночасно необхідно реалізувати і функцію гарантування дотримання цих обмежень, див. рис. 9.

Для цього алгоритми гарантування ув'язані з варіантами алгоритмів пошуку екстремуму, що використовуються у системах екстремального регулювання (СЕР), тобто реалізовано СЕР з гарантуванням (СЕРГ). Дослідження показали працездатність і ефективність СЕРГ, див. рис. 10.

У четвертому розділі розглядаються методи підвищення ефективності СГУ, засновані на підвищенні рівня робастності (грубості за А. Андроновим) контурів регулювання СГУ і надання спеціальних властивостей СГУ за рахунок координації роботи її контурів регулювання і гарантування.

Цілеспрямовано використовуючи, як відомі підходи (комутація структури регулятора, прогнозування вільного руху на час запізнення вперед), так і оригінальні розробки (динамічна зона

нечутливості) у ході спеціальної процедури синтезу, заснованої на імітаційному моделюванні з параметричною оптимізацією, і порівняльному аналізі великої кількості альтернативних варіантів, розроблено робастний алгоритм регулювання. Його застосування доцільне як у СГУ, так і в звичайних САР, як базового (РПСБ), тобто альтернативи ПД- регулятора.

Регулятор складається з 5 модулів (див. рис. 11): завдання (МЗД), динамічної зони нечутливості (МДЗН), основного алгоритмічного (МОА), прогнозування руху під впливом управління (МПР), формування управляючих дій (МФУВ) для виконавчих механізмів (ИМ) двох принципово різних типів – пропорційного (ПИМ) і інтегруючого з постійною швидкістю (ИИМПС). Функції змінної структури реалізуються ψ -осередками, що комутують сигнали: розузгодження – $\psi_{зн}$, $\psi_{н}$, інтегральної складової ПД-алгоритму – $\psi_{и}$, вхідного сигналу алгоритму прогнозуючої корекції – $\psi_{пн}$, управляючої дії – $\psi_{у}$ (див. рис. 12).

У тому випадку, коли всі ψ -осередки реалізують свої α -структури, РПСБ вироджується в лінійний ПД-регулятор. Спільно $\psi_{зн}$ та $\psi_{н}$ реалізують $\psi_{дзн}$ – ψ -осередок, типу “зона нечутливості другого порядку, що динамічно перенастроюється”. Вона описується системою рівнянь (13), і, як показують дослідження, грає найбільш помітну роль у забезпеченні ефективності РПСБ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta y_i(t) = \psi_i(\Delta y, g_i) \Delta y(t); \quad \psi_i(\Delta y, g_i) = \begin{cases} \alpha_i = 1, & \text{if } g_i(\Delta y - g_i \text{ sign } \Delta y) \geq 0, \\ \beta_i = 0, & \text{if } g_i(\Delta y - g_i \text{ sign } \Delta y) < 0, \end{cases} \\ g_i(t_1) = \Delta y_{\text{cf}\ddot{a}}(t_1) = -T_{\text{cf}\ddot{a}} \Delta \dot{y}_{\text{cf}\ddot{a}}(t_1); \quad t_1 = 0, \text{ if } t = \arg\{g_{\text{cf}}(t) \Delta y(t)\}, \\ \Delta y_{\text{cf}\ddot{a}}(t_1 = 0) = \Delta y_{\text{cf}\ddot{a}}^i(t), \quad \Delta y_{\text{cf}\ddot{a}}^i(t) = \psi_{\text{cf}}(\Delta y, g_{\text{cf}}) \Delta y(t), \\ \psi_{\text{cf}}(\Delta y, g_{\text{cf}}) = \begin{cases} \alpha_{\text{cf}} = 1, & \text{if } g_{\text{cf}} \Delta y > 0, \\ \beta_{\text{cf}} = 0, & \text{if } g_{\text{cf}} \Delta y < 0, \end{cases} \\ g_{\text{cf}}(t) = \Delta y(t) + \tau_1^i \Delta \dot{y}(t) + \tau_2^i \Delta \ddot{y}(t) + \Delta y_{\text{cf}} \text{ sign } \Delta y, \end{array} \right. , \quad (13)$$

де $g_{зн}(t)$, $g_{н}(t)$ – функції переключення $\psi_{зн}$ та $\psi_{н}$;

$\Delta y_{знд}(t)$, $\Delta \dot{y}_{\text{cf}\ddot{a}}^i(t)$, $\Delta y_{зн}$, $\Delta \dot{y}_{\text{cf}\ddot{a}}(t)$ – поточне, початкове і мінімальне значення зони нечутливості, швидкість зміни $\Delta y_{знд}$;

t_1 – поточний час, відлік якого починається при $t = 0$ та відновляється щоразу, коли $g_{зн}(t) \cdot \Delta y(t) = 0$;

τ_1^i , τ_2^i , $T_{знд}$ – настроювальні параметри $g_{зн}(t)$ та настроювальний параметр, що визначає швидкість зменшення $\Delta y_{знд}(t)$, при $t_1 \rightarrow \infty$.

Всебічні дослідження перехідних і сталих процесів показали, що при його застосуванні в САР істотно розширюється область стійкості в просторі параметрів об'єкту, збільшується динамі-

чна точність, знижується імовірність виходу регульованої змінної за встановлені обмеження. Це, а також розроблена проста і зручна (“інженерна”) методика настроювання параметрів, опрацьованість цифрової реалізації алгоритму, що забезпечує стійкість його обчислювальних процедур, дозволяють рекомендувати алгоритм як базовий при побудові САР, замінивши ним ПД-алгоритми.

Розширивши відомий метод типової статистичної ідентифікації на моделі об'єктів і САР із запізненням, за рахунок спеціальної оптимізаційної процедури, де цей метод використовується двічі, вдається здійснити розв'язання задачі параметричної ідентифікації моделі об'єкту в замкнутому контурі регулювання, що входить до складу СГУ. Після ідентифікації адаптація регулятора зводиться до формальної процедури визначення його квазіоптимальних настроювань. Підвищення якості ідентифікації в замкнутому контурі вимагає подачі на вхід САР адитивно змінної $y^{зДД+}(t)$, що визначається в контурі гарантування, спеціального, досить високочастотного, впливу $\Delta y^Д$. Подача цього впливу і розв'язання задачі адаптації може здійснюватися періодично. Підставою для запуску процедури є дрейф імовірнісних характеристик регульованої змінної, котрі оцінюються безперервно на ковзаючих інтервалах часу.

При реалізації СГУ об'єктами управління, для яких пріоритетом є зниження інтенсивності управляючих впливів, можна використовувати координацію роботи контурів регулювання і гарантування. Принцип координації складається у використанні власного руху об'єкту в напрямку, що передбачається гарантуючим управлінням. Реалізуючи його, розроблені варіанти алгоритмів на час такого руху фактично розмикають зворотні зв'язки контурів регулювання і гарантування (див. рис. 13).

Найпростіший варіант алгоритму координації змінює поточне припустиме задане значення $y^{зДД} \equiv y^{зДК}$ відповідно до умови:

$$y^{зДД}(nT_{\text{кв}}) = \begin{cases} \min(y^{зДД}(nT_{\text{кв}}), y(nT_{\text{кв}})) & \text{їдè } X_1 \text{ \& } X_2 \text{ \& } X_3 \\ \max(y^{зДД}(nT_{\text{кв}}), y(nT_{\text{кв}})) & \text{їдè } X_4 \text{ \& } X_5 \text{ \& } X_6 \\ y^{зДД}((n-1)T_{\text{кв}}) & \text{â } \text{â} \end{cases}, \quad (14)$$

де $y^{зДК}(nT_{\text{кв}})$ – поточне задане значення для $y(t)$, що відповідає $y^{зДД}(nT_{\text{кв}})$, але зміна якого зкоординована зі зміною $y(t)$;

X_1, X_2, \dots – операції порівняння;

$X_1 = y^{зДД}(nT_{\text{кв}}) \geq y^{зДК}((n-1)T_{\text{кв}})$, $X_2 = y((n-1)T_{\text{кв}}) \leq y^{зДК}((n-1)T_{\text{кв}})$, $X_3 = y(nT_{\text{кв}}) \geq y^{зДК}((n-1)T_{\text{кв}})$, $X_4 = y^{зДД}(nT_{\text{кв}}) \leq y^{зДК}((n-1)T_{\text{кв}})$, $X_5 = y((n-1)T_{\text{кв}}) \geq y^{зДК}((n-1)T_{\text{кв}})$, $X_6 = y(nT_{\text{кв}}) \leq y^{зДК}((n-1)T_{\text{кв}})$.

Несприятливим наслідком такої координації є деяке зниження, за інших рівних умов, імові-

рності безаварійної роботи. Часткова компенсація цього зводиться до використання в алгоритмі координації прогнозованих (на час запізнення) змінних.

У п'ятому розділі розглядаються питання розробки, реалізації, виробничих іспитів і впровадження різних модифікацій систем гарантуючого управління молотковими дробарками, комплексами безперервного вагового дозування і прес-грануляторами – основних технологічних агрегатів комбікормової промисловості. Вони, як об'єкти управління, піддані інтенсивним збуренням за сировиною й енергоносіями, мають у каналах управління значні запізнення і дуже істотну нестаціонарність. Їх найважливішою особливістю є наявність обмежень у технологічних і експлуатаційних регламентах, порушення яких приводить до аварійних зупинок технологічних агрегатів (дробарки, преси-гранулятори) чи різкому зниженню якості готової продукції (комплекси дозування).

Обмеження на режими роботи головних приводних електродвигунів (ПЕД) молоткових дробарок і пресів-грануляторів пов'язані з переповненням їх робочих обсягів продуктом, зокрема через погіршення його виходу, і перевищенням моментів опору на валах ПЕД. Їх можна віднести або до гранично-припустимих струмів їх навантаження, або, що більш ефективно, до гранично-припустимих перегрівів цих ПЕД. Оскільки вимір температури двигуна не передбачається його штатною автоматикою, то доцільно про тепловий режим двигуна судити, розраховуючи його в реальному часі за розробленою моделлю реле його теплового захисту. У тому випадку, якщо ресурсів управління для запобігання перегріву не вистачає, то аварійну зупинку (включення “твердого” алгоритму захисту ПЕД) можна запобігти, використовуючи цю модель у режимі прогнозування моменту такої зупинки. При цьому, якщо прогноз стверджує, що досить часу для технологічної зупинки, то буде реалізований саме він – “м'який” алгоритм захисту.

Обмеження на режим гідротермічної обробки при гранулюванні розсипного комбікорму пов'язані з його перезволоженням. Воно приводить до “замазування” отворів матриці, що пресує, швидкому переповненню робочого обсягу вузла, що пресує, і зрізу захисних штифтів головного ПЕД. Принципова особливість цих обмежень полягає в тому, що їх значення априорі невідомі, тому що гранично-припустимий ступінь зволоження визначається властивостями компонентів суміші, що подається на гранулювання, зокрема їх гігроскопічність. Одночасно, наближення до гранично-припустимого зволоження забезпечує максимально високі продуктивність, якість гранул, зниження питомих енерговитрат. Задача гарантованого дотримання режиму гідротермічної обробки при максимально досяжній продуктивності прес-гранулятора вирішена в рамках СГУ. У якості регламентованої змінної взята оцінка коефіцієнта кореляції між струмом навантаження ПЕД і подачею пари на пресування, що розраховується в реальному часі на ковзному інтервалі. Область її припустимих значень – від'ємні числа, а гранично-припустиме (граничне) значення дорівнює нулю.

Обмеження в технологічному процесі дозування безперервної дії мають дві зовсім різні

природи, але однакові наслідки – погіршення якості суміші та її брак. Перший тип обмежень пов'язаний з обмеженнями швидкості живильників дозаторів. Його порушення хоча б одним з дозаторів приводять до різкого порушення співвідношення компонентів у суміші. Гарантоване дотримання цих обмежень при забезпеченні максимально досяжної продуктивності комплексу забезпечується реалізацією контуру гарантування, управляючим впливом в якому є припустиме задане значення продуктивності комплексу в цілому. Другий тип обмежень безпосередньо пов'язаний з допусками на зміни концентрації окремих компонентів у суміші. Виробник комбікормів зацікавлений у зниженні відсотка фактичного введення в суміш дорогих компонентів для зниження її собівартості. Застосування СГУ дозволяє досягнути цього результату цілеспрямованою зміною *заданого* відсотка введення в суміш всіх її компонентів до значень, при яких гарантується, що їх поточні значення не будуть виходити за встановлені рецептом (регламентом) допуски, а собівартість суміші при цьому буде мінімально досяжною.

Різні модифікації СГУ молотковими дробарками, пресами- грануляторами, комплексами безперервного вагового дозування були впроваджені в виробництво чи пройшли виробничі іспити. Системи реалізують різні алгоритми гарантування і регулювання (у тому числі, аналоговий і цифровий варіанти) мають різну технічну структуру і програмно-технічну базу. Практика підтвердила їх ефективність поза залежністю від усіх цих особливостей. Основою ефективності цих систем стали реалізація функції гарантування і поліпшення реалізації функції регулювання.

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено *обґрунтування і рішення наукової проблеми* – створення наукових основ нового класу систем автоматичного управління – систем гарантуючого управління. Ці системи, крім традиційних, реалізують функцію гарантування – гарантованого (з наперед заданою імовірністю) дотримання обмежень на регламентовані змінні об'єкту управління. Головна мета, що повинна бути досягнута за рахунок застосування таких систем у промисловості – засобами автоматичного управління гарантувати дотримання обмежень регламентів ведення технологічних процесів та роботи технологічних агрегатів, забезпечивши за рахунок цього підвищення якості продукції, зниження питомих витрат енергії і втрат сировини, запобігання виникнення аварійних ситуацій та пов'язаних з ними негативних наслідків.

Основу дисертації складають *нові наукові положення, що виносяться на захист*. Нижче сформульовані їх короткі обґрунтування і сутність.

1. Розвиток антропогенних систем, якими є і САУ, пов'язаний з підвищенням їх функціональної цілісності і визначає розширення складу реалізованих ними функцій. Новою системоутворюючою функцією, що об'єктивно повинна поповнити склад традиційних для САУ функцій (регу-

лювання, оптимізації, логічного управління) повинна стати функція гарантування – гарантованого дотримання встановлених регламентами обмежень. Її декомпозиція конкретизує задачі, рішення яких доцільно вести застосовуючи функцію гарантування, і одночасно виявляє доцільні зв'язки з іншими системоутворюючими функціями.

2. Концепція побудови СГУ ґрунтується на поточній, прямій чи непрямій, оцінці в реальному часі імовірності дотримання обмежень, встановлених регламентами, і зміни управляючого (“гарантуючого”) впливу на об'єкт з метою забезпечення відповідності значення оцінки наперед заданому (“гарантуючому”) значенню цієї імовірності. Оцінка імовірності ведеться на основі поточних оцінок характеристик регламентованих змінних як ВП і моделі порушення регламенту. Багатоваріантність побудови СГУ відображує її класифікація. Вона дає можливість віднести конкретний об'єкт до того класу об'єктів, управління яким доцільно реалізувати з використанням функції гарантування, конкретизувати джерела інформації і крапки прикладання гарантуючого управління, тобто в остаточному підсумку, обґрунтувати раціональну структуру СГУ цим об'єктом. Розроблені конкретні варіанти таких структур, з узагальненою характеристикою області їх доцільного застосування й основних особливостей дають для цього обґрунтування важливу підтримку. Разом з функціональною структурою САУ, концепція побудови, класифікація і варіанти структур формують методологічну основу СГУ.

3. Математична МПР відіграє найважливішу роль у СГУ, оскільки поточне значення імовірності дотримання обмежень регламенту безпосередньо вимірюване бути не може. Її альтернативні варіанти отримані відповідно до прийнятого набору моделей зміни регламентованих змінних як випадкових процесів. Головна ознака цих моделей – квазістаціонарність чи нестаціонарність на ковзних інтервалах часу математичних очікувань цих процесів. Варіанти алго-ритмів гарантуючого управління для конкретних структур СГУ безпосередньо визначаються конкретним видом МПР. Їх порівняльні дослідження показали працездатність всіх алгоритмів, у тому числі, при взаємодії їх з алгоритмами пошукової оптимізації режимів роботи об'єктів, екстремум функції ефективності яких дрейфує в широкому діапазоні. Результати оцінювалися взаємопротирічними показниками, що дозволили виділити область компромісів з Парето-оптимальними алгоритмами. Разом з тим, деякі алгоритми, що не ввійшли в цю область, але близькі до неї, мають перевагу, що не піддається формалізації – перевагою простоти їх настроювання. Воно і може виявитися вирішальним у конкретній ситуації.

4. Зміна управляючого впливу, що розраховується в контурі гарантування, що у СГУ є головним, викликає додаткові перехідні процеси в її внутрішньому (допоміжному) контурі – контурі регулювання. Це збільшує дисперсії коливань регулюючого впливу і регульованої (регламентованої) змінної, що приводить до негативних наслідків. Координація роботи контурів на основі синхронізації зміни гарантуючого управління зі змінами регульованої змінної, дозволяє істотно знизити

ти ці дисперсії. “Платою” за це є деяке зниження імовірності дотримання обмежень, викликане появою запізнення в контурі гарантування. Альтернативні алгоритми при реалізації загального принципу координації, по суті, забезпечують різний ступінь компромісу між двома зазначеними недоліками.

5. При інтенсивних параметричних збуреннях, навіть таких, котрі здатні привести до нестійкості контуру регулювання (САР), СГУ в цілому зберігає працездатність, забезпечуючи запобігання порушень регламенту й аварійних ситуацій. Однак, у таких умовах неминуче знижується ефективність роботи об'єкту. Зберегти її на високому рівні можливо за рахунок адаптації параметрів регулятора регламентованої змінної. Розроблений алгоритм адаптації заснований на ідентифікації моделі каналу регулювання об'єкту в замкнутому контурі. Він враховує, що в СГУ за каналом завдання на вхід САР подається вплив, що змінюється – гарантуюче управління. Розширюючи його спектр за рахунок додаткового випадкового, щодо високочастотного сигналу, вдається вирішити задачу ідентифікації на основі дворазового застосування методу типової статистичної ідентифікації (перший раз ідентифікується модель замкнутого контуру САР, другий – модель каналу регулювання).

6. Область застосування відомого підходу регуляризації процедури статистичної ідентифікації на основі застосування типових моделей розширена, насамперед, на типові моделі об'єктів і САР із запізненням. Наявність запізнення різко ускладнює отримання аналітичних виразів взаємкореляційних функцій через їх громіздкість і необхідність аналізувати велику кількість варіантів для відбору фізично обґрунтованого. Метод ефективний при роботі на коротких вибірках, що актуально для поточної ідентифікації, що реалізована в реальному часі.

7. Використовуючи, як відомі підходи (комутація структури регулятора, прогнозування вільного руху) так і оригінальні розробки (динамічна зона нечутливості) у ході спеціальної процедури синтезу, що заснована на імітаційному моделюванні і параметричній оптимізації, що включає, і порівняльний аналіз великої кількості альтернативних варіантів, розроблено алгоритм регулювання, застосування якого доцільно як у СГУ, так і в звичайних САР, як альтернативу ПД-регулятору. Усебічні дослідження показали, що при його застосуванні в САР істотно розширюється область стійкості в просторі параметрів об'єкту, збільшується динамічна точність, знижується імовірність порушення обмежень. Це, а також розробка простої та зручної (“інженерної”) методики настроювання параметрів, пропрацьованість цифрової реалізації алгоритму, що забезпечує стійкість його обчислювальних процедур, дозволяють рекомендувати алгоритм як базовий при побудові САР, замінивши їм ПД-алгоритми.

8. Різні модифікації СГУ молотковими дробарками, пресами-грануляторами, комплексами безперервного вагового дозування були впроваджені в виробництво чи пройшли виробничі іспити на підприємствах комбікормової промисловості. Системи реалізують різні алгоритми гарантуван-

ня і регулювання (у тому числі, аналоговий і цифровий варіанти), мають різну технічну структуру і програмно-технічну базу. Практика підтвердила їх економічну ефективність поза залежністю від усіх цих особливостей. Основою ефективності цих систем стали реалізація функції гарантування і поліпшення реалізації функції регулювання. Це є головним критерієм обґрунтованості прийнятих у роботі положень і вірогідності теоретичних розробок.

9. Область застосування СГУ не обмежується зазначеними об'єктами чи галуззю промисловості. Вони можуть бути застосовані для будь-яких об'єктів управління, регламент яких містить у собі обмеження на режими експлуатації. Ефективність застосування таких систем буде тим вище, чим важче наслідки порушень регламенту, і чим ближче найбільш ефективні режими роботи об'єкту наближаються до обмежень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хобин В.А. Эффективные алгоритмы и системы управления технологическими процессами производства комбикормов: Серия “Комбикормовая промышленность”. – М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР, 1989. – 40 с.

2. Хобин В.А. Перспективы применения автоматических систем прогнозируемого управления с переменной структурой в пищевой технологии // Сб. научн. тр. “Автоматизация на предприятии в хранилищно-вкусовой промышленности”. – г. Пловдив, НРБ, 1981. – С. 54 – 63.

3. Хобин В.А., Антонов А.Б. Об эффективном алгоритме автоматического управления молотковыми дробилками зернового сырья // В кн.: Управление в агропромышленных и пищевых комплексах / Киев: ИК АН УССР, 1983. – С. 41 – 46.

4. Хобин В.А., Редунов Г.М. Алгоритм генерации гауссовских случайных процессов с заданной корреляционной функцией // В кн.: “Моделирование и оптимизация управления технологическими процессами в пищевой промышленности” / Краснодар, 1984. – С. 125 – 132.

5. Хобин В.А., Плева А.Г., Тищенко Г.Г. Оптимизация управления молотковыми дробилками в АСУ ТП смесеприготовления // В кн.: АСУ ТП химических производств и смесеприготовления / Киев: Ин-т автоматики, 1985. – С. 88 – 92.

6. Хобин В.А., Фарфель А.И. Критерий оптимальности АСУ ТП дозирования комбикормов // “Изв. вузов. Пищевая технология”. – 1986. – № 3. – С. 93 – 97.

7. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю. Математическая модель весового конвейерного дозатора сыпучих материалов // “Изв. вузов. Пищевая технология”. – 1986. – № 5. – С. 50 – 54.

8. Хобин В.А., Левинский В.М. Адаптивное управление технологическими процессами при ограничениях типа “аварийная ситуация” // В кн.: “Адаптивные системы автоматического управления” / Киев: Техника. – 1986. – Вып. 14. – С. 84 – 90.

9. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю., Гальперин Ф.С., Фарфель А.И. Алгоритмы управления бункерным дозатором непрерывного действия в составе комплекса многокомпонентного дозирования // “Приборы и системы управления”. – 1987. – № 2. – С. 28 – 30.

10. Хобин В.А., Фарфель А.И., Гальперин Ф.С., Ситниченко В.М. Оптимизация структур МО системы управления непрерывным весовым дозированием // “Приборы и системы управления”. – 1988. – № 4. – С. 25 – 27.

11. Хобин В.А., Плева А.Г. Автоматическое управление объектами АПК в условиях интенсивных безлюдных технологий // Интенсификация технологических процессов и новые способы переработки, хранения и транспортировки в АПК: Сб. научн. тр. / К.: УМК ВО, 1988. – С. 5 – 10.

12. Хобин В.А., Дудник В.В., Галушкевич Р.Н. Синтез автоматической системы управления параллельно работающими размольными агрегатами при циклическом дозировании компонентов комбикормов // Автоматизированные системы управления объектами агропромышленного комплекса: Сб. научн. тр. / Киев: Ин-т автоматики. – 1989. – С. 4 – 10.

13. Хобин В.А. Непрерывное весовое дозирование - преимущества и недостатки // Комбикормовая промышленность. – 1990. – С. 20 – 21.

14. Хобин В.А. Закономірності розвитку та принципи розробки ефективних систем автоматизації // В кн.: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 1995. – Вип. 15. – С. 190 – 196.

15. Хобин В.А., Парамонов О.І. Регулятор змінної структури для побутових ефективних робастних автоматичних систем // В кн.: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 1997. – Вип. 17. – С. 241 – 248.

16. Хобин В.А., Парамонов А.И. Цифровая имитационная модель пресса-гранулятора как средство для разработки эффективных САУ // Проблеми та перспективи розвитку виробництва та споживання хлібопродуктів: Зб. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 1997. – С. 38 – 41.

17. Хобин В.А., Парамонов А.И. Эффективное управление процессом гранулирования комбикормов // Проблеми та перспективи розвитку виробництва та споживання хлібопродуктів: Зб. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 1997. – С. 32 – 35.

18. Хобин В.А., Парамонов А.И. Имитационная модель процесса гранулирования комбикормов // Моделирование в прикладных научных исследованиях: Матер. семин. / Одес. гос. политех. ун-т. – Одесса, 1997. – С. 29 – 34.

19. Хобин В.А., Жигайло А.М. Регуляризованная процедура структурной и параметрической идентификации моделей динамики на основе управления Винера-Хопфа во временной области // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: – Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. / М-во освіти України. – Вип. 1. – Одеса, 1998. – Вип. 18. – С. 190 – 195.

20. Хобин В.А., Жигайло О.М. Робастні процедури самоналаштування регуляторів на основі

типових моделей // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: – Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. / М-во освіти України. – Вип. 1. – Одеса, 1999. – Вип. 19. – С. 225 – 233.

21. Хобін В.А. Імовірнісні моделі порушень регламенту технологічного процесу для систем гарантуючого управління // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: – Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. / М-во освіти України. – Вип. 1. – Одеса, 1999. – Вип. 19. – С. 234 – 237.

22. Хобін В.А., Жигайло О.М., Степанов М.Т. Порівняльний аналіз методів ідентифікації // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: – Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. / М-во освіти України. – Вип. 1. – Одеса, 1999. – Вип. 20. – С. 192 – 196.

23. Хобин В.А., Шейда Голбад К. Формализация задачи эффективного гарантирующего управления формированием смесей // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: – Зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. / М-во освіти України. – Вип. 1. – Одеса, 1999. – Вип. 19. – С. 200 – 203.

24. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления: назначение, классификация, структура // Системний аналіз, управління і інформаційні технології: Зб. наук. пр. / Харків. держ. політех. ун-т. – Харків: ХДПУ, 1999. – Вип. 71. – С. 14 – 21.

25. Хобин В.А., Шейда Голбад К. Принципы гарантирующего управления качеством формирования смесей // Всеукраїн. наук.-техн. журнал “Автоматизація виробничих процесів”. – Київ, 1999. – № 2 (9). – С. 104 – 109.

26. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления: структуры с расчетом уставок контурам регулирования // Пр. Міжнар. конф. з автомат. управління (Львів. – 11 – 15 вересня 2000). – Т. 1 – Математичні проблеми управління, оптимізації та теорії ігор. – Львів, ДНДІ інформаційної інфраструктури, 2000. – С. 269 – 273.

27. Хобин В.А., Шейда Голбад К. Эффективное управление комплексами непрерывного весового дозирования в условиях неопределенностей // Пр. Міжнар. конф. з автомат. управління (Львів. – 11 – 15 вересня 2000). – Т. 2 – Управління та ідентифікація в умовах невизначеності. – Львів, ДНДІ інформаційної інфраструктури, 2000. – С. 229 – 233.

28. Хобин В.А. Автоматизация технологических процессов в области хлебопродуктов: состояние и перспективы // Хранение и переработка зерна, 2000. – № 10. – С. 43 – 45.

29. Хобін В.А., Жигайло О.М. Ідентифікація моделі об'єкту в замкнутому контурі та її застосування в САУ ГБ // Галузь хлібопродуктів на порозі III тисячоліття: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 2001. – Вип. 21. – С. 153 – 157.

30. Хобін В.А., Трішин Ф.А. Алгоритм координації роботи контурів регулювання і “гаран-

тування” систем автоматичного управління // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 2001. – Вип. 22. – С. 130 – 134.

31. Хобін В.А., Жигайло О.М. Алгоритм самоналаштування регулятора, що використовує метод поетапної типової ідентифікації моделі об’єкту управління // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 2001. – Вип. 22. – С. 137 – 144.

32. 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.

33. Хобин В.А. Автоматизация технологических процессов. Состояние и перспективы // ГП “Журнал Хлебопродукты”. – М., 2001. – С. 26 – 29.

34. Хобин В.А., Бабиков А.Ю. Исследование систем гарантирующего управления экстремальными нестационарными объектами с ограничениями // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. / Кіровоград. держ. техн. ун-т. – Кіровоград, 2002. – Вип. 11. – С. 54 – 57.

35. 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.

36. Хобин В.А. Функция гарантирования в системах автоматического управления // Всеукр. наук.-техн. журнал “Автоматизація виробничих процесів”. – Київ, 2002. – № 1(14). – С. 145 – 150.

37. Хобин В.А., Ронис-Нафталин И. Эффективное управление молотковыми дробилками // Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 2002. – Вип. 24. – С. 384 – 387.

38. Хобин В.А., Бабиков А.Ю. Оптимизация режимов работы технологических машин в реальном времени // Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 2002. – Вип. 24: Присвячується 100-річчю з дня заснування ОДАХТ. – С. 388 – 391.

39. Хобин В.А. Интеллектуализация алгоритмов управления – экономичный путь повышения эффективности производства // Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 2002. – Вип. 24: Присвячується 100-річчю з дня заснування ОДАХТ. – С. 405 – 407.

40. Хобин В.А. Автоматизация процессов порционного многокомпонентного весового дозирования: проблемы, пути решения, перспективы // Наук.-вироб. журнал “Зернові продукти і комбікорми”. – Одеса, 2002. – № 1. – С. 60 – 61.

41. Система автоматического управления загрузкой дробилки: А.с. 1189502 СССР, МКИ В02С 25/00 / В.А. Хобин, В.М. Левинский, А.Г. Плева, Г.М. Редунов (СССР). – Заявлено 28.03.84;

Опубл. 07.11.85, Бюл. № 41. – 5 с.

42. Способ и система адаптивного управления загрузкой дробилки: А.с. 1251192 СССР, МКИ В02С 25/00 / В.А. Хобин, А.Г. Плева, В.М. Левинский (СССР). – Заявлено 20.02.85; Опубл. 29.05.86, Бюл. № 31. – 10 с.

43. Самонастраивающаяся система: А.с. 1241192 СССР, МКИ G05В 13/02 / В.А. Хобин, А.Г. Плева (СССР). – Заявлено 06.12.84; Опубл. 30.06.86, Бюл. № 24. – 11 с.

44. Весовой дозатор непрерывного действия: А.с. 1265486 СССР, МКИ G01 G 11/14 13/28 / В.А. Хобин, С.Ю. Митрофанов, В.А. Шаповаленко, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель (СССР). – Заявлено 04.01.85; Опубл. 23.10.86, Бюл. № 39. – 7 с.

45. Адаптивная система управления потенциально опасным объектом: А.с. 1291926 СССР, МКИ G05 В 11/01 / В.А. Хобин, В.М. Левинский, А.И. Трач (СССР). – Заявлено 27.02.85; Опубл. 23.02.87, Бюл. № 7. – 10 с.

46. Конвейерный дозатор: А.с. 1506288 СССР, МКИ G01 G 11/08 / В.А. Хобин, С.Ю. Митрофанов, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель (СССР). – Заявлено 20.10.87; Опубл. 07.09.89, Бюл. № 33. – 10 с.

47. Система непрерывного весового дозирования: А.с. 1325421 СССР, МКИ G05 D 11/13 / А.И. Фарфель, В.А. Хобин, В.А. Шаповаленко (СССР). – Заявлено 22.07.85; Опубл. 23.07.87, Бюл. № 27. – 10 с.

48. Адаптивная система управления потенциально опасным объектом: А.с. № 1423977 СССР, МКИ G05В 11/01 / В.А. Хобин, В.М. Левинский, Г.М. Редунов (СССР). – Заявлено 19.01.87; Опубл. 15.09.88, Бюл. № 34. – 14 с.

49. Система управления пресс-гранулятором: А.с. 1301726 СССР, МКИ В30В 9/18 / В.А. Хобин, В.М. Левинский, А.Г. Плева (СССР). – Заявлено 20.03.85; Опубл. 07.04.87, Бюл. № 13. – 6 с.

50. Адаптивная система управления потенциально опасным объектом: А.с. 1513416 СССР, МКИ G05В, 11/01 / В.А. Хобин, С.А. Воинова, В.М. Левинский (СССР). – Заявлено 05.11.87; Опубл. 07.10.89, Бюл. № 37. – 12 с.

51. Хобин В.А., Левинский В.М. Вероятностная модель функционирования тепловой защиты электроприводов и условия интенсификации работы технологических машин / Одес. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Одесса, 1983. – 7 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 1983, № 129Ук-Д83 // Анот. в БУ ВИНТИ “Деп. научн. работы”, № 7 (141), б/о 729, 1983.

52. Хобин В.А., Редунов Г.М., Пекарев Э.Л. Метод моментов для выявления скрытых периодичностей случайных процессов в условиях априорной неопределенности / Одес. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Одесса, 1983. – 12 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 1983, № 238Ук-Д83 // Анот. в БУ ВИНТИ “Деп. научн. работы”, № 8 (142), б/о 617, 1983.

53. Хобин В.А., Левинский В.М. Оптимизация управления технологическими машинами при ограничениях типа “аварийная ситуация” / Одес. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Одесса, 1983. – 7 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 1983, № 326Ук-Д83 // Анот. в БУ ВИНТИ “Деп. научн. работы”, № 9 (143), б/о 713, 1983.

54. Хобин В.А., Левинский В.М., Плеве А.Г. Математические модели молотковых дробилок комбикормового производства / Одес. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Одесса, 1984. – 25 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 1984, № 892Ук-85Деп.

55. Хобин В.А., Фарфель А.И. Влияние характеристик технологического оборудования на показатели качества смесеобразования / Одес. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Одесса, 1984. – 10 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 1984, № 10Ук-85Деп.

56. Хобин В.А., Плеве А.Г., Митрофанов С.Ю. Моделирование звена с переменным временем запаздывания на ЭЦВМ / Одес. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Одесса, 1984. – 9 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 1984, № 445Ук-85Деп.

57. Хобин В.А., Фарфель А.И., Гальперин Ф.С., Ситниченко В.М. Оптимизация структуры МО системы управления непрерывным весовым дозированием / Ред. журн. Приборы и системы управления. – М., 1987. – 8 с. – Рус. – Деп. в ЦНИИТЭИприборостроения 15.05.87, № 3773 Пр.

58. Хобин В.А. Техническая структура и вопросы эффективности АСУ ТП в пищевой промышленности // Тез. докл. к Всесоюзн. совещанию “Основные направления развития АСУ-пищепром и повышение эффективности использования вычислительной техники в пищевой промышленности в XI пятилетке”, ВНИИТЭИпищепром. – М., 1981. – С. 19 – 20.

59. Хобин В.А., Плеве А.Г., Редунов Г.М. Анализ перспектив применения алгоритмов управления с прогнозированием для автоматизации характерных объектов пищевой промышленности // Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. “Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств”. – М., 1982. – С. 11 – 12.

60. Хобин В.А., Левинский В.М., Митрофанов С.Ю. Интенсификация процессов сушки молока средствами автоматического управления // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. семинара “Оптимизация процессов сушки”. – Харьков, 1983. – С. 155 – 156.

61. Хобин В.А., Шаповаленко В.А., Митрофанов С.Ю. Спектральный анализ и цифровое моделирование возмущающих воздействий и помех измерения ленточных ДНД // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Проблемы автоматизации процессов взвешивания и дозирования”. – М., 1985. – С. 136 – 137.

62. Хобин В.А., Фарфель А.И., Гальперин Ф.С., Рязанов О.В. К определению эффективности комплекса непрерывного весового дозирования // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Проблемы автоматизации процессов взвешивания и дозирования”. – М., 1985. – С. 131 – 134.

63. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю., Гальперин Ф.С., Фарфель А.И. Алгоритмы управления бункерным дозатором непрерывного действия в составе комплекса многокомпонентного дозирования // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Проблемы автоматизации процессов взвешивания и дозирования”. – М., 1985. – С. 138 – 140.

64. Хобин В.А., Платонов П.Н., Плева А.Г., Левинский В.М. Управление потенциально опасными технологическими процессами в условиях гибких производств // Тез. докл. IV Всесоюзн. науч. конф. “Математическое моделирование сложных химико - технологических систем”. – Одесса, 1985. – С. 114 – 115.

65. Хобин В.А., Воинова С.А., Левинский В.М., Плева А.Г. Совершенствование алгоритмического и технического обеспечения систем управления технологическими агрегатами АПК // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Системы управления и средства автоматизации в агропромышленном комплексе” (Кишинев, 1987). – М., 1987. – С. 115 – 116.

66. Хобин В.А. Управление потенциально опасными объектами в условиях неопределенностей // Тез. IV Всесоюзн. совещания “Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов”, Суздаль, 1988. – М., 1988. – С. 91.

67. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю., Фарфель А.И. Иерархическое адаптивное управление комплексами непрерывного дозирования-смешивания жидких и сыпучих компонентов // Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. “Информатика и автоматизация в регионе”. – Винница, 1988. – С. 178.

68. Хобин В.А. Весовое непрерывное дозирование: проблема точности формирования смесей и алгоритмический путь ее решения // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Технология сыпучих материалов”. – Ярославль, 1989. – С. 89 – 91.

69. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю., Литовченко Н.М. Алгоритмическое обеспечение систем НЦУ непрерывным весовым дозированием-смешиванием сыпучих материалов // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Технология сыпучих материалов”. – Ярославль, 1989. – С. 92.

70. Хобин В.А. Оптимизация режимов технологических агрегатов при ограничениях типа “аварийная ситуация” // Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Автоматизация технологических процессов и производств в пищевой промышленности”. – М., 1989. – С. 57.

71. Хобин В.А., Воинова С.А., Левинский В.М., Плева А.Г. Исследование динамических и установившихся режимов систем стабилизации показателей функциональной надежности технологических агрегатов АПК // Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. “Автоматизация технологических процессов и производств в пищевой промышленности”. – М., 1989. – С. 92.

72. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю., Литовченко Н.М. Особенности цифрового управления комплексом непрерывного дозирования компонентов комбикормов // Тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. “Социально-экономические и научно-технические проблемы агропромышленного комплекса”. – Одесса, 1989. – С. 210.

73. Хобин В.А., Воинова С.А., Морозов Ю.Г. Управление живучестью оборудования на предприятиях зерноперерабатывающей промышленности // Тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. “Социально-экономические и научно-технические проблемы агропромышленного комплекса”. – Одесса, 1989. – С. 211.

74. Хобин В.А., Митрофанов С.Ю., Буданцов А.А. Цифровое иерархическое управление комплексом непрерывного дозирования компонентов комбикормов // Тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. “Социально-экономические и научно-технические проблемы агропромышленного комплекса”. – Одесса, 1989. – С. 151.

75. Хобин В.А., Тришин Ф.А., Жуков А.О. САУ, гарантирующие безаварийность функционирования объектов управления // Сб. докл. и сообщ. Второй Всес. конф. с межд. уч. “Контроль, управление и автоматизация в современном производстве” (Минск, 15 – 19 окт. 1990). – М., 1990. – С. 165.

76. Хобин В.А., Тришин Ф.А., Жуков А.О. Система непосредственно-цифрового управления прессами-грануляторами и молотковыми дробилками комбикормового завода // Сб. тез. докл. 52 научн. конф. ОТИПП (Одесса, 22 – 25 апреля 1992). – Одесса, 1992. – С. 165.

77. Хобин В.А., Вадатурский А.А. Управление объектами, гарантирующее безаварийность // Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ “Контроль и управление в технических системах” (Винница, 8 – 10 сентября 1992). – Винница, 1992. – С. 203.

78. Хобин В.А., Хилал М. Прогнозирование перегрева приводных электродвигателей в задачах управления нагрузкой технологического оборудования // Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ “Контроль и управление в технических системах” (Винница, 8 – 10 сентября 1992). – Винница, 1992. – С. 243.

79. Хобин В.А., Хилал М. Вероятностная модель работы тепловой защиты приводных электродвигателей технологических машин // Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ “Контроль и управление в технических системах” (Винница, 25 – 28 октября 1993). – Винница, 1993. – С. 1.

80. Хобин В.А., Плева А.Г., Жуков А.О., Тришин Ф.А., Левинский В.М. Цифровая централизованная система управления участками дробления и гранулирования Новополтавского комбината хлебопродуктов // Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ “Контроль и управление в технических системах” (Винница, 25 – 28 октября 1993). – Винница, 1993. – С. 2.

81. Хобин В.А., Жигайло А.М. Регуляризованная процедура идентификации моделей динамики на основе управления Винера-Хопфа // Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ “Контроль и управление в технических системах” (Винница, 25 – 28 октября 1993). – Винница, 1993. – С. 3 – 4.

82. Хобин В.А., Воинова С.А. Оптимизация управления агрегатами АПК в предельно допустимых режимах // Тез. докл. 53-й науч. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром. им. М.В. Ломоносова (Одесса, 20 – 23 апреля 1993). – Одесса, 1993. – С. 203.

83. Хобин В.А., Тришин Ф.А., Щетинина Ю.Л. Координация контуров оптимизации и регулирования как средство повышения эффективности САУ // Тез. докл. 53-й науч. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром. им. М.В. Ломоносова (Одесса, 20 – 23 апреля 1993). – Одесса, 1993. – С. 208.

84. Хобин В.А., Тришин Ф.А. Упрощенная реализация алгоритма расчета безопасного заданного значения в САУ гарантирующих безаварийность // Тез. докл. 53-й науч. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром. им. М.В. Ломоносова (Одесса, 20 – 23 апреля 1993). – Одесса, 1993. – С. 210.

85. Хобин В.А., Хилал М. Текущая параметрическая идентификация модели для прогнозирования изменения тока нагрузки ПЭД технологических агрегатов // Тез. докл. 54-й научн. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром. им. М.В. Ломоносова (Одесса, 19 – 22 апреля 1994). – Одесса, 1994. – С. 76.

86. Хобин В.А., Жигайло А.М. Регуляризованная процедура идентификации моделей динамики на основе управления Винера-Хопфа в частотной области // Тез. докл. 54-й научн. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром. им. М.В. Ломоносова (Одесса, 19 – 22 апреля 1994). – Одесса, 1994. – С. 79.

87. Хобин В.А., Щетинина Ю.Л. Об одном способе повышения эффективности систем, гарантирующих безаварийность // Тез. докл. 54-й научн. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром. им. М.В. Ломоносова (Одесса, 19 – 22 апреля 1994). – Одесса, 1994. – С. 80.

88. Жуковский Э.И., Хобин В.А. Управление технологическими агрегатами при ограничениях типа “аварийная ситуация” // Тез. докл. межд. научн.-техн. конф. “Автоматизация биотехнических систем в условиях рыночной экономики и конверсии”. – М., 1994. – С. 65 – 66.

89. Хобин В.А., Тришин Ф.А. Алгоритмы гарантирующего управления в системах НЦУ молотковыми дробилками и прессами-грануляторами Новополтавского КХП // Тез. докл. 55-й научн. конф. Одес. гос. акад. пищ. техн. (Одесса, 11 – 14 апреля 1995). – Одесса, 1995. – С. 214.

90. Хобин В.А., Парамонов А.И. Эффективный базовый алгоритм регулирования для технологических объектов // Тез. докл. 55-й научн. конф. Одес. гос. акад. пищ. техн. (Одесса, 11 – 14 апреля 1995). – Одесса, 1995. – С. 215.

91. Жуковский Э.И., Хобин В.А. Оптимизация режимов технологических агрегатов при ограничениях типа “аварийная ситуация” // Тез. докл. 2-й укр. конф. по автомат. управлению (“Автоматика-95”) (Львов, 26 – 30 сентября 1995). – Львов: НВЦ “ІТІС”, 1995. – т. 5. – С. 52 – 53.

92. Хобин В.А. Алгоритмы управления объектами, работающими в условиях ограничений типа “аварийная ситуация” // Тез. докл. 2-й укр. конф. по автомат. управлению (“Автоматика-95”) (Львов, 26 – 30 сентября 1995). – Львов: НВЦ “ІТІС”, 1995. – т. 5. – С. 91.

93. Хобин В.А., Парамонов А.И. Повышение эффективности базовых алгоритмов регулирования для технологических объектов // Тез. докл. 2-й укр. конф. по автомат. управлению (“Автоматика-95”) (Львов, 26 – 30 сентября 1995). – Львов: НВЦ “ІТІС”, 1995. – т. 5. – С. 92.

94. Хобин В.А., Парамонов А.И. Сравнительный анализ и отбор алгоритмов для базового уровня систем регулирования // Тез. докл. 56-й научн. конф. ОГАПТ (Одесса, 9 – 12 апреля 1996). – Одесса, 1996. – С. 163.

95. Хобин В.А., Парамонов А.И. Робастные и эффективные алгоритмы для систем регулирования // Труды 3-й укр. конф. по автомат. управлению (“Автоматика – 96”) (Севастополь, 9 – 15 сентября 1996). – Севастополь: СевГТУ, 1996. – Т.1. – С. 48.

96. Хобин В.А., Парамонов А.И. Повышение эффективности систем гарантирующих безаварийность // Зб. пр. 4-ї укр. конф. з автомат. управління “Автоматика – 97” (Черкаси, 23 – 28 червня, 1997). – Черкаси: ЧІТІ, 1997. – Т.2. – С. 114.

97. Хобин В.А. Функциональная структура современных САУ технологических агрегатов и место в ней функции гарантирования // 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. 121 – 122.

98. 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.

99. Хобин В.А., Бабиков А.Ю. Системы гарантирующего управления для экстремальных нестационарных объектов с ограничениями в регламенте эксплуатации // 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. 123 – 124.

100. Хобин В.А., Плевне А.Г. Расчет показателей качества и параметрическая оптимизация линейных стохастических систем // Программный модуль 621.5747127.33003-01. – Инв. номер ГосФАП – 50880000960. – Инв. номер СО АгроФАП А-0153 Пищ. – Одесса: НПО “Пищепроматоматика”, 1987. – 159 с.

Хобін В.А. Системи гарантуєчого управління технологічними агрегатами: основи теорії, практика застосування. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2003.

Обґрунтовано об'єктивну необхідність розширення складу системоутворюючих функцій, що реалізуються САУ. Задача нової функції – гарантувати, з наперед заданою імовірністю, дотримання обмежень, що накладено на регламентовані змінні об'єкту. Системи, що реалізують таку функцію, названо системами гарантуєчого управління (СГУ). Їх основу склала розроблена мате-

матична модель порушення регламенту (МНР). Розроблено наукові основи СГУ, що включають: функціональну структуру, концепцію побудови, класифікацію, варіанти структур для рішення найбільш розповсюджених задач управління в класі СГУ, альтернативні алгоритми управління (на основі окремих випадків МНР). Алгоритми пройшли всебічне тестування в умовах істотно нестаціонарного об'єкту в перехідних і сталих режимах роботи СГУ, включаючи екстремальні режими, коли контур регулювання втрачав стійкість. Для підвищення якості СГУ розроблено: спеціальний робастний регулятор зі змінною структурою (може бути рекомендований як альтернатива ПД-регулятору); алгоритми самонастроювання регуляторів на основі розширеного методу типової статистичної ідентифікації; алгоритми координації контурів регулювання і гарантування. Варіанти СГУ молотковими дробарками, комплексами безперервного вагового дозування, пресгрануляторами впроваджені у виробництво і дали економічний ефект.

Ключові слова: система автоматичного управління, обмеження регламенту, гарантування, регулювання, оптимізація.

Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2003.

Обоснована об'єктивна необхідність розширення складу системообразующих функцій САУ, для яких традиційними являються функції регулювання, оптимізації, логічного управління. Задача нової функції – гарантувати, з наперед заданою ймовірністю, дотримання обмежень, наложених на регламентовані змінні об'єкта управління. Системи, що реалізують таку функцію, названі системами гарантуючого управління (СГУ). Застосування СГУ найбільш актуально для випадків, коли максимально ефективні режими роботи об'єкта близькі до предельно допустимих, і (або) порушення обмежень призводить до виникнення аварійних ситуацій, наслідки яких несуть суттєві економічні втрати або потенційно небезпечні. Їх основу склали розроблені математична модель порушення регламентів (МНР). Вона дозволяє в реальному часі оцінити поточні значення ймовірності дотримання регламентів на основі поточних оцінок ймовірнісних характеристик регламентованих змінних об'єкта.

Розроблені наукові основи СГУ, які включають: функціональну структуру САУ з функцією гарантування, концепцію побудови СГУ, їх всебічну класифікацію, варіанти структур для рішення найбільш поширених задач управління в класі СГУ, альтернативні варіанти алгоритмів гарантуючого управління. Останні ґрунтуються на частних слу-

чаях МНР, в которые она вырождается в случае принятия тех или иных гипотез относительно модели изменения регламентированных переменных как случайных процессов (главный признак этих моделей – квазистационарность или нестационарность математического ожидания регламентированной переменной на интервале осреднения).

Алгоритмы адаптированы к работе в условиях замкнутых САУ и обеспечивают устойчивость контура гарантирования. Они прошли всестороннее тестирование при работе в переходных и установившихся режимах в условиях существенно нестационарных свойств объекта, включая экстремальные. В экстремальных условиях вспомогательный контур (контур регулирования) СГУ терял устойчивость, но управляющее воздействие главного контура (контура гарантирования) так изменяло режим работы объекта, что нарушений ограничений регулируемой переменной не происходило. Исследования позволили выделить Парето-оптимальные множества алгоритмов гарантирующего управления в плоскости двух взаимопротиворечивых параметров качества СГУ – вероятности соблюдения ограничений и удаления от этого ограничения, при котором эффективность работы объекта максимальна.

Для повышения качества СГУ разработаны два варианта регуляторов их “внутренних” САУ. Первый разрабатывался как более эффективная и робастная альтернатива ПИД-регулятору. Он использует известные и новые, специально разработанные, методы коммутации структуры регулятора и прогнозирования. В ходе его всестороннего тестирования разработаны “инженерные” методики его настройки, а также цифровой алгоритм реализации, обеспечивающий устойчивость вычислительных процедур. Второй – самонастраивающийся на специально разработанном – “расширенном” методе типовой статистической идентификации. Двукратное применение метода в совокупности со специальными оптимизационными процедурами и целенаправленное расширение спектрального состава входного сигнала контура регулирования, входящего в СГУ, позволяет решать задачу идентификации канала регулирования объекта, а значит и самонастройки регулятора, в замкнутом контуре. Для снижения интенсивности собственного движения СГУ разработаны алгоритмы координации работы контуров гарантирования и регулирования.

Разработаны, реализованы на различной программно-технической базе и внедрены варианты СГУ молотковыми дробилками, комплексами непрерывного весового дозирования, прессами-грануляторами. Их эксплуатация дала существенный экономический эффект, подтвердив целесообразность и эффективность применения СГУ.

Ключевые слова: система автоматического управления, ограничения регламента, гарантирование, регулирование, оптимизация.

Khobin V.A. Systems of guaranteeing management of technological units: bases of the theory, practice of application. – Manuscript.

Thesis for application of scientific degree of doctor of technical sciences – speciality 05.13.07 – automation of technological processes – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2003.

Objective necessity of structure expansion of system forming functions sold ACS is proved. The task of new function is to guarantee, with beforehand set probability, observance of the restrictions imposed on regulated variables of object. The systems realizing such function are named systems of guaranteeing management (SGM). Their basis was made with the developed mathematical model of infringement of rules (MIR). The scientific bases of SGM are developed including: functional structure, the concept of construction, classification, variants of structures for the decision of the most widespread tasks of management in class of SGM, alternative algorithms of management (on the basis of special cases of MIR). Algorithms have passed all-round testing in conditions of essentially non-stationary object in transitive and constant operating modes of SGM, including extreme modes when the contour of regulation lost stability. For improvement the quality of SGM are developed: a special robust regulator with variable structure (can be recommended as alternative to the PID-regulator); algorithms of self-adjustment of regulators on the basis of the expanded method of typical statistical identification; algorithms of coordination of contours of regulation and warranting. Variants the SGM of hammer crushers, complexes of continuous weight batching, press-granulators are introduced into manufacture and gave economic benefit.

Keywords: automatic control system, restriction of the rules, warranting, regulation, optimization.