

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

ФОМЕНКО БОГДАНА ВІКТОРІВНА

УДК 621.181.1:681.5

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ПРЯМОТОЧНИМИ
КОТЛОАГРЕГАТАМИ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ОБМЕЖЕНЬ**

05.13.07 - Автоматизація процесів керування

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ–2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, професор
Ковриго Юрій Михайлович,
завідуючий кафедрою автоматизації
теплоенергетичних процесів НТУУ «КПІ».

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Гончаренко Борис Миколайович,
професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національного університету харчових
технологій

кандидат технічних наук, доцент
Ладієва Леся Ростиславівна,
доцент кафедри автоматизації хімічних
виробництв НТУУ «КПІ»

Захист відбудеться «25» жовтня 2011 р. о 14-30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою 03056, м.Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 438.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою 03056, м.Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «16» вересня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, професор

Л. С. Ямпольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У теперішній час більшість прямоточних котлоагрегатів працює у змінних (маневрених) режимах, що суттєво ускладнює забезпечення високої точності підтримання регульованих змінних в потрібних технологічних діапазонах. Крім того задача керування ускладнюється наявністю перехресних зв'язків через об'єкт керування, роботою виконавчих пристроїв в положеннях, близьких до границь робочих діапазонів, нелінійностями в системах керування, внутрішніми та зовнішніми збуреннями.

У діючих системах керування прямоточними котлоагрегатами врахування технологічних обмежень реалізується на рівні захистів, які спрацьовують миттєво або з витримкою в часі, але в самих алгоритмах керування заходи щодо запобігання виходу змінних за межі допустимого діапазону в процесі регулювання не передбачені. Спрацьовування протиаварійного захисту призводить до тривалого виведення котлоагрегату з робочого стану, його подальшого простою та позапланового пуску. В свою чергу, це призводить до порушення режиму роботи всієї електростанції як одиниці системи енергозабезпечення України, а, отже, до значних економічних збитків. Запобігти цьому можна за рахунок використання новітніх систем керування, які примусово утримують регульовані змінні в межах технологічного регламенту і запобігають неефективній роботі котлоагрегату.

З іншого боку, перегляд технологічних обмежень на експлуатаційні режими енергетичного обладнання є одним із можливих шляхів економії палива. Так для режимів роботи енергоблока на ковзному тиску існує значний технічний резерв для підвищення температури пари за водопаровим трактом котлоагрегату, що дає можливість підвищити ККД блока без погіршень умов експлуатації поверхонь нагріву.

Таким чином, розробка та дослідження алгоритмічних та структурних рішень для автоматизації процесів керування прямоточними котлоагрегатами, які при формуванні керуючих впливів враховують технологічні обмеження, є актуальною науково-технічною задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування енергоблоків ТЕС з прямоточними котлоагрегатами шляхом вдосконалення автоматизованої системи керування за допомогою методів врахування технологічних обмежень.

Відповідно до зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

- дослідити вплив технологічних обмежень на якість регулювання прямоточних котлоагрегатів, які працюють у маневрених режимах;
- проаналізувати алгоритмічні та структурні рішення, які враховують обмеження в системах керування, та дослідити можливість їх використання в типових системах регулювання енергоблока;
- на основі виконаного аналізу запропонувати методи врахування обмежень в процедурі синтезу алгоритмів;
- розробити структурні рішення для забезпечення якісного регулювання, орієнтовані на використання в сучасних промислових контролерах;

- розробити методику та формули розрахунку основних параметрів запропонованих алгоритмів для синтезу локальних систем регулювання прямоточного котлоагрегату;

- перевірити методами моделювання та дослідним шляхом покращення показників якості, забезпечення заданого технологічного діапазону контрольованих змінних та зменшення інтегральних показників у порівнянні з типовими рішеннями.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування основними змінними прямоточного газомазутового котлоагрегату.

Предметом дослідження є система керування, яка побудована з використанням методів врахування технологічних обмежень при формуванні керуючих дій.

Методи дослідження. При вирішенні задач роботи застосовувались методи теорії систем і теорії автоматичного керування, у тому числі методи простору станів, обернених задач динаміки, методи параметричного синтезу і оптимізації систем керування, методи дослідження стійкості нелінійних систем, а також методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна. В ході вирішення поставлених задач одержані нові наукові результати:

- вперше досліджена можливість розрахунку систем регулювання з врахуванням технологічних обмежень для прямоточного котлоагрегату;

- вперше запропоновані структурні рішення по вдосконаленню систем регулювання температури робочого середовища за ходом водопарового тракту котлоагрегату з можливістю введення постійних і змінних обмежень на температуру;

- розроблений метод підвищення ефективності функціонування систем керування, який відрізняється врахуванням обмежень на керуючі та керовані змінні та поширений на багатоконтурні системи керування.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані наступні результати:

- розроблені рішення та рекомендації щодо врахування обмежень в алгоритмах керування основними змінними прямоточних котлоагрегатів;

- доведена можливість суттєвого підвищення ефективності регулювання за рахунок введення нових структурних рішень та алгоритмів з врахуванням обмежень;

- визначені формули розрахунку додаткових параметрів налаштування розроблених алгоритмічних та структурних рішень;

- розроблена методика синтезу нелінійних багатоконтурних систем керування з врахуванням обмежень, що базуються на типових структурних рішеннях, які використовуються при автоматизації прямоточних котлоагрегатів.

Результати роботи пройшли дослідно-промислові випробовування та прийняті для реалізації на Трипільській ГРЕС, а також розроблені алгоритмічні рішення використовуються в програмному забезпеченні контролера S7586-XX виробництва «Нейро Систем», що підтверджено відповідними актами. Результати роботи використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів.

Апробація роботи. Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на Міжнародних конференціях з автоматичного керування «Автоматика-2008» (м. Одеса, 2008), «Автоматика-2010» (м. Харків, 2010); V, VI,

VII, VIII міжнародних конференціях аспірантів, магістрів, студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (м. Київ, 2007, 2008, 2009, 2010); X міжнародній конференції «Інвестування в енергетику, енергозбереження та екологію» (Київ 2010); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Последните научни постижения – 2010» (м. Софія, 2010); Науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, 2010); Міжнародній конференції в рамках «13 International Student Olympiad on Automatic Control» (м. Санкт-Петербург, 2010); Міжнародній науково-практичній конференції «Становлення сучасної науки - 2006» (м. Дніпропетровськ, 2006).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 25 друкованих праць, в яких викладено основний зміст виконаних досліджень, з них 8 статей у видавництвах, що перераховані ВАК, 17 матеріалів доповідей та тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, списку літератури з 141 найменувань. Повний обсяг дисертації 188 стор., з яких зміст викладено на 160 стор. друкованого тексту, містить 68 рисунків, 4 таблиці та 6 додатків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" в рамках НДР за Державним замовленням на науково-технічну продукцію: договір №03120403000 - «Розробка програмних аспектів і методів підвищення ефективності обладнання ТЕС з використанням новітніх технологій спалювання органічних видів палива», договір №0111707000 - «Підвищення надійності роботи генераторів засобами експертно-діагностичних систем в складі АСУТП енергоблока», договір №01110613000 - «Розробка оптимальних технічних та алгоритмічних рішень для маловитратної модернізації автоматизованих систем керування енергоблоків» (замовник Мінпаливенерго); та в рамках держбюджетних НДР: № держ. реєстр. 0108U000930 - «Теорія і методи побудови високоякісних систем регулювання теплоенергетичних об'єктів з використанням стратегії структурно-параметричної оптимізації», № держ. реєстр. 0110U002291 - «Автоматичне керування теплоенергетичними об'єктами у змінних режимах роботи» (замовник МОН).

У зазначених науково-дослідних роботах автор приймав участь як виконавець.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто дисертанту належать такі положення: синтез та імітаційне моделювання систем керування прямоточним котлоагрегатом [8, 10, 15], аналіз існуючих рішень по вдосконаленню ефективності керування [1, 2, 4, 5, 11, 13, 17], дослідження існуючих алгоритмів керування з врахуванням обмежень для їх використання в автоматизації прямоточних котлоагрегатів [3, 6, 7, 9], рішення та рекомендації щодо врахування обмежень в алгоритмах керування основними змінними прямоточних котлоагрегатів [12, 14, 16, 18, 19], синтез та дослідження абсолютної стійкості нелінійної системи з врахуванням обмежень [24], дослідження нестандартних алгоритмів в системах регулювання з врахуванням обмежень на

керований сигнал з врахуванням питань безударного переключення та розрахунку додаткових параметрів налаштування [20, 21, 22, 23, 25].

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета і визначені основні задачі досліджень, надана характеристика наукової новизни і практичної значності отриманих результатів, наведені відомості про апробацію та практичну реалізацію основних результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуто проблеми, що обумовлюють необхідність удосконалення систем автоматизованого керування енергоблоками ТЕС, проведено аналіз сучасних тенденцій модернізації існуючих та розробки нових систем.

Виконано огляд та аналіз існуючих рішень, пов'язаних з автоматичним керуванням основними змінними прямогочного газомазутового котлоагрегату, визначені основні структурні елементи технологічного об'єкта і системи керування. Виділено основні контури регулювання технологічного об'єкта керування, пов'язані з задачею дослідження. Показано, що технологічні обмеження враховуються лише на рівні блокувань та сигналізації, а методи, що запобігають виходу регульованих змінних за граничні значення, в самих алгоритмах керування не передбачені.

Проведено огляд обмежень, властивих реальним системам, та негативних наслідків, до яких призводить нехтування обмеженнями при розробці та синтезі систем керування. Проведено огляд технологічних обмежень, характерних для енергоблоків ТЕС. Показано, що на основні контрольовані величини впливають зміни ряду параметрів. Цей вплив обумовлений наявністю в прямогочному котлі перехресних зв'язків, змін умов роботи котлоагрегату та обмежень, нехтування якими значно погіршує якість регулювання, призводить до виходу основних змінних за допустимі діапазони, навіть до втрати стійкості системи.

У кінці розділу наведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи і сформульовані основні задачі дослідження.

Другий розділ присвячений дослідженню динамічних властивостей прямогочного котлоагрегату. Виконана декомпозиція об'єкта керування та розглянуті математичні моделі ділянок. Показано, що математичні моделі враховують характеристики регулюючих органів, які є джерелом нелінійностей. Показано, що в лінійному наближенні опис динаміки процесів при малих коливаннях змінних для задач регулювання є цілком коректним. Доведено, що при розробці автоматичних систем керування АСК необхідно враховувати нелінійності та обмеження, властиві реальним об'єктам і системам, безпосередньо в алгоритмі керування. Виконана постановка задачі керування з врахуванням обмежень на керуючі та керовані змінні.

У роботі більш детально розглядається задача керування з обмеженнями, що пов'язані з особливістю роботи виконавчих пристроїв та технологічними вимогами до основних регульованих змінних. Однією з основних нелінійностей є обмеження на керуючу змінну, яке пов'язане з робочим діапазоном регулюючого органа, що завжди обмежений верхньою та нижньою межами. Використана нелінійність "насичення" представлена виразом (1):

$$\bar{u} = \begin{cases} u_{lo}, & u < u_{lo} \\ u, & u_{lo} \leq u(t) \leq u_{hi} \\ u_{hi}, & u > u_{hi} \end{cases} \quad (1)$$

де u_{lo}, u_{hi} - відповідно нижнє та верхнє граничні значення керуючого сигналу. Обмеження на керуючу дію відносяться до об'єкта регулювання (рис. 1, а). Об'єкт керування з обмеженнями на керовану змінну $y_2(t)$ показаний на рис. 1, б.

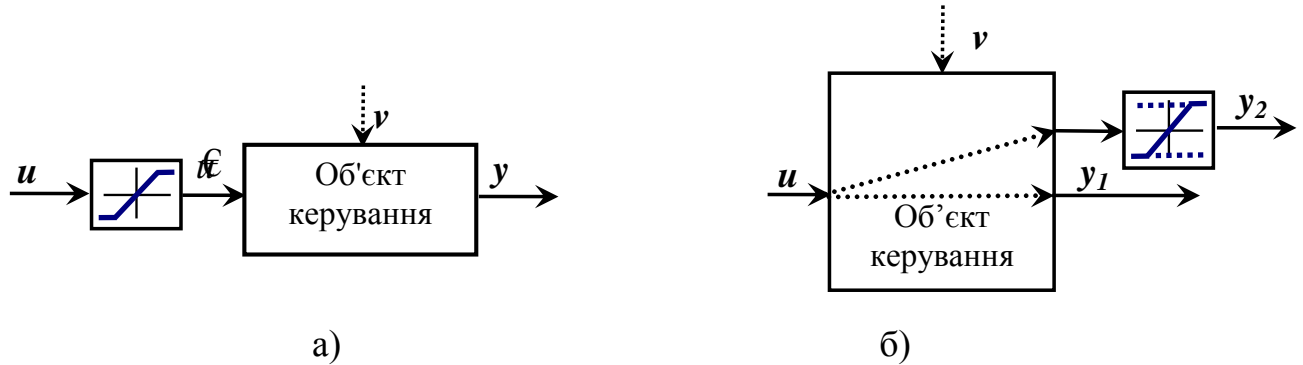


Рис. 1 Об'єкт керування з обмеженнями
а) на керуючу дію ; б) на керовану змінну $y_2(t)$

Коректно сформульована задача керування з врахуванням обмежень на керуючий сигнал повинна задовольняти наступній умові:

- в нормальному режимі роботи системи сигнал керування встановлюється на певному значенні \bar{u} :

$$u_{lo} + \Delta u_{lo} < \bar{u} < u_{hi} - \Delta u_{hi} \quad (2)$$

розташованому на кінцевому проміжку ($\Delta u_{lo,hi}$) всередині обмеженого робочого діапазону, який враховує регулювання контуру керування при невеликих змінах завдання r та/або збурення v , таким чином, щоб керування $u(t)$ не досягало граничних значень. Основна увага в роботі приділяється випадку з тимчасовим обмеженням, де нове значення керуючого сигналу встановлюється при \bar{u} , розташованому в середині робочого діапазону.

Обмеження регульованих змінних обумовлене технологічними вимогами, умовами роботи металу поверхонь нагріву, економічними та екологічними аспектами. Для великих похибок керування керована змінна $y_2(t)$ може виходити за межі робочого діапазону (рис.1,б:). Вихідні обмеження являють собою "м'які" обмеження (3):

$$y_{2lo} - \Delta y_{2lo} < y_2(t) < y_{2hi} + \Delta y_{2hi} \quad (3)$$

Коректно сформульована задача керування з врахуванням обмежень на керований сигнал повинна задовольняти таким умовам:

- обмежена вихідна змінна y_2 регулюється керуючою змінною $u(t)$;
- під час перехідного процесу необхідно, щоб змінна $u(t)$, керуючи змінною $y_2(t)$ в межах верхньої r_{2hi} чи нижньої r_{2lo} межі, затухала до значення \bar{u} , розташованого всередині робочого діапазону. Це повинно бути справедливим для певного діапазону збурень v . Якщо ця вимога не виконується, необхідно перепроектувати підсистему виконавчих пристроїв;

- в сталому стані системи керування значення змінної y_2 повинне знаходитись в обмеженому діапазоні відповідно до (4):

$$r_{2lo} + \Delta r_{2lo} < \overline{y_2} < r_{2hi} - \Delta r_{2hi} \quad (4)$$

з обмеженим позитивним значенням $\Delta r_{2lo,hi}$. Тобто вихідні обмеження не досягаються для досить малих відхилень від сталого значення змінної головного контуру керування. Тоді як для більших відхилень - можливе регулювання вихідної змінної $y_2(t)$ до встановлених меж.

У роботі запропоновано врахувати такі обмеження в локальних системах керування прямоточним котлоагрегатом, а саме:

- обмеження на вприскування, що обумовлені як достатньо вузькими для ТГМП-314 діапазонами вприсків так і вимогами експлуатації. З одного боку, вузький діапазон вприсків необхідний для забезпечення економічної роботи котлоагрегату, з іншого боку, це призводить до виходу керуючого сигналу за межі регулюючого діапазону, що суттєво погіршує якість регулювання;

- обмеження керуючого сигналу на подачу палива та повітря і відсмоктування димових газів, які можуть бути досягнуті при переході на мінімальне або максимальне навантаження, враховуючі різні режими роботи енергоблока;

- обмеження коригуючих сигналів в локальних системах регулювання для забезпечення більш ефективного керування в перехідних режимах, зменшення коливальності процесу та забезпечення стійкості при великих відхиленнях;

- обмеження температури в розсічі верхньої радіаційної частини ВРЧ, що обумовлене технологічними вимогами, умовами роботи металу;

- обмеження температури пари в проміжних точках ширмового пароперегрівника ШПП та конвективного пароперегрівника КПП в системах регулювання для забезпечення технологічних вимог щодо температури первинної пари;

- обмеження впливу системи керування тепловим навантаженням на систему керування температурним режимом для забезпечення температури середовища за ходом водопарового тракту в певному діапазоні за рахунок зміни витрати палива.

При виборі алгоритмів та структурних рішень для врахування існуючих вимог та обмежень враховувався досвід робіт, присвячених перегляду технологічних умов для режимів роботи блоків при ковзному тиску, за якими є можливим збільшення температури перегріву пари при експлуатації енергоблока на зниженому тиску для підвищення ККД блока без погіршень умов експлуатації металу поверхонь нагріву.

У **третьому розділі** проведено дослідження існуючих алгоритмів врахування обмежень. Досліджувались алгоритми умовного інтегрування, компенсації інтегрального насичення та модельного прогнозуючого керування з обмеженнями з метою використання їх для маловитратної модернізації автоматизованої системи керування прямоточним котлоагрегатом. Детальне дослідження алгоритмів врахування обмежень на керуючий сигнал обумовлене не лише самими фізичними обмеженнями, але й технологічними, адже задачі регулювання з обмеженням керуючого та керованого сигналів тісно пов'язані між собою.

Визначено, що використання І-П та ПІ-Д алгоритмів дозволяє зменшити ризик насичення інтегральної змінної за рахунок обмеження пропорційної або диференційної складової регулятора. Запропоновано для подальших досліджень використовувати І-П та ПІ-Д алгоритми керування в поєднанні з алгоритмами

компенсації інтегрального насичення. Показано, що використання розробленого алгоритмічного рішення дозволяє реалізувати більш плавне регулювання та досягти мінімальних інтегральних показників якості, що в свою чергу дозволяє зменшити вплив систем регулювання на інші регульовані величини при глибоких збуреннях та зміні завдання. Для І-П та ІІ-Д алгоритмів при обмеженні керуючої змінної $U \neq \mathcal{U}$ закон керування з компенсацією інтегрального насичення для регулятора має вигляд відповідно (5) і (6):

$$U_{I-P}(p) = \frac{K_p}{T_I p + Ka} E(p) + \frac{Ka}{T_I p + Ka} \mathcal{U}(p) - \frac{K_p T_I p}{(T_I p + Ka)} Y(p) \quad (5)$$

$$U_{II-D}(p) = \frac{K_p(T_I p + 1)}{T_I p + Ka} E(p) + \frac{Ka}{T_I p + Ka} \mathcal{U}(p) - \frac{K_p T_D T_I p^2}{(T_f p + 1)(T_I p + Ka)} Y(p) \quad (6)$$

де K_p, T_D, T_I - параметри регулятора, Ka - параметр алгоритму компенсації інтегрального насичення.

Вдосконалення локальних систем керування проточним котлоагрегатом реалізовано на основі розроблених алгоритмів (5,6) та нелінійних структур для врахування обмежень, що представлені на рис. 2, 3. Головний регулятор працює за умови, що $y_{2lo} \leq y_2 \leq y_{2hi}$, тобто, змінна y_2 знаходиться в заданому допустимому діапазоні. У випадку якщо $y_2 > y_{2hi}$ або $y_2 < y_{2lo}$, спрацьовують відповідні регулятори обмежень. Для структури, представленій на рис. 2, значення обмежень на регульовану змінну y_2 задаються в якості завдань регуляторам обмежень верхньої r_{2hi} та нижньої границь r_{2lo} відповідно. Керуючий сигнал визначається як $\mathcal{U} = \min \{u_{2hi}, \max \{u_{2lo}, u_1\}\}$.

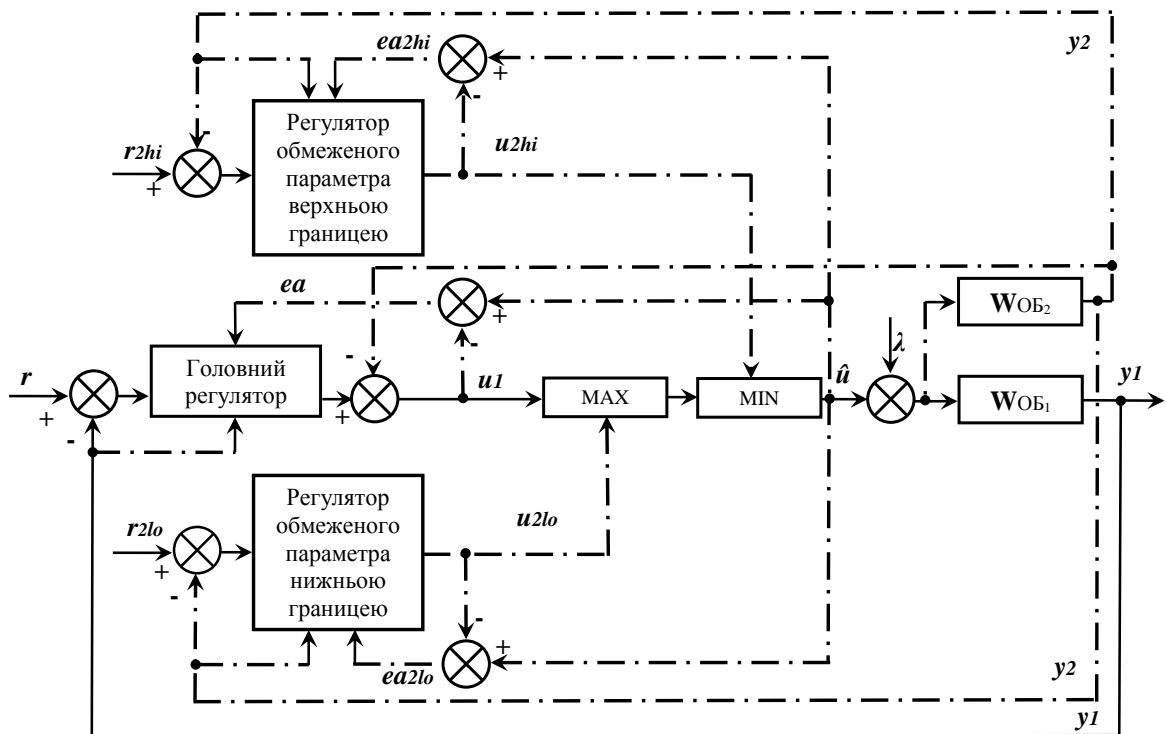


Рис. 2 Нелінійна система регулювання з обмеженнями на y_2

Для структури, що представлена на рис. 3, при наявності інтегральної складової в алгоритмі регулятора обмежень параметри нелінійної ланки «зона нечутливості»

визначаються за формулами: $u_{2hi} = r_{2hi} \frac{K_{p2}}{Ka_2}$, $u_{2lo} = r_{2lo} \frac{K_{p2}}{Ka_2}$, де K_{p2}, Ka_2 - параметри регулятора обмежень. У розглянутих структурах в якості основної регульованої змінної позначено y_1 , в якості обмеженої змінної – y_2 .

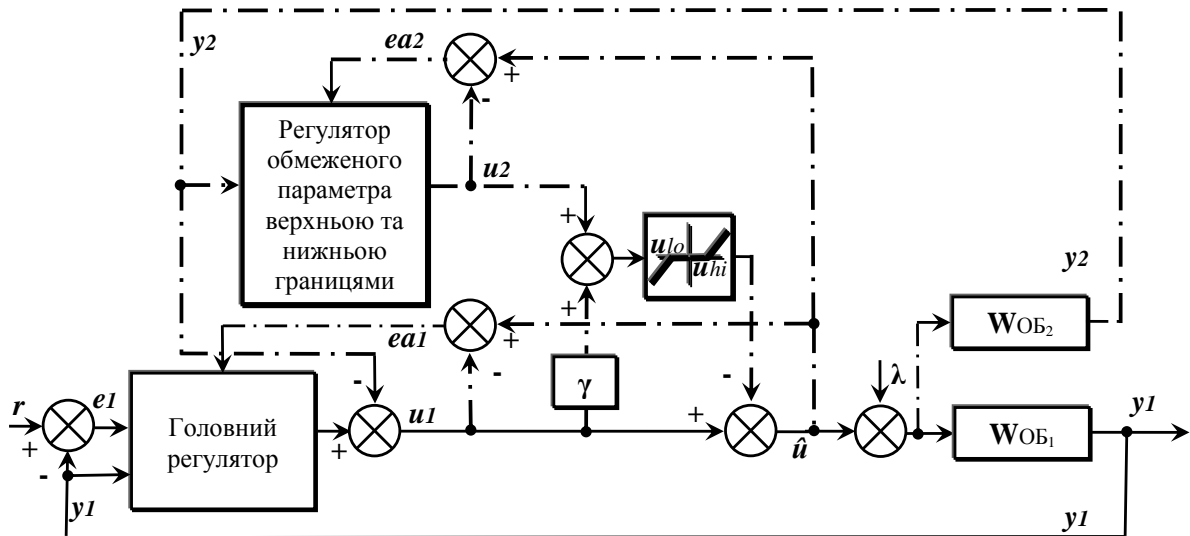


Рис. 3 Нелінійна система регулювання з обмеженнями на y_2 зі змінним впливом головного регулятора

В розроблених структурних та алгоритмічних рішеннях існує необхідність визначення додаткових параметрів налаштування Ka головного регулятора та регуляторів обмежень і вагового коефіцієнта γ .

У **четвертому розділі** виконано синтез локальних систем керування прямоточним котлоагрегатом з використанням алгоритмів врахування обмежень. До складу локальних систем керування входять: каскадна АСК згоранням, комбінована АСК розрідженням, каскадна АСК температурним режимом з випереджаючими сигналами, АСК температурою пари з регулятором і диференціатором та каскадна АСК тепловим навантаженням. Структура комплексу систем керування газомазутовим прямоточним котлоагрегатом представлена на рис. 4.

Враховуючи, що в існуючих системах регулювання основних технологічних змінних більшість локальних АСК побудовано за складними багатоконтурними схемами, зв'язаними через об'єкт керування, була розроблена методика розрахунку таких систем з врахуванням обмежень. Спрощений алгоритм синтезу з використанням стандартних законів керування може бути представлений в наступному вигляді (рис. 5), який може бути використаний як в рамках маловитратної модернізації шляхом додавання необхідних контурів регулювання, так і в процесі проектування нової автоматизованої системи.

За розробленою методикою спочатку виконується розрахунок багатоконтурної лінійної системи керування за заданим критерієм. Далі система керування доповнюється додатковими контурами відповідно до обраної структури та поставленої задачі. В залежності від того, які алгоритми керування використовуються в нелінійних структурних рішеннях, розраховується додатковий параметр налаштування $Ka = f(K_p, T_I)$ або $Ka = f(K_p, T_I, T_D)$ для кожного регулятора.

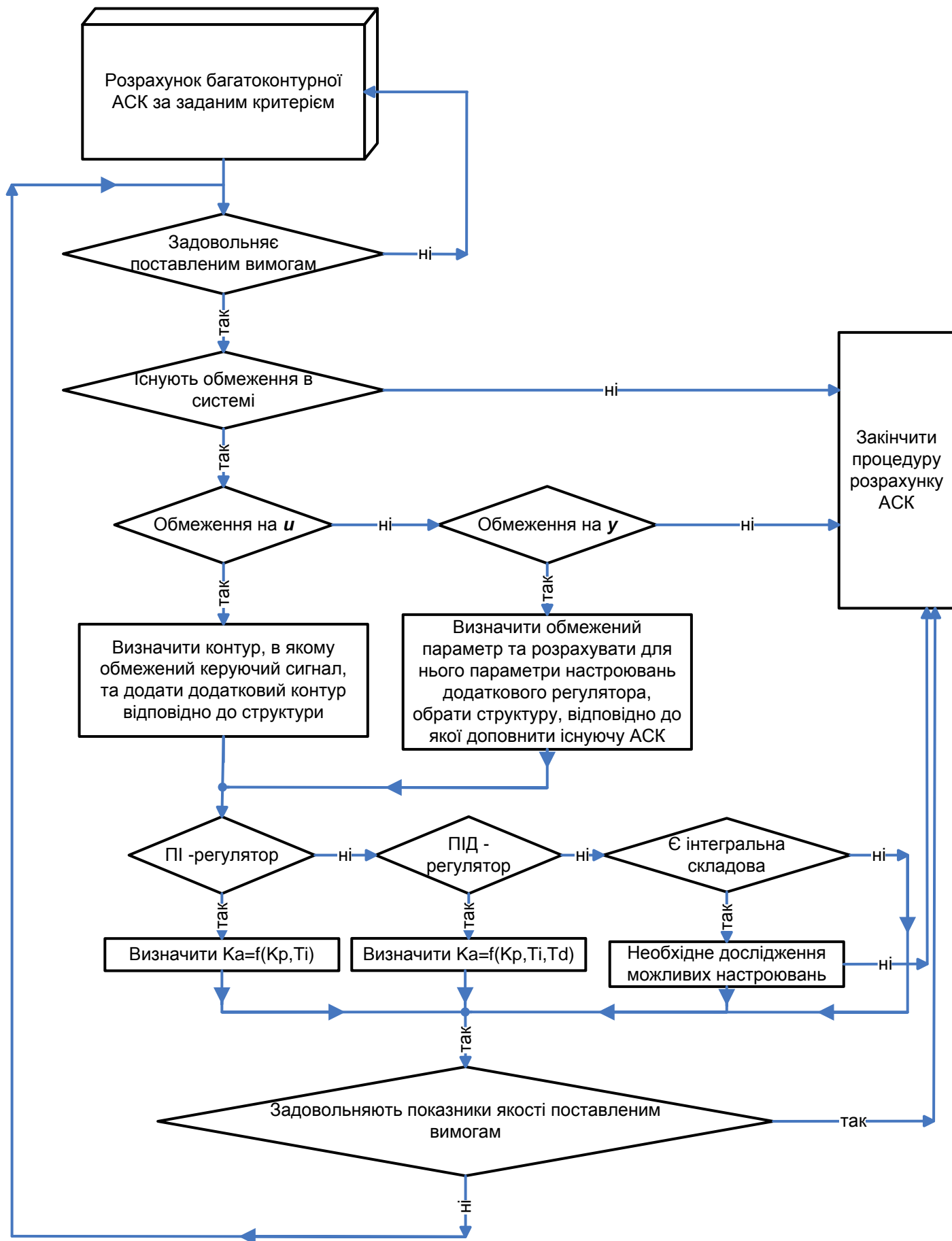


Рис. 5 Алгоритм синтезу АСК з обмеженнями

Для розроблених I-П, ПІ-Д алгоритмів з компенсацією інтегрального насичення актуальним є питання щодо вибору формул розрахунку $Ka = f(K_p, T_i)$ та $Ka = f(K_p, T_i, T_d)$. Дослідження цих залежностей включає дослідження як показників якості регулювання, так і абсолютної стійкості системи з обмеженнями. При дослідженні абсолютної стійкості системи з обмеженням керованого сигналу розглядається система з однією нелінійністю. Клас нелінійностей може бути визначений локальним зв'язком:

$$F(u, \kappa) = (\beta u - \kappa)(\kappa - \alpha u) > 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (7)$$

Дослідження абсолютної стійкості проводилось з використанням кругового критерію, за яким необхідно привести систему до канонічної форми, яка складається з лінійної частини F та нелінійної. Далі розглядається система порівняння, в якій нелінійна ланка замінюється лінійною ланкою з передаточною функцією $W_c(p) = \mu$, $\mu \in [\alpha, \beta]$. Система порівняння повинна бути стійкою при будь-якому $\mu \in [\alpha, \beta]$, $0 < \alpha < \beta < \infty$. Якщо передаточна функція не має полюсів в правій напівплощині, то для того, щоб нелінійна система була абсолютно стійкою в куті $[\alpha, \beta]$, достатньо, щоб амплітудно-фазова характеристика АФХ лінійної частини не перетинала $[\alpha, \beta]$ коло.

Для дослідження на стійкість системи з врахуванням обмежень на керовані змінні структура приведена до канонічної форми (рис. 6). У роботі показано, що запропоновані структурні рішення (рис. 2, 3) при ваговому коефіцієнті $\gamma=1$ еквівалентні.

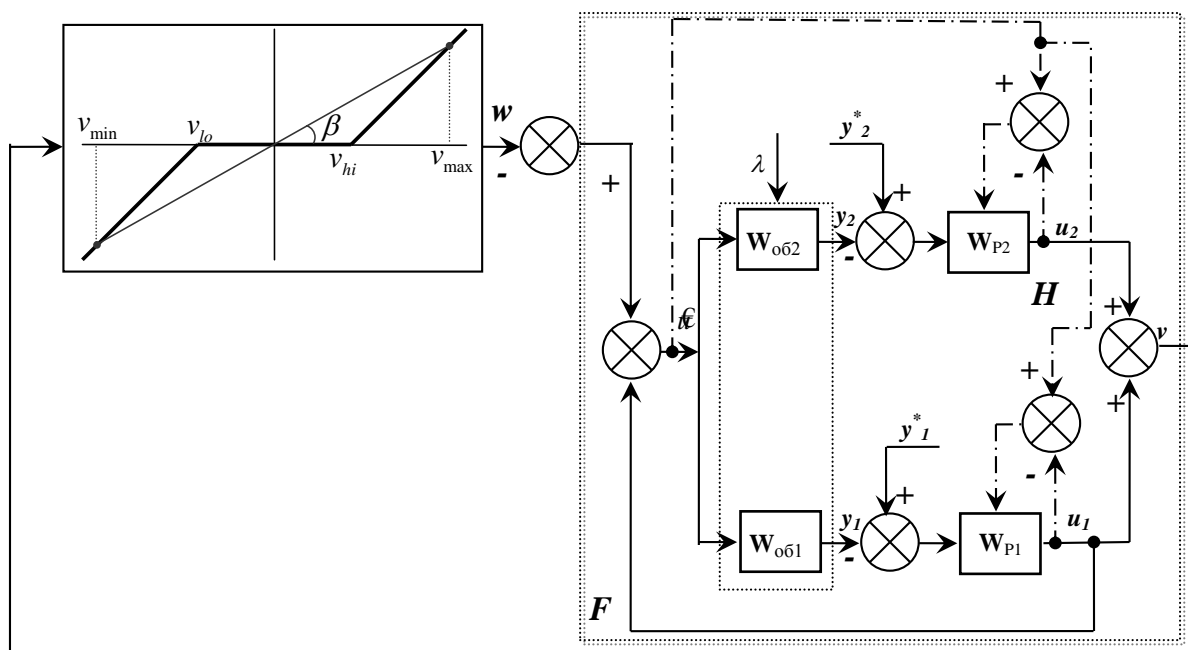


Рис. 6 Канонічна форма для дослідження стійкості АСК з врахуванням обмежень на керований сигнал

Для нелінійної ланки, що приведена на рис. 6, враховуючи, що $-\frac{1}{\alpha} \rightarrow -\infty$, коло перетворюється у вертикальну лінію, яка проходить через точку $-\frac{1}{\beta}$ на дійсній осі.

Дослідження стійкості проводились для локальних систем керування прямоточним котлоагрегатом. Результати досліджень на абсолютну стійкість нелінійної системи керування температурою первинного перегріву при варіації додаткових параметрів налаштування представлені на рис. 7 а, б.

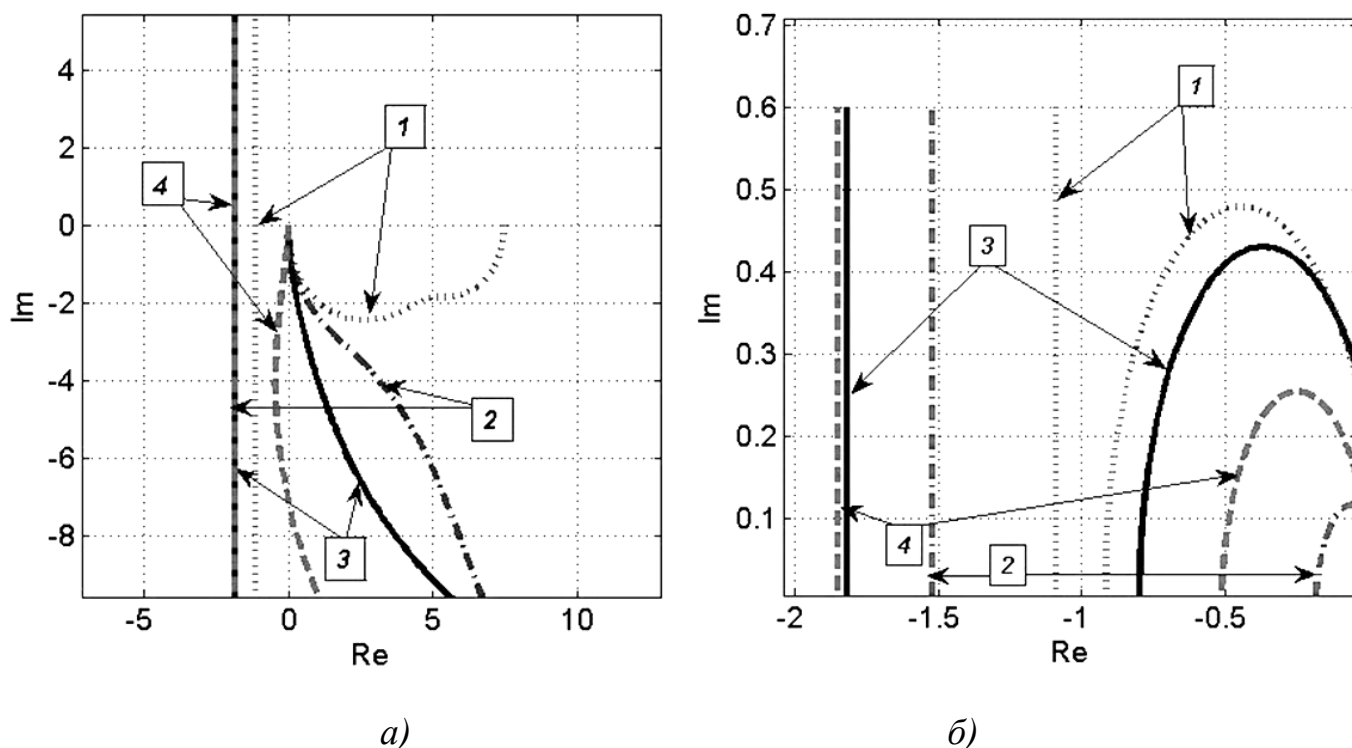


Рис. 7 Дослідження стійкості АСК температурою первинної пари

а) з І-П-регулятором обмеження:

$$1 - Ka = \frac{K_p}{T_I}, \quad 2 - Ka = \frac{1}{T_I}, \quad 3 - Ka = K_p, \quad 4 - Ka = \frac{1}{0.03T_I},$$

б) з ПІ-Д-регулятором обмеження:

$$1 - Ka = \frac{K_p}{T_I}, \quad 2 - Ka = \frac{K_p}{\sqrt{T_D T_I}}, \quad 3 - Ka = K_p, \quad 4 - Ka = \frac{1}{0.03T_I}$$

На рис. 8 приведені перехідні процеси для системи регулювання температури первинної пари під дією координатних збурень з використанням ПІ-Д алгоритмів керування з компенсацією інтегрального насичення: 1 – типове рішення, 2 – розроблене рішення при $Ka = K_p$, 3 – розроблене рішення при $Ka = \frac{K_p}{T_I}$. Дослідження показали, що при визначенні параметра налаштування Ka як $Ka = K_p$ був отриманий найкращий результат з точки зору забезпечення технологічного діапазону, а при $Ka = \frac{K_p}{T_I}$ - найкращі інтегральні критерії, а саме: в порівнянні з типовим рішенням інтегральний модульний критерій зменшився на 12%, інтегральний квадратичний критерій – на 37%, зважений інтегральний квадратичний критерій – на 41%.

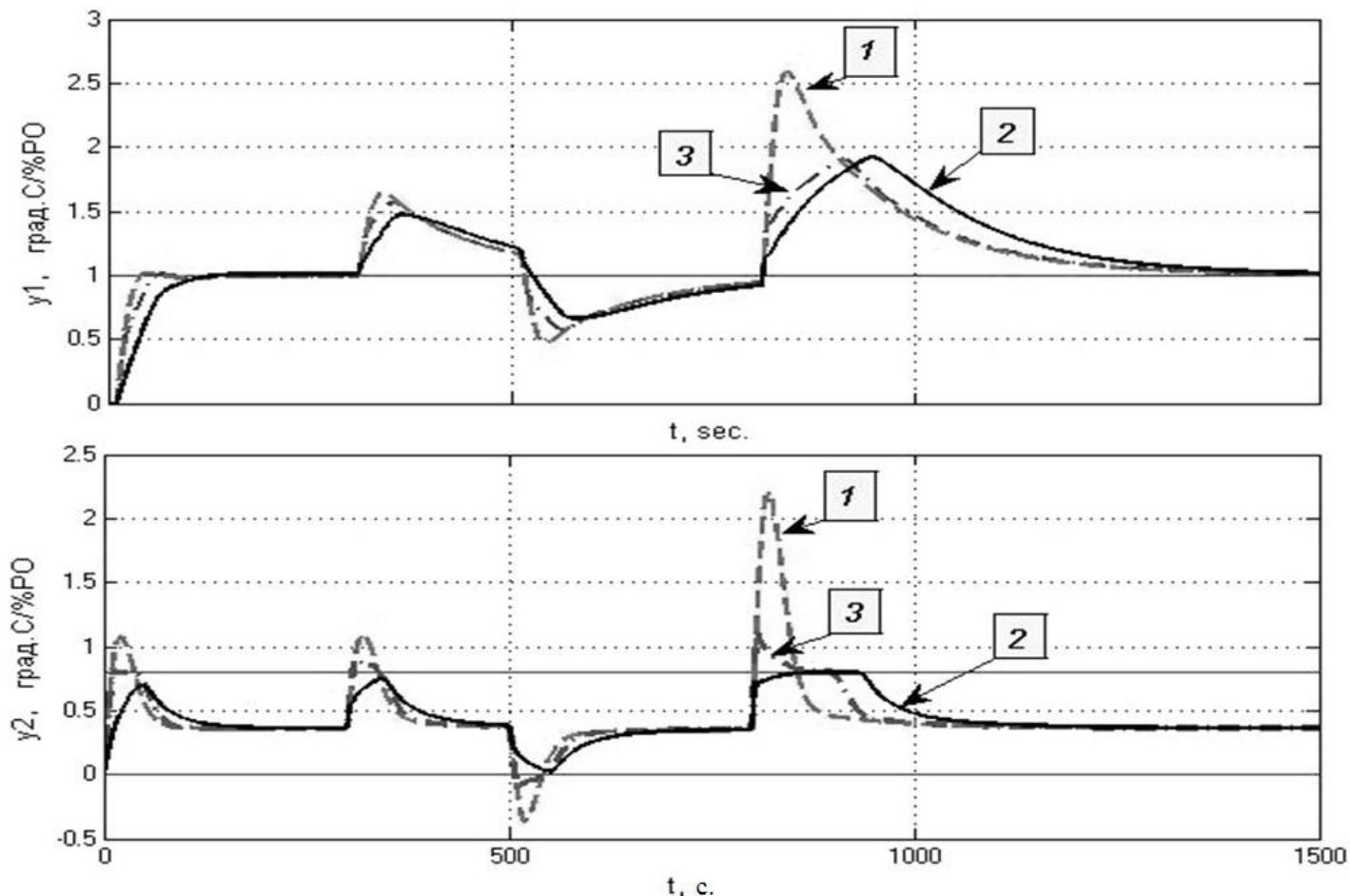


Рис. 8 Перехідні процеси за температурою первинної пари

При зменшенні вагового коефіцієнта γ суттєво покращились інтегральні показники якості при налаштуваннях $K_a = K_p$ (рис. 9): інтегральний модульний критерій зменшився в 2,7 рази, інтегральний квадратичний критерій - в 4,5 рази, зважений інтегральний квадратичний критерій - в шість разів. При визначенні $K_a = \frac{K_p}{T_I}$ із зменшенням параметра γ не спостерігалось суттєвого покращення розглянутих інтегральних показників.

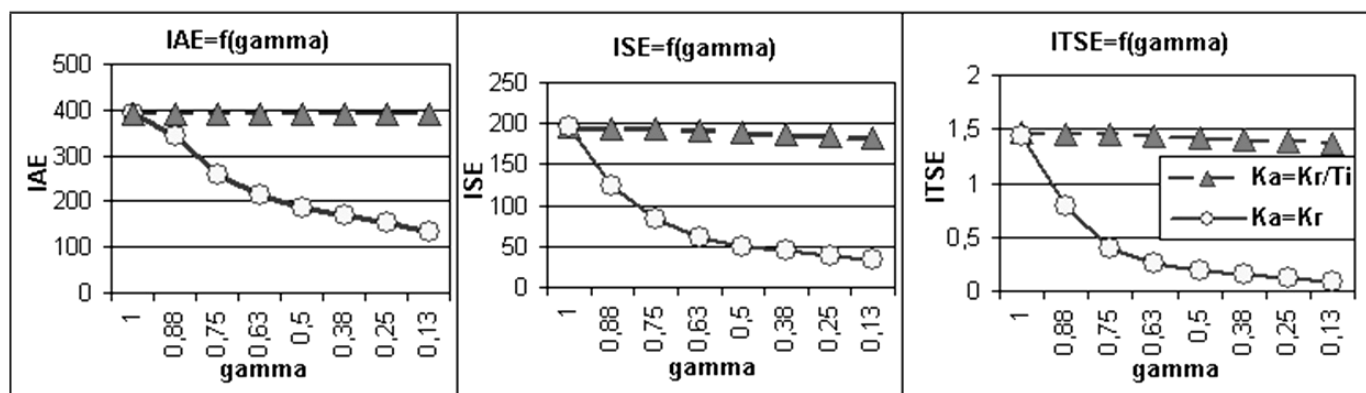


Рис. 9 Вплив параметра γ на інтегральні показники якості

Запропоновано в двозв'язній АСК тепловим навантаженням та температурою в перехідній зоні використовувати вплив перехресного зв'язку для підвищення якості

регулювання при глибоких збуреннях та в перехідних режимах, також запропонована методика синтезу такої системи. Використання розроблених структурних та алгоритмічних рішень у вищезазначеній АСК дає можливість змінювати витрату палива відповідно до завдання за тепловим навантаженням таким чином, щоб забезпечити значення температури робочого середовища в ВРЧ в заданому технологічному діапазоні.

Моделльні та дослідно-промислові випробування на енергоблоці 300 МВт Трипільської ГРЕС показали, що застосування структурних та алгоритмічних рішень по врахуванню обмежень в алгоритмах керування основними технологічними змінними прямооточного котлоагрегату суттєво підвищує якість перехідних процесів, зменшує кількість включень виконавчого механізму та забезпечує більш плавне регулювання у порівнянні з класичними АСК, підвищує надійність та економічність обладнання і системи керування.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі запропоновано розв'язання задачі по вдосконаленню автоматизованої системи керування основними змінними прямооточного котлоагрегату за рахунок врахування технологічних обмежень при формуванні керуючих впливів.

1. Проаналізовані можливі обмеження, які властиві автоматизованій системі керування енергоблоком, та визначено вплив технологічних обмежень на якість керування основними змінними, на основі чого були визначені основні контури, що потребують вдосконалення;

2. Досліджено методи врахування обмежень та оцінено можливість їх використання в типових системах керування основними змінними прямооточного котлоагрегату, в результаті чого встановлено, що використання І-П та ПІ-Д алгоритмів з компенсацією інтегрального насичення забезпечує найкращу якість керування для систем, які працюють у маневрених режимах, в порівнянні із стандартними законами регулювання;

3. Вперше розроблені рішення щодо врахування обмежень на керуючі та керовані змінні в алгоритмах керування локальних систем регулювання прямооточного котлоагрегату, використання яких дало можливість зменшити інтегральні модульні та квадратичні критерії як мінімум в два рази і забезпечити плавну зміну керуючого сигналу;

4. Вперше представлені структурні рішення щодо врахування постійних та змінних обмежень на регульовані змінні, які орієнтовані на використання в багатоконтурних локальних системах керування прямооточним котлоагрегатом;

5. Досліджено абсолютну стійкість вдосконалених систем керування при варіації додаткових параметрів налаштування;

6. Визначені формули розрахунку налаштувань розроблених алгоритмічних та структурних рішень для систем керування основними змінними прямооточних котлоагрегатів;

7. Представлені алгоритми синтезу багатоконтурних систем керування з врахуванням технологічних обмежень, які можна використовувати як в рамках маловитратної модернізації шляхом додавання необхідних контурів регулювання, так і в процесі проектування нової автоматизованої системи;

8. Модельні та дослідно-промислові випробування показали, що застосування структурних та алгоритмічних рішень по врахуванню обмежень в алгоритмах керування основними технологічними змінними прямооточного котлоагрегату суттєво поліпшує якість перехідних процесів, зменшує кількість включень виконавчого механізму, підвищує надійність та економічність обладнання і системи керування, та рекомендується до застосування в системах керування температурним режимом на прямооточних котлоагрегатах;

9. Застосування розроблених рішень дає можливість зменшити кількість аварійних вимикань енергоблока та забезпечити розрахунковий термін служби поверхонь нагріву за рахунок врахування технологічних обмежень на температуру середовища вздовж водопарового тракту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основний зміст дисертації викладено в опублікованих роботах:

1. Ковриго Ю.М. Адаптивна система регулювання витрати палива/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, І.А. Поліщук, //Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. - №1(19). - С. 136-140.
2. Ковриго Ю.М. Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами/ Ю.М. Ковриго, А.П. Мовчан, Б.В. Фоменко, И.А. Полищук// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. - №2. – С. 147-156.
3. Ковриго Ю.М. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, И.А. Полищук // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. - №2. - С. 21-28.
4. Ковриго Ю.М. Система автоматичного регулювання процесом спалювання органічних видів палива/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко// Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Становлення сучасної науки - 2006». - Дніпропетровськ, 2006. - С. С. 53-57.
5. Фоменко Б.В. Оптимізація регулювання рівня води в парогенераторі ПГВ-1000/ Б.В. Фоменко , В.М. Григорук //тези V міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2007. – С. 67.
6. Фоменко Б.В. Система регулювання витрати палива з компенсацією обмежень на керування/ Б.В. Фоменко// тези V міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2007. – С. 83.
7. Фоменко Б.В. Використання прогноуючого управління по моделі з врахуванням вхідних і вихідних обмежень/ Б.В. Фоменко//тези VI міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2008. – С.122.
8. Ковриго Ю.М. Використання сучасних методик для підвищення якості функціонування систем регулювання енергоблоків ТЕС і АЕС/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко// Матеріали XVII Міжнар. Конф. з автоматичного управління (Автоматика – 2008), м. Одеса, 23-26 вересня 2008 р. – ЧЗ – Одеса:ОНМА, 2008. – С. 27-30.
9. Ковриго Ю.М. Врахування обмежень для підвищення якості функціонування систем регулювання енергоблоків ТЕС і АЕС/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко//

Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. - №2(22). – С. 180 – 186.

10. Фоменко Б.В. Структурні та алгоритмічні рішення в системах регулювання теплоенергетичними об'єктами з врахуванням обмежень/ Б.В. Фоменко// тези VII міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2009. – С. 223.

11. Фоменко Б.В. Регулювання розрідження шляхом зміни продуктивності тягодуттєвих машин/ Б.В. Фоменко, О.В. Симчук // тези VII міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2009. – С. 199.

12. Фоменко Б.В. Система регулювання перегріву пари із введенням обмежень на вихідну змінну/ Б.В. Фоменко, Д.Р. Корнієнко// тези VII міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2009. – С. 195.

13. Фоменко Б.В. SCADA системи: свойства, особенности, сравнительный анализ/ Б.В. Фоменко, Ю.С. Дадичин// тези VII міжнародної конференції “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”. - Київ, 2009. – С. 193.

14. Фоменко Б.В. Учет ограничений на выходную переменную в системе регулирования температуры перегрева пара/ Б.В. Фоменко, Д.Р. Корниенко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. -№3/4 (39). - С. 21-24.

15. Ковриго Ю.М. Використання алгоритмів обмеження керуючої та керованої змінної в системах регулювання котлоагрегату/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко// тези доповідей 76-а Наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» 12-13 квітня 2010 р. –Київ:НУХТ, 2010. - С. 115-116.

16. Фоменко Б.В. Дослідження нелінійних структур для регулювання температури первинної пари/ Б.В. Фоменко, Д.Р. Корнієнко// тези VIII міжнародної конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». - Київ, 2010. - С. 272.

17. Фоменко Б.В. Метод релейного експеримента для подстройки параметров ПИД регулятора/ Б.В. Фоменко, А.Ф. Иванов// тези VIII міжнародної конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». - Київ, 2010. - С. 253.

18. Фоменко Б.В. Использование нелинейных структур для учета ограничений в системе регулирования температуры пара/ Б.В. Фоменко, Д.Р. Корнієнко// Материали за VI международна научна практична конференция «Последните научни постижения – 2010». – София, 17-25 марта 2010. - С. 95-99.

19. Bogdana V. Fomenko. Steam Temperature Automatic Control System with Nonlinear Components/ Bogdana V. Fomenko, Dmytriy R. Kornienko// Preprints of scientific Section of 13 International Student Olympiad on Automatic Control, Saint-Petersburg, 2010. - P. 170-172.

20. Bogdana V. Fomenko. Automatic Control System of Energy Objects with Variable Operation Modes/ Alexander V. Stepanets, Bogdana V. Fomenko// Preprints of scientific Section of 13 International Student Olympiad on Automatic Control, Saint-Petersburg, 2010. - P. 173-175.

21. Ковриго Ю.М. Система регулювання тепловим навантаженням котла ТПП-210А з використанням регулятора з внутрішньою моделлю/ Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, О.В. Степанець// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2010. -№3/10(45). – С. 4-7.

22. Ковриго Ю.М. Інтелектуальні будівлі та автоматизація інженерних систем/ Ю.М. Ковриго, А.П. Мовчан, І.А. Поліщук, Б.В. Фоменко, О. В. Степанець // Інвестування в енергетику, енергозбереження та екологію: десята міжнародна конференція, 25-29 тр. 2010р. : вибрані матеріали — К., 2010. — С. 133-139.

23. Фоменко Б.В. Система автоматичного керування теплоенергетичними об'єктами зі змінними режимами роботи/ Б.В. Фоменко, О. В. Степанець// Матеріали XVII Міжнар. Конф. з автоматичного управління (Автоматика-2010), 27-29 вер. 2010р. : тези доп. — Х., 2010. — С. 301-303.

24. Фоменко Б.В. Дослідження стійкості нелінійної системи регулювання температури первинної пари/Б.В. Фоменко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. -№6/7 (48). - С. 64-66.

25. Фоменко Б.В. Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання за рахунок врахування обмежень керованого сигналу/Б.В. Фоменко, О.В. Степанець, О.С. Бунке//Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2010. - №57. – С. 177-183

АНОТАЦІЇ

Фоменко Б.В. Автоматизація процесів керування прямоточними котлоагрегатами з врахуванням технологічних обмежень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2011.

Дисертацію присвячено питанням створення автоматизованої системи керування з врахуванням обмежень.

У дисертаційній роботі висвітлені наступні проблеми: доведена необхідність врахування обмежень на керуючі та керовані сигнали в алгоритмах керування; запропоновані нелінійні структурні рішення, в основі яких типові локальні системи керування з можливістю введення технологічних обмежень; запропонований розрахунок локальних нелінійних систем регулювання з врахуванням обмежень; розроблена методика врахування обмежень при синтезі багатоконтурних систем керування; визначені формули розрахунку додаткових параметрів налаштування в запропонованих алгоритмах керування; досліджені питання абсолютної стійкості запропонованих рішень; розроблена система керування температурою за ходом водопарового тракту прямоточного котлоагрегату з врахуванням технологічних обмежень.

Запропоновано в двозв'язній системі керування тепловим навантаженням і температурним режимом використовувати нелінійне структурне рішення з розробленими алгоритмами, що дозволяє змінювати витрату палива відповідно до завдання за тепловим навантаженням таким чином, щоб забезпечити значення температури робочого середовища в ВРЧ в заданому технологічному діапазоні.

Результати роботи пройшли дослідно-промислові випробування та прийняті для реалізації на Трипільській ГРЕС, а також розроблені алгоритмічні рішення використовуються в програмному забезпеченні контролера S7586-XX ТОВ «Нейро Систем».

Ключові слова: прямоточний котел, технологічні обмеження, компенсація інтегрального насичення, нелінійні структури, методика синтезу, формули розрахунку, абсолютна стійкість.

АННОТАЦІЯ

Фоменко Б.В. Автоматизация процессов управления прямоточными котлоагрегатами с учетом технологических ограничений. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2011.

Диссертация посвящена повышению эффективности функционирования энергоблоков ТЭС с прямоточными котлоагрегатами путем создания автоматизированной системы управления с учетом ограничений.

Научная новизна работы заключается в получении новых научно-обоснованных результатов для решения актуальной проблемы, которая заключается в разработке решений по учету ограничений на регулирующие и регулируемые переменные в алгоритмах локальных систем управления прямоточным котлоагрегатом: впервые исследована возможность расчета нелинейных систем регулирования с учетом технологических ограничений для прямоточного котлоагрегата; впервые предложены структурные решения по усовершенствованию систем регулирования температуры рабочей среды по ходу водопарового тракта котлоагрегата с возможностью введения постоянных и переменных ограничений на температуру; разработана методика учета ограничений в локальных системах управления прямоточным котлоагрегатом; определены формулы расчета дополнительных параметров для алгоритмов управления на базе модифицированных ПИ и ПИД законов, которые отличаются от стандартных формированием пропорциональной и дифференциальной составляющих по регулируемым переменным с реализацией алгоритма компенсации интегрального насыщения.

В результате исследований выявлено, что в действующих системах управления прямоточными котлоагрегатами учет технологических ограничений реализуется на уровне защит, которые срабатывают мгновенно или с выдержкой во времени, но в самих алгоритмах управления меры по предотвращению выхода переменных за пределы допустимого диапазона в процессе регулирования не предусмотрены.

На основе анализа существующих проблем, обусловленных выходом регулирующих органов на предельные положения, предложено использовать в качестве закона управления модификации ПИ и ПИД алгоритмов. От стандартных они отличаются формированием пропорциональной и дифференциальной составляющих по регулируемым переменным и реализуют компенсацию интегрального насыщения путем изменения постоянной интегрирования, если управляющий сигнал находится на предельном значении рабочего диапазона. В предложенных алгоритмах появился дополнительный параметр настройки, для которого были определены формулы расчета, которые обеспечивают абсолютную устойчивость нелинейных систем управления с учетом технологических ограничений для основных контуров прямоточного котлоагрегата.

Разработана методика учета технологических ограничений в процедуре синтеза многоконтурных типовых систем управления основными технологическими переменными прямоточного котлоагрегата, которую можно использовать как в рамках малозатратной модернизации, так и при проектировании автоматизированной системы управления.

Определение дополнительных параметров настройки в предложенных алгоритмах проводилось с помощью анализа абсолютной устойчивости нелинейной системы с учетом технологических ограничений по круговому критерию.

Предложено нелинейное структурное решение с разработанными алгоритмами для системы управления температурой первичного пара с учетом технологического диапазона на температуру пара после пароохладителя, которая позволяет повысить качество регулирования за счет более плавного и точного изменения температуры в пароперегревателе.

Предложено в двухсвязной системе управления тепловой нагрузкой и температурным режимом использовать нелинейное структурное решение с разработанными алгоритмами, которое позволяет изменять расход топлива в соответствии с заданием тепловой нагрузки таким образом, чтобы обеспечить значение температуры рабочей среды в рассечке верхней радиационной части в заданном технологическом диапазоне.

Модельные и опытно-промышленные испытания показали, что применение структурных и алгоритмических решений по учету ограничений в алгоритмах управления основными технологическими переменными прямоточного котлоагрегата существенно улучшает качество переходных процессов, уменьшает количество включений исполнительного механизма, повышает надежность и экономичность оборудования и системы управления.

Результаты работы прошли опытно-промышленные испытания и приняты для реализации на Трипольской ГРЭС, а также разработанные алгоритмические решения используются в программном обеспечении контроллера S7586-XX «Нейро Систем».

Ключевые слова: прямоточный котел, технологические ограничения, компенсация интегрального насыщения, нелинейные структуры, методика синтеза, формулы расчета, абсолютная устойчивость.

ABSTRACT

Fomenko Bogdana V. Automation of control processes of the once-through boilers taking into account technological constraints. - Manuscript.

Dissertation for a candidate degree by specialty 05.13.07 - Automation of control processes. National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute".

In the dissertation was considered the following problems: the necessity of taking in account constraints on control and output signals into the control algorithms; it was proposed nonlinear structural solutions, based on typical local control systems, with the possibility of using technological constraints; it was proposed design of local nonlinear control systems with regard to restrictions of the limitations in synthesis of the multiloop control systems with the proposed control algorithms; it was investigated the problems of absolute stability of all nonlinear solutions; it has developed a system of temperature control along the path water-steam boiler direct flow, taking into account technological

constraints. It was proposed in MIMO system of heat load and temperature control to use a nonlinear structural solution based on the developed algorithms which are providing a possibility to change the fuel input according to the reference of the heat load to keep the steam temperature in the crosscut in the upper radiation section of a boiler in the given technology range.

Keywords: once-through boiler, technological constraints, anti-windup, nonlinear structures, methods of synthesis, calculation formulas, the absolute stability.