



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет Автоматика

Катедра Автоматизация на непрекъснатите производства

Проф. д-р маг.инж. Снежана Тодорова Йорданова

**ИНТЕЛИГЕНТНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА
ПРОЦЕСИ НА БАЗА НА РАЗМИТА ЛОГИКА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на научна степен
"ДОКТОР НА НАУКИТЕ"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Автоматизация на производството

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“ към Факултет Автоматика на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 26.01.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 05.06.2018 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-57/08.02.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Чл. кор. проф. дтн. инж. Петко Христов Петков – председател
2. Проф. д-р инж. Андон Венелинов Топалов – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Михаил Георгиев Петров
4. Проф. дтн. инж. Никола Енчев Маджаров
5. Проф. дтн. инж. Стоян Колев Стоянов
6. Проф. дтн. инж. Чавдар Иванов Дамянов
7. Проф. д-р инж. Коста Петров Бошнаков

Рецензенти:

1. Чл. кор. проф. дтн. инж. Петко Христов Петков
2. Проф. д-р инж. Михаил Георгиев Петров
3. Проф. дтн. инж. Никола Енчев Маджаров

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на факултет Автоматика на ТУ-София, блок №2, кабинет № 2350.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора в катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“ на факултет Автоматика, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти и внедряване в промишлеността.

Автор: проф. д-р маг.инж. Снежана Йорданова

Заглавие: Интелигентни системи за управление на процеси на база на размита логика

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

Списък на съкращенията

АРР	Адаптивен размит регулатор	PE(PE _S)	Размита единица (на CPP)
АСРР	Адаптивен на база на супервайзор РР	РЛ	Размита логика
ГАи	Генетични алгоритми	РМ	Размито множество
КВД	Концентрация на въглероден двуокис	РР	Размит регулатор/ регулиране
ЛМН	Линейни матрични неравенства	CPP	Супервайзорен РР
ЛП	Лингвистична променлива	ТСК	Такаги-Сугено-Канг модел
ЛС	Лингвистична стойност	ФП	Функция на принадлежност
НР	Невронно-размит (модел, регулатор)	DAQ	Интерфейс (Data AcQuisition)
ОВК	Отопление, вентилация, климатизация	IMC	Регулатор с вътрешен модел
ПИД	Пропорционален-интегрален- диференциален алгоритъм	SI/2I/MI SO/MO	Един/два/много входове един/много изходи
ПЛК	Програмируем логически контролер	Rh	Относителна влажност
ПРК	Паралелно разпределена компенсация	ZN	Модел на Циглер-Николс

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Голямата конкуренция на пазара и стремежът към повишаване на качеството на живот изискват от съвременните промишлени инсталации да произвеждат повече и по-висококачествена продукция при икономично изразходване на енергия и суровини и спазване на екологичните норми. Това извежда на преден план такива особености на процесите като обекти за управление като нелинейност, многосвързаност, моделна неопределеност и инерционност, които затрудняват постигането на повишените изисквания към качеството на управление със средствата на класическите методи за моделиране и управление. Размитата логика (РЛ) позволява да се пренесе човешкия опит при управление на процеси без необходимостта от класически математически модел. Настройката и адаптивните свойства на размитите регулатори (РРи) се усъвършенстват и субективизмът при синтеза се намалява чрез интегриране на РЛ с оптимизационни процедури на база на генетични алгоритми (ГАи). Назрява необходимостта от промишлени приложения на РРи, което изисква цялостен инженерен подход за синтез на размити модели и лесни за реализация РРи, гарантиращи устойчивост, енергийна ефективност и високо качествено на управлението на процесни променливи, проверени и оценени при управление в реално време в близки до промишлените условия.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационния труд е разработване на нов общ и цялостен подход за синтез на системи с РРи за управление на процеси с повишено качество на база на минимална експертна начална информация за обекта и несложни за реализация в програмируеми логически контролери (ПЛК) алгоритми за управление с адаптивни свойства. Устойчивостта и желаните показатели за качество на системата при работа в широка област от режими и условия се осигуряват при компенсиране на

нелинейността, инерционността, многосвързаността, моделната неопределеност и променливостта на параметрите на обекта.

Основните задачи са:

1. Разработване на методи за синтез на SISO и MIMO системи с РРи на основа на паралелно разпределена компенсация (ПРК) и Такаги-Сугено-Канг (ТСК) модели на обектите, което включва:

- разработване на нов тип базирани на предавателни функции ТСК модели на обекти и на методика за извеждането им от експериментални данни чрез оптимизация с помощта на ГАи;

- извеждане на условия за наблюдаемост и управляемост на нелинейни обекти;

- разработване на честотни и честотно-времеви методи за синтез на ПИД базирани РРи-ПРК и валидиране на устойчивостта на затворената система;

2. Разработване на адаптивни РРи чрез ГАи оптимизация и използване на супервайзорни РРи (СРРи) и на методи за синтеза им на основа на анализ на чувствителност, сходимост и устойчивост по Ляпунов на затворената система.

3. Разработване на РРи с компенсация на чистото закъснение и моделната неопределеност на обекта и на методи за техния синтез.

4. Приложение на разработените РРи и методите за синтеза им за управление на лабораторни и индустриални обекти и оценка на подобренията.

Методите за изследване съчетават експертни знания, оптимизационни техники, експериментални и симулационни изследвания, аналитични извеждания, анализ на устойчивост, чувствителност и сходимост, числени процедури и инженерни методи. Използва се програмната среда MATLAB™ като разпространена, добре изучена и осигуряваща нужните изследвания.

Научна новост

Научната новост се изразява в разработване на:

- размити модели и регулатори за SISO и MIMO обекти, ориентирани към управление на променливите, характеризиращи промишлените процеси. Те са основани на принципа на ТСК-ПРК моделите, като се различават по отделяне на условието в размитите правила в Сугено модел за идентифициране на областта на линейна работа на нелинейния обект и замяна на моделите в пространство на състоянията в заключенията с локални линейни динамични модели, описани с предавателни функции. РРи-ПРК от нов тип, вместо обратни връзки по състояние, имат локални ПИД базирани регулатори, за които са разработени инженерни методи за настройка по предавателните функции на локалните обекти. Така модифицираните ТСК-ПРК модели на обекти и РРи имат ясен физически смисъл, компактно и опростено описание и са лесни за получаване на база на оптимизационни техники, инженерни методи и експертна оценка;

- адаптивен на база на супервайзор РР (АСРР);

- РРи за компенсиране на моделната неопределеност, голямото относително

закъснение и инерционността на нелинейни обекти на принципите на ТСК-ПРК регулатор с вътрешен модел на обекта (ИМС), предиктор на Смит и невронно-размит (НР) предиктор;

- методи за извеждане на модифициран ТСК модел на обекта, анализ на наблюдаемост и управляемост на нелинейни обекти и синтез на РРи от нов тип от условия за устойчивост и постигане на измерими показатели за качеството на нелинейната затворена система;

- процедури и методики за off-line оптимизация с използване на ГАи, структурен синтез на АСРР чрез анализ на чувствителност, анализ на устойчивост на системите на база на метода на Ляпунов и линейни матрични неравенства (ЛМН), анализ на сходимост на адаптацията и оценяване на оптимален хоризонт на прогнозиране.

Практическа приложимост

Предложените РРи и методите за синтеза им са проверени и оценени при управление в реално време в MATLABTM и с индустриални ПЛКи на:

- нивото на амониев разтвор в карбонизационна колона за производство на сода в Солвей Соди ООД - гр.Девня – индустриален обект;

- нивото и нивата на течност в лабораторна система от свързани резервоари;

- относителната влажност (Rh), температурата и концентрацията на въглероден двуокис (КВД) на въздуха в лабораторна система за отопление, вентилация и климатизация (ОВК);

- температурата на въздуха в лабораторна сушилня и пещ.

Апробация

Размитите модели и РРи са тествани върху разработени лабораторни SISO и MIMO полупромишлени обекти за управление, оборудвани с промишлени измервателни и изпълнителни устройства и свързани през интерфейсни платки към компютър и Simulink модели и към ПЛК SIMATIC на Siemens за управление в реално време. Резултатите от изследванията се използват за обучение на студенти и докторанти. От м. март 2017 г. в Солвей Соди ООД - гр. Девня е внедрено размито управление на нивото на амониев разтвор в карбонизационна колона с РР-ПРК на основа на ПЛК Experion на Honeywell. Качеството на управление е подобро с около 15%.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в **30** публикации от тях **14** с импакт фактор по Scopus и Thomson Reuters, глава от книга на английски език, ръководство за лабораторни упражнения, **24** статии в рецензирани списания (**10** самостоятелни), **4** доклада на конференции.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **246** страници. Структуриран е в увод, **5** глави, списък на основните приноси, **3** приложения, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Съдържа **120** фигури и **18** таблици. Ползвани са **254** литературни източници, от които **229** са на латиница.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1 Преглед на методите за синтез на системи с размити регулатори с повишено качество. Цел и задачи на дисертацията

1.1. Особенности на процесите като обекти за управление Съвременните технологични процеси стават все по-сложни за моделиране и управление в отговор на новите потребности, поставени от растящите конкуренция и стандарт на живот за повече и по-качествена продукция, съобразяване с пазара и околната среда и икономия на енергия и суровини. Пред управлението на процесните променливи се поставят изисквания за бързи и чести смени на режимите и областите на работа и за въвеждане на вътрешни контури и обратни връзки за оползотворяване на материали и енергия. Системата за управление се превръща в нелинейна, с променливи параметри, многосвързана и от висок ред и устойчивостта и качеството на управление трудно се гарантират с класически методи и средства. Размитите регулатори успешно се справят с нелинейността на обекта, осигуряват устойчивост и робастни свойства на затворената система при ограничени изменения в параметрите на обекта. Синтезът и настройката са несложни, като използват минимални емпирични знания за обекта. Подходът за синтез е унифициран и независим от приложението, а алгоритмите са подходящи за реализация в ПЛК при управление в реално време, тъй като консумират малко изчислителни ресурси. За разширяване на индустриалното приложение на РРи са разработени стандарт на език за програмиране и ПЛК реализации.

1.2. Размити регулатори за управление на процеси Размитите регулатори се изграждат на основата на описание на процесите чрез лингвистични променливи (ЛПи) вместо физически величини. ЛПи приемат различни лингвистични стойности (ЛСи) или терми, които се изобразяват върху оста на реалните стойности на физическите променливи чрез размити множества (РМ). Връзката между входните и изходните ЛПи се задава с правила от вида:

IF <условие, предпоставка> **THEN** <заключение, действие>.

Всяко правило описва едно състояние и въвежда експертното знание по изчислителен път. Условието се състои от размити обекти, а заключението – от размити обекти при Мамдани РРи или от детерминирани функции на входните величини – константи (сингълтъни), линейни и от по-висок ред, при Сугено РРи. РРи от тип Мамдани или Сугено са известни като неизползващи математически модел на обекта за синтеза си. Извеждането на размитото заключение имитира човешкия подход при вземане на решение.

Голямо разпространение са намерили Мамдани/Сугено РРи, базирани на ПИД и производните му. Скоростният двувходов ПИ РР се описва с размити правила от вида:

$$\mathbf{R}_i: \mathbf{IF} \ e \text{ is } L_e \ \mathbf{AND} \ \dot{e} \text{ is } L_{de} \ \mathbf{THEN} \ \Delta u \text{ is } L_{\Delta u}, \quad i=1 \div r, \quad (1.1)$$

където правилата (1.1) задават всички състояния и се реализират в размита единица

(PE) с входове грешката в системата e , определена от разликата между заданието y_3 и измерената изходна променлива на обекта y ($e=y_3-y$), и нейната производна \dot{e} . Изходната променлива на PE е промяната на управлението Δu . Лингвистичните стойности L_e , $L_{\dot{e}}$ и $L_{\Delta u}$ за e , \dot{e} и Δu , съответно, се задават като РМ посредством функции на принадлежност (ФП). Динамиката на регулатора е изнесена в блок за предварителна подготовка, където се изчислява \dot{e} и се нормализират входните за PE променливи, и в блок за допълнителна обработка на изходната променлива Δu , където тя се денормализира и интегрира или добавя към предишната стойност на управлението, за да се получи управлението $u_n=u_{n-1}+\Delta u_n$ в текущия момент t_n .

Когато допълнителната обработка не съдържа интегриране, се получава ПД РР. ПИД РРи се изграждат на база на различни структурни решения, например ПИ РР и паралелна Д съставка, ПИД РР от паралелна структура на ПИ РР и ПД РР и др. Диференцирането се реализира числено като крайна разлика, например $\dot{e} \approx \Delta e_n = e_n - e_{n-1}$, или с помощта на диференциатор с предавателна функция $W_d(s) = K_d T_d s (T_d s + 1)^{-1}$, който има допълнително филтриращи свойства по отношение на шума. Използване на производната на изхода \dot{y} вместо на грешката \dot{e} води до плавно променящ се сигнал при стъпално изменение на заданието. Базата правила (1.1) се запазва, като знакът минус от връзката $\dot{e} \approx -\dot{y}$ се отразява в мащабирането. Широко разпространени са също ПИД базирани РРи с единствен вход e или знаковото разстояние $d_s = e + \lambda \dot{e}$, чиято управляваща крива е секторно ограничена и позволява лесен синтез на регулатора от условия за устойчивост.

Исторически по-късно възниква втори тип РРи на основа на ТСК динамични размити модели на обектите. Размитите правила в ТСК модела на обекта описват k зони на работа, в които обектът може да се представи с линейни модели в пространството на състоянията:

$$\mathbf{R}_k: \text{IF } z_1 \text{ is } L_{z1} \text{ AND } z_2 \text{ is } L_{z2} \text{ AND...AND } z_p \text{ is } L_{zp} \text{ THEN } \dot{x}(t) = \mathbf{A}_k x(t) + \mathbf{B}_k u(t), \quad (1.2)$$

$$y(t) = \mathbf{C}_k x(t),$$

където

- $z(t)=[z_j(t)]$, $j=1 \dots p$ е векторът на променливите, които служат за разпознаване на текущата област на работа на обекта;
- L_{z_j} са ЛСи за $z_j(t)$, които чрез ФП на съответните РМ задават размитите области на работа, в които обектът може да се приеме за линеен;
- $x(t) \in \mathbf{R}^n$, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ и $y(t) \in \mathbf{R}^q$ са векторите на състоянията, на входните управляващи въздействия и на изходните променливи, съответно;
- $\mathbf{A}_k \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}_k \in \mathbf{R}^{n \times m}$ и $\mathbf{C}_k \in \mathbf{R}^{q \times n}$, $k=1 \div N$, са съответните матрици на локалния линеен модел на обекта в пространство на състоянията от заключенията.

Условието във всяко правило проверява степента на съвпадение на измерените или оценени променливи $z_j(t)$ с определените размити области, във всяка от които обектът се представя с локален линеен модел, описан в заключението. ТСК моделът има малко на брой правила, колкото са предполагаемите линейни работни области.

Изходът на нелинейния обект се получава като претеглено средно от изходите на локалните линейни модели по силата на размитата импликация и деразмиването.

ТСК моделите се извеждат при известен нелинеен модел и линеаризация в отделни работни точки или чрез обучение по експериментални данни на НР структури. Доказано е, че всяка нелинейна динамична система може да бъде описана при зададена точност с ТСК модел.

За всеки ТСК модел на обекта може да бъде синтезиран РР-ПРК. РР-ПРК има същите предикати като ТСК модела на обекта и заключения, които представляват линейни обратни връзки по състояние, всяка синтезирана по локалния линеен модел на обекта от съответното правило в ТСК модела на обекта:

$$\mathbf{R}_k: \text{IF } z_1 \text{ is } L_{z1} \text{ AND } z_2 \text{ is } L_{z2} \text{ AND...AND } z_p \text{ is } L_{zp} \text{ THEN } u(t) = -\mathbf{F}_k x(t), \quad (1.3)$$

където \mathbf{F}_k е матрицата от коефициентите на локалния регулатор.

Изходът на РР-ПРК се получава по аналогичен начин като претеглено средно от изходите на локалните линейни регулатори в зависимост от степента на изпълнение на съответните условия.

За синтеза на РР-ПРК се използват известните методи за линейни системи за управление за осигуряване на устойчивост и желани показатели на качество на управление на локалните линейни затворени системи. Устойчивостта на глобалната нелинейна затворена система се изследва на база на непрекия метод на Ляпунов с помощта на ЛМН. Локалните линейни обратни връзки по състояние може да се определят и пряко от условията на Ляпунов за устойчивост, като се отчитат ограничения върху сигналите и показателите за качество на процесите, съществуване на чисто закъснение в управлението и променливите на състоянието, на смущения и на моделна неопределеност. Задачата, обаче, се решава трудно или е нерешима при голям брой ЛМН. Освен това физическите условия, свързани с изисквания към управлението, с ограничения върху сигнали и параметри и с особености на обекта, сложно се формализират и привеждат към ЛМН. РРи-ПРК, известни като базирани на модел РРи, могат с малко на брой правила да апроксимират всеки нелинеен регулатор. ТСК-ПРК подходът е привлекателен с унифицирания несложен синтез на РР на основа на добре изучената и широко разпространена в инженерната практика теория на линейните системи за управление.

Трета група размити модели, известни като еволюиращи, базирани на облачна техника и потоци от данни, си проправя път отскоро с основни приложения засега в разпознавателни задачи и механични системи. Методи за синтез и изследване на устойчивост на системата все още не са разработени.

Сугено и ТСК моделите се предпочитат, тъй като при тях деразмиването - най-трудоемката изчислителна операция при РРи, не изисква големи компютърни ресурси, което облекчава реализацията на РР в ПЛК.

1.3. Проблеми на системите с размити регулатори за управление на процеси и методи за повишаване на качеството на управление Основните проблеми при синтеза на системи с РРи са свързани с:

- използване на емпирично експертно знание, което е носител на субективизъм за Мамдани и Сугено РРи;
- извеждане на ТСК модел на обекта за РРи-ПРК при отсъствие на нелинеен модел на обекта и при нелинейни МИМО обекти, колебателни, без саморегулиране и др. и анализ на наблюдаемост и управляемост на ТСК модела;
- трудно настройване и промяна на параметрите;
- сложни методи за анализ на устойчивост и необвързване на условията за устойчивост със синтеза при системи с РРи-ПРК;
- недостатъчно съобразяване с основните свойства на процесите като обекти за управление и на индустриалната среда - шумове и смущения, ограничения върху сигналите и др.

При настройката на параметрите на различни РРи, вместо емпирични правила, все по-често се очитат изисквания за устойчивост и робастност, което обективизира синтеза на РР и подготвя РР за управление на индустриални обекти.

Възможностите на РР-ПРК за устойчиво робастно управление с желани показатели за качество на процесите се разширяват с разработки на РР-ПРК за обекти със закъснение и локални линейни ПИД регулатори. Изведените условия на Ляпунов и ЛМН за различни типове обекти и регулатори подсказват подход за валидиране на устойчивостта на произволна ТСК-ПРК система. ТСК-ПРК концепцията предоставя многобройни неизучени възможности за използване на по-сложни линейни локални регулатори за компенсиране на свързаност между променливи, смущения, голямо времезакъснение, моделна неопределеност и др. в локалните линейни системи, които да повишат качеството на регулиране.

За подобряване на адаптивните свойства на РРи са разработени адаптивни РРи (АРР) на база на класическите принципи за адаптивно управление – самонастройващи се, самоорганизиращи се АРР с адаптация на базата правила, с твърда адаптация и с еталонен модел. Размити компоненти в АРР се използват за еталонния модел, коефициентите от твърдата адаптация, наблюдателя за оценяване на показателите за качество на затворената система при прякото адаптивно управление или параметрите на обекта при базираното на идентификация непряко адаптивно управление, обратния модел на обекта от механизма за адаптация, основния регулатор и др. Модификаторът на базата знания, на основа на градиентни методи и методите на Ляпунов, осигурява устойчивост на системата и желана скорост на сходимост на адаптацията, което се усложнява от високия ред и наличието на закъснение в обекта. Адаптацията се отнася до мащабиращите коефициенти, ФП (обикновено техните върхове или сингълтъните) и базата правила или релационната матрица.

АРРи се характеризират със: 1) сложен изчислителен алгоритъм за промишлено приложение и програмиране в ПЛК при управление на процеси в реално време и зашумена среда; 2) трудоемък и специфичен за даденото приложение синтез; 3) трудно проверими и формулирани предположения и интуитивни решения; 4) отсъствие на валидиране, проверка и оценка при on-line управление на физически обекти в реално време в индустриална среда.

Супервайзорният РР добива популярност и крие неразработен потенциал за подобряване на показателите за качество на системата чрез изчислително прост алгоритъм и лесен синтез. На основа на изчислени на база на измервания показатели за качество, СРР променя нелинейно on-line, от по-високо управляващо ниво, параметрите (коефициенти, ФП, размити правила и др.) на регулаторите от по-долното ниво - линейни, размити, НР и др., за да поддържа избраните показатели в зададените им норми. При наличие на данни от експериментални или симулационни изследвания, параметрите на различни РРи може да се определят чрез обучение на Сугено НР структури или off-line многокритериална оптимизация на зададена целева функция на различни показатели за качество на затворената система. ГАи са подходящ апарат за случайно безградиентно търсене на глобален екстремум на неаналитично зададени мултимодални нелинейни целеви функции на голям брой настройвани параметри.

1.4. Цел на дисертационния труд е разработване на нов общ (за голям клас обекти) и цялостен (от моделиране на обекта през анализ на устойчивост на затворената система до експериментални изследвания) подход за синтез на системи с РРи за управление на процеси с повишено качество. Използва се експертна начална информация за обекта и несложни за реализация в ПЛК алгоритми за управление с адаптивни свойства, които на база на компенсиране на нелинейността, инерционността, многосвързаността, моделната неопределеност и променливостта на параметрите на обекта, осигуряват устойчивост и желани показатели за качество на системата при работа в широка област от режими и условия.

Основните задачи са:

1. Разработване на нов тип ТСК модели за SISO и MIMO нелинейни обекти на основа на предавателни функции и на тяхна база на нов тип РР-ПРК, както и на методи за извеждане на ТСК модели, изследване на наблюдаемост и управляемост на нелинейни обекти и синтез на РР-ПРК;

2. Разработване на адаптивни РРи чрез ГАи оптимизация и използване на супервайзорни РРи (СРРи) и на методи за синтеза им на основа на анализ на чувствителност, сходимост и устойчивост на нелинейната затворена система;

3. Разработване на РРи с компенсация на моделната неопределеност и чистото закъснение на обекта и на методи за техния синтез;

4. Приложение на разработените РРи и методи за управление на лабораторни и индустриални обекти и оценка на подобренията.

Глава 2 Методи за синтез на системи с размити регулатори на основа на паралелно разпределена компенсация за управление на процеси с повишено качество

2.1. Постановка на задачата Целта е да се разработят методи за извеждане на модифицирани ТСК модели за описание на нелинейни обекти – многосвързани, със закъснение, без саморегулиране и др., които се срещат често в промишлеността, и за синтез на тяхна основа на модифицирани РРи-ПРК с ПИД базирани локални регулатори за управление на процеси с повишено качество, които са лесно приложими в инженерната практика и реализуеми в ПЛК.

Класическият ТСК модел (1.2), необходим за синтеза на РР-ПРК, и методологията за извеждането му на база на линеаризация на зададен нелинеен модел на обекта са ориентирани предимно към механични системи и устройства (летателни апарати, роботи, антени и др.) и към синтез на локални линейни обратни връзки по състояние. Извеждането на ТСК модел от преходните характеристики на обекта в различни работни точки, получени експериментално или чрез симулации при известен негов приблизителен нелинеен модел, е трудно и дори практически неосъществимо за МИМО индустриални обекти с времезакъснение, без саморегулиране и др.

Описанието в пространство на състоянията на локалните обекти затруднява също и синтеза на широко разпространените в промишлеността и реализирани в ПЛК локални ПИД базирани регулатори, които използват утвърдени инженерни методи за синтез за линейни системи за управление без да е необходим пълния вектор на състоянията.

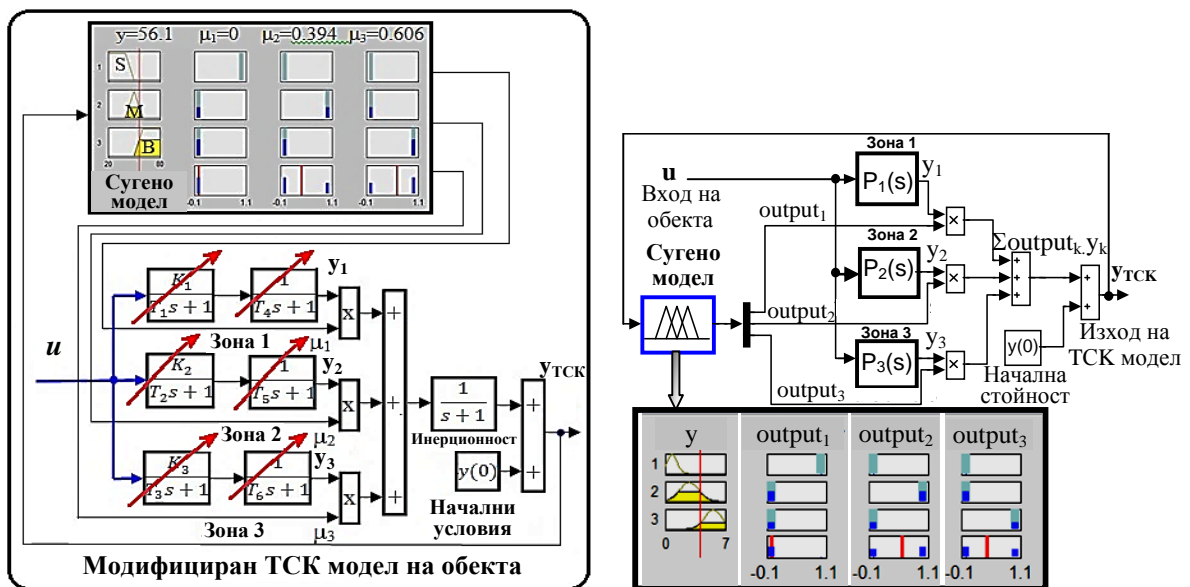
Идеята за модифициран ТСК модел на обекта се заключава в компактно описание на локалните модели с предавателни функции, които лесно се оценяват от експерти и спомагат за настройката на ПИД базираните линейни локални регулатори. Модифицираният ТСК модел позволява също да се синтезират по-сложни локални линейни регулатори за компенсиране на моделната неопределеност, многосвързаността и времезакъснението на нелинейния обект. Той има отворена и инженерно разбираема структура, подходяща за моделиране в MATLABTM-Simulink, улесняваща оптимизацията му по произволни експериментални или симулационни данни за входа и изхода на обекта. Модифицирани ТСК модели могат да се получат за обекти, при които идентификацията е трудна, невъзможна или непозволена. Ако обектът няма управление, първо се синтезира РР по емпирични данни за обекта. При наличен приблизителен нелинеен модел на обекта данните за ТСК моделирането се взимат от симулационното изследване на този модел или на затворената система със синтезиран за него РР. Тогава входният сигнал за обекта или системата може да бъде случаен, да покрива обхвата на работа на обекта и да е богат на амплитуди и честоти, което да осигури добро моделиране на нелинейността и независимост на резултата от входния сигнал. Симулациите са бързи, безопасни за реалния обект и позволяват да се експериментира с различни

сигнали и параметри, недопустими или нереализуеми в реалната среда, като по този начин се отчита моделната неопределеност на нелинейния обект и индустриалните смущения. Изведеният модифициран ТСК модел се валидира по друг набор от входно-изходни данни.

2.2. Разработване на базирани на предавателни функции ТСК модели на SISO и MIMO обекти и на методика за тяхното извеждане Разглежда се модифицираният ТСК модел, показан на фиг.2.1. Сугено модел дефинира съответните N зони на линеаризация, в случая $N=3$, в които обектът се приема за линеен. Зоните на линеаризация могат да се определят чрез клъстерен анализ по експериментални данни за входа и изхода y на обекта или от експерти при многосвързани обекти, обекти без саморегулиране и др. При липса на априорна информация се приемат три зони – работа в „Норма“, желаната или най-често използваната зона, „под Норма“ и „над Норма“, и ортогонални стандартни ФП на входа - **М** (medium) за „Норма“, **S** (small) за „под Норма“ и **В** (big) за „над Норма“. Изходите на Сугено модела са толкова на брой, колкото са зоните на линеаризация. Всеки изход има две ФП – сингълтънните „1“ и „0“ за пълно съответствие и несъответствие на измерените входове с дефинираната област на линеаризация. Всяка зона на линеаризация се описва с едно размито правило:

- R₁: If y is Zone 1 Then $output_1=1$ And $output_2=0$ And $output_3=0$**
- R₂: If y is Zone 2 Then $output_1=0$ And $output_2=1$ And $output_3=0$** (2.2)
- R₃: If y is Zone 3 Then $output_1=0$ And $output_2=0$ And $output_3=1$.**

Правилата (2.2) осигуряват изобразяване на ФП на k -тата зона на изхода $output_k$. Ако измерената стойност y_n в текущия момент t_n изпълнява условията в базата правила (2.2) със степени на принадлежност на y_n към областите **S**, **М** и **В** съответно μ_1 , μ_2 и μ_3 , то изходите след деразмиване по метода за претеглено средно при ортогонални ФП ($\mu_1+\mu_2+\mu_3=1$), ще станат:



(а) конкретна структура

(б) обща структура

Фиг. 2.1. Модифицирани ТСК модели на обект с три зони на линейна работа

$$\begin{aligned} \text{output}_1^o &= [\mu_1 \cdot \mathbf{1} \text{ (от } \mathbf{R}_1) + \mu_2 \cdot \mathbf{0} \text{ (от } \mathbf{R}_2) + \mu_3 \cdot \mathbf{0} \text{ (от } \mathbf{R}_3)] / (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) = \mu_1, \\ \text{output}_2^o &= [\mu_1 \cdot \mathbf{0} \text{ (от } \mathbf{R}_1) + \mu_2 \cdot \mathbf{1} \text{ (от } \mathbf{R}_2) + \mu_3 \cdot \mathbf{0} \text{ (от } \mathbf{R}_3)] / (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) = \mu_2, \\ \text{output}_3^o &= [\mu_1 \cdot \mathbf{0} \text{ (от } \mathbf{R}_1) + \mu_2 \cdot \mathbf{0} \text{ (от } \mathbf{R}_2) + \mu_3 \cdot \mathbf{1} \text{ (от } \mathbf{R}_3)] / (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) = \mu_3. \end{aligned}$$

За N зони и произволни ФП всеки изход на Сугено модела се определя от:

$$\text{output}_k^o = \mu_k / \sum_{i=1}^N \mu_i, \quad (2.3)$$

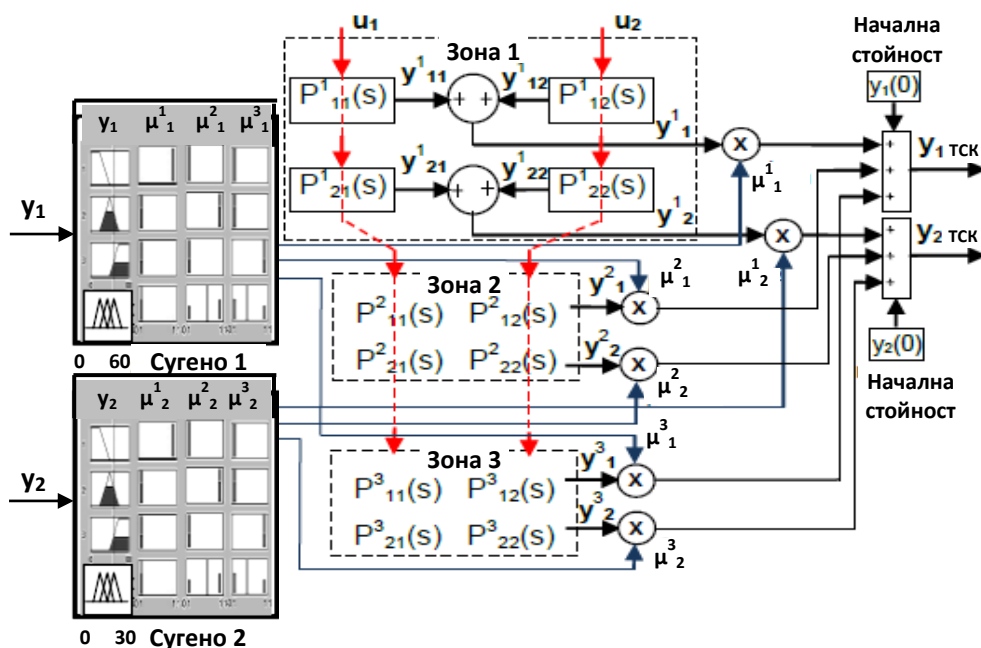
Така дефинираният Сугено модел задава предикатната част от правилата на класическия ТСК модел. Той се реализира в една опростена РЕ, която представлява нелинейната статична компонента от ТСК модела на обекта.

Динамичната компонента в модифицирания ТСК модел от фиг.2.1 е изнесена като паралелно работещи локални (за всяка зона) линейни модели на обекта с общ вход – входа на обекта u , и с определени от експерти предавателни функции $P_k(s)$, описващи динамиката на обекта в отделните зони на линеаризация. Предавателните функции може да съдържат интегратор при обект без саморегулиране и/или звено с чисто закъснение $e^{-\tau_k s}$.

Динамичната компонента е аналог на заключенията в размитите правила на класическия ТСК модел. Изходът на модифицирания ТСК модел е претеглено средно от изходите на локалните линейни модели:

$$y_{\text{ТСК}}^o = \sum_{k=1}^N \text{output}_k^o y_k = \sum_{k=1}^N \mu_k y_k / \sum_{k=1}^N \mu_k.$$

На фиг.2.5 е показана структурата на ТСК модел за двусвързан обект. Два Сугено модела с РЕи при експертно фиксирани ФП задават независими зони на линеаризация за всяка изходна променлива y_i . Локалните обекти се описват компактно с предавателни матрици в трите зони на линеаризация:



Фиг. 2.5. Модифициран ТСК модел на двусвързан обект с предавателни матрици на локалните обекти в трите зони на линейна работа за всяка изходна величина

$$\mathbf{P}^k(s) = \begin{bmatrix} P_{11}^k(s) & P_{12}^k(s) \\ P_{21}^k(s) & P_{22}^k(s) \end{bmatrix}, k = 1 \div 3.$$

Изходът на i -тия канал е $y_i(s)=y_{ii}(s)+y_{ij}(s)=P_{ii}(s)u_i+P_{ij}(s)u_j$, с $y_{ij}(s) = P_{ij}(s)u_j(s)$, ($i, j=1, 2$). Каналът е основен (главен, прав) при $i=j$, и кръстосан при $i \neq j$. Горните индекси задават номера на зоната на линеаризация.

Параметрите на ТСК модела $\mathbf{q}_{\text{ТСК}}=[\mathbf{q}_{\text{ПФ}} \ \mathbf{q}_{\text{ФП}}]$ са параметрите от предавателните функции на локалните обекти - в примера от фиг.2.1(а) $\mathbf{q}_{\text{ПФ}}=[K_1 \ T_1 \ K_2 \ T_2 \ K_3 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6 \ y(0)]$ с включено началното условие $y(0)$, и параметрите на ФП - за Гаусовите ФП от фиг.2.1(б) $\mathbf{q}_{\text{ФП}}=[c_S \ \sigma_S \ c_M \ \sigma_M \ c_B \ \sigma_B]$. Те могат да се определят в оптимизационна процедура за минимизиране на приета целева функция на моделната грешка, например:

$$\mathbf{F}_{\text{ТСК}} = \int \{ [y_{\text{ТСК}}(t, \mathbf{q}_{\text{ТСК}}) - y_{\text{exs}}(t)] / y_{\text{exs}}(t) \}^2 dt \rightarrow \underbrace{\min}_{\mathbf{q}_{\text{ТСК}}} \quad (2.4)$$

където $y_{\text{ТСК}}(t, \mathbf{q}_{\text{ТСК}})$ и $y_{\text{exs}}(t)$ са изходи на ТСК модела и на реалния обект, получени при едни и същи входни данни $u_{\text{ex}}(t)$ от симулационни и експериментални изследвания, съответно. Вместо данни от експерименти с реалния обект може да се използват данни от симулационни изследвания на негов модел.

Целевата функция за ММО обекти с m изходни величини $y_i(t)$, $i=1 \div m$, може да бъде от вида:

$$\mathbf{F}_{\text{ТСК}} = \int \sum_{i=1}^m \{ [y_{i\text{ТСК}}(t, \mathbf{q}_{\text{ТСК}}) - y_{i\text{exs}}(t)] / y_{i\text{exs}}(t) \}^2 dt \rightarrow \underbrace{\min}_{\mathbf{q}_{\text{ТСК}}} \quad (2.5)$$

Експерименталните и симулационните изследвания се планират така, че да се използват богати на честоти и амплитуди входни сигнали за обекта $u_{\text{ex}}(t)$, които покриват целия обхват на работа на обекта. Това осигурява висока точност на моделиране на нелинейността и другите особености на обекта. Данните от експерименталните и симулационните изследвания се подлагат на предварителна обработки за постигане на бърза сходимост на оптимизационната процедура, включваща филтриране на смущенията, намаляване на размерността с премахване на неинформативни стойности (повтарящи се установени стойности), отстраняване на корелацията в данните (разреждане на извадката с неколккратно по-голяма стъпка Δt на дискретизация по време при запазване на характера на сигнала), нормализация в обхвати $[-1, 1]$ или $[0, 1]$ или стандартизация ($c=0, \sigma=1$) и др.

За минимизация на сумарната относителна интегрално квадратична грешка от моделиране (2.4) или (2.5) са избрани ГАи, които се характеризират с паралелно претърсване на параметричното пространство и избягват засядане в локален екстремум и търсене на градиент.

Модифицираният ТСК модел на обекта е удобен за симулиране в Simulink на MATLABTM и бързо и точно off-line изчисляване на целевата функция без да се застрашава работата на обекта.

За подобряване на точността на решението ГАи оптимизацията може да се повтори

при нова структура на модифицирания ТСК модел (брой и разположение на зоните на линеаризация и тип на предавателните функции на локалните обекти), друга случайна инициализация на настройваните параметри, променени граници на изменението им, други параметри на ГАи.

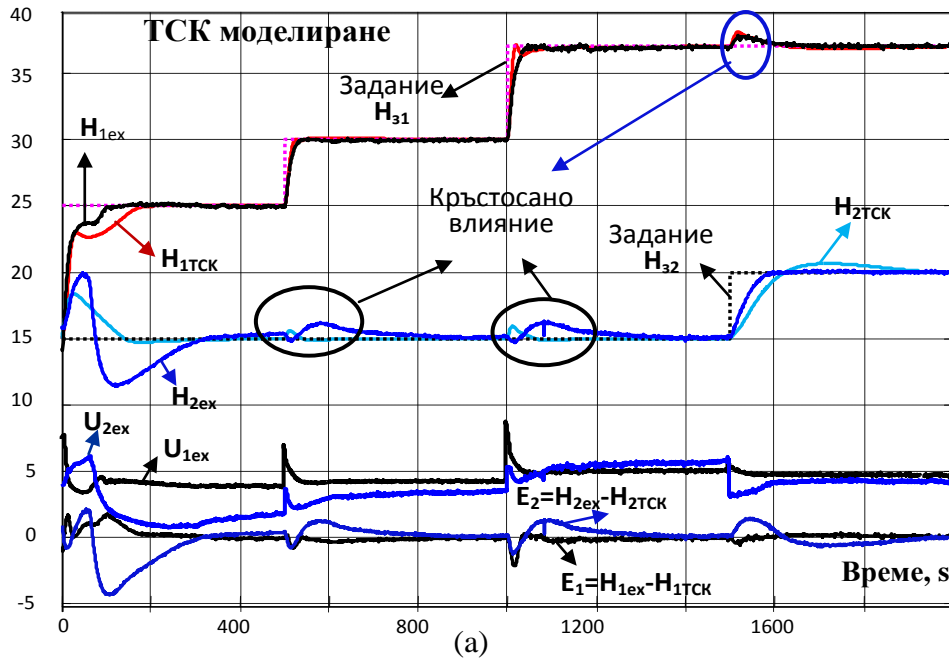
Валидирането на получения ТСК модел на обекта с оптимални параметри е успешно, ако за различни входно-изходни данни за обекта оценената моделната грешка остава малка. Съвременните ПЛК позволяват валидация чрез паралелна работа на ТСК модела на управлението в реално време физически обект при „висящ изход“. Така ТСК моделът се захранва от същото управляващо въздействие, а изходът му лесно се сравнява on-line с изхода на реалния обект. Валидираният размит ТСК модел на даден обект се използва по-нататък за анализ на управляемост и наблюдаемост на нелинейни обекти, синтез на лесни за изпълнение в ПЛК модифицирани РРи-ПРК на основа на линейни локални ПИД или специални регулатори, анализ на устойчивост на затворената размита система, симулационни изследвания на размити системи за управление с цел ГАи оптимизация на параметрите на регулатора, определяне на оптималните хоризонт на прогнозиране на НР предиктор и структура на СРР и др.

По подобен начин може да се предложат структури на ТСК модели за произволни ММО обекти и зони и да се изведат оптималните им параметри.

Разглежда се нелинеен двусвързан обект за регулиране на нивата $y_1=H_1$ и $y_2=H_2$ в два скачени резервоара чрез напреженията U_1 към помпа 1 за напълване на резервоар 1, и U_2 - към помпа 2 за източване на течност от резервоар 2, $u_1=U_1$ и $u_2=U_2$. Обектът е без саморегулиране по двата изхода и идентификация е невъзможна. За него емпирично се синтезира двусвързан Мамдани ПИ РР и затворената система се изследва при управление на обекта в реално време за различни задания и смущения. Получените от експериментите данни (U_{iex} , H_{iex}), показани на фиг.2.6(a), служат за извеждане на ТСК модел на обекта с три зони на линеаризация, представен на фиг.2.5 с $P_{ij}^k(s) = K_{ij}^k \cdot [(T_{ij}^k s + 1) \cdot (T_{oij} s + 1)]^{-1}$. Оптималните параметри на ТСК модела се изчисляват с ГАи минимизация на (2.5) ($m=2$). На фиг.2.6(a) са дадени реакциите на двата изхода на ТСК модела с оптимални параметри $H_{iТСК}(t)$ към същите входни въздействия, подавани към реалния обект при управлението му с Мамдани РР в реално време. ТСК моделът се валидира успешно по данни от управление на H_1 и H_2 в реално време от двунивов РР. Грешките от моделиране $E_i=H_{iex}-H_{iТСК}$ на фиг.2.6(a) са в границите на ± 5 cm.

2.3. Определяне на условия за наблюдаемост и управляемост на нелинейни обекти за управление на основа на ТСК размити модели
Ранговите условия за наблюдаемост и управляемост на линейни системи за управление се прилагат към еквивалентни при дадени измервания локални линейни модели на ТСК модела (1.2) на нелинейния обект.

Локалните линейни динамични обекти в заключенията на размитите правила R_k , $k=1 \div N$, се описват в пространство на състоянията с матриците ($A_k^{n \times n}$, $B_k^{n \times m}$, $C_k^{q \times n}$).



Фиг. 2.6. Управлението на нивата: (а) в реално време с Мамдани РР и симулация

Модифицираните ТСК модели първо се трансформират в класически ТСК модели чрез привеждане на предавателните функции на локалните обекти в модели в пространство на състоянията. Звената със закъснение в предавателните функции на локалните обекти се апроксимират, например с линейния член от разложението им в ред на Тейлор.

Изходът на ТСК модела (1.2) се получава като претеглено средно на изходите на локалните линейни обекти:

$$\begin{cases} \dot{x}^o(t) = \sum_{k=1}^N h_k(z(t)) [\mathbf{A}_k x(t) + \mathbf{B}_k u(t)], \\ y^o(t) = \sum_{k=1}^N h_k(z(t)) y_k(t), \quad y_k(t) = \mathbf{C}_k x(t). \end{cases}, \quad (2.8)$$

където $h_k(z(t)) = w_k(z(t)) / \sum_{i=1}^N w_i(z(t))$, $\sum_{k=1}^N h_k(z(t)) = 1$, $h_k \in [0, 1]$, като за степен $\mu_{Lz_j}(z_j(t))$ на съвпадение на $z_j(t)$ с L_{z_j} съставното условие в размитото правило се изпълнява със степен $w_k(z(t)) = \prod_{j=1}^p \mu_{Lz_j}(z_j(t))$.

За N зони на линеаризация (2.8) може да се развие във вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}^o(t) &= h_1 [\mathbf{A}_1 x(t) + \mathbf{B}_1 u(t)] + h_2 [\mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{B}_2 u(t)] + \dots + h_N [\mathbf{A}_N x(t) + \mathbf{B}_N u(t)] \\ y^o(t) &= (h_1 \mathbf{C}_1 + h_2 \mathbf{C}_2 + \dots + h_N \mathbf{C}_N) x(t). \end{aligned}$$

След преобразувания се получава:

$$\begin{cases} \dot{x}^o(t) = \mathbf{A}^e(h) x(t) + \mathbf{B}^e(h) u(t) \\ y^o(t) = \mathbf{C}^e(h) x(t) \end{cases}, \quad (2.9)$$

където $h = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_N]^T$, а $\mathbf{A}^e(h) = \sum_{k=1}^N h_k \mathbf{A}_k$, $\mathbf{B}^e(h) = \sum_{k=1}^N h_k \mathbf{B}_k$, $\mathbf{C}^e(h) = \sum_{k=1}^N h_k \mathbf{C}_k$ са еквивалентни матрици, описващи еквивалентни линейни обекти.

Съгласно (2.9) нелинейният обект се представя с безкраен брой линейни модели

$(\mathbf{A}^e(h), \mathbf{B}^e(h), \mathbf{C}^e(h))$, изведени при различни комбинации от стойности за $[h_1 \dots h_N]$, които се определят от възможните измерени стойности за $z(t)$. Така за нелинейния обект може да се дефинират безкраен брой матрици на наблюдаемост и управляемост като функции на h с отчитане на еквивалентните матрици $(\mathbf{A}^e(h), \mathbf{B}^e(h), \mathbf{C}^e(h))$:

$$\mathbf{Ob}^e(h) = [\mathbf{C}^e(h) | \mathbf{C}^e(h) \cdot \mathbf{A}^e(h) | \mathbf{C}^e(h) \cdot \mathbf{A}^e(h)^2 | \dots | \mathbf{C}^e(h) \cdot \mathbf{A}^e(h)^{n-1}]^T, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{Cb}^e(h) = [\mathbf{B}^e(h) | \mathbf{A}^e(h) \cdot \mathbf{B}^e(h) | \mathbf{A}^e(h)^2 \cdot \mathbf{B}^e(h) | \dots | \mathbf{A}^e(h)^{n-1} \cdot \mathbf{B}^e(h)]. \quad (2.11)$$

Обектът, представен с ТСК модел, е наблюдаем само ако всички матрици на наблюдаемост за възможните комбинации от $h_k, k=1 \div N$, имат ранг равен на n , $\text{rank}[\mathbf{Ob}^e(h)] = n$. Тогава всички двойки $[\mathbf{C}^e(h), \mathbf{A}^e(h)]$ са наблюдаеми. Обектът е управляем само ако всички матрици на управляемост за възможните комбинации от $h_k, k=1 \div N$, имат ранг равен на n , $\text{rank}[\mathbf{Cb}^e(h)] = n$. Тогава всички двойки $[\mathbf{A}^e(h), \mathbf{B}^e(h)]$ са управляеми. Наблюдаемостта и управляемостта на ТСК модела се изследват числено в MATLABTM.

При неизпълнение на условията за наблюдаемост и управляемост за конкретния изведен ТСК модел на обекта, за всяко h се изчислява минимална реализация, за която тези условия са изпълнени. Получените напълно наблюдаеми и управляеми линейни модели могат да се използват за синтез на регулатори, наблюдатели на състоянието, компенсатори, предиктори и др.

Наблюдаемостта и управляемостта на нелинеен обект се изследва за изведения модифициран ТСК модел за двусвързания обект за регулиране на свързани нива, който се преобразува в стандартна форма на ТСК модел:

$$\begin{cases} \dot{x}^1(t) = \mathbf{A}_k^1 x^1(t) + \mathbf{B}_k^1 u(t), & y_1(t) = \mathbf{C}^1 x^1(t) \\ \dot{x}^2(t) = \mathbf{A}_k^2 x^2(t) + \mathbf{B}_k^2 u(t), & y_2(t) = \mathbf{C}^2 x^2(t) \end{cases}. \quad (2.12)$$

Променливите на състоянието $x_1 \div x_8$ са групирани в два блока - $x(t) = [x^1(t) \ x^2(t)]^T$, всеки свързан със съответния изход на обекта. Определят се всички възможни комбинации от измерени стойности за изходите на обекта (H_1, H_2) , които попадат в съответните зони на линеаризация със степени μ_1^k и $\mu_2^k, k=1 \div 3$, за всеки изход. Тъй като по отношение H_1 и H_2 са дефинирани независими зони на линеаризация, на всяка комбинация от измерени (H_1, H_2) се съпоставя комбинация от ФП от векторите $\mu_1 = [\mu_1^1 \mu_1^2 \mu_1^3]$ и $\mu_2 = [\mu_2^1 \mu_2^2 \mu_2^3]$. При ортогонални ФП и дискретизация на всяко $\mu_i^k, \mu_i^k \in [0, 1]$, с постоянна стъпка $\Delta\mu = 0.2$ се получават следните подредени по стълбове единадесет комбинации $[\mu_1^1 \mu_1^2 \mu_1^3]$:

$$\mu_1^T = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 1 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 1 \end{bmatrix}.$$

и 121 комбинации от дискретните стойности за μ_1 и от μ_2 . За всяка комбинация се получава по една еквивалентна система за всеки изход $(\mathbf{A}^{e1}, \mathbf{B}^{e1}, \mathbf{C}^{e1})$ и $(\mathbf{A}^{e2}, \mathbf{B}^{e2}, \mathbf{C}^{e2})$:

$$\begin{cases} \mathbf{A}^{e1}(\mu_1, \mu_2) = \sum_{k=1}^N \mu_1^k \mathbf{A}_k^1, \mathbf{A}^{e2}(\mu_1, \mu_2) = \sum_{k=1}^N \mu_2^k \mathbf{A}_k^2 \\ \mathbf{B}^{e1}(\mu_1, \mu_2) = \sum_{k=1}^N \mu_1^k \mathbf{B}_k^1, \mathbf{B}^{e2}(\mu_1, \mu_2) = \sum_{k=1}^N \mu_2^k \mathbf{B}_k^2, \\ \mathbf{C}^{e1} = \mathbf{C}^{e2} \end{cases} \quad (2.15)$$

На база на (2.15) се изчисляват матриците на наблюдаемост (2.10) и управляемост (2.11) на еквивалентните системи. ТСК моделът на двусвързания обект е наблюдаем и управляем само ако за всички комбинации (μ_1, μ_2) двойките, свързаните с двете подсистеми $(\mathbf{C}^{e1}, \mathbf{A}^{e1}(\mu_1, \mu_2))$ и $(\mathbf{C}^{e2}, \mathbf{A}^{e2}(\mu_1, \mu_2))$ са наблюдаеми и двойките $(\mathbf{A}^{e1}(\mu_1, \mu_2), \mathbf{B}^{e1}(\mu_1, \mu_2))$ и $(\mathbf{A}^{e2}(\mu_1, \mu_2), \mathbf{B}^{e2}(\mu_1, \mu_2))$ са управляеми. За примера се получава:

$$\begin{aligned} \text{rank}[\mathbf{Ob}^{e1}(\mu_1, \mu_2)] &= n=4, \text{rank}[\mathbf{Ob}^{e2}(\mu_1, \mu_2)] = 4, \\ \text{rank}[\mathbf{Cb}^{e1}(\mu_1, \mu_2)] &= n=4, \text{rank}[\mathbf{Cb}^{e2}(\mu_1, \mu_2)] = 4, \end{aligned}$$

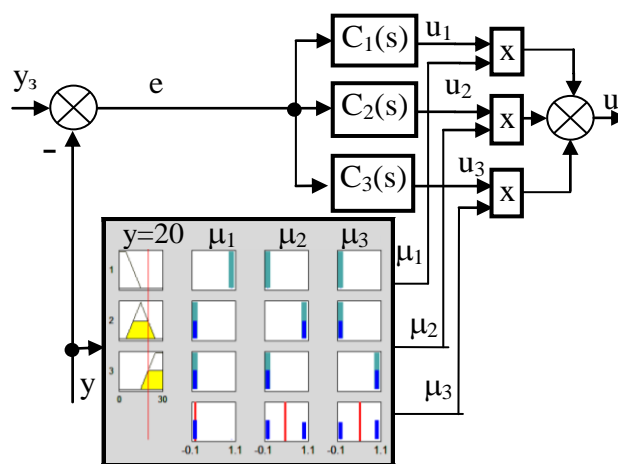
което доказва, че нелинейният обект, описан с ТСК модела от фиг.2.5 е напълно наблюдаем и управляем и може да се използва за синтез на РР.

2.4. Разработване на честотно-времеви метод за синтез на ПИД базирани модифицирани РРи-ПРК за управление на SISO и MIMO обекти и валидиране на устойчивостта на затворената система Целта е да се разработят модифицирани РР-ПРК на основа на стандартни линейни локални регулатори и метод за техния синтез на база на модифицирани ТСК модели на нелинейните обекти. В компактното описание с предавателни функции и матрици на локалните обекти може да се отчете наличието на чисто закъснение, свързаност между променливите, моделна неопределеност и др., което да осигури синтез на РР-ПРК за управление с повишено качество.

Разработеният метод за синтез на модифицирани РР-ПРК за управление на SISO и MIMO обекти се основава на двуетапната схема:

- синтез на структура на модифициран РР-ПРК по образец на ТСК модела на обекта и определяне на параметрите на приети стандартни локални линейни регулатори с използване на известни честотни, инженерни или оптимизационни методи. Най-често използваните в инженерната практика методи за настройка на стандартни линейни регулатори са разработени на основа на най-разпространените за управление на процесни променливи трипараметрични локални модели (K, T, τ) на Циглер-Николс (ZN). Това може да наложи предварителна апроксимация на локалните обекти, описани с друг тип предавателни функции, към ZN модели;
- валидиране на устойчивостта на затворената система след привеждане на описанието в класическа ТСК-ПРК форма с използване на времеви методи.

За известен валидиран наблюдаем и управляем модифициран ТСК модел на обекта може да се синтезира съответен нелинеен модифициран РР-ПРК с примерна структура, показана на фиг.2.7. Сугено моделът е същият като на модифицирания ТСК модел на обекта. Линеината динамична част се състои от паралелно работещи локални линейни регулатори, в случая позиционни ПИД базирани, описани с



Сугено модел

Фиг. 2.7. Модифициран РР-ПРК с три зони на линейна работа, вход на Сугено модела $y(t)$ и определени от експерти ортогонални ФП

предавателни функции $C_k(s) = K_p^k + K_I^k/s + K_D^k \cdot s$ ($K_{Ik} = K_{pk}/T_{ik}$, $K_{Dk} = K_{pk} \cdot T_{dk}$) с общ вход грешката на системата $e(t)$. Локалните регулатори се настройват по избран метод, гарантиращ устойчивост и желани показатели за качество на локалните линейни системи за управление на зададените с предавателни функции локални обекти. Изходът $u(t)$ на РР-ПРК се изчислява като претеглено средно от управленията $u_k(t)$ на локалните регулатори:

$$u(t) = \sum_{k=1}^N \text{output}_k^0(t) u_k(t) \quad , \quad (2.21)$$

където $\text{output}_k^0 = \mu_k / \sum_{i=1}^N \mu_i$ съгласно (2.3), като на фиг.2.7 $\sum_{i=1}^N \mu_i = 1$.

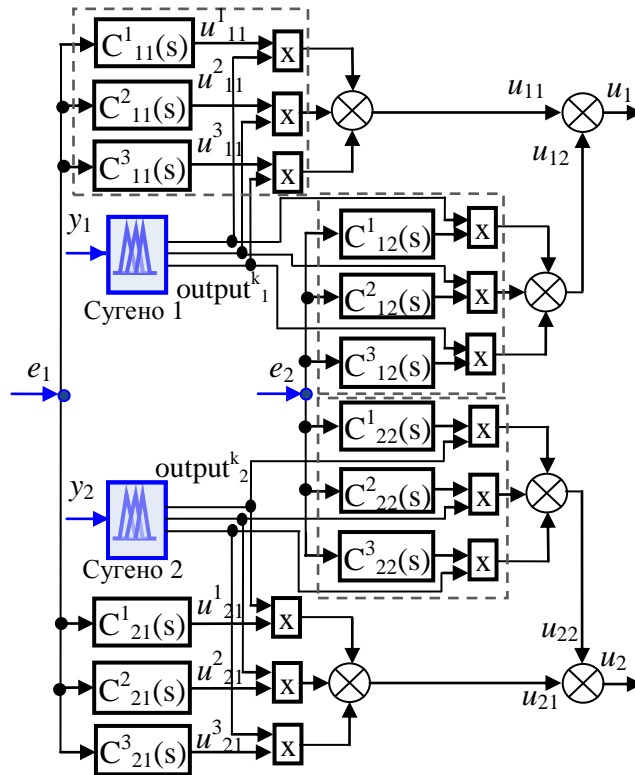
На фиг.2.8 е показан модифициран РР-ПРК с разгърнато представяне на двусвързани линейни локални регулатори в три зони на линейна работа. Предавателните функции $C_{ij}^k(s)$, ($i, j=1,2$), за k -та зона по канала с вход $e_j(t)$ и изход $u_i(t)$ са на линейни регулатори. Матричното представяне на локалния линеен регулатор в k -тата зона на линеаризация има вида:

$$\mathbf{C}^k(s) = \begin{bmatrix} C_{11}^k(s) & C_{12}^k(s) \\ C_{21}^k(s) & C_{22}^k(s) \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

като $u_{ij}^k(s) = C_{ij}^k(s) e_j(s)$, $u_{ij}(t) = \sum_{k=1}^N \text{output}_i^k \cdot u_{ij}^k(t)$, $u_i(t) = u_{i1}(t) + u_{i2}(t)$.

При скоростни алгоритми изходите на РР-ПРК $\dot{u}_i(s)$, както и техните компоненти $\dot{u}_{ij}^k(s)$, представляват скорости на промяна на управленията. Тогава предавателните функции $C_{ij}^k(s)$ са производни на предавателните функции на стандартните позиционни регулатори. Съответното за даден закон управление се получава, като изходът на РР-ПРК \dot{u}_{in} в момента t_n се интегрира или добавя към запазения изход u_{in-1} в предишния момент t_{n-1} $u_{in} = u_{in-1} + \Delta u_{in}$, $\dot{u}_{in} \approx \Delta u_{in}$. Ролята на интегратор може да се изпълнява от интегриращо изпълнително устройство или от обект без саморегулиране.

Синтезираната система от модифицирани ТСК модел на обекта и РР-ПРК се привежда в класическа форма на ТСК-ПРК описание в пространство на



Фиг. 2.8. Модифициран РР-РРК с двусвързани локални линейни регулатори в три зони на линейна работа

състоянията. Това е възможно след като интеграторът от локалните ПИ и ПИД регулатори се изнесе и приведе към модела на обекта, което означава позиционните алгоритми да се преобразуват в скоростни, а моделът на обекта да увеличи реда си с единица, като придобие последователно свързан интегратор.

За SISO ТСК модел на обект с ZN локални линейни обекти и ПИД РР-РРК се извеждат следните класически ТСК модел на обекта и РР-РРК:

$$R_k: \text{IF } z_1 \text{ is } L_{z1} \text{ AND } z_2 \text{ is } L_{z2} \text{ AND... } z_p \text{ is } L_{zp} \text{ THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}_{ko}x(t) + \mathbf{B}_{kd}\dot{u}(t - \tau_k) \\ y(t) = \mathbf{C}x(t) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$R_k: \text{IF } z_1 \text{ is } L_{z1} \text{ AND } z_2 \text{ is } L_{z2} \text{ AND... } z_p \text{ is } L_{zp} \text{ THEN } \begin{cases} \dot{u}(t) = -\mathbf{F}_kx(t) + \mathbf{G}_kx_3(t), \\ \text{или } \dot{u}(t) = K_{Ik}e(t) + K_{Pk}\dot{e}(t) + K_{Dk}\ddot{e}(t) \end{cases} \quad (2.16)$$

където: $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) = y(t) \\ x_2(t) = \dot{x}_1(t) \\ x_3(t) = \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}$ и $x_3 = \begin{bmatrix} x_{31} = y_3 \\ x_{32} = 0 \\ x_{33} = 0 \end{bmatrix}$ са векторите на променливите на

състоянието и на техните задания при постоянно задание $y_3 = \text{const}$;

$\mathbf{A}_{ko} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/T_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_{kd} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_k/T_k \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]$ са съответните матрици за

модела на k -тия локален обект, като долните индекси 'o' и 'd' означават отсъствие на закъснение в променливите на състоянието и наличие на закъснение в управлението; $\mathbf{F}_k = [K_{Ik} \ K_{Pk} \ K_{Dk}]$, $\mathbf{G}_i = [K_{Ik} \ 0 \ 0]$ са матриците на регулатора,

като K_{pk} , K_{Ik} и K_{Dk} са настройваните коефициенти пред пропорционалната, интегралната и диференциалната компоненти на скоростния ПИД в k -тата зона.

Устойчивостта на глобалната нелинейна система се изследва на база на ТСК-ПРК описанието (2.16)–(2.17), като се използват следните условия за устойчивост по Ляпунов:

$$\mathbf{P}\mathbf{A}_{ko} + \mathbf{A}_{ko}^T \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{B}_{kd} \mathbf{F}_k \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{F}_k^T \mathbf{B}_{kd}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} < \mathbf{0}, \quad (2.18)$$

$$\mathbf{P} \cdot 0,5(\mathbf{A}_{ko} + \mathbf{A}_{jo}) + [0,5(\mathbf{A}_{ko} + \mathbf{A}_{jo})]^T \mathbf{P} + 0,5(\mathbf{B}_{kd} \mathbf{F}_j \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{F}_j^T \mathbf{B}_{kd}^T + \mathbf{B}_{jd} \mathbf{F}_k \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{F}_k^T \mathbf{B}_{jd}^T) + \mathbf{Q} \leq \mathbf{0} \quad (2.19)$$

Достатъчното условие затворената система (2-16)-(2-17) да е устойчива по Ляпунов е да съществуват положително определени матрици $\mathbf{P} > \mathbf{0}$ и $\mathbf{Q} > \mathbf{0}$ такива, че следните матрични неравенства да са изпълнени за $k, j=1 \dots N, j > k$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}\mathbf{A}_{ko} + \mathbf{A}_{ko}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} & \mathbf{P}\mathbf{B}_{kd} \mathbf{F}_k \\ \mathbf{F}_k^T \mathbf{B}_{kd}^T \mathbf{P} & -\mathbf{Q} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} \mathbf{P} \cdot 0,5(\mathbf{A}_{ko} + \mathbf{A}_{jo}) + [0,5(\mathbf{A}_{ko} + \mathbf{A}_{jo})]^T \mathbf{P} + 0,5(\mathbf{B}_{kd} \mathbf{F}_j \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{F}_j^T \mathbf{B}_{kd}^T + \mathbf{B}_{jd} \mathbf{F}_k \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{F}_k^T \mathbf{B}_{jd}^T) + \mathbf{Q} \leq \mathbf{0} \\ -\mathbf{P} < -\mathbf{O} \\ -\mathbf{Q} < -\mathbf{O} \end{cases}$$

Тъй като отворената система е на границата на устойчивост поради наличието на интегратор в регулатора, се предлага условията за устойчивост да се засилят, като вместо положително определени матрици $\mathbf{P} > \mathbf{0}$ и $\mathbf{Q} > \mathbf{0}$ да се търсят матрици $\mathbf{P} > \mathbf{O}$ и $\mathbf{Q} > \mathbf{O}$, където \mathbf{O} е ненулева положително определена матрица, най-често диагонална с елементи малки положителни числа. Ако съществува решение, системата е устойчива, а ако – не, тя може да е устойчива или неустойчива. В този случай се търсят други ТСК модели при повече зони на линеаризация и други локални динамични модели.

За модифицирания ТСК модел на двусвързания обект за регулиране на нивата в скачени резервоари се синтезира модифициран РР-ПРК със структурата от фиг.2.8. Сугено моделите са като при ТСК модела на обекта с входове y_1 и y_2 . Основните регулатори на двусвързаните локални регулатори (2.22) са ПИ, а кръстосаните регулатори се определят от условия за автономност.

Параметрите на основните регулатори се изчисляват по ZN моделите на еквивалентните за тях при автономност обекти. Използват се инженерни и честотни методи за робастна устойчивост или робастно качество.

При необходимост получените кръстосани регулатори се привеждат към физически реализуеми типови динамични елементи. След това за улесняване на реализацията им те се апроксимират със звена от по-нисък ред, определени от типа на основните локални регулатори $C_{ii}^k(s)$.

Приведеното описание на системата от модифициран ТСК модел на обекта и модифициран РР-ПРК в класическа форма след преобразуване на локалните

позиционни ПИ регулаторите в скоростни и разширяване на модела на обекта на входа с интегратор добива вида:

$$\text{IF } y(t) \text{ is } M_k \text{ THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}_k x(t) + \mathbf{B}_k \dot{u}(t) \\ y(t) = \mathbf{C}_k x(t) \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\text{IF } y(t) \text{ is } M_k \text{ THEN } \begin{cases} \dot{u}(t) = -\mathbf{F}_k x(t) + \mathbf{G}_k y_3 \\ \text{or } \dot{u}(t) = K_{pk} \dot{e}(t) + K_{Ik} e(t) \end{cases} \quad (2.25)$$

Векторите на променливите на състоянието $x(t)$, управляващите въздействия $u(t)$, изходните променливи $y(t)$ и заданията им $y_3(t)$, както и грешките $e(t)$ в k -тата зона са съответно:

$$x(t) = [x^1(t) \ x^4(t) \ x^7(t) \ x^{10}(t)]^T; \ x^p(t) = \begin{bmatrix} x_p(t) = y_{ij}(t) \\ x_{p+1}(t) = \dot{x}_p(t) \\ x_{p+2}(t) = \dot{x}_{p+1}(t) \end{bmatrix}; \ u(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T;$$

$$y(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T; \ y_i(t) = y_{i1}(t) + y_{i2}(t); \ y_3 = [y_{31} \ y_{32}]^T;$$

$$e(t) = [e_1(t) \ e_2(t)]^T, \ e_i(t) = y_{ii}(t) - y_i(t), \ i, j = 1, 2; \ p = 1, 4, 7, 10.$$

Заклученията в правилата (2.24) описват динамиката на локалните двусвързани обекти по основните канали $y_{ii} - u_i$ ($p=1$ за $i=1$, $p=10$ за $i=2$) и кръстосаните връзки $y_{ji} - u_i$ ($p=4$ за $i=1$ и $j=2$, $p=7$ за $i=2$ и $j=1$), като всяко заключение съответства на представянето на обекта с последователно свързани две апериодични звена и интегратор от ПИ локалния регулатор.

За k -тата зона на линеаризация съответните матрици в (2.24) са:

$$\mathbf{A}_k = \text{diag}[\mathbf{A}_k^1 \ \mathbf{A}_k^4 \ \mathbf{A}_k^7 \ \mathbf{A}_k^{10}]_{12 \times 12}, \ \mathbf{A}_k^p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -(1/T_o T)_k^p & -[(T_o + T)/T_o T]_k^p \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_k^1 \\ \mathbf{B}_k^4 \\ \mathbf{B}_k^7 \\ \mathbf{B}_k^{10} \end{bmatrix}_{12 \times 2}, \ \mathbf{B}_k^{1,7} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ (K/T_o T)_k^{1,7} & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 2}, \ \mathbf{B}_k^{4,10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & (K/T_o T)_k^{4,10} \end{bmatrix}_{3 \times 2},$$

$$\mathbf{C}_k = [\mathbf{C}_k^1 \ \mathbf{C}_k^4 \ \mathbf{C}_k^7 \ \mathbf{C}_k^{10}]_{2 \times 12}, \ \mathbf{C}_k^{1,4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 3}, \ \mathbf{C}_k^{7,10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 3}.$$

Локалните линейни инкрементални ПИ основни и кръстосани регулатори в заключенията на (2.25) се описват с матриците:

$$\mathbf{F}_k = [\mathbf{K}_k^{1,7} | \mathbf{O}_{2 \times 1} \ \mathbf{K}_k^{1,7} | \mathbf{O}_{2 \times 1} \ \mathbf{K}_k^{4,10} | \mathbf{O}_{2 \times 1} \ \mathbf{K}_k^{4,10} | \mathbf{O}_{2 \times 1}]_{2 \times 12},$$

$$\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} K_{I11k} & K_{I12k} \\ K_{I21k} & K_{I22k} \end{bmatrix}_{2 \times 2}, \ \mathbf{K}_k^{1,7} = \begin{bmatrix} K_{I11k} & K_{p11k} \\ K_{I21k} & K_{p21k} \end{bmatrix}_{2 \times 2}, \ \mathbf{K}_k^{4,10} = \begin{bmatrix} K_{I12k} & K_{p12k} \\ K_{I22k} & K_{p22k} \end{bmatrix}_{2 \times 2}, \ \mathbf{O}_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

където $K_{ijjk} = K_{pij}^k / T_{ij}^k$.

Достатъчните условия системата (2.24)-(2.25) да има асимптотически устойчиво в цялост равновесно състояние по Ляпунов е да съществува обща за всички локални

линейни системи положително определена матрица $\mathbf{P} > \mathbf{0}$, която удовлетворява следните матрични неравенства за $k, m=1 \div N, m > k$ и степени на активиране на правилата $h_k \cap h_m \neq \emptyset$:

$$\begin{cases} M_{kk}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} M_{kk} < \mathbf{0} \\ 0.5(M_{km} + M_{mk})^T \mathbf{P} + 0.5\mathbf{P}(M_{km} + M_{mk}) \leq \mathbf{0}. \\ M_{km} = \mathbf{A}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{F}_m \end{cases} \quad (2.26)$$

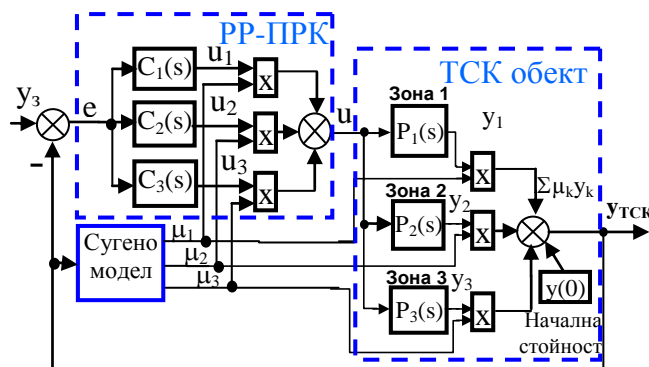
Съответните ЛМН за намирането на \mathbf{P} с помощта на числена процедура се състоят от (2.26) и добавеното ограничение ($-\mathbf{P} < \mathbf{0}$), което тук също е засилено до ($-\mathbf{P} < -\mathbf{O}$). Ако не може да бъде намерена числено такава матрица \mathbf{P} , синтезът на РР-ПРК се повтаря при други начални данни и ТСК модел.

2.5. Разработване на честотен метод за синтез на ПИД базирани РРи-ПРК за управление на обекти от условия за устойчивост на затворената ТСК-ПРК система

Целта е да се предложи честотен метод за пряк синтез на глобалната нелинейна система с модифициран РР-ПРК при отчитане на закъснението, многосвързаността и/или моделна неопределеност на нелинейни обекти. Структурата на модифицирания РР-ПРК от Сугено модел е определена от ТСК модела на обекта. Параметрите на локалните линейни регулатори се изчисляват от изисквания за устойчивост и робастност на глобалната нелинейна система, изведени в честотната област, и свързаните с тях показатели за качество като запаси по модул C и фаза γ , степен на колебателност m , показател на колебателност M , срязваща ω_{cp} /пикова ω_p честота и др. Тези показатели дават косвена оценка на измеримите по преходните процеси на затворената линейна система времеви показатели – време на регулиране t_p , максимално динамично отклонение u_m , затихване Ψ , пререгулиране σ и т.н.

Методът се основава на дефиниране на честотна характеристика за нелинейна система, описана с ТСК-ПРК модел, и е приложим за SISO и MIMO обекти и локални линейни регулатори със стандартни и по-сложни алгоритми.

Разглежда се SISO системата от фиг.2.10 от модифициран РР-ПРК и модифициран ТСК модел на обекта със Сугено модел за три зони на линеаризация при вход $y(t)$ и ортогонални ФП. Предавателните функции на локалния линеен обект и съответния



Фиг. 2.10. Затворена система с модифицирани РР-ПРК и ТСК модел на обекта

регулатор в k -тата зона са съответно $P_k(s)$ и $C_k(s)$. Всяко конкретно измерване на $y(t_n)=y_n$ в момента t_n се преобразува от Сугено модела в комбинация от стойности на ФП на принадлежност към трите дефинирани зони $y_n \rightarrow (\mu_1^n \mu_2^n \mu_3^n)$ на изхода му, като $\mu_1^n + \mu_2^n + \mu_3^n = 1$. Управлението към обекта се изчислява на база на текущата грешка $e_n = y_3 - y_n$, алгоритмите и параметрите на линейните регулатори във всичките три зони и комбинацията $(\mu_1^n \mu_2^n \mu_3^n)$:

$$u_n = \mu_1^n u_1^n + \mu_2^n u_2^n + \mu_3^n u_3^n. \quad (2.29)$$

като за ПИ локални регулатори

$$u_k^n = u_k^{n-1} + (K_{pk} + K_{Ik} \cdot \Delta t) e_n + K_{pk} \cdot e_{n-1} \text{ или } u_k^n = K_{pk} e_n + K_{Ik} \cdot \Delta t \sum_{i=1}^n e_i.$$

На всяка комбинация $(\mu_1^n \mu_2^n \mu_3^n)$ може да се съпостави еквивалентен линеен обект с вход u_n и изход:

$$y_n = \mu_1^n y_1^n + \mu_2^n y_2^n + \mu_3^n y_3^n, \quad (2.30)$$

описан с предавателна функция $P_k^{eqn}(s)$ и получен като претеглено средно от изходите на локалните линейни обекти. На всеки еквивалентен линеен обект съответства еквивалентен линеен регулатор $C_k^{eqn}(s)$ с вход e_n и изход u_n , определен като претеглено средно от локалните линейни регулатори.

Следователно затворената нелинейна ТСК-ПРК система може да се разглежда като семейство от затворени линейни системи от възможните двойки еквивалентен линеен обект и съответен еквивалентен линеен регулатор, получени за всички комбинации $(\mu_1 \mu_2 \mu_3)$. Теоретически тези комбинации са безкрайно много, тъй като $\mu_1 \div \mu_3$ заемат непрекъснати стойности в интервала $[0, 1]$. За общия случай на N зони на линеаризация и неортогонални ФП на Сугено модела предавателните функции на еквивалентния обект и регулатор за измерен изход y_n се дефинират като:

$$P^{eqn}(s) = \sum_{k=1}^N \mu_k(y^n(s)) P_k(s) / \sum_{k=1}^N \mu_k(y^n(s)), C^{eqn}(s) = \sum_{k=1}^N \mu_k(y^n(s)) C_k(s) / \sum_{k=1}^N \mu_k(y^n(s)) \quad (2.31)$$

Описанието (2.31) позволява да се дефинира Найквист характеристика $W_{OL}^{eqn}(j\omega)$ на еквивалентна отворена система и амплитудно честотна характеристика или спектър $A_{CL}^{eqn}(\omega)$ на еквивалентна затворена система. „Най-лошата“ Найквист характеристика за някаква комбинация $(\mu_1 \mu_2 \mu_3)$, за която ходографът на Найквист е разположен най-близко до точката на Найквист $(-1, j0)$ определя еквивалентните запаси по модул и фаза на нелинейната ТСК-ПРК система $C^{eq} = \min_n (C^{eqn})$ и

$\gamma^{eq} = \min_n (\gamma^{eqn})$. От показателите на колебателност на всички еквивалентни затворени системи $M^{eqn} = A_{CLmax}^{eqn}(\omega_p^n)$ този с най-голяма стойност определя еквивалентния показател на колебателност $M^{eq} = \max_n (M^{eqn})$ за нелинейната ТСК-ПРК система.

Дефинираните понятия позволяват едновременен синтез на всички локални линейни регулатори при критерий за осигуряване на желани запаси по модул и фаза $(C_d^{eq}, \gamma_d^{eq})$ или на желан показател на колебателност M_d^{eq} , което гарантира също така

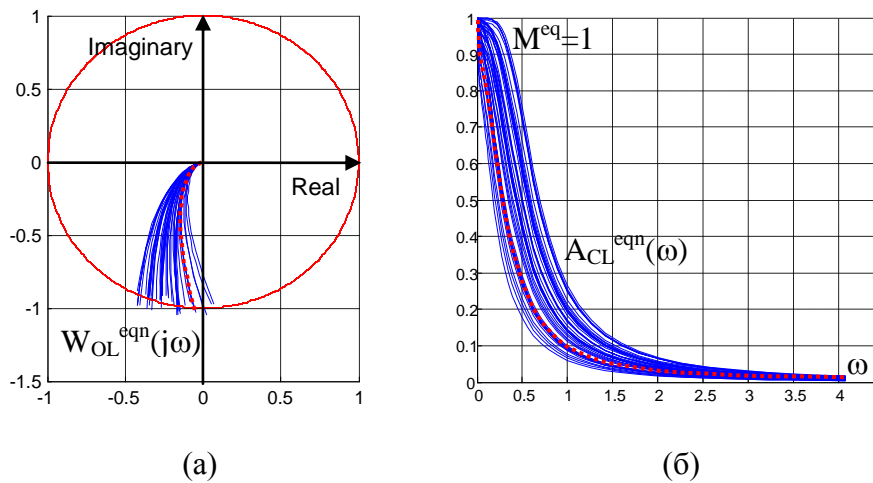
устойчивост, робастност и добри времеви показатели на затворената нелинейна система. Към Найквист характеристиките на еквивалентните отворени системи може да се добавят дискове на моделна неопределеност и да се използват критерии за еквивалентна робастна устойчивост и еквивалентно робастно качество. За ММО система е приложим обобщеният критерий на Найквист за гарантиране на запаси на устойчивост за „най-лошия“ случай на еквивалентна затворена система.

Параметрите $\mathbf{q}_{\text{ПРК}} = [\mathbf{q}_{\text{ПРК}j}]$ на локалните линейни регулатори, които зависят от избрания алгоритъм на регулаторите, се определят по следния начин. Интервалът $[0, 1]$ за всяка ФП μ_k се дискретизира с избрана постоянна стъпка $\Delta\mu_k$. Получава се вектор от дискретните стойности $\mu_k = [\mu_k^n]$, съответстващи на възможните конкретни измервания на входа. Изчисляват се краен брой комбинации $\mu = (\mu_1 \mu_2 \dots \mu_N)$. Определят се начални стойности за търсените параметри $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}^0$ по инженерни методи с отчитане на параметрите на съответните локални обекти. Спрямо тях се задават обхвати от допустимите стойности за $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}$ и в тях се извършва дискретизация на всеки от параметрите с фиксирана стъпка $\Delta\mathbf{q}_{\text{ПРК}j}$. Определят се възможните комбинации от дискретни стойности за различните параметрите. За всяка комбинация от параметри се построяват $W_{\text{OL}}^{\text{eqn}}(j\omega)$ и/или $A_{\text{CL}}^{\text{eqn}}(\omega)$ за всички комбинации от дискретни стойности за $\mu = (\mu_1 \mu_2 \dots \mu_N)$. Оптималните параметри $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}^{\text{опт}}$ са тези, за които Найквист характеристиките $W_{\text{OL}}^{\text{eqn}}(j\omega)$ и/или спектрите $A_{\text{CL}}^{\text{eqn}}(\omega)$ удовлетворяват избрания честотен показател за качество на нелинейната система. При повече оптимални параметри се използва допълнителен критерий за избор на единствено оптимално решение за параметрите на РР-ПРК. При неудовлетворяване на приетия честотен критерий синтезът се повтаря при по-малки стъпки на дискретизация за параметрите $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}$ и за ФП.

Процедурата се повтаря при намалена стъпка $\Delta\mu_k$, докато получените решения при две съседни стъпки са достатъчно близки. Тогава решението е числено устойчиво и доближава аналоговото при непрекъснати ФП.

Чрез симулационни изследвания на затворената система с оптимално настроен РР-ПРК и ТСК модел на обекта се проверява дали са постигнати заложените при синтеза показатели за качество. Ако не са постигнати, синтезът се повтаря при по-малки стъпки на дискретизация за $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}$ и за ФП.

На фиг.2.13 са показани Найквист характеристики и спектри, за които е удовлетворен критерият $M^{\text{eq}}=1$ при синтеза на РР-ПРК с ПИ локални регулатори и структура от фиг.2.7 за регулиране на температурата на въздуха в лабораторен модел на тунелна сушилна. Оптималните $W_{\text{OL}}^{\text{eqn}}(j\omega)$ и $A_{\text{CL}}^{\text{eqn}}(\omega)$ за $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}^{\text{опт}}$ са дадени с точкувана линия. Намаляването на стъпката $\Delta\mu_k$ не променя решението. Симулационните изследвания на преходните процеси на системи с ТСК модел на обекта и РР-ПРК с различни стойности на параметрите показват, че при $\mathbf{q}_{\text{ПРК}}^{\text{опт}}$ процесите са без пререгулиране и с най-малко t_p в съответствие с критерия за синтез на РР-ПРК.

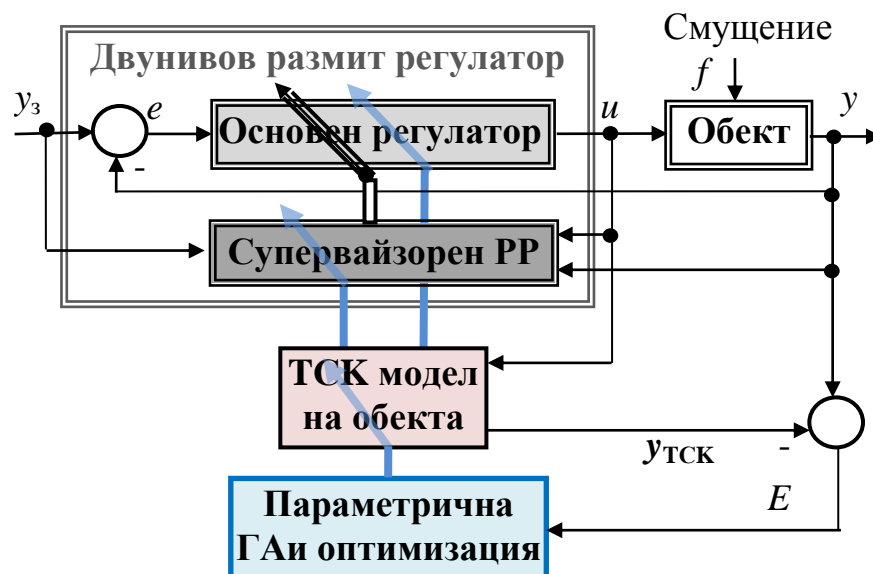


Фиг. 2.13. Найквист характеристики (а) на еквивалентни отворени системи и спектри (б) на еквивалентни затворени системи с $M^{eq}=1$ – за $q_{ПРК}^{opt}$ с точкувана линия

Глава 3 Методи за синтез на адаптивни системи за управление на процеси с използване на параметрична оптимизация и размит супервайзор

3.1. Постановка на задачата Настройката и способността за адаптация към промени в обекта на Мамдани РР и на синтезиран РР-ПРК по изведен ТСК модел на обекта от експерименти на система с Мамдани РР могат да се оптимизират off-line с помощта на ГАи или непрекъснато on-line от СРР. Целта е да се изследват възможностите на всеки от двата подхода, както и тяхното съчетаване за подобряване на показателите за качество и енергийна ефективност на реалната нелинейна система и на тази база да се предложат удобни за приложение в инженерната практика методи за синтез на адаптивни РРи с ПЛК реализация.

На фиг.3.1 е показана общата блокова схема на адаптивна система с двунивов регулатор от основен регулатор и СРР за нелинейна автоматична корекция на настройката на основния регулатор и ГАи оптимизатор.



Фиг. 3.1. Система с двунивов размит регулатор

Основният регулатор осигурява устойчивостта на затворената система. Той може да е линеен на база на ПИД или по-сложен (робастен ИМС, предиктор на Смит, апериодичен регулатор и др.), Мамдани/Сугено РР с един (SISO) или с два входа (2ISO), инкрементален или позиционен ПИД базиран, РР-ПРК с различни локални линейни регулатори, невронен или НР. Линейните регулатори се настройват по известни инженерни методи. РРи използват стандартни размити правила и неголям брой стандартни ФП, дефинирани в нормализирано универсално пространство.

СРР се изгражда от 2ISO и SISO РЕи, по една РЕ за всеки настройван параметър. Входи на РЕи са оценки за показателите на качество, които се изчисляват on-line на база на променливи от надеждни измервания. Показателите за качество се представят с малко на брой стандартни ФП, предимно ортогонални, в известни абсолютни универсални пространства и „Норма“, и размити правила, изведени от връзката между показателите и настройваните параметри. Изходните на РЕи служат за промяна на коефициентите на основния регулатор.

Всички поставени изисквания за несложна структура на двунивовия регулатор, лесен синтез, малък брой параметри за настройка със значителен ефект върху показателите на системата и малък брой проби и грешки гарантират промишлената приложимост на регулатора.

3.2. Разработване на метод за синтез на пасивно адаптивни регулатори на база на параметрична оптимизация и генетични алгоритми Предполага се, че: 1) обектът е гладко нелинеен с плавно изменящи се параметри в ограничена област, като промените не могат да бъдат оценени, може да са в големи граници и се обуславят от работата на обекта в различни режими и условия, стареене, нестационарност и др.; 2) за обекта има изведен и валидиран ТСК модел; 3) адаптивният регулатор, който се синтезира, има несложен за реализация в ПЛК стандартен алгоритъм.

Векторът от настройвани параметри \mathbf{q}_p се изчислява при off-line оптимизация на приета целева функция от показатели за качество на управление. Използват се ГАи и симулационни изследвания на затворената система на база на ТСК модела на обекта по изготвен план на експериментите.

Разглежда се система от модифицирани ТСК модел на обекта и РР-ПРК с локални ПИ регулатори. Неизвестните параметри за настройка $\mathbf{q}_{\text{ПИ-ПРК}}$ са параметрите на локалните ПИ линейни регулатори (K_p^k, T_i^k). ГАи off-line оптимизацията използва целевата функция:

$$F_{\text{ПИ-ПРК}} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |e_n| + \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M u_n + \max\left(\frac{y}{y_3 D_3}\right) + \frac{\max(y_m)}{D_3} \rightarrow \min_{\mathbf{q}_{\text{ПИ-ПРК}}}, \quad (3.1)$$

където M е размерността на извадката от дискретни стойности за сигналите, получени от добре планирани симулационни експерименти, и $u_n \geq 0$.

В (3.1) се минимизира сумата от средните стойности на модула на грешката и управлението и най-големите стойности спрямо обхвата на заданието D_3 на

относителното недорегулиране и пререгулиране $\sigma=y/y_3$ и максималното динамично отклонение y_m . Така се постига динамична точност на регулиране при ограничаване на определени показатели и намалено управляващо въздействие, еквивалентно на намален разход на енергия за управление.

При възможност показателите на синтезираната система се сравняват с показателите на симулирана система с алтернативно управление, например с ПИ РР с емпирична настройка. Най-често оценяваните показатели за качество на процесите са t_p и σ , а за управлението u - максималната стойност U_{max} и амплитудата на колебанията A_U , които може да се приемат за оценка на енергията, използвана за управление. Управление с големи по амплитуда колебания показва ниска енергийна ефективност. Робастността на системата за управление и свойството да се адаптира при промени в обекта може да се оценят по предложени индекс $Rob=|\Pi-\Pi_{min}|/\Pi_{max}$, където Π_{min} е най-малката (желаната) стойност на показателя, изчислена за някой от преходните процеси, а Π_{max} – най-голямата (най-лошата). При малка стойност на **Rob** преходните процеси запазват своите показатели при промяна на параметрите на нелинейния обект, т.е. системата е робастна.

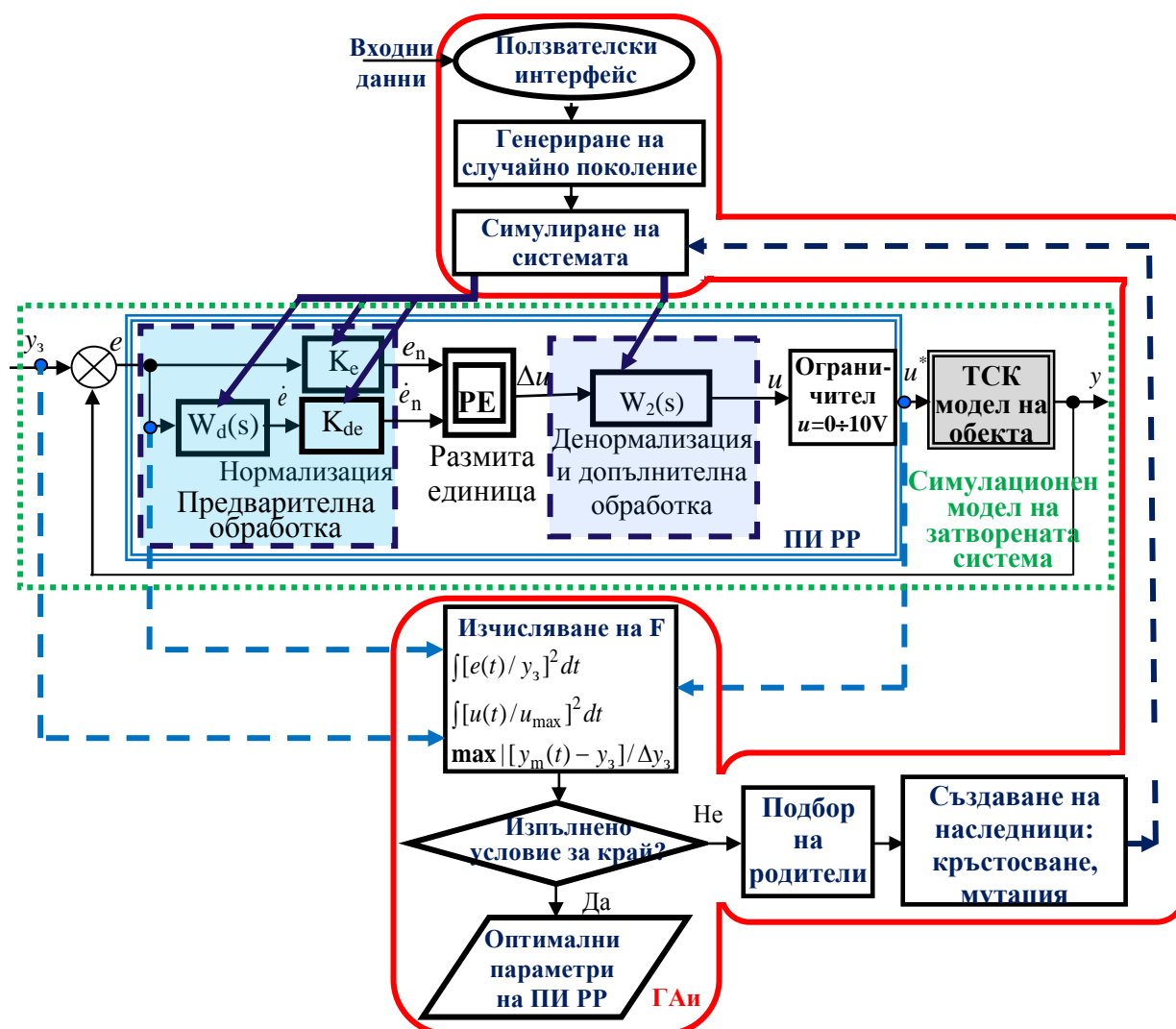
При недостатъчно добри стойности на **F** или на показателите **Π** и **Rob** процедурата се повтаря при други начални данни, нова случайна инициализация на параметрите, променени граници за параметрите и извадка от данни от симулация.

Регулаторът с получените оптимални параметри q_p^{opt} гарантира преходни процеси на затворената система с добри стойности на включените в целевата функция показатели. Тези показатели дават осреднена оценка на поведението на затворената система за предвидените при симулацията въздействия върху нея. Колкото повече тези въздействия се доближават до въздействията от индустриалната среда, в която функционира реалният обект, толкова по-добре синтезираният регулатор ще осъществява адаптивно съгласно условията и обекта управление.

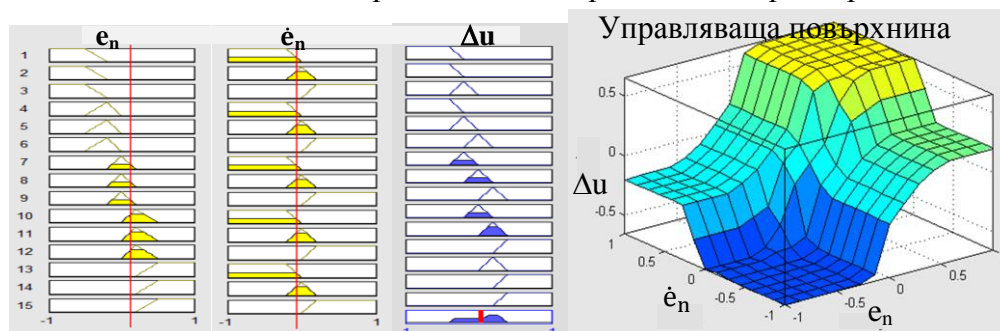
Разглежда се регулирането на нивото $y=H$ на течност в резервоар чрез напрежението U към усилвателя на постоянно-токова помпа, разположена на дъното на събирателен съд, която подкачва течността от съда към върха на резервоара над него. За управлението на нивото е синтезиран Мамдани инкрементален ПИ 2ISO РР, показан на фиг.3.5, със стандартни ФП и правила от фиг.3.6, и емпирично определени начални параметри $q_{ПИ-РР}^*$. Сигналите U_{ex} и y_{ex} от управление на нивото в реално време са използвани за ТСК моделиране на обекта при три зони на линеаризация. Параметрите на ПИ РР $q_{ПИ РР}=[K_e (K_d.K_{de}) T_d K_{du}]$ се оптимизират с помощта на ГАи да минимизират следната целева функция:

$$F_{ПИ РР} = \int [e(t)/y_3]^2 dt + \int [u(t)/u_{max}]^2 dt + \max | [y_m(t) - y_3] / \Delta y_3 | \rightarrow \min_{q_{ПИ РР}} \quad (3.2)$$

В (3.2) се обединяват изискванията към: 1) интегрално-квадратичната относителна грешка спрямо заданието y_3 ; 2) интеграла от квадрата на относителното управляващо въздействие спрямо максималното u_{max} и 3) максималното за всички



Фиг. 3.5. Off-line оптимизация чрез ГАи на настройваните параметри на ПИ РР

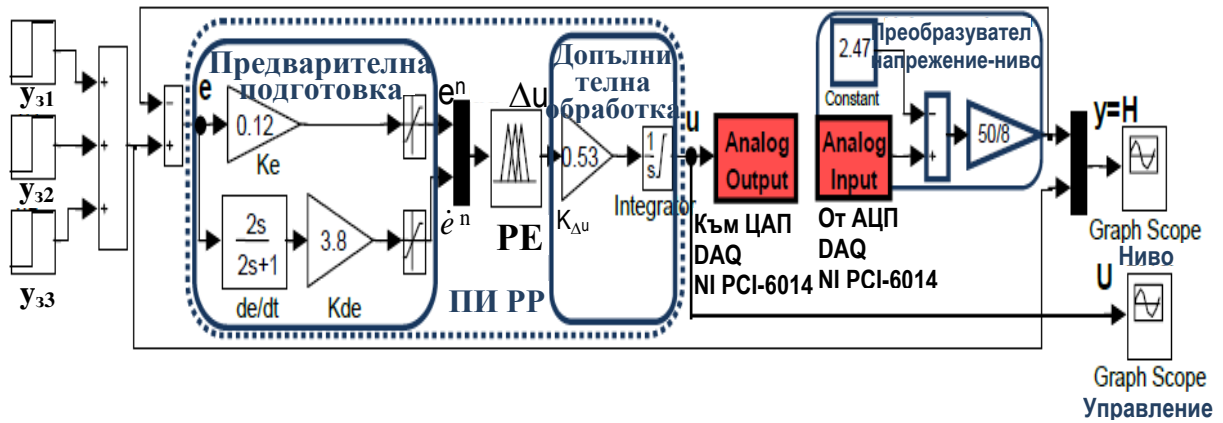


Фиг. 3.6. ФП, правила и управляваща повърхнина на размитата единица на ПИ РР

преходни процеси по задание пререгулиране - $\max |[y_m(t) - y_3] / \Delta y_3|$, като y_m е най-голямата стойност на изхода и $y_m > y_3$ при промяна на заданието $\Delta y_3 > 0$ или y_m е най-малката стойност и $y_m < y_3$ при $\Delta y_3 < 0$.

Оптимизаторът на база на ГАи и взаимодействието му със симулационния модел, използван за изчисляване на целевата функция (3.2) на затворената система, са показани на фиг.3.5.

Управлението на нивото в MATLAB™ реално време се осъществява с помощта на Simulink модел на синтезирания ПИ РР, показан от фиг.3.7. При такт на дискретизация Δt измерената стойност за нивото от трансмитера на сензора за ниво



Фиг. 3.7. Simulink модел на ПИ РР за управление в реално време

постъпва в аналогово-цифровия преобразувател на интерфейсната платка (DAQ) и се прочита чрез драйвера Analog Input в Simulink модела. Там се преобразува от напрежение в ниво, показва се на екрана, сравнява се с текущото задание и постъпва за предварителна подготовка на входните сигнали за РЕ. В РЕ се изчислява деразмито заключение Δu и извежда за допълнителна обработка за получаване на крайното управление, което се ограничава в обхвата $[0,10]V$, показва се на екрана и се извежда с помощта на драйвера Analog Output през цифрово-аналоговия преобразувател на DAQ към усилвателя на помпата.

На фиг.3.8 са представени преходните процеси на нивото в резервоара от симулация и управление в реално време. Изследвани са системи с емпирична и оптимална настройка на параметрите на ПИ РР. Показателите на системите за управление в реално време и на системите за управление на ТСК модела на обекта чрез симулации са относително близки за всеки тип настройка. Това е потвърждение, че изведеният ТСК модел на обекта е достатъчно точен и следователно получените на негова база оптимални параметри на ПИ РР осигуряват възможно най-добрите показатели на системата. Системата с ПИ РР с оптимални параметри има по-добри показатели от системата с емпирично настроен ПИ РР.



Фиг. 3.8. Преходни процеси на нивото при управление с ПИ РРи

Намалени са: 1) пререгулирането до нула за първите два преходни процеса и два пъти за третия; 2) времето на регулиране средно 1.3 пъти; 3) U_{\max} средно 1.33 пъти; 4) A_U средно 2.6 пъти. Преходните процеси запазват своите показатели при промяна на параметрите на нелинейния обект с работната точка на обекта (заданието). Това показва, че оптимизацията на настройката с използване на ГАи е перспективна техника за подобряване на робастността и способността на системата да се адаптира.

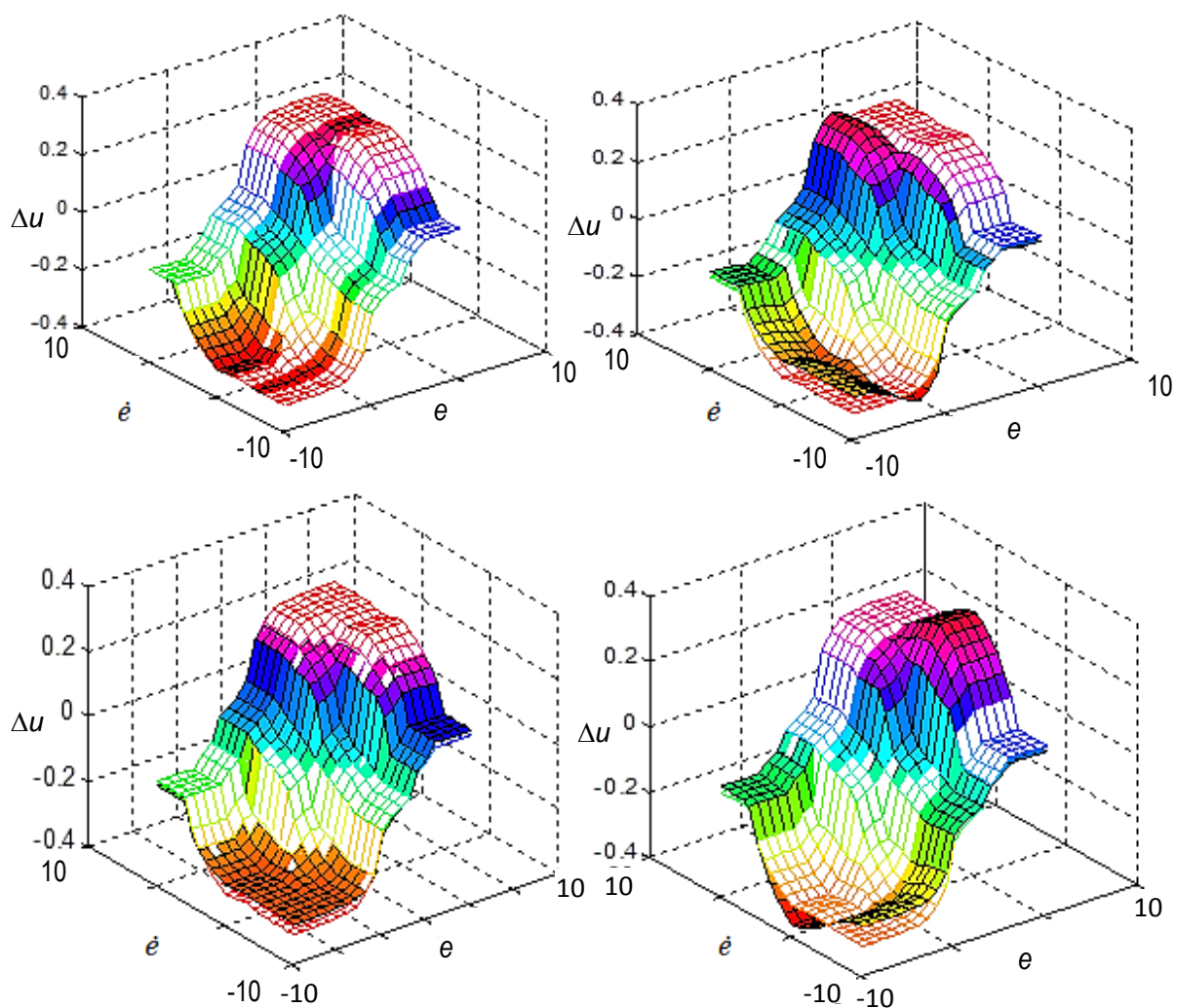
3.3. Разработване на метод за синтез на адаптивни на база на размит супервайзор регулатори за управление на SISO и MIMO обекти Целта е да се разработи метод и процедура за синтез АСРР на база на минимална експертна информация за обекта при осигуряване на лесен синтез и реализация на АСРР, сходимост на адаптацията и устойчивост на системата.

Предполага се, че нужните промени в управлението се постигат с адаптация на коефициентите на основния регулатор q_{OP} , които са параметри на широко разпространените в промишлеността различни по тип регулатори.

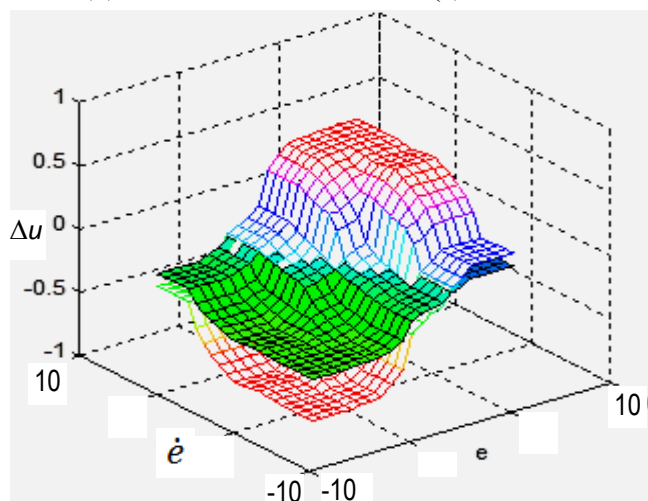
Динамичната промяна на q_{OP} е несложен подход за постигане на желани глобални и локални изменения в управляващата повърхнина. За РРи той е еквивалентен по резултат на по-сложните техники на адаптация на ФП и размити правила. Това предопределя успешната адаптация на системата към произволни промени в обекта, които се регистрират в отклоненията на показателите за качество на основната затворена система спрямо „нормите“ им. Адаптацията цели оптимизиране на тези показатели чрез поддържането им в дефинираните „норми“.

На фиг.3.11 са показани измененията в управляващата повърхнина на инкрементален Мамдани ПИ РР в резултат на действието на СРР. ПИ РР има изход Δu и емпирично настроени базови стойности на мащабиращите коефициенти. Използва се СРР от една РЕ при две Гаусови ФП поотделно за входа и изхода и размити правила, определени от връзката „Голям вход- голям изход“. Изследвани са различни конфигурации на СРР от комбинации на входни показатели и изходи на РЕ. Показателите са нормализираните измерени текущи стойности за $|e|$, $|\dot{e}|$, $|\Delta u|$. Изходите $k_s=[k_{si}]=[k_e k_{de} k_{\Delta u}]$ служат за мултипликативна корекция на $q_{OP} - K_e=k_e K_e^0$, $K_{de}=k_{de} K_{de}^0$ и $K_{\Delta u}=k_{\Delta u} K_{\Delta u}^0$. При различните конфигурации СРР променя различни области на управляващата повърхнина.

За сравнение на фиг.3.12 са показани управляващите повърхнини само на основния ПИ РР за две различни фиксирани стойности на мащабиращия коефициент $K_{\Delta u}$. Наблюдаваният ефект е равномерно свиване на цялата управляваща повърхнина по оста Δu за по-малката стойност на $K_{\Delta u}$. Тези изследвания показват, че непрекъснатата автоматична настройка на мащабиращите коефициенти може успешно да се използва за адаптация на управляващата повърхнина с цел компенсиране на промените в показателите вследствие изменения в обекта.



Фиг. 3.11. Управляваща повърхнина на основен РР (цветна мрежа) и на РР със СРР (плътен цвят) за различни конфигурации на СРР: (а) с вход e и изход k_{de} ; (б) с вход e и изход $k_{\Delta u}$; (в) с вход Δu и изход $k_{\Delta u}$; (г) с вход \dot{e} и изход $k_{\Delta u}$



Фиг. 3.12. Управляваща повърхнина на основен РР за $K_{\Delta u} = 1$ (цветна мрежа) и за $K_{\Delta u} = 0.5$ (плътен цвят)

Синтезът на двунивовия АСРР се декомпозира на следните етапи:

1. Синтез на основен регулатор, който може да е емпиричен без модел на обекта

или да използва изведен ТСК модел на обекта.

2. Определяне на показателите за качество и енергоефективност на управлението, които следва да се подобрят, от изследване на затворената система за управление на обекта в реално време. Тези показатели са входове на РЕи на СРР.

3. Синтез на СРР - определяне на ефективна конфигурация от малко на брой SISO и 2ISO РЕи с правилно подбрани входове и корекция с оглед максимално подобряване на определените в етап 2 показатели, и синтез на стандартни и малко на брой ФП в абсолютни универсални пространства и размити правила.

Използват се два подхода за синтез на СРР – емпиричен и системен. Емпиричният подход се базира на емпирични зависимости между показатели за качество на управлението в системата с основен регулатор и настройвани параметри q_{OP} и оценка на подобренията на показателите за качество и енергийна ефективност на управлението в резултат наличието на СРР.

Системният подход се прилага при наличен ТСК модел на обекта, като се анализират относителните функции на чувствителност на всички показатели на системата към промяна на всички настройвани параметри чрез симулационни изследвания и се избира оптимална конфигурация на СРР. Подобренията на показателите за качество и енергийна ефективност на управлението в резултат наличието на СРР се оценяват чрез сравнителен анализ на показателите на системите без и със СРР в симулационни изследвания. При необходимост базовите параметри на двунивоия РР се оптимизират с използване на ГАи.

4. Анализ на сходимост на адаптацията на q_{OP} чрез симулационни изследвания или от управление в реално време.

5. Апроксимация на двунивоия РР към функционално еквивалентен РР-ПРК с опростена структура.

Използва се наличен ТСК модел на обекта и параметрична оптимизация на база на ГАи и данни от симулация на регулатора.

Получената опростената структура на РР-ПРК с една РЕ улеснява анализа на устойчивост на затворената система с двунивоия РР, а също така и реализацията на двунивоия РР в индустриален ПЛК.

6. Анализ на устойчивост на затворената система.

Използва се класическото ТСК-ПРК описание на затворената система и съчетаване на непрекия метод на Ляпунов с ЛМН. При отсъствие на ТСК модел на обекта устойчивостта се валидира по метода на лингвистичната фазова траектория от управление в реално време.

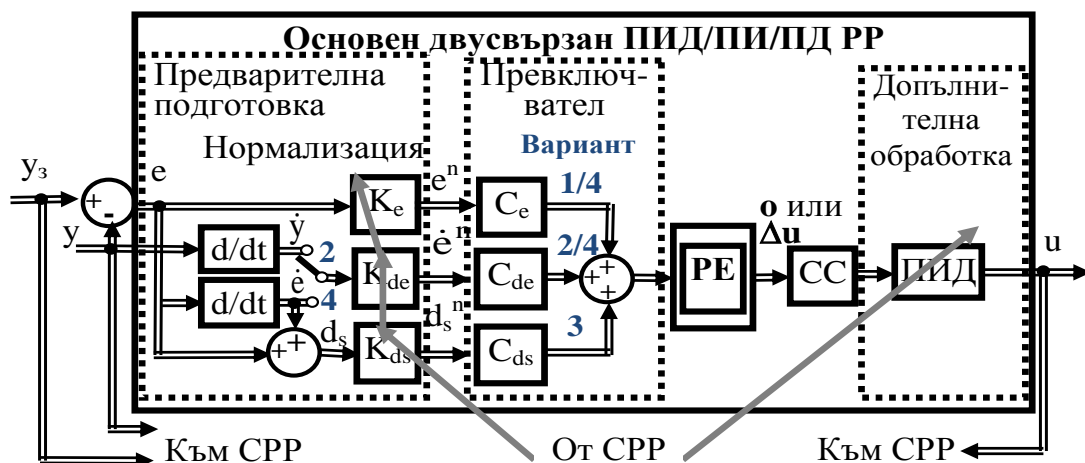
Разработеният метод се прилага за синтез на АСРР с основен двусвързан РР с матричната блокова схема от фиг.3.15. Двусвързаният РР има симетрична структура от два идентични РРи по главните канали, които са свързани чрез входовете или изходите на своите РЕи. Всеки РР по главен канал включва:

1) модул за предварителна подготовка на входните сигнали за РЕ, в който се

- изчисляват $\dot{e}(t)$, $\dot{y}(t)$ и знаковото разстояние $d_s = e + \lambda \cdot \dot{e}$, и сигналите се нормализират в обхвата $[-1, 1]$ посредством мащабиращи коефициенти K_e , K_{de} и K_{ds} ;
- 2) модул превключвател за комутация на сигналите към входа на РЕ при конфигуриране на различни типове РРи – едновходови с вход e^n или d_s^n , двувходови с входове $[e^n, \dot{e}^n]$ или $[e^n, \dot{y}^n]$;
 - 3) SISO или 2ISO РЕи;
 - 4) модул за кръстосана връзка СС между изходите на РЕи на главните канали;
 - 5) модул за допълнителна обработка за получаване на желания нелинеен алгоритъм ПИ, ПД или ПИД.

Кръстосаните връзки между главните канали се описват с матриците C_e , C_{de} , C_{ds} и СС, дадени в Табл.3.3 за четири основни варианта.

Синтезът на основния двусвързан РР включва: конфигуриране за избран тип нелинеен алгоритъм за главните РРи и определяне на матриците C_e , C_{de} , C_{ds} и СС от Табл.3.3; синтез на главен РР за всеки от каналите с идентични за двата канала 2ISO РЕи със стандартни ортогонални ФП и стандартни правила; и определяне на базовите стойности на параметрите за настройка. Мащабиращите коефициенти



Фиг. 3.15. Основен двусвързан размит регулатор с 2I РЕ

Таблица 3.3. Кръстосани връзки в двусвързан РР с 2I РЕ

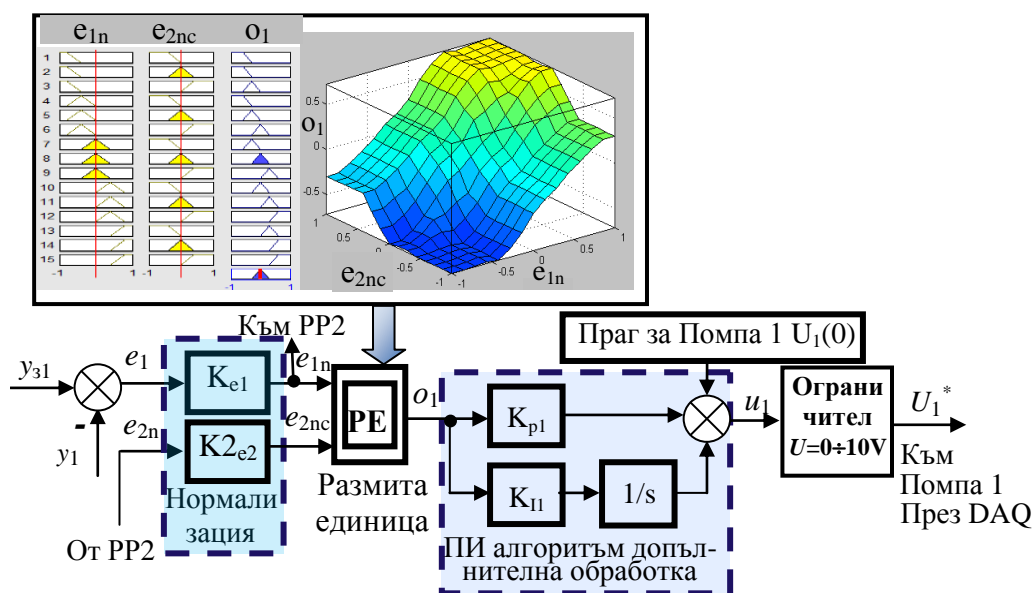
Вариант	C_e	C_{de}	C_{ds}	СС	2ISO РЕ _i входове $[x_{i1}^n, x_{i2}^n]$	2ISO РЕ _i изход	Допълнителна обработка за ПИ/ПИД РР
1	E	∅	∅	I	$[e_i^n, e_j^n]$	o_i^n	ПИ/ПИД
2	I	E-I	∅	I	$[e_i^n, \dot{y}_j^n]$	o_i^n	ПИ/ПИД
3	∅	∅	E	I	$[d_{si}^n, d_{sj}^n]$	Δu_i^n	Интегратор/ПИ
4	I	I	∅	E1	$[e_i^n, \dot{e}_i^n]$	Δu_i^n	Интегратор/ПИ
Пояснения	$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, ∅ - нулева матрица, $E = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, $E1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$, Δu_i – скорост на управлението, индекс 'n' за нормализирани сигнали в обхвата $[-1, 1]$, канали $i, j=1, 2, i \neq j$						

се изчисляват по средните или максималните очаквани амплитуди на грешките по двата канала $K_{ei}^0 = K_{dei}^0 = 1/|e_{\max i}|$, $K_{yi}^0 = K_{dyi}^0 = 1/|y_{\max i}|$. Параметрите от допълнителната обработка $\mathbf{q}_{PP}^0 = [K_{\Delta u_i}^0]$ за ПИ РР и $\mathbf{q}_{PP}^0 = [K_{pi}^0 \ T_{li}^0 \ T_{Di}^0]$ или $\mathbf{q}_{PP}^0 = [K_{ali}^0 \ K_{a2i}^0]$ за ПИД РР, се определят емпирично по наличен линеен модел на обекта или чрез ГАи параметрична оптимизация с помощта на симулиране при даден ТСК модел на обекта. Параметрите на диференциатора за получаване на производната \dot{e}_i^n или \dot{y}_j^n се настройват в зависимост от такта на дискретизация и шумовете от измерване.

На фиг. 3.16 е показан единият главен канал на емпирично синтезиран двусвързан основен ПИ РР по вариант 1 от Табл.3.3. Другият канал е аналогичен. Напреженията $U_i(0)$ компенсират прага на нечувствителност на помпите. Този регулатор се използва за управление на обекта в реално време и събиране на данни за ТСК моделирането му в гл. 2.

Системен подход се прилага за изчисляване на базовите стойности за параметрите на основен двусвързан РР за управление на относителната влажност и температурата в ОВК система. Главните регулатори са скоростни ПИ РРи, а кръстосаните връзки са вариант 2 от Табл. 3.3. Използва се критерий за робастна устойчивост на система с РР, който е разработен на основа на модифициран с условията за робастност критерий на Попов и получени номинален и „най-лош“ ZN модел на обекта по двата главни канала.

Синтезираният основен РР се реализира в индустриален ПЛК или Simulink модел, подобен на показания на фиг.3.7. Затворената система се изследва при разнообразни входни сигнали съгласно проектиран план на експериментите. По данните се извежда ТСК модел на обекта по методиката от гл. 2. ТСК моделът позволява симулационни изследвания за оптимизиране на \mathbf{q}_{PP}^0 чрез минимизация на избрана целева функция от показатели на процесите с използване на ГАи. ТСК моделът на обекта е база за синтез и на други типове основни регулатори като РР-ПРК или



Фиг. 3.16. Блокова схема на първи канал на основен двусвързан ПИ РР

линеен ПИД регулатор. Линеен модел на обекта може да се определи от средните стойности на параметрите на локалните обекти. Моделната неопределеност се оценява по най-големите разлики между осреднените и реалните параметри на локалните обекти.

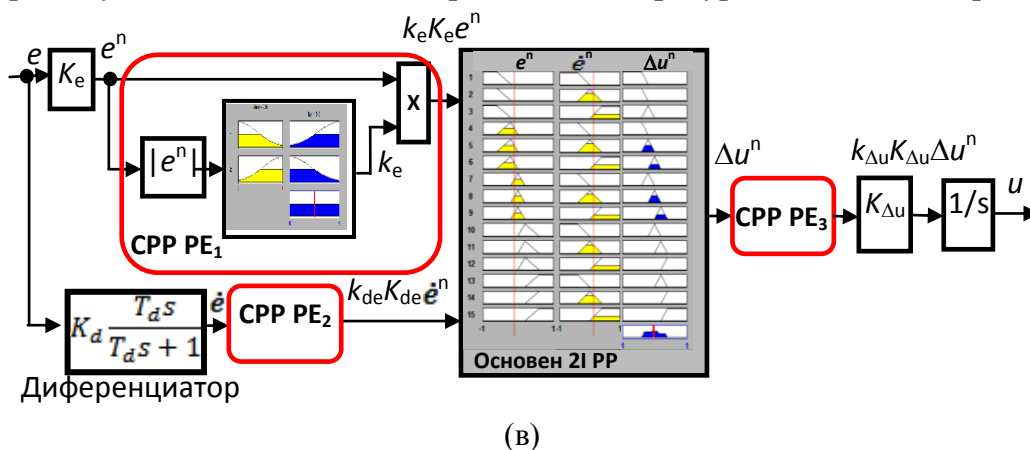
Основен линеен двусвързан регулатор се синтезира емпирично за регулиране на нивата в лабораторна система от свързани резервоари. Използва се изведен от известен модифициран ТСК модел линеен модел за най-тежкия случай за целия обхват на работа на обекта. Локалните регулатори по правите канали са ПИ, а кръстосаните регулатори реализират условия за автономност.

Синтезът на СРР се състои от конфигуриране, т.е. определяне на броя на PE_S и връзките им с измерваните величини и променяните параметри q_{OP} , и синтез на PE_S . Той може да е емпиричен на база на експертно знание или системен с използване на изведен ТСК модел на обекта за оптимизация на конфигурацията и анализ на устойчивост на затворената система. МИМО СРР използва симетрична конфигурация от идентични по структура СРРи към основните регулатори в отделните канали, за да се осигури структурна устойчивост на затворената МИМО система.

Входове на СРР са различни on-line измерени величини, на база на които се изчисляват тези показатели за качество Π_j , които се нуждаят от оптимизиране. Показателите са свързани с динамична точност, икономичност на управлението, интегрални оценки или средни стойности, изчислени след натрупване за определен период на M измервания във времето на абсолютни и относителни величини, комбинирани показатели от няколко съизмерими показатели, измерени величини и логически условия, прогнозни стойности, оценка на текущия коефициент на обекта K_{on} , която при закъснението в обекта $\tau \approx d \cdot \Delta t$ се изчислява във всеки дискретен момент от време $t_n = n \Delta t$ като

$$K_{on} = (y_n - y_{n-m}) / (u_{n-d} - u_{n-d-m}). \quad (3.4)$$

На фиг.3.21(в) е показан пример за двунивов РР от основен 2I РР и СРР с три PE_S . За определяне на оптималната съгласно приет критерий конфигурация на СРР се синтезират двунивови РР със СРРи с различни конфигурации. С тях се провежда



Фиг. 3.21. Примерни конфигурации на двунивови РРи от различни основни регулатори и СРРи: (а) ...; (в) при СРР с три PE_S ; ...

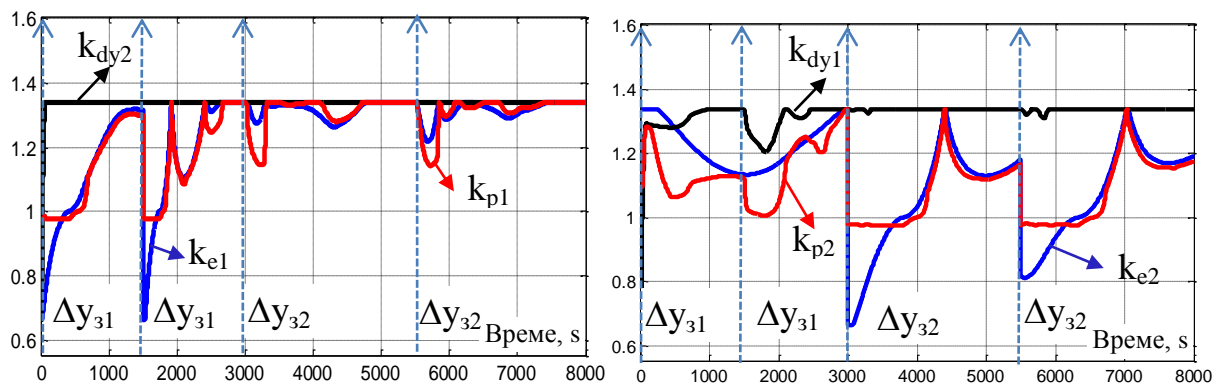
по планирани експерименти управление на реалния обект в реално време или симулационни изследванията при наличие на ТСК модел на обекта. Оценяват се показателите на затворените системи и се избира конфигурацията на CPP, за която приета функция на тези показатели има оптимална стойност. В целевата функция се отчитат оценки за сложност на CPP (брой на участващите PE_S и правилата в тях), динамична точност, енергийна ефективност и др. Пример за критерий за оптимална конфигурация е минимизиране на сумата от относителната динамична грешка, относителната средна стойност на енергия за управление и максималното отклонение от заданието:

$$F = \frac{\sum_{n=1}^M |e_n|}{y_3} + w \cdot \frac{\sum_{n=1}^M |u_n|}{M \cdot D_u} + \max\left(\frac{y}{y_3}\right) \rightarrow \min_{\text{CPP конфигурация}}, \quad (3.5)$$

където w е тегловен коефициент.

Енергийната ефективност се обуславя от кратко t_p , липса на пререгулиране и малко необходимо управляващо въздействие без колебания и с бързо установяване. Разходът на енергия за управление може да се оцени по натрупаното за времето на изследване t_f управляващо въздействие $u(t) \geq 0$, което косвено показва консумираната от мрежата енергия за управление $EEF = \int_0^{t_f} u(t) dt$. При МИМО системи тази оценка е сума от оценките EEF_i за управление на отделните регулируеми величини $\sum_i EEF_i$. При по-малка стойност на EEF енергоефективността на управлението е по-голяма, ако показателите за динамична точност са в желаните граници.

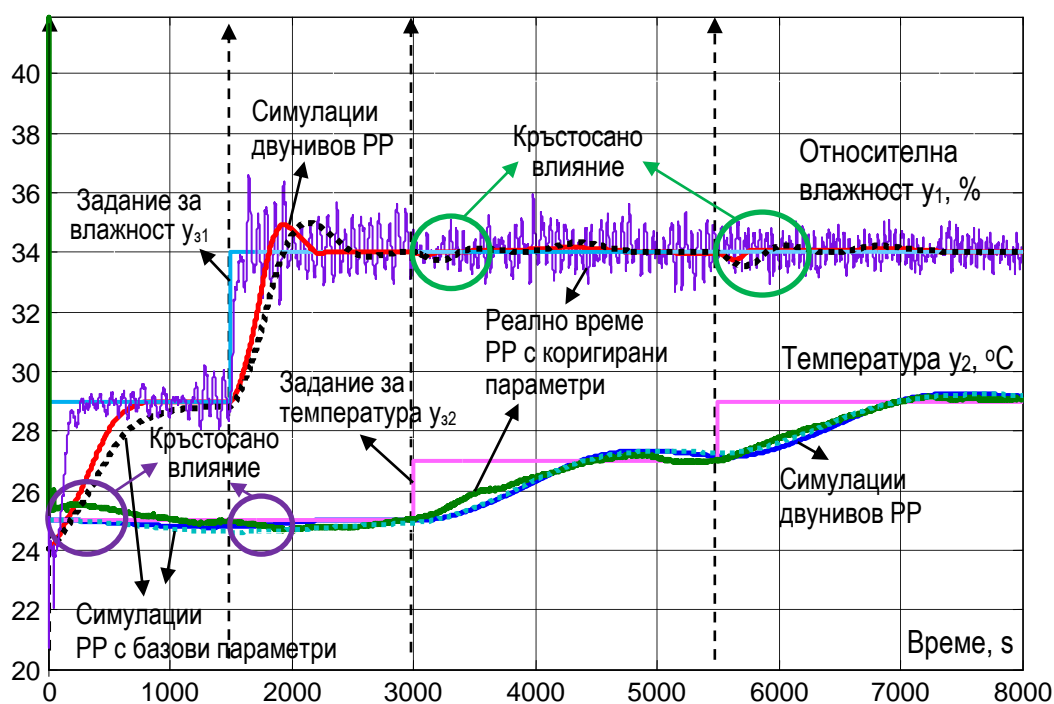
За двусвързания Мамдани РР за регулиране на относителна влажност и температура емпирично се синтезира двусвързан CPP. Той се състои от две идентични за всеки изход части – CPP₁ и CPP₂, всяка от три PE_S за мултипликативна корекция на базовите стойности на K_{ei} , K_{dyj} и K_{pi} с цел подобряване на показателите за качество $\Pi_{1i}=|e_i|$, $\Pi_{2i}=|\dot{y}_j|$ и енергийна ефективност $\Pi_{3i}=|\Delta u_i|$, съответно. Двунивовият РР се използва в симулационни изследвания на размито управление на ТСК модела на обекта при различни стъпални промени на заданията. Непрекъснатата адаптация на коригиращите коефициентите k_{ei} , k_{dyj} и k_{pi} на изходите на РЕи на CPP₁ и CPP₂ при автоматичната настройка е показана на фиг. 3.28. Коефициентите k_{ei} , k_{dyj} и k_{pi} се установяват в рамките на времето на преходните процеси, което показва сходност



Фиг. 3.28. Адаптация на коригиращите коефициенти по време на преходните процеси

на адаптацията. Изчислените им средни стойности k_{ei}^{av} , k_{dyj}^{av} , k_{pi}^{av} мащабират базовите стойности на параметрите на основния двусвързан РР и СРР се изключва. Адаптивните свойства на системата с основен РР с фиксирани коригирани параметри, получени на база на симулации с двунивов РР, се оценяват, като се сравняват показателите на три системи - симулирани системи за управление на ТСК модела на обекта с основен РР с базови стойности на параметрите и с АСРР, и система за управление в реално време на Rh и температурата с основен РР с коригирани параметри. Преходните процеси на трите системи са показани на фиг. 3.29. Динамичната точност на поддържане на заданията за двете величини, характеризиращи микроклимата в помещение, се увеличава с 46% в сравнение със системата с основен РР с базови параметри. Времето на регулиране намалява с 54% и максималното динамично отклонение намалява с 58%. Енергията за постигане на тези подобрения намалява с 19%. Съгласно системния подход оптималната конфигурация на СРР се получава в резултат на анализ на чувствителността за влиянието на настройваните параметри върху отделните показатели и оценка по приет критерий на подобренията на показателите за качество и енергийна ефективност на управлението в резултат на наличието на СРР.

Относителната функция на чувствителност на показателя Π_j за качество на затворената система с основен регулатор към промяна на настройвания параметър q_{OPi} на регулатора спрямо базовата му стойност q_{OPi}^0 се дефинира като $S_{\Pi_j} = \frac{\Delta \Pi_j / \Pi_j^0}{\Delta q_{OPi} / q_{OPi}^0}$, където $\Delta \Pi_j = \Pi_j - \Pi_j^0$ е вариацията на показателя за качество Π_j при вариация на параметъра $\Delta q_{OPi} = q_{OPi} - q_{OPi}^0$, $\Pi_j = f(q_{OPi})$, $\Pi_j^0 = f(q_{OPi}^0)$. Всеки показател е функция от всички настройвани параметри, но най-ефективно е влиянието на този



Фиг. 3.29. Преходни процеси на влажност и температура от симулация на системи с и без СРР и от управление в реално време с основен РР с коригирани параметри

параметър, към който чувствителността на показателя е най-голяма. Относителните функции на чувствителност на всички показатели към всички параметри за настройка се получават от симулационни изследвания на две системи - при базови q_{OPi}^0 и при променени $q_{OPi} = q_{OPi}^0 + \Delta q_{OPi}^0$ параметри на регулатора. По тях се определят двойки вход-изход на PE_S така, че СРР с най-малък брой РЕи да променя най-бързо избраните показатели в посока на дефинираната им норма.

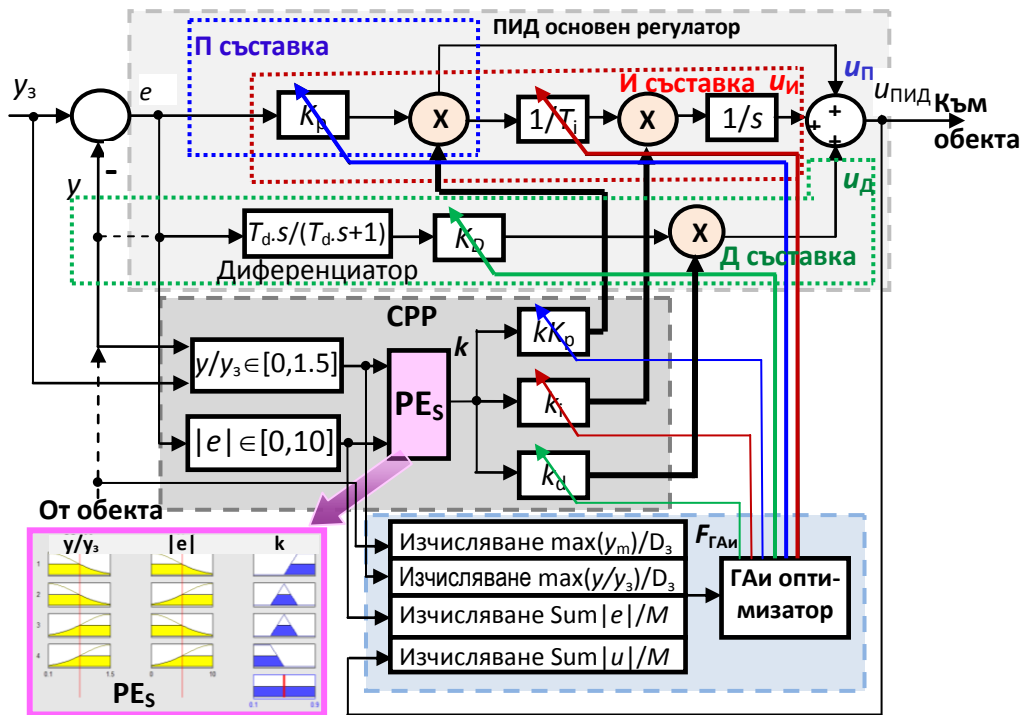
При необходимост от допълнителни подобрения в избрани показатели на системата с двунивов РР се използва off-line параметрична оптимизация на база на ГАи. Оптималните базови стойности на настройваните параметри на двунивовия РР $\mathbf{q}_{OP-CPP} = [\mathbf{q}_{OP} \ \mathbf{q}_{CPP}]$ се определят от изисквания приета целева функция на един или няколко показатели на затворената система да приема оптимална стойност. Примери за целеви функции са (3.1), (3.2) и (3.5).

На фиг.3.39 е показана схема за комбиниране на двете техники – адаптивната и оптимизационната при синтез на двунивов регулатор. Основният регулатор е ПИ или ПИД. СРР е от една 2ISO PE_S с входове y/y_z и $|e|$ за управление на температурата на въздуха в сушилнята. Изходът k на PE_S с помощта на $\mathbf{q}_{CPP} = [kK_p \ k_i \ k_d]$ служи за on-line адаптация на настройваните параметри на ПИ или ПИД регулатора $\mathbf{q}_{ПИД} = \mathbf{q}_{OP} = [K_p \ T_i \ K_D]$. Базовите стойности на параметрите на двунивовия РР $\mathbf{q}_{OP-CPP}^0 = [\mathbf{q}_{OP}^0 \ \mathbf{q}_{CPP}^0]$ се определят от емпирична настройка. Оптималните стойности $\mathbf{q}_{OP-CPP}^{opt}$ се изчисляват от условие за минимизация на целевата функция (3.1) с използване на ГАи.

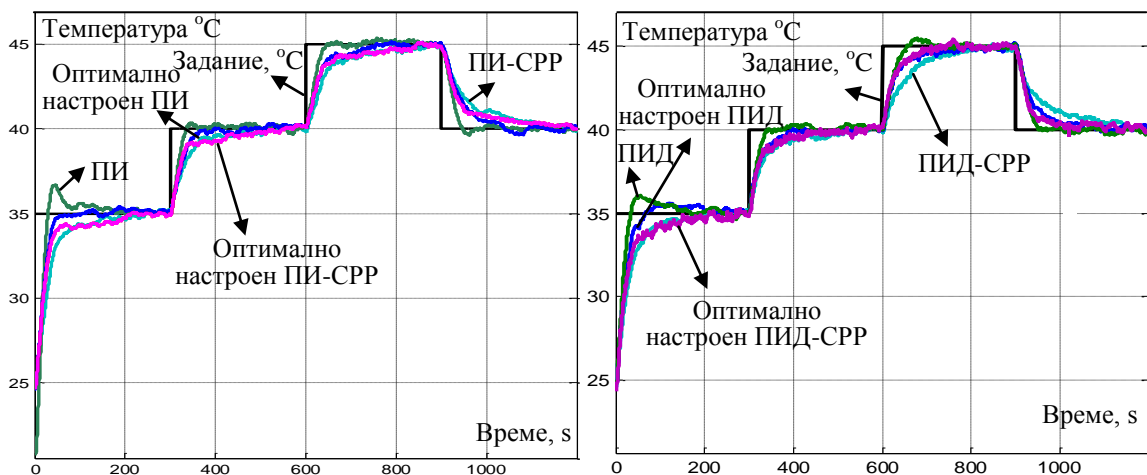
На фиг.3.40 са показани преходните процеси от ПИ и ПИД управление на температурата в реално време без и със СРР, а на фиг.3.41 – оценките **ЕЕФ**. Колкото **ЕЕФ** е по-голямо, толкова по-продължително са включени нагревателят и вентилаторът на сушилнята за времето на изследването t_f . Намаляване на **ЕЕФ** се постига със СРР и по-ефективно – с ГАи оптимизация. Най-добри са показателите на системата с оптимално настроен ПИД-СРР, а най-енергоикономично е управлението с оптимално настроен ПИ.

3.4. Анализ на сходимост и скорост на сходимост на адаптацията в СРР базирани системи Сходимостта на адаптацията и скоростта на сходимост е условие за постигане на желаните норми на показателите за качество и установяване на процесите. Те се проверяват по сигналите на изходите на СРРи от симулационни изследвания на системата от двунивов РР и ТСК модел на обекта или от експерименти при управление на обекта в реално време. Ако за времето на преходния процес изходите на СРР се установят, то адаптацията сходя с достатъчно добра скорост.

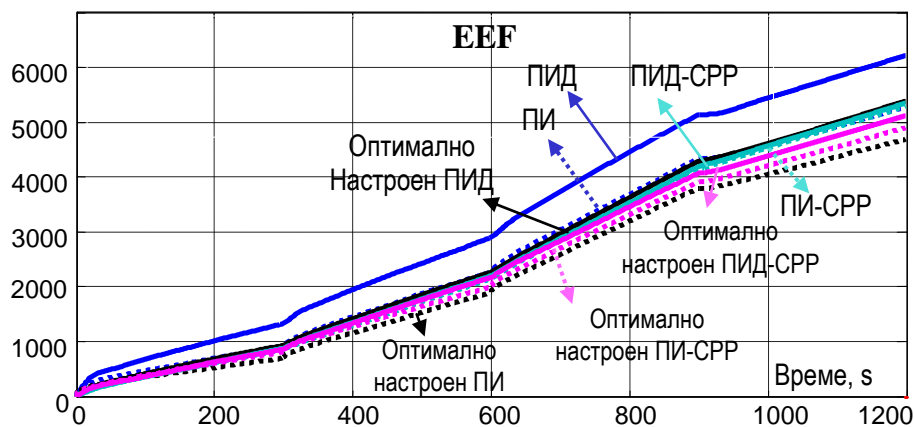
На фиг. 3.28 е показана непрекъснатата адаптация на коригиращите коефициентите k_{ei} , k_{dij} и k_{pi} на изходите на РЕи на идентичните СРР₁ и СРР₂ при автоматичната настройка в система за двусвързано регулиране с двунивов РР на влажност и температура в ОВК система. Използват се симулационни изследвания на база на ТСК модела на обекта при различни стъпални промени на заданията. Адаптацията



Фиг. 3.39. Оптимизация на параметрите на двунивов РР от основен линеен ПИД и СРР с 2I PE_S за управление на температурата на въздуха в тунелна сушилня



Фиг. 3.40. Преходни процеси на системи с ПИ, ПИ-СРР, ПИД и ПИД-СРР за енергоикономично управление в реално време на температурата в тунелна сушилня



Фиг. 3.41. Енергийна ефективност на управлението в реално време на температурата на въздуха в тунелна сушилня с ПИ, ПИ-СРР, ПИД и ПИД-СРР регулатори

се стартира при всяка промяна в двата канала, предизвикана от смяна на задание, поява на смущение, промени в обекта и др. Изходите на СРР k_{ei} , k_{dyj} и k_{pi} се установяват в рамките на времето на преходните процеси на началните си стойности - индикация, че показателите са доведени до дефинираните им норми.

3.5. Апроксимация на адаптивни РРи на база на СРР към функционално еквивалентни РРи-ПРК Целта е разработване на процедура за апроксимация на АСРР към функционално еквивалентен модифициран РР-ПРК с опростена структура от една РЕ за улесняване на анализа на устойчивост на затворената нелинейна система и ПЛК реализацията на АСРР.

Разгледаните АСРРи на база на СРР имат лесен инженерен синтез с ясен физически смисъл, но са съставени от много РЕи. РР-ПРК е удобен за апроксимация на АСРР, тъй като на база на една РЕ може да реализира произволен нелинеен алгоритъм. Модифицираният РР-ПРК се характеризира в допълнение с ясна и отворена за параметрична оптимизация структура, а също и изчислителна простота, подходяща за изпълнение от ПЛК в реално време и промишлена среда. Той позволява лесен анализ и валидация на устойчивостта на затворената система с АСРР. За синтеза на структурата на модифицирания РР-ПРК е необходим Сугено моделът, т.е. само РЕ, от модифицирания ТСК модел на обекта, който може да се определи по експертна информация за обекта без да се разполага с пълния ТСК модел. Алгоритъмът на основния РР задава типа на локалните линейни регулатори на РР-ПРК. Техните параметри се изчисляват чрез минимизация на дадена целева функция за близост между изходите на модифицирания РР-ПРК и АСРР.

При параметричната оптимизация на РР-ПРК с използване на ГАи за целите на апроксимация на АСРР може да се търси близост между:

- изходите на двата регулатора, като изходът на РР-ПРК $u_{iПРК}(t, \mathbf{q}_{ПРК})$ се получава в резултат на симулационни изследвания, а изходът на АСРР от основен регулатор и СРР (ОР-СРР) $u_{iОР-СРР}(t)$ - чрез симулационни изследвания или от управление в реално време на промишления обект. Целевата функция е от вида:

$$F_{ПРК} = \int_0^{t_f} \{ \sum_{i=1}^m [u_{iПРК}(t, \mathbf{q}_{ПРК}) - u_{iОР-СРР}(t)]^2 / u_{iОР-СРР}(t)^2 \} dt \rightarrow \min_{\mathbf{q}_{ПРК}}; \quad (3.7)$$

- изходите на затворените системи за управление с регулаторите, като с РР-ПРК се управлява ТСК модела на МИМО или SISO ($m=1$) обекта чрез симулации, а с АСРР се управлява ТСК модела на МИМО или SISO обекта чрез симулации или промишления обект в реално време. Целевата функция е:

$$F_{ПРК} = \int_0^{t_f} \{ \sum_{i=1}^m [y_{iПРК}(t, \mathbf{q}_{ПРК}) - y_{iОР-СРР}(t)]^2 / y_{iОР-СРР}(t)^2 \} dt \rightarrow \min_{\mathbf{q}_{ПРК}}, \quad (3.8)$$

където $y_{iПРК}(t, \mathbf{q}_{ПРК})$ е i -тият изход на модифицирания ТСК модел на обекта от затворената система с РР-ПРК, а $y_{iОР-СРР}(t)$ е i -тият изход на модифицирания ТСК модел на обекта или на реалния обект от затворената система с АСРР.

Към системите с РР-ПРК и с АСРР се прилагат едни и същи входни въздействия, обикновено промяна на заданията, определена от план на експериментите. Планът

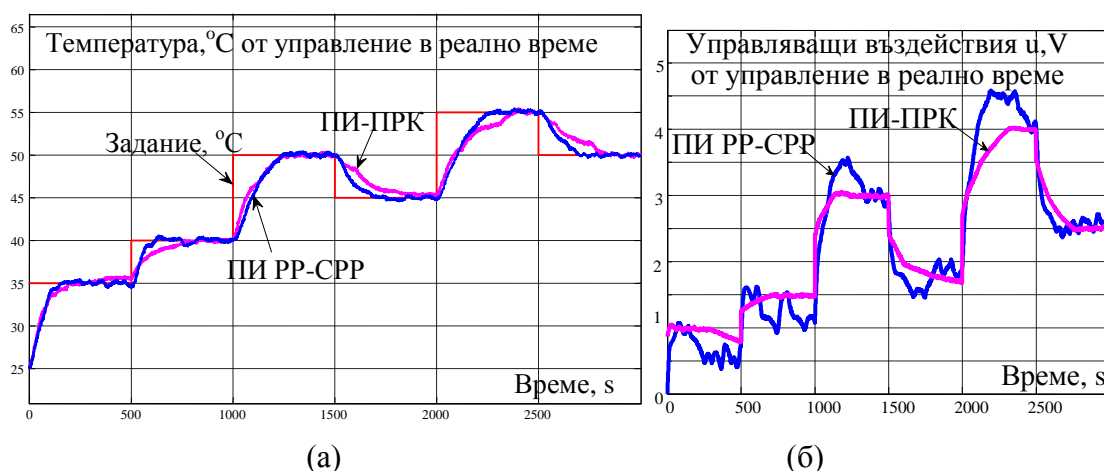
на експериментите трябва да осигурява входни въздействия от целия обхват на работа на двунивовия РР, съобразени с реалните сигнали от промишления обект.

Оптималните параметри на РР-ПРК $q_{\text{ПРК}}^{\text{опт}}$ минимизират целевата функция (3.7) или (3.8), изчислена за времетраенето на експериментите t_f . Полученият РР-ПРК функционален еквивалент на АСРР се валидира по друг набор от входно-изходни данни за двунивовия РР.

На фиг.3.45 са показани преходните процеси и съответните управляващи въздействия на система за регулиране на температурата на въздуха в лабораторна сушилна с АСРР от 4 РЕи и с получения по предложената процедура функционален негов РР-ПРК еквивалент. Постигнатата висока точност на апроксимация позволява РР-ПРК да се използва по-нататък за изследване на устойчивостта на системата с АСРР и за реализация на АСРР.

3.6 Анализ на устойчивост на адаптивна на база на СРР затворена система

Анализът на устойчивост на затворената адаптивна на база на СРР система е от изключително значение поради нелинейния, а често и многосвързан характер на системата и променливостта на нейните параметри. Той е гарант за работоспособността на системата при възможните режими и условия на работа в обхвата на физическите устройства и протичащите процеси в тях. При отсъствие на ТСК модел на обекта устойчивостта на системата с двунивов РР се валидира експериментално по някой от емпиричните качествени подходи като метода на фазовата равнина. За синтезираната адаптивна на база на СРР система съществува описание с модифицирани ТСК модел на обекта и РР-ПРК апроксиматор на АСРР. То се привежда в класически ТСК-ПРК формат и устойчивостта на системата се изследва по метода на Ляпунов с помощта на ЛМН. Това изследване е от особено значение поради факта, че РР-ПРК се синтезира да апроксимира изходния структурно и изчислително по-сложен АСРР, а не да гарантира устойчивост, робастност и зададени показатели за качество на локалните линейни системи, както е при класическия синтез на РР-ПРК.



Фиг. 3.45. Преходни процеси (а) и управляващи въздействия (б) при управление в реално време на температурата на въздуха в тунелна сушилна с РР-ПРК и с РР-СРР

Глава 4 Методи за синтез на размити регулатори с компенсация на моделната неопределеност и чистото закъснение на обекта

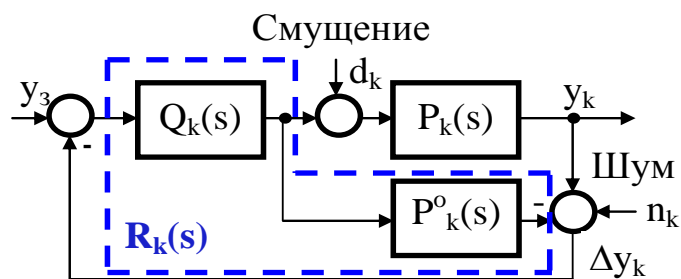
4.1. Постановка на задачата Относително голямото закъснение и моделната неопределеност влошават устойчивостта и показателите на системите за управление, като същевременно застрашават оборудването и водят до разхищение на материали и енергия. В теорията на линейните системи има разработени специални методи и регулатори за тяхното компенсиране, най-разпространените от които са регулаторите за робастно управление с ІМС, предикторите на Смит и прогнозиращите регулатори.

Общи недостатъци на съществуващите за нелинейни обекти методи и РРи за робастно, предикторно и с отчитане на закъснението управление, които ги правят неприложими в инженерната практика, са липсата на ясен физически смисъл и простота на алгоритъма и синтеза им и неотчитане на условията за надеждна работа в индустриална среда и реално време.

Целта е разработване на реализуеми в промишлеността специални РРи на основа на модифициран ТСК модел на обекта, които да компенсират моделната неопределеност, голямата инерционност и чисто закъснение на нелинеен обект, както и на методи за техния синтез на база на системен подход. Системният подход обхваща базиран на експериментални данни синтез, апроксимация чрез ГАи параметрична оптимизация, определяне на оптимален хоризонт на предсказване, валидиране, оценка на подобренията в показателите за качество на регулиране и анализ на устойчивост на затворената със специалния РР нелинейна система. Устойчивостта на глобалната затворена нелинейна система се валидира както при система с РР-ПРК и ТСК модел на обект със закъснение съгласно методиката, описана в гл.2, използвайки ЛМН (2.20).

Допълнителите изисквания към специалните РРи са лесен синтез с използване на минимална информация за обекта и изчислителна простота, подпомагаща реализация в ПЛК. Предполага се, че нелинейният обект се описва с модифициран ТСК модел с локални ZN модели $P_k(s) = K_k(T_k s + 1)^{-1} \cdot e^{-\tau_k s} = P_{ko}(s) \cdot e^{-\tau_k s}$. Приемат се три зони на линеаризация и изходът на обекта $y(t)$ за предикатна променлива, което не ограничава използване на повече зони и предиктни променливи.

4.2. Синтез на робастни системи с РР-ПРК за компенсация на моделната неопределеност на обекта на основа на регулатор с вътрешен модел на обекта Използва се съчетаване на ТСК-ПРК принципа с идеята за робастност на локалните линейни системи чрез локален ІМС. На фиг.4.1 е показана k -тата локална линейна система от локален обект с предавателна функция $P_k(s)$ и локален ІМС $R_k(s)$. Локалният ІМС се определя от номинален модел на обекта $P_k^o(s)$ и регулатор $Q_k(s) = [P_k^o(s)]^{-1} \cdot F_k(s)$, където $[P_k^o(s)]^{-1}$ е обратният модел на локалния обект. Филтърът $F_k(s)$ осигурява реализуемост на регулатора $Q_k(s)$ и отсъствие на статична



Фиг.4.1. Локална система с регулатор с вътрешен модел на обекта

грешка в системата при стъпални изменения на входните въздействия.

За ZN модел на локалния обект $[P_k^o(s)]^{-1} = (T_k s + 1) e^{ts} / K_k$ е нереализуемо звено с изпреварване. В $Q_k(s)$ се взима само неминимално фазовата част от $P_k^o(s)$, като звеното с чисто закъснение се пренебрегва. Необходимият филтър за физическа реализуемост е $F_k(s) = (\lambda_k s + 1)^{-1}$. Тъй като предавателната функция на затворената система при идеални условия $P_k(s) = P_k^o(s)$, $d_k = 0$ и $n_k = 0$ е $\Phi_k(s) = F_k(s) = (\lambda_k s + 1)^{-1}$, то затворената система се описва с апериодично звено с времеконстанта λ_k , която определя времетраенето на преходните процеси.

Затова λ_k се настройва от компромиса да е малка, за да може $y(t)$ бързо по апериодичен закон да се установи на заданието y_3 , и в същото време да е достатъчно голяма, за да се удовлетворят условията за робастна устойчивост или робастно качество.

За предавателната функция $R_k(s)$ на локалния ИМС от фиг.4.1 при ZN модел на обекта се получава позиционен ПИ алгоритъм с параметър за настройка λ_k :

$$R_k(s) = Q_k(s) \cdot [1 - Q_k(s) \cdot P_k^o(s)]^{-1} = [P_k^o(s)]^{-1} \cdot F_k(s) \cdot [1 - F_k(s)]^{-1}. \quad (4.1)$$

$$R_k(s) = (T_k^o s + 1) / (K_k^o \cdot \lambda_k s) = (T_k^o / \lambda_k K_k^o) [1 + 1 / (T_k^o s)] = C_{ПИk}(s) \quad (4.2)$$

Размитите правила на РР-ПРК базирания размит ИМС се извеждат след преобразуване на локалните регулатори от позиционни в инкрементални ПИ чрез извеждане на интегратора в допълнителната обработка:

$$R_k: \text{IF } y(t) \text{ is } Ly_k \text{ THEN } \dot{u}_k(t) = T_k^o / (\lambda_k K_k^o) \dot{e}(t) + 1 / (\lambda_k K_k^o) e(t) \quad (4.3)$$

$$\text{или } \dot{u}_k(t) = -\mathbf{F}_k x_k(t) + \mathbf{G}_k x_3,$$

където Ly_k е ЛС на $y(t)$, $\mathbf{F}_k = [1 / (\lambda_k K_k^o) \quad T_k^o / (\lambda_k K_k^o)]$ и $\mathbf{G}_k = [1 / (\lambda_k K_k^o) \quad 0]$.

Методът за синтез е с ясен физическия смисъл, изчислително прост – настройва се само един параметър на ПИ регулатора във всяка зона по известни правила. За изследване на устойчивостта на ТСК-ПРК системата има разработена процедура и ПРК-ИМС е с лесно промишлено изпълнение.

Разработеният метод се прилага за робастно управление на температурата на въздуха θ , °C, $y(t) = \theta(t)$, във лабораторна пещ. На основа на изведен ТСК модел на обекта с ZN номинални и „най-лоши“ локални линейни модели, се синтезира

РР-ПРК базиран робастен ИМС, като параметрите на скоростните локални ПИ регулатори от заключенията се изчисляват след определяне на λ_k за всяка зона от условието за робастна устойчивост или робастно качество на локалната линейна система. За сравнение е синтезиран и робастен линеен ПИ регулатор. Преходните процеси от управление на ТСК модела на обекта с РР-ПРК базиран ИМС и с линеен ПИ регулатор при номинален и смутен обект са получени от симулационни изследвания. Системата с ПРК-ИМС проявява по-добра робастност – преходните процеси при номинален и смутен обект се различават по-малко. Времето на регулиране е също по-малко и няма пререгулиране при номинален обект и по-малко пререгулиране при смутен обект за целия обхват на задания. Системата с ПИ регулатор е на границата на устойчивост при смутен обект и малки задания.

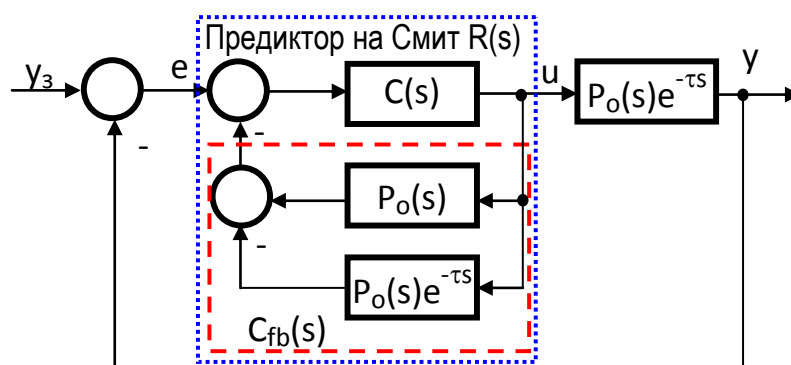
4.3. Синтез на системи с компенсация на влиянието на чистото закъснение и инерционността на нелинейни обекти на база на ТСК модели Обектите с относително голямо чисто закъснение τ спрямо най-голямата времеконстанта T на обекта - $\tau/T \gg 1$, трудно се управляват с класически средства, тъй като закъснението намалява запасите на устойчивост на системата и може да предизвика големи колебания. За да се запази устойчивостта на затворената система коефициентът на регулатора се ограничава и това води до бавно установяване на преходните процеси и намалена динамична точност. Налага се прилагане на специални мерки за компенсиране на τ .

4.3.1. Системи с нелинеен предиктор на Смит на база на РР-ПРК Целта е да се разработи размит Смит предиктор за нелинеен обект с относително голямо закъснение и на метод за синтеза му на база на ТСК-ПРК подхода.

На фиг.4.8 е показана линейна система със Смит предиктор $R(s)$. Той се състои от стандартен линеен регулатор $C(s)$, най-често ПИ, обхванат с отрицателна обратна връзка $C_{fb}(s)$, определена от условие характеристичното уравнение на затворената система да не съдържа τ :

$$C_{fb}(s) = P_o(s)(1 - e^{-\tau s}). \quad (4.5)$$

Параметрите за настройка на Смит предиктора са параметрите на стандартния линеен регулатор $C(s)$, тъй като $C_{fb}(s)$ съгласно (4.5) изцяло зависи от модела на



Фиг. 4.8. Блокова диаграма на затворена система с предиктор на Смит $R(s)$

обекта. Те се определят по методи, разработени за линейни системи за управление на обекти без закъснение.

При $P_o(s) = K(Ts + 1)^{-1}$ и ПИ основен регулатор $C_{\text{ПИ}}(s) = K_p(1 + 1/T_i s)$ системата със Смит предиктор е от втори ред и коефициентът на регулатора K_p може да се избере максимално допустимо голям, без да се застраши устойчивостта на затворената система, като осигури висока динамична точност и нечувствителност към моделна неопределеност и смущения.

Независимо от предимствата си, линейният Смит предиктор не е намерил широко индустриално приложение заради трудната реализация на обратната връзка към основния регулатор и изискването за точен модел на обекта.

4.3.1(а) Структура с локални Смит предиктори Синтезира се РР-ПРК с локални регулатори линейни Смит предиктори с ПИ основен регулатор, които компенсират относително голямите закъснения τ_k на локалните обекти. Така за всяка зона k на линеаризация локалната линейна затворена система има блоковата диаграма от фиг.4.8, която след структурни преобразувания добива вида, показан на фиг.4.9, където:

$$Q_k(s) = C_k(s) \cdot [1 + C_k(s) P_{ok}(s)]^{-1} = K_{pk} \cdot (T_k s + 1) \cdot (T_{ik} s + 1) \cdot [T_{ik} s \cdot (T_k s + 1) + K_k \cdot K_{pk} \cdot (T_{ik} s + 1)]^{-1} \quad (4.7)$$

Ако се приеме $T_{ik} = T_k$, (4.7) може да се преобразува в:

$$Q_k(s) = K_{pk} \cdot (T_k s + 1) (T_k s + K_k \cdot K_{pk})^{-1} = [(T_k s + 1) / K_k] \cdot \{ [T_k / (K_k \cdot K_{pk})] s + 1 \}^{-1}. \quad (4.8)$$

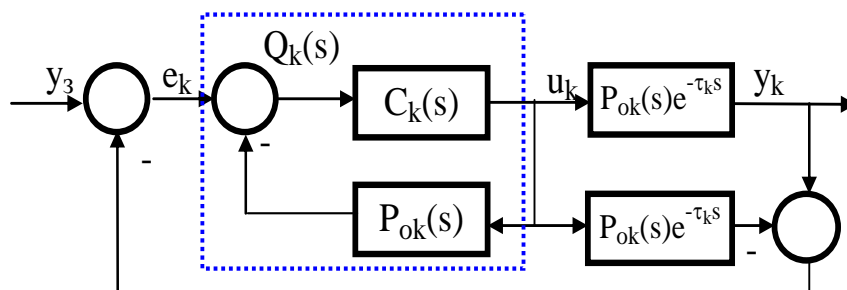
Налице е аналогия с ИМС, при който

$$Q_k(s) = [P_{ok}(s)]^{-1} \cdot F_k(s) = [(T_k s + 1) / K_k] \cdot (\lambda_k s + 1)^{-1}, \quad \lambda_k = T_k / (K_k \cdot K_{pk}).$$

ПИ регулаторът в предиктора на Смит използва възможността K_{pk} да е голямо и това добре се съгласува с изискването λ_k от ИМС да е малко. За $K_k \cdot K_{pk} > 1$ регулаторът (4.8) става ПД $Q_k(s) = C_{\text{ПДк}}(s) = (1 / K_k) \cdot (T_k s + 1) \cdot (\lambda_k s + 1)^{-1}$.

Заклученията в размитите правила на РР-ПРК предиктора се извеждат при следните допускания:

1) λ_k може да се пренебрегне като относително малко спрямо τ_k ($\lambda_k \ll \tau_k$), тъй като от една страна $\lambda_k < T_k$ за $K_k \cdot K_{pk} > 1$ ($\lambda_k = T_k / (K_k \cdot K_{pk})$, $T_k = T_{ik}$) при достатъчно голямо



Фиг. 4.9. Блокова диаграма на локална затворена система с предиктор на Смит и аналогия със системата с вътрешен модел на обекта

K_{pk} , а от друга страна закъснението на локалния обект е относително голямо $T_k \ll \tau_k$, и в крайна сметка $\lambda_k \ll T_k \ll \tau_k$ и тогава $F_k(s) \approx 1$;

2) закъснителното звено може с достатъчна точност да се апроксимира с линейния член от разложението му в ред на Тейлор $e^{-\tau_k s} \approx (\tau_k s + 1)^{-1}$.

При тези допускания предавателна функция за k -тия Смит предиктор става:

$$R_k(s) = Q_k(s)[1 - Q_k(s)P_{ok}(s)e^{-\tau_k s}]^{-1} = C_{ПДk}(s)\{1 - P_{ok}(s)[P_{ok}(s)]^{-1}F_k(s)e^{-\tau_k s}\}^{-1} = \\ = C_{ПДk}(s)[1 - e^{-\tau_k s}]^{-1} = C_{ПДk}(s)(\tau_k s + 1)/\tau_k s = C_{ПДk}(s).C_{ПИk}(s). \quad (4.9)$$

Съгласно (4.9) локалните Смит предиктори са съставени от последователно свързани ПД и ПИ локални регулатори с параметри съответно $K_{ПДk}=1/K_k$, $T_{dk}=T_k$ ($K_{Dk}=K_{ПДk}.T_{dk}$) за ПД регулатора и $K_{pk}=1$ и $T_{ik}=\tau_k$ за ПИ регулатора.

Това определя предложената на фиг.4.11 структура на размит базиран на РР-ПРК Смит предиктор от последователно свързани РР-ПРК с локални ПД и скоростен ПИ регулатори. Необходимият интегратор е оставен в допълнителната обработка, за да бъде отнесен към ТСК описанието на обекта. Машабиращите коефициенти се изчисляват на база на максималната очаквана грешка $|e_{max}|$ като $K_e=K_{de}=1/|e_{max}|$. Отчитайки, че $|u_{ПДmax}|=K_{ПДk max}.|e_{max}|$, то $K_{uПД}=K_{\Delta uПД}=1/(K_{ПДk max}.|e_{max}|)$. Размитите правила на ТСК модела на обекта с разширението с интегратор ZN локални обекти се описват с (2.17), а на РР-ПРК базирания Смит предиктор от последователно свързани РР-ПРК с локални ПД и скоростен ПИ регулатори - с:

$$R_{k1}: \text{IF } y(t) \text{ is } Ly_k \text{ THEN } u_{ПД}(t) = -F_{ПДk}x(t) + G_{ПДk}x_3 \quad (4.11a)$$

$$\text{или } u_{ПД}(t) = K_{ПДk}e(t) + K_{Dk}\dot{e}(t),$$

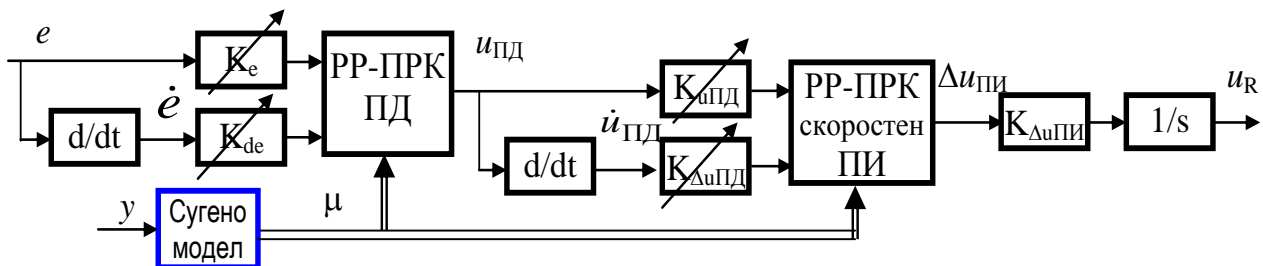
$$R_{k2}: \text{IF } y(t) \text{ is } Ly_k \text{ THEN } \dot{u}_{ПИ}(t) = -F_{ПИk}x_{ПД}(t) \quad (4.11б)$$

$$\text{или } \dot{u}_{ПИ}(t) = (1/\tau_k)u_{ПД}(t) + \dot{u}_{ПД}(t),$$

където Ly_k са ЛСи за y , $x_{ПД}(t) = \begin{bmatrix} x_{1ПД}(t) = u_{ПД}(t) \\ x_{2ПД}(t) = \dot{x}_{1ПД}(t) \end{bmatrix}$, $F_{ПДk} = [K_{ПДk} \ K_{Dk}]$, $F_{ПИk} = [1/\tau_k \ 1]$,

$G_{ПДk} = [K_{ПДk} \ 0]$, като $\dot{e}(t) = -\dot{y}(t)$ при постоянно задание.

Векторът на променливите на състоянието $x(t)$ може да се разшири с $x_{ПД}(t)$ и тогава се получава $x^e(t) = [x_1(t) = y(t), x_2(t) = \dot{x}_1(t), x_3(t) = \dot{x}_2(t), x_4(t) = u_{ПД}(t), x_5(t) = \dot{x}_4(t)]^T$.



Фиг. 4.11. Размит предиктор на Смит на база на РР-ПРК

Новоопределените вектори и матрици могат да се представят като блокове в блочните вектори и матрици на обобщен локален обект и регулатор:

$$\mathbf{A}_{ok}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ok2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{dk}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{dk2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_k^e = [\mathbf{C}_{k1 \times 2} \quad \mathbf{0}_{1 \times 2}], x_3^e = \begin{bmatrix} x_{32 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_k = [\mathbf{F}_{ПДк} \quad \mathbf{F}_{ПИк}],$$

$$\mathbf{G}_k = [\mathbf{G}_{ПДк} \quad \mathbf{0}_{1 \times 2}].$$

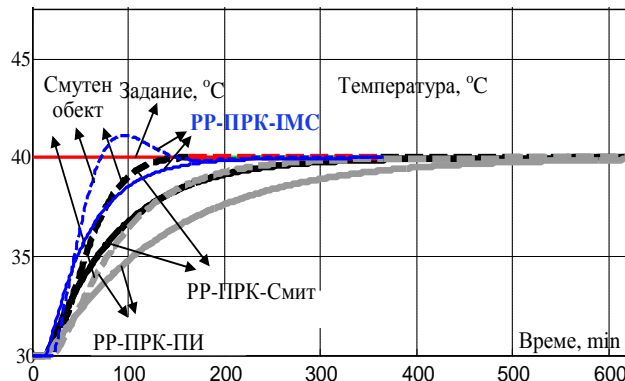
Устойчивостта на глобалната нелинейна система от ТСК модел на обекта с линейни локални обекти ($\mathbf{A}_{ok}^e, \mathbf{B}_{dk}^e, \mathbf{C}_k^e$) и РР-ПРК с линейни локални регулатори ($\mathbf{F}_k, \mathbf{G}_k$), се валидира с използване на неравенствата на Ляпунов (2.18)-(2.19) и получените за тях ЛМН (2.20).

Методът е приложен за подобряване на показателите за качество на системата за управление на температурата в лабораторната пещ.

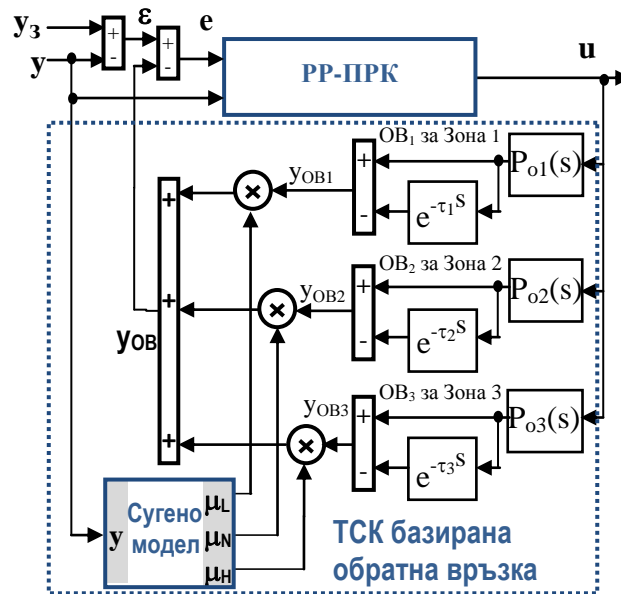
Преходните процеси на системата с РР-ПРК Смит предиктор, получени чрез симулация, са показани на фиг.4.12. За сравнение там са дадени и преходните процеси от управление с РР-ПРК с локални ПИ регулатори, настроени по инженерен метод за локалните обекти, и от управление със синтезирания РР-ПРК с локални ИМС. Изследвано е управление при номинален и смутен ТСК модел на обекта. Размитият ПРК предиктор на Смит осигурява по-бързи преходни процеси без пререгулиране от ПРК-ПИ и по-добра робастност от ПРК-ИМС. Най-малко е t_p на ПРК-ИМС за сметка на поява на пререгулиране при смутен обект.

4.3.1(б) Структура с ТСК обратна връзка Синтезира се размит нелинеен Смит предиктор с повече възможности за настройка и по-проста структура, показан на фиг.4.13. Той се състои от основен модифициран РР-ПРК с локални линейни ПИД базирани регулатори, обхванат от обратна връзка с модифициран ТСК модел. Схемата е подобна на линейния Смит предиктор, но с нелинейни основен регулатор и обратна връзка. Всяка локална обратна връзка компенсира голямото относително закъснение на съответния локален обект. Тогава всеки от локалните ПИД базирани регулатори се настройва по локалния за него линеен обект без закъснение.

За изследване на устойчивостта на глобалната нелинейна система с модифицираните ТСК модел на обекта и РР-ПРК се използва изведеното в гл.2 стандартно ТСК-ПРК описание (2-17)-(2.16) и (2.25) на разширените с интегратор



Фиг. 4.12. Преходни процеси на системите с ПРК-Смит, ПРК-ПИ и ПРК-ИМС



Фиг. 4.13. Блокова диаграма на ПРК базиран нелинеен предиктор на Смит

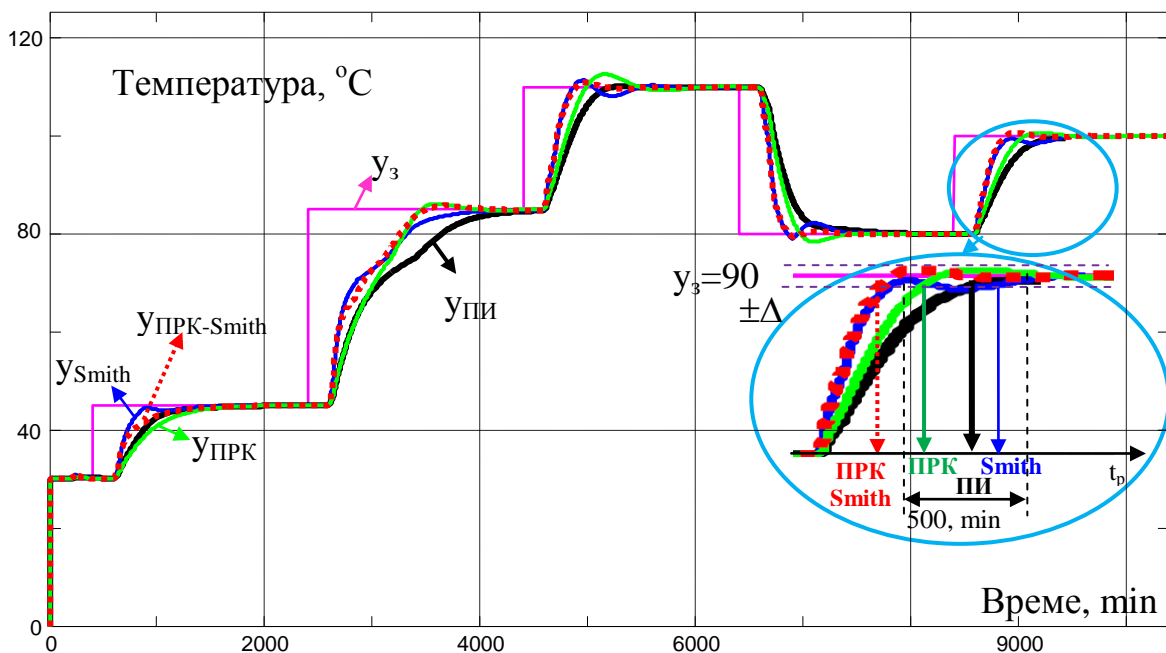
ZN локални обекти и скоростни ПИД/ПИ локални регулатори. За описание на ТСК базираната обратна връзка от фиг.4.13 в пространство на състоянията, както и за лесна реализация, преходните характеристики на локалните обратни връзки, получени чрез симулация, се апроксимират към определен линеен модел от нисък ред без закъснение, като параметрите се получават от оптимизационна процедура с използване на ГАи за минимизиране на относителната моделна грешка.

Нелинеен PP-ПРК Смит предиктор на база на фиг.4.13 се синтезира за управление на температурата на въздуха в лабораторната пещ. Локалните ZN модели на ТСК модела на обекта са с относително големи закъснения. Параметрите на ПИ локалните регулатори се настройват като за система от втори ред при зададена степен на колебателност. Локалните обратни връзки се апроксимират с диференциатори от трети ред с предавателна функция

$$W_{dk}(s) = K_{dk} T_{dk} s [(T_{d1k} s + 1)(T_{d2k} s + 1)(T_{d3k} s + 1)]^{-1}.$$

Валидирането се осъществява чрез симулационни изследвания на системите с нелинейния Смит предиктор с точните и апроксимираните обратни връзки и сравнение на изходите на обекта и на управляващите въздействия. Диференциаторите лесно се описват в пространство на състоянията, което позволява използване на разработените в гл.2 подходи за анализ на устойчивостта на затворената нелинейна система.

На фиг.4.16 са показани преходните процеси от симулации на синтезираната система с нелинеен ПРК базиран Смит предиктор. Там за сравнение са дадени и преходните процеси на системите с линеен ПИ регулатор, който не компенсира нито закъснението, нито нелинейността на обекта, линеен Смит предиктор за компенсиране само на закъснението и модифициран PP-ПРК с локални ПИ регулатори за компенсиране само на нелинейността на обекта. Линеен ПИ регулатор и линеен Смит предиктор са синтезирани за ZN модел с осреднени параметри от локалните ZN модели по инженерни методи за осигуряване на

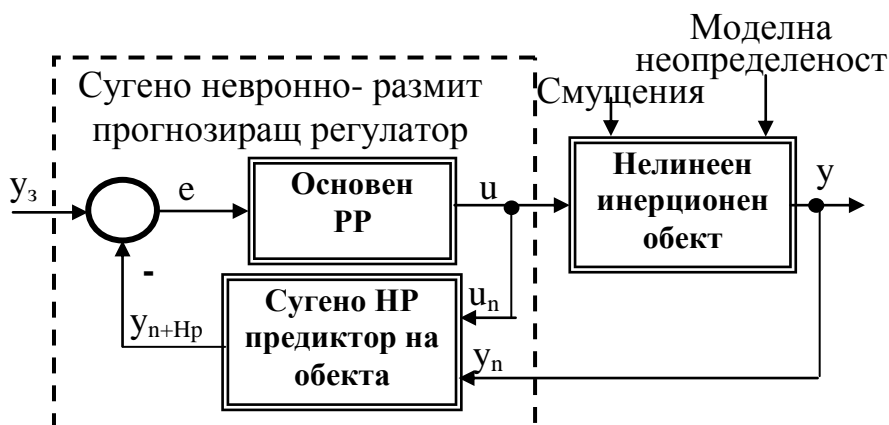


Фиг. 4.16. Преходни процеси от симулационни изследвания на системи с нелинеен ПРК-Смит предиктор, ПИ, линеен Смит предиктор и РР-ПРК регулатори за управление на ТСК модел на нелинеен обект – температурата в лабораторна пещ

минимално време на регулиране и пререгулиране. Модифицираният РР-ПРК е синтезиран на база на модифицирания ТСК модел на обекта с големи ограничения върху коефициентите на локалните ПИ регулатори. Преходните процеси на системата с ПРК-Смит предиктор са с малко пререгулиране, най-малко t_p и най-бързо установяване на управляващото въздействие – доказателство за добро компенсиране на значителното закъснение на обекта. Управлението, обаче, има високи стойности в началото на всеки преходен процес и затова показателят за енергийна ефективност е по-висок. Системата с ПРК-Смит предиктор запазва подобни преходни процеси в различните работни точки, което е индикатор за добро компенсиране на нелинейността на обекта.

Предложеният нелинеен ПРК-Смит предиктор е ефективен за компенсиране както на нелинейността, така и на значителното закъснение на обекта. Опростената му структура, алгоритъм и синтез, включващ анализ на устойчивостта на затворената система, го правят подходящ за реализация в ПЛК за управление в реално време на промишлени обекти.

4.3.2. Системи с невронно-размит предиктор на обекта Целта е да се разработи метод за синтез на изчислително несложен и експериментално доказан предикторен (прогнозиращ) РР за управление на нелинеен обект със значително закъснение. Системата за управление на нелинеен обект с прогнозиращ РР е показана на фиг.4.17. Прогнозиращият РР се състои от основен РР и обратна връзка НР предиктор. ТСК модел на обекта се извежда и се валидира по данни от управлението му в реално време с емпирично синтезиран РР. По тези данни Сугено НР модел със сингълтни в заключенията се обучава да прогнозира изхода на обекта след време равно на зададен начален хоризонт на прогнозиране H_p ,



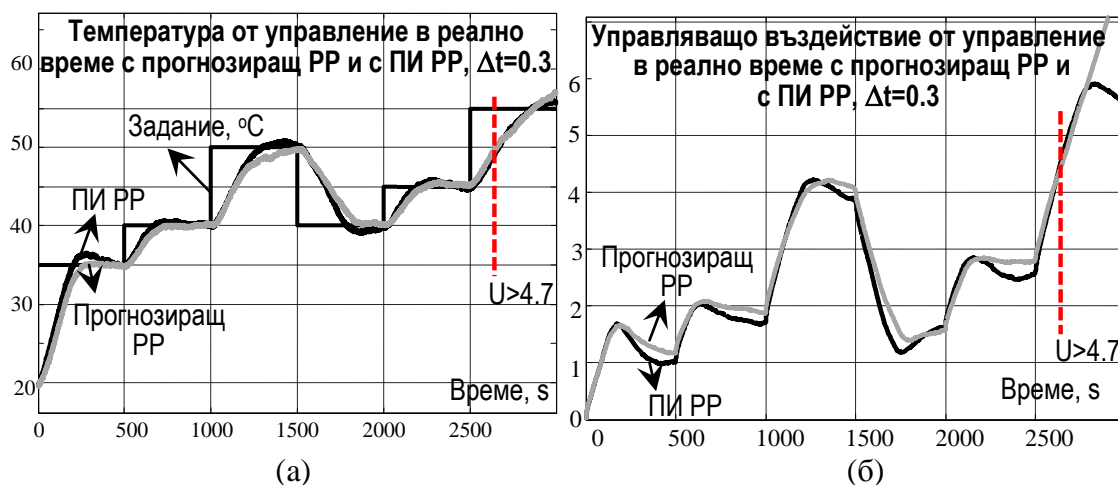
Фиг. 4.17. Затворена система с основен РР и Сугено НР предиктор на обекта

определен от обхвата на закъснението. Предикторът се валидира за данни, неизползвани при обучението, или on-line в реално време, като на входовете на предиктора се подават текущите сигнали за управлението и изхода на обекта, а изходът на предиктора през закъснително звено със закъснение (H_p-1) се сравнява с изхода на обекта в следващия момент. В случай на неуспешна валидация обучението се повтаря за нов Сугено НР модел. Чрез симулационни изследвания се оценяват подобренията в показателите за качество и енергийна ефективност на управлението в сравнение с отсъствие на предиктор. При значителни подобрения, компенсацията на променливото τ в различните работни точки на нелинейния обект е добра и H_p се приема за оптимален хоризонт на прогнозиране. В противен случай обучението се повтаря за ново H_p .

Устойчивостта на затворената система със Сугено НР прогнозиращ регулатор се изследва на база на условията на Ляпунов и съответните ЛМН, изведени за ТСК-ПРК описание на системата. За целта прогнозиращият РР се апроксимира с функционално еквивалентен РР-ПРК, който се валидира с данни от предикторно управление в реално време на обекта. РР-ПРК улеснява реализацията на предикторния РР в ПЛК.

Подобренията на показателите за качество и енергийна ефективност на системата с предикторен РР се оценяват от управление в реално време при сравнение с показателите на системата без Сугено НР предиктор.

НР предикторен регулатор се синтезира за управление на температурата на въздуха в лабораторна сушилня. На фиг.4.23 са показани преходните процеси на системите с прогнозиращ ПИ РР и основен ПИ РР за регулиране в реално време на температурата на въздуха в лабораторната сушилня. НР предиктор намалява σ , t_p и подобрява робастността на системата, като допринася преходните процеси в различните работни точки да са близки по показатели въпреки, че обектът променя своите параметри. Управляващото въздействие на прогнозиращия РР е по-гладко и с по-малък размах на изменение. НР предиктор е точен за обхватите на данните, за които е обучен $0 < U < 4.7$ и $19.7 < y < 53, ^\circ\text{C}$. Преходните процеси на системите за управление на обекта в реално време с апроксимиращ РР-ПРК и прогнозиращ РР са близки.



Фиг. 4.23. Преходни процеси от управление в реално време на температурата на въздуха в сушилня с ПИ РР и с прогнозиращ РР за: (а) температура; (б) управляващо въздействие

Глава 5 Приложение на разработените методи за синтез на размити системи за висококачествено управление на лабораторни и индустриални обекти

5.1. Постановка на задачата Целта е приложение на синтезираните РРи за управление в реално време на промишлени обекти и лабораторни модели с използване на MATLAB™, ПЛК SIMATIC 300 на Siemens и ПЛК Experion на Honeywell и оценяване на подобренията в управлението по различни показатели за качество и енергийна ефективност. С това изследване се преодолява липсата на проверка и оценка на известните РРи и методи за техния синтез в близка до индустриалната среда и при промишлено приложение.

Подбрани са типични промишлени обекти, при които класическите линейни подходи не са приложими за тяхното моделиране и управление или за постигане на необходимите показатели за качество на управлението им.

5.2. Синтез на РР-ПРК за управление на нивото на амониев разтвор в карбонизационна колона в Солвей Соди ООД - гр. Девня Карбонизационната колона е ключова инсталация в производството на синтетична сода на прах. Процесите в нея са определящи за качеството на цялата продукция. Затова изискванията към управлението на нивото на амониевия или прекарбонирания разтвор в нея са особено високи. От върха на колоната постъпва амониев разтвор под променливо налягане P , а в противоток – газове с различна концентрация на въглероден двуокис. Химическата реакция е екзотермична, обратима, с продукт на кристали, които полепват по охлаждащите повърхности и налагат отмиване. Обектът работи при различни задания в зависимост от произведения амониев разтвор. Класическите методи за управление на ниво на основа на линейни модели не са ефективни поради свързаността между променливите, нелинейността, колебателността, високото ниво на случайните смущения от страна на налягането P и моделната неопределеност на обекта.

По данни от управлението на обекта в реално време с линеен ПИ регулатор е изведен модифициран ТСК модел чрез off-line оптимизация с използване на ГАи. На негова база е синтезиран модифициран РР-ПРК с ПИ локални регулатори, чиито параметри са настроени по инженерен метод за осигуряване на минимално време на регулиране и пререгулиране на процесите в локалните линейни системи. РР-ПРК е реализиран върху ПЛК от разпределената система за управление на Honeywell, с която се управляват всички процеси в завода и която няма специализирани средства за РЛ. За целта Сугено моделът на РР-ПРК се представя еквивалентно с класически логически правила:

$$\begin{aligned}
 &\text{IF } 0 \leq H \leq 35 \text{ THEN } \mu_1=1 \quad \text{AND } \mu_2=0 \quad \text{AND } \mu_3=0 \\
 &\text{IF } 35 < H \leq 50 \text{ THEN } \mu_1=-a.H+b \text{ AND } \mu_2= a.H-c \text{ AND } \mu_3=0 \\
 &\text{IF } 50 < H \leq 65 \text{ THEN } \mu_1=0 \quad \text{AND } \mu_2=-a.H+d \text{ AND } \mu_3= a.H-b \\
 &\text{IF } 65 < H \leq 100 \text{ THEN } \mu_1=0 \quad \text{AND } \mu_2=0 \quad \text{AND } \mu_3=1,
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

където $a=1/15$, $b=10/3$, $c=7/3$ и $d=13/3$ са параметрите на триъгълната ФП за „Норма“ и трапецовидните от двете нейни страни.

Програмираният в ПЛК РР-ПРК се тества при управление в реално време на нивото на прекарбонирания разтвор, като замества предишния ПИ регулатор. Оценяват се различни показатели за качество - σ , t_p , максимален размах на изменение на управлението $|\Delta U_{\max}|$, средна U_{mean} и установена U_{∞} стойности на управлението. Въведени са още интегрални оценки за качество:

- средна стойност на модула на относителната спрямо заданието H_3 грешка

$$I_1 = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |E(t_n)| / H_3(t_n), E(t_n) = H_3(t_n) - H(t_n), \tag{5.6}$$

като системата с по-малка стойност за I_1 е с по-висока динамична точност.

- средно относително спрямо H_3 управляващо въздействие като индикатор за средното количество енергия, използвано за управление на единица задание

$$I_2 = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M U(t_n) / H_3(t_n), \tag{5.7}$$

като колкото I_2 е по-малко, толкова системата е по-икономична, защото потреблението на енергия за управление е по-малко;

- средна стойност на абсолютната грешка, изчислена за времето, когато нивото е над заданието при нарастване на заданието или под заданието при намаляване на заданието като индикатор за пререгулирането и излишната енергия за управление

$$I_{\sigma} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |E(t_n)| \tag{5.8}$$

за $(H_3(t_n) < H(t_n) \text{ и } \Delta H_3(t_n) > 0)$ или $(H_3(t_n) > H(t_n) \text{ и } \Delta H_3(t_n) < 0)$, като системата с по-малко I_{σ} има намалено σ , което я прави по-точна и по-икономична;

- стандартно отклонение StD_H на нивото от заданието си в установен режим за използваните задания $H_3=40\%$, 50% и 60% като мярка за подтискане на случайните смущения, като при малко StD_H подтискането на смущението е по-

ефективно, тъй като вариацията на нивото около заданието в резултат от случайното смущение е малка;

- отношение на StD_H и стандартното отклонение на смущението StD_P в установен режим като индикатор за робастността на системата, което колкото е по-малко, т.е. StD_P е по-голямо спрямо StD_H (вариациите на смущението са по-големи от вариациите на нивото), толкова по-голяма е робастността

$$I_{H_3} = StD_H / StD_P. \quad (5.9)$$

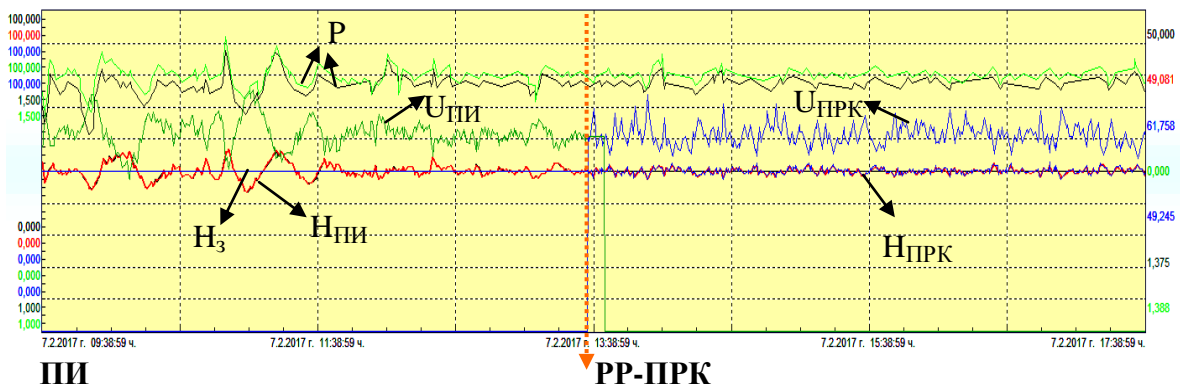
Това отношение позволява да се сравняват робастностните свойства и влиянието на случайните смущения върху процесите в установен режим на системи с различни по тип управления, например, линейно и размито управление, или за различни задания, когато основното смущение P е различно ($StD_P=0.017-0.03$) по време на управлението в реално време с отделните регулатори, както и при различните задания.

Преходните процеси на нивото H и управляващите въздействия U от управление в реално време показват, че при регулиране с РР-ПРК 1.2 пъти нараства динамичната точност ($I_{1ПИ}=1.2I_{1ПРК}$), с 4% намалява разходът на енергия за управление ($I_{2ПИ}=1.04I_{2ПРК}$), 2 пъти намалява I_{σ} ($I_{\sigma\PИ}=2I_{\sigma\PРК}$), 1.5-4 пъти намалява t_p и σ и 1.1-2.9 пъти намалява I_{H_3} , т.е. подобрява се робастността. Намалява се също честота на колебанията на нивото и на управлението, което редуцира износването на изпълнителното устройство.

На фиг.5.8 е показан операторският панел с графики на променливите при управление на нивото в реално време с ПИ регулатор и РР-ПРК, където се виждат подобренията в резултат на РР-ПРК. От 15.03.2017 г. РР-ПРК е пуснат в редовна експлоатация съгласно удостоверение за внедряване.

5.3. Синтез на размити регулатори за управление на нивата на течност в свързани резервоари на лабораторен модел с ПЛК Целта е да се предложи ПЛК реализация на разработените в гл.2 и гл.3 РРи-ПРК, която да се използва за експериментални изследвания при управление в реално време на свързани нива в резервоари.

Промишлен ПЛК SIMATIC S7 313 на Siemens се програмира да реализира два



Фиг. 5.8. Операторският панел от управление в реално време с ПИ регулатор и РР-ПРК

модифицирани РРи-ПРК с идентични структури, синтезирани на база на изведен в гл.2 модифициран ТСК модел на обекта:

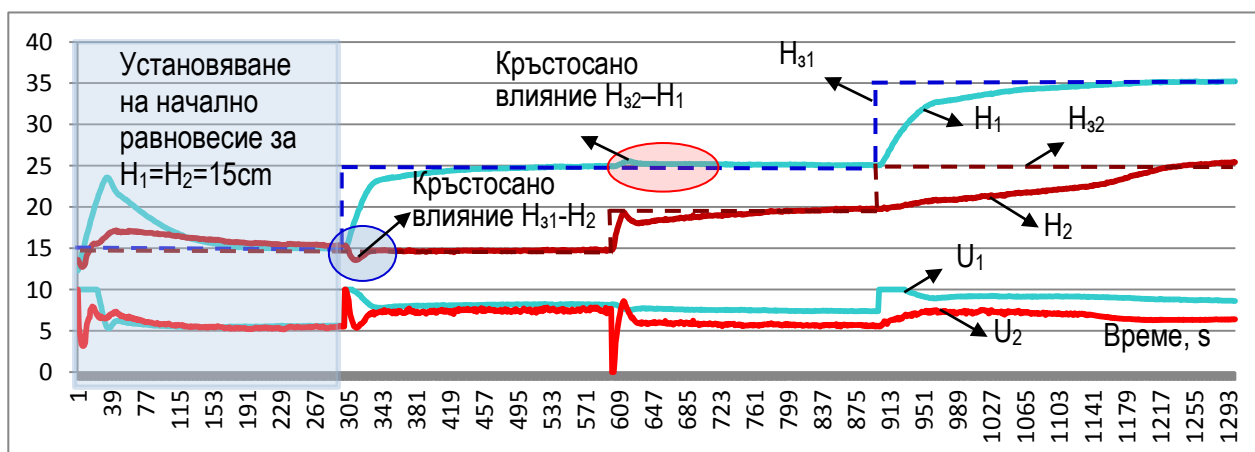
- РР-ПРК₁ - еквивалентен заместител на синтезирания в гл.3 адаптивен на база на СРР двусвързан РР с параметри, получени в резултат на апроксимация с помощта на ГАи;

- РР-ПРК₂ с двусвързани ПИ локални регулатори с параметри, определени от условия за осигуряване на автономност на локалните линейни системи.

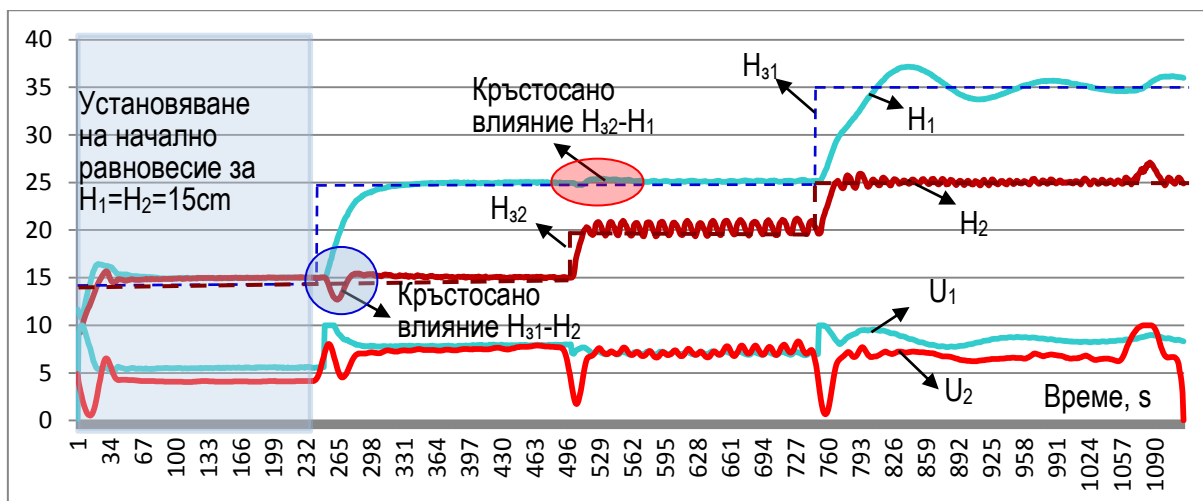
Схемата на експерименталната постановка е дадена на фиг.5.10. В ПЛК се реализира общата структура на РР-ПРК за управление на свързаните нива в реално време. Двата Сугено модела се програмират с помощта на Fuzzy Control на Siemens. Определят се функциите за старт, стоп и управление в ръчен режим. Програмира се в WinCC SCADA система с екрани на мнемосхеми и входно-изходни комуникации между оператор и ПЛК. На фиг.5.14 и фиг.5.16 са показани преходни процеси при управление с РР- ПРК₁ и РР-ПРК₂, съответно. Системата с адаптивен РР-ПРК има по-малки σ , t_p и намалено кръстосано влияние. Системата с РР-ПРК за автономност има автоколебания в установен режим при големите задания поради повишена чувствителност към шумове от измерване.



Фиг. 5.10. Експериментална постановка за управление в реално време на нивата на течност в свързани резервоари с РР-ПРК, реализиран в ПЛК



Фиг. 5.14. Преходни процеси в система 1 с адаптивен РР-ПРК и задания в) през 300s

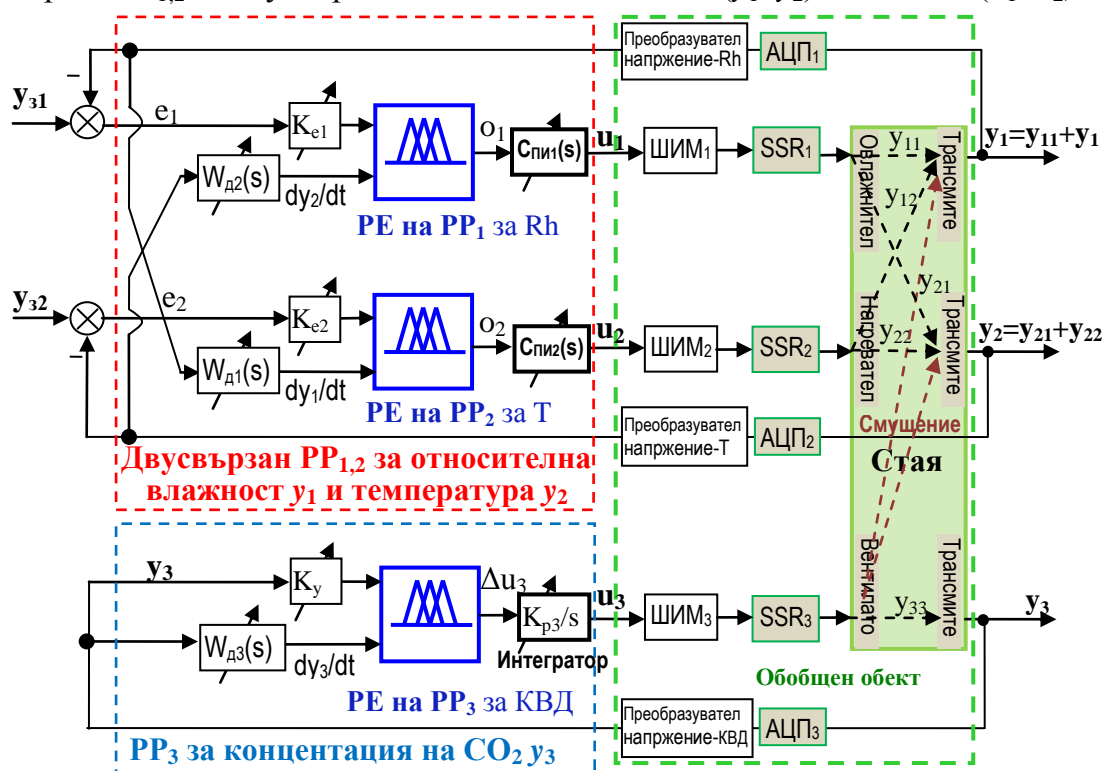


Фиг. 5.16. Преходни процеси в система 2 с РР-ПРК за автономност и задания в) през 250s

5.4. Синтез на размити регулатори за управление на температура, влажност и концентрация на въглероден двуокис на въздуха в лабораторен модел на система за отопление, вентилация и климатизация в помещение Целта е да се разработят и реализират в ПЛК РРи за регулиране на относителната влажност $y_1=Rh$, температурата $y_2=T$ и концентрация на въглероден двуокис (КВД) $y_3=КВД$ на въздуха в помещения, като се отчита свързаността между променливите и изискванията за енергоефективност на управлението. Използва се лабораторна ОВК система и ПЛК SIMATIC S300 на Siemens за управление на трите свързани променливи в реално време и полупромишлени условия.

Предлага се системата, показана на фиг.5.20, в която се синтезират:

- двусвързан РР_{1,2} за двусвързания подобект с изходи (y_1, y_2) и входове (u_1, u_2);



Фиг. 5.20. Размито управление на относителна влажност Rh, температура T и КВД на въздуха в лабораторна ОВК система

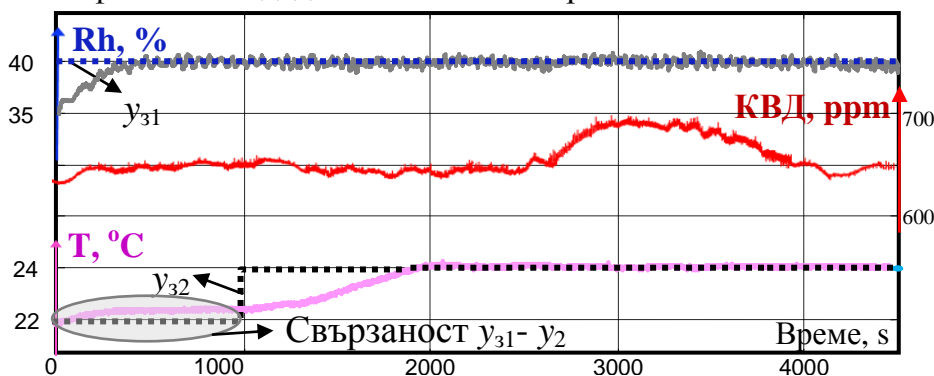
- PP_3 , компенсиращ смущенията в y_3 , като влиянието на y_3 върху y_1 и y_2 се отчита като смущение, което следва да се компенсира от $PP_{1,2}$.

Използват се сингълтни в заключенията на правилата за улесняване на реализацията на РРи в ПЛК SIMATIC S300 на Siemens.

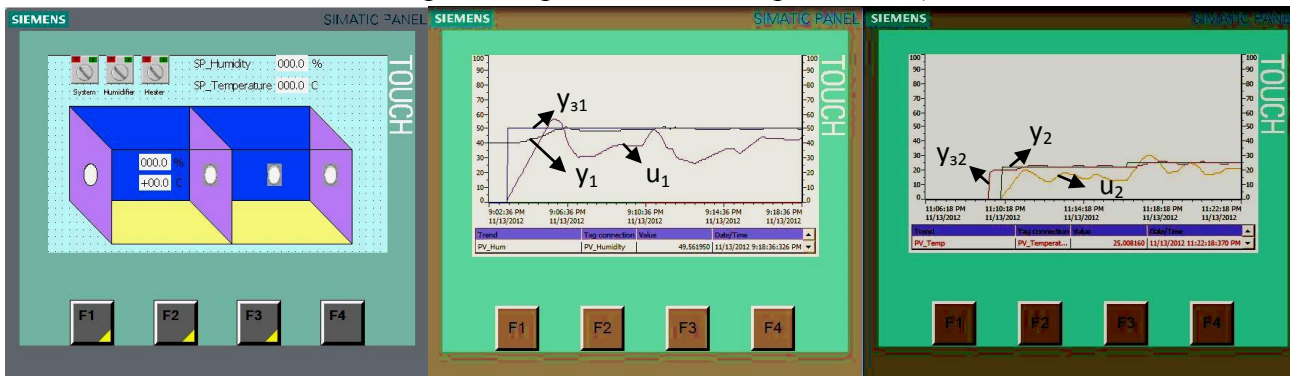
ТСК моделите на двата подобекта се определят по методиката от гл.2.

Модифицираният ТСК модел на двусвързания подобект интегрира изведени чрез ГАи параметрична оптимизация индивидуални за всеки канал ТСК модели на база на експериментално получени преходни характеристики по прави и кръстосани канали в различни работни точки. ТСК моделът на SISO подобекта с вход u_3 и изход y_3 се извежда от преходния процес при управление в реално време на КВД с емпирично настроен PP_3 в система с разрито задание, определено от ФП за терма „Норма“. ТСК моделите се използват за параметричната оптимизация на РРи с помощта на ГАи при целеви функции, съчетаващи изисквания за динамична точност на системата и енергоикономично управление.

На фиг.5.25 са показани преходните процеси, получени от управление в MATLAB™ реално време на влажност и температура със синтезирания $PP_{1,2}$ и за компенсация с PP_3 на нарасналата КВД на въздуха. Свързаността между y_1 и y_2 е малка. Промяната в КВД се компенсира и не се отразява в y_1 и y_2 . Краткото време на регулиране и липсата на пререгулиране е свидетелство за икономично регулиране. Алгоритъмът за управление от фиг.5.20 е програмиран върху ПЛК SIMATIC S300 на Siemens. На фиг.5.27 са дадени основните екрани на SCADA системата.



Фиг. 5.25. Преходни процеси от управление на влажност, температура и КВД на въздуха в MATLAB™ реално време със синтезираните $PP_{1,2}$ и PP_3



Фиг. 5.27. Основен екран на операторския интерфейс и преходни процеси от управление на влажност и температура на въздуха в реално с ПЛК реализиран $PP_{1,2}$

НАУЧНИ, НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Основните приноси на дисертационния труд се изразяват в следното.

Научни и научно-приложни приноси

1. Разработени са нов тип размити SISO и MIMO модели на нелинейни обекти и регулатори:

- модифициран ТСК модел на нелинейни обекти на основа на предавателни функции за компактно описание с ясен физически смисъл на локалните обекти особено при MIMO обектите, и ориентиран към управление на процесни променливи, инженерни приложения и оптимизация с помощта на добре разработената и широко прилагана програмна среда MATLABTM;
- модифициран РР-ПРК на основа на модифицирания ТСК модел на обекта с типови линейни локални регулатори, разпространени в инженерната практика;
- адаптивен регулатор на база на размит супервайзор;
- ТСК-ПРК базиран нелинеен робастен регулатор с вътрешен модел на обекта;
- два варианта на нелинеен предиктор на Смит на основа на ТСК-ПРК;
- нелинеен предикторен РР за компенсация на инерционността и закъснението на обекта на база на обучение на НР Сугено модел и ТСК-ПРК.

2. Разработени са за SISO и MIMO нелинейни обекти нови методи за:

- извеждане на модифициран ТСК модел на обекта от експертни оценки и експериментални данни чрез оптимизационни техники с използване на ГАи и привеждането му в класическо ТСК описание;
- анализ на наблюдаемост и управляемост на нелинейни обекти на база на ТСК модели;
- синтез на модифициран РР-ПРК в честотната и честотно-времевата област, от условия за устойчивост и желани измерими показатели за качеството на нелинейната затворена система;
- синтез на регулатори с пасивна адаптация чрез off-line оптимизация на настройваните им параметри с помощта на ГАи и симулационни изследвания на системата за управление на ТСК модела на обекта;
- синтез на адаптивен на база на размит супервайзор регулатор с on-line нелинейна адаптация на параметрите на основния регулатор в хода на работа на затворената система, без необходимост от ТСК модел на обекта;
- синтез на нелинеен робастен регулатор с използване на РР-ПРК с локални линейни регулатори с вътрешен модел на обекта и преобразуването им в ПИ регулатори, и изследване на устойчивостта на приведената в стандартно

ТСК-ПРК описание глобална затворена нелинейна система;

- синтез на нелинеен Смит предиктор на база на РР-ПРК с локални линейни Смит предиктори и преобразуването му в последователни РРи-ПРК със стандартни локални ПД и ПИ линейни регулатори, съответно, с параметри, определени от параметрите на локалните обекти, и изследване на устойчивостта на приведената в стандартно ТСК-ПРК описание глобална затворена нелинейна система;

- синтез на нелинеен Смит предиктор на база на модифициран РР-ПРК с ПИ локални регулатори, настройвани по локалните обекти без отчитане на закъснението, и ТСК обратна връзка към него, и анализ на устойчивостта на глобалната затворена нелинейна система след апроксимация на локалните обратни връзки с диференциращи звена и привеждане на описанието на системата в стандартна ТСК-ПРК форма;

- синтез на НР предикторен регулатор за компенсиране на инерционността и закъснението на нелинеен обект, съставен от основен РР и обучен за определен чрез симулационни изследвания оптимален хоризонт на прогнозиране НР Сугено предиктор на изхода на обекта в обратната връзка на затворената система, и анализ на устойчивостта на приведената в стандартно ТСК-ПРК описание глобална затворена нелинейна система.

3. Разработени са процедури, методики и алгоритми за:

- off-line оптимизация с използване на ГАи на параметрите на размити регулатори и техни компоненти, модифицирани ТСК модели на нелинейни обекти и ПРК апроксимиращи модели на съставни регулатори от повече РЕи;

- анализ на устойчивост на системите с разработените РРи с използване на условията на Ляпунов и ЛМН за класическо ТСК-ПРК описание на системата;

- анализ на сходимост и скорост на сходимост на адаптацията в адаптивни системи с размит супервайзор;

- определяне на структурата на адаптивен регулатор на база на размит супервайзор посредством анализ на чувствителност;

- оценяване на оптимален хоризонт на прогнозиране.

Приложни приноси

1. Разработени са лабораторни SISO и MIMO полупромишлени обекти за управление (сушилня, свързани резервоари, ОВК система), оборудвани с промишлени измервателни и изпълнителни устройства и присъединени през интерфейсни платки към компютър и Simulink модели и към ПЛК SIMATIC на Siemens, които са програмирани да изпълняват разработените размити алгоритми при управление на обекта в реално време. За някои от обектите

класическите методи за моделиране и управление са неприложими, за други – тези методи не позволяват да се постигнат желаните показатели за качество.

2. Разработените РРи и методите за синтеза им са приложени за управление в реално време в MATLABTM, с ПЛК SIMATIC на Siemens и с ПЛК Experion на Honeywell на различни лабораторни и индустриални обекти:

- нивото на амониевия разтвор в карбонизационна колона за производство на сода в Солвей Соди ООД - гр.Девня (индустриален обект);
- нивото и нивата на течност в свързани резервоари на разработена лабораторна система (SISO и MIMO нелинейни обекти без саморегулиране);
- относителната влажност, температурата и концентрацията на въглероден двуокис на въздуха в помещение в разработена лабораторна система за отопление, вентилация и климатизация (MIMO нелинеен обект);
- температурата на въздуха в разработена лабораторна сушилня и в лабораторна пещ (SISO нелинейни инерционни обекти със значително чисто закъснение).

3. Синтезираните РРи водят до подобряване на различни показатели, което се оценява от експерименталните изследвания на системите и при сравнение с показателите на системи с линейни регулатори или стандартни РРи:

- намалени са сумарната относителна динамична грешка в системата, пререгулирането и времето на регулиране;
- намалено е сумарното управляващо въздействие, управляващото въздействие бързо се установява по време на преходните процеси без колебания или с понижени колебания по амплитуда и продължителност;
- показателите остават близки в различните работни точки, въпреки, че нелинейният обект променя значително своите параметри с работната точка;
- намалено е влиянието както на свързаността между променливите при MIMO обекти, така и на случайните смущения.

4. Резултатите се прилагат за обучение на студенти и докторанти. От март 2017 г. ПРК е внедрен за размито управление на нивото на амониевия разтвор в карбонизационна колона в Солвей Соди ООД - гр. Девня. Показателите за качество на управление се подобряват с около 15%.

Списък на публикациите във връзка с дисертационния труд

А. Публикации с импакт фактор в Scopus, Thomson Reuters и Elsevier

І. Глава в книга

A1.1. Yordanova S (2016) *Design of Fuzzy Supervisor-based Adaptive Process Control Systems*. In: *New Approaches in Intelligent Control: Techniques, Methodologies and Applications*, Book series “Intelligent Systems Reference Library”, Eds: K. Nakamatsu, R. Kountchev, Springer Int. Publ., Switzerland, 107, Ch. 1: 1-42. **Sc SJR 0.135**

ІІ. Статии в научни списания

A2.1. Yordanova S, Tashev T (2012) Fuzzy Internal Model Control of Nonlinear Plants with Time Delay based on Parallel Distributed Compensation. *WSEAS Trans. Cir. & Sys.* 11(2): 56-64. **Sc SJR 0.158**

A2.2. Yordanova S, Jain L (2012) Design of Process Fuzzy Control for Programmable Logic Controllers. *Int. J. of Innovative Comp., Information & Control, ICIC Int.* 8(12): 8033- 8048. **Sc SJR 0.777– 4 цитирания**

A2.3. Yordanova S (2014) Intelligent Approaches for Linear Controllers Tuning with Application to Temperature Control. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(6): 2809-2820. **ThR IF 1.004, Sc SJR 0.391– 1 цитиране**

A2.4. Yordanova S, Merazchiev D, Jain L (2015) A Two-Variable Fuzzy Control Design with Application to an Air-Conditioning System. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems* 23(2): 474-481. **ThR IF 6.701, Sc SJR 4.754– 13 цитирания**

A2.5. Yordanova S (2016) Fuzzy Logic Approach to Coupled Level Control. *Sys. Sci. & Contr. Eng. - An Open Access Journal* 4(1): 215-222. **Sc SJR 2.173**

A2.6. Yordanova S (2016) A Frequency Domain Approach for Design of Stable Fuzzy Logic Systems with Parallel Distributed Compensation. *WSEAS Trans. on Systems* 15: 85-93. **Sc SJR 0.184**

A2.7. Yordanova S (2017) Energy Efficient Fuzzy Logic Control of Indoor Air-Conditioning in Real Time. *WSEAS Trans. on Cir. & Sys.* 16: 163-170. **Sc SJR 0.114**

A2.8. Yordanova S, Jain L (2017) Design of Supervisor-based Adaptive Process Fuzzy Logic Control. *Int. J. of Advanced Intelligence Paradigms* 9(4): 385-401. **Sc SJR 0.199**

A2.9. Yordanova S, Yankov V, Jain L (2017) MIMO Fuzzy Logic Supervisor-based Adaptive Control using the Example of Coupled-Tanks Levels Control. *Int. J. of Innovative Comp., Information & Control, ICIC Int.* 13(2): 453-470. **Sc SJR 0.778**

A2.10. Yordanova S, Ichtev A (2017) A Model-Free Neuro-Fuzzy Predictive Controller for Compensation of Nonlinear Plant Inertia and Time Delay. *Informatica* 28(4): 749-766. **ThR IF 1.056, Sc SJR 0.386**

A2.11. Yordanova S, Slavov M, Gueorguiev B (2018) Parallel Distributed Compensation for Improvement of Level Control in Carbonisation Column for Soda Production. *Contr. Eng. Practice* 71: 53-60. **ThR IF 2.602, Sc SJR 1.287**

A2.12. Yordanova S (2018) TSK Model-based Fuzzy Logic Control of Carbon Dioxide Concentration in Rooms. *J. Mechatronic Systems & Control (J. Control & Intell. Sys.)* 46(1): 32-38 **Sc SJR 0.240**

III. Доклади на международни конференции в чужбина

A3.1. Yordanova S, Tzvetkov P (2017) Intelligent Approaches for Control of Nonlinear Plants with Significant Time Delay. *Proc. 9th IEEE Int. Conf. on Intell. Data Acquisition & Advanced Comp. Sys.- IDAACS'2017: Technology & Appl.*, 21-23 Sept., Bucharest, Romania: 558-563. **Sc SJR 0.123**

Б. Публикации в научни списания и доклади от конференции

I. Статии в чуждестранни списания

B1.1. Yordanova S, Dimitrov L, Klochkova M, Bankov H (2011) Fuzzy Logic Based Approach in an Enterprise Resource Planning System for Hydraulic Cylinders Assembly. *Journal of Mechanics Engineering & Automation* 1(6): 425-435.

B1.2. Yordanova S, Sivchev Y (2014) Design and Tuning of Parallel Distributed Compensation-based Fuzzy Logic Controller for Temperature. *Journal of Automation & Control* 2(3): 79-85. – **3 цитирания**

B1.3. Yordanova S, Yankov V (2015) Design and Stability Analysis of Supervisor-based Adaptive Fuzzy Logic Control System for Temperature. *Int. J. of IT, Eng. & Appl. Sci. Res.* 4(4): 20-29.

B1.4. Yordanova S (2015) Intelligent Approaches to Real Time Level Control, *Int. J. Intell. Sys. & Appl.* 7(10): 19-27. – **1 цитиране**

B2.5. Yordanova S, Yankov V, Marinchev A (2016) Real Time Adaptive Fuzzy Control of Coupled Levels via Programmable Logic Controller. *Int. J. of IT, Eng. & Appl. Sci. Res.* 5(5): 1-8.

II. Статии в български списания

B2.1. Yordanova S (2012) Fuzzy Smith Predictor for Nonlinear Plants with Time Delay based on Parallel Distributed Compensation. *Proceedings of the Technical University -Sofia* 62(2): 15-24.

B2.2. Yordanova S, Yankov V (2013) Design and Implementation of Fuzzy Two-Level Control. *Proceedings of the Technical University -Sofia* 63(1): 79-88.

B2.3. Yordanova S, Georgieva A (2013) Genetic Algorithm Based Optimization of Fuzzy Controllers Tuning in Level Control. *J. Electrotechnica & Electronica E+E* 48(9-10): 45-51. – **2 цитирания**

B2.4. Йорданова С (2014) Електронни форми за учене и развитие на компетенции по интелигентни системи за управление. *Годишник на ТУ-София* 64(1): 121-130.

B2.5. Yordanova S, Yankov V (2014) Fuzzy Supervisor for Nonlinear Self-Tuning of Controllers in Real Time Operation. *Proceedings of the Technical University-Sofia* 64(1): 131-140.

Б2.6. Yordanova S, Stoitseva-Delicheva D (2015) Supervisor-based Fuzzy Logic Control of Anaerobic Organic Wastewater Treatment. *Proceedings of the Technical University-Sofia* 65(1):147-156.

Б2.7. Yordanova S (2015) An Approach to Observability and Controllability Analysis of Nonlinear Plants on the basis of TSK Models. *Information Technologies & Control* 1-2: 35-45.

III. Доклади на международни конференции в чужбина

Б3.1. Lepadatescu B, Yordanova S (2013) Neuro-Fuzzy Logic Based Modelling for Optimisation in Superfinishing Process. In: *Recent Advances in Electrical Engineering Series. Proc. 15th Int. Conf. Advances in Automatic Control, Modelling & Sim.*, 1-3 June, Brasov, Romania 13: 48-52.

Б3.2. Yordanova S, Merazchiev D, Mladenov V (2013) Fuzzy Control of Carbon Dioxide Concentration in Premises. In: *Recent Advances in Sys Sci.*: 269-273. – **1 цитиране**

IV. Доклади на международни конференции в България

Б4.1. Yordanova S, Merazchiev D, Georgieva A (2012) Investigation of the Real Time Fuzzy Control System of a Two-Variable Plant. *Proc. 10th Int. Conf. "Challenges in Higher Education and Research in the 21st Century"*, Sozopol, 5-8 June: 50-54.

V. Учебници и ръководства

Б5.1. Йорданова С, Георгиев М, Меразчиев Д, Янков В (2014) *Интелигентни системи за управление. Ръководство за лабораторни упражнения*: 90.

Благодарности

Изказвам своята благодарност на моите колеги от катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“ за подкрепата им в развитието ми в областта на интелигентните системи за управление. Признателна съм на моите асистенти, докторанти и дипломанти за въпросите им, съвместните проекти и обсъжданията, довели до успехи и радостни изживявания. Благодаря на близките си за търпението и разбирането към моята работа и ангажираност.

Поднасям своите благодарности на колегите от факултет „Автоматика“ и на ТУ-София за проектите, които позволиха да се реализират и проверят на практика много от смелите идеи, както и да се публикуват добрите резултати. Благодаря на ТУ-София и за програмата Еразъм, която ме свързва с водещи учени и колективи в областта на дисертацията ми и доведе до творчески контакти и трайни приятелства.

Summary

Intelligent Systems for Process Control based on Fuzzy Logic

Prof. Dr. MEng. Snejana Todorova Yordanova

The contemporary plants grow in complexity in response to the demand to produce more and of high quality urged by the market competition and the improved standard of living. The increased requirements to their modelling and control can no longer be satisfied by classical approaches. Fuzzy logic (FL) offers simple and unified techniques for stable and robust control of process variables based on expert knowledge. Optimization techniques using genetic algorithms (GAs) can enhance the tuning and the adaptation facilities of the fuzzy logic controllers (FLCs) and reduce the subjectivity in its design. In order to prepare the FLCs for broad industrial implementation in process control the following aim of the present investigation is formulated: to develop a general and complete approach for the design of high performance FLC systems using plant expert information and practically feasible algorithms with enhanced adaptability which ensure system stability and desired performance and compensate the plant nonlinearity, inertia, multivariable character, model uncertainty and parameter changes.

The research methodology combines: expert knowledge and optimization techniques using GAs; Lyapunov stability analysis and linear matrix inequalities numerical solver; numerical time-domain and frequency-domain methods; the principle of parallel distributed compensation (PDC) and methods from the linear control theory – the internal model controller and the Smith predictor; sensitivity and convergence rate analysis and optimal prediction horizon estimations.

The main contributions conclude in the development of:

- New types of SISO and MIMO TSK based plant models and FLCs with enhanced adaptivity and compensation of plant inertia, model uncertainty and parameter changes, feasible for use by industrial programmable logic controllers
- Design methods for the new FLCs using the new TSK plant models based on stability and robustness requirements, off-line GAs parameter optimization and on-line gains adjustment by FL supervisors.

All developed methods use minimal initial knowledge about the plant, experimental data for modelling, approximation, optimization, model validation and performance assessment. The results are tested in real time PLC control of laboratory-scale plants and an industrial plant from the production of soda ash in Solvay Sodi Ltd – Devnya where the average improvements comprise 15% greater dynamic accuracy.