



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Факултет Автоматика
Катедра „Автоматизация на непрекъснатите
производства“**

Маг. инж. Милен Николаев Славов

РАЗМИТО УПРАВЛЕНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ ОТ ХИМИЧЕСКАТА ПРОМИШЛЕННОСТ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и
автоматика
Научна специалност: „Автоматизация на производството“

Научен ръководител: Проф. дн инж. Снежана Йорданова

СОФИЯ, 2025г.

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 08.10.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 02.02.2026 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-79/16.10.2025г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Методи Георгиев – Председател
2. доц. д-р инж. Албена Танева – Научен секретар
3. проф. д-р инж. Коста Бошнаков
4. проф. д-р инж. Красимира Стоилова
5. доц. д-р инж. Ясен Горбунов

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Методи Георгиев
2. доц. д-р инж. Ясен Горбунов

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в канцеларията на Факултет Автоматика на ТУ-София, блок №2, кабинет № 2340.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“ на факултет Автоматика. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Милен Славов

Заглавие: Размито управление на технологични процеси от химическата промишленост

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Съвременната химическа промишленост е изправена пред редица предизвикателства, породени от изострящата се конкурентна среда и все по-строгите екологични стандарти. За справяне с тях е необходимо ефективно използване на суровините, редуциране на консумираната енергия, относителното количество отпадък и бракувана продукция, увеличаване на междуремонтния период на съоръженията и намаляване на относителния брой на аварията.

Разработването на ефективни алгоритми за управление е една от важните цели в усъвършенстването на промишлената автоматизация. Изграждането на интелигентни системи, базирани на размита логика (РЛ) и генетични алгоритми (ГА), е сред основните инструментариуми за решаване на тези задачи.

Размитите регулатори (РР) са привлекателни за индустриално приложение. Те притежават несложен нелинеен алгоритъм, унифициран синтез и добри показатели за качеството на управление на нелинейни обекти без класически математически модел в условията на смущения, каквито са процесите от химическата промишленост. Чрез разработването на размити модели се описват сложни и нелинейни индустриални обекти.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е разработването и индустриалното приложение алгоритми и структури, базирани на РЛ и методи за синтез на основа на експертни знания за обекта, принципите на робастното управление и параметрична оптимизация с помощта на ГА. С разработените системи се търси подобряване на управлението на промишлен обект – нивото на карбонизационна колона (ККл) при производство на калцинирана сода.

Основните задачи за реализиране на целта са следните:

1. Изучаване на обекта за управление и разработване за целите на симулационни изследвания на модифицирани Такаги-Сугено-Канг (МТСК) модели на база на данни от експерименти в реално време.

2. Синтез и промишлена реализация на система за автоматично управление (САУ) на ниво на разтвора в ККл със Сугено РР с вход грешката, без класически модел на обекта на основата на експертни знания и с отчитане на условията за робастна устойчивост и робастно качество.

3. Синтез и промишлена реализация на САУ за ниво с РР от размита единица (РЕ) с два входа – с грешка и основно смущение и с грешка и производна на регулируемата величина.

4. Проектиране, промишлена реализация и изследване на система с ПИД адаптивен РР (АРР) чрез механизъм с паралелно разпределена

компенсация (ПРК) за адаптация на коефициентите на РР при метод за синтез чрез оптимизация с ГА на параметрите на АРР.

5. Анализирани са робастността на система с ПИД АРР чрез модификация на зададени условия за робастна устойчивост и робастно качество на система с РР.

Поставените задачи се решават чрез провеждане на експерименти с реално действаща промишлена инсталация и чрез симулационни изследвания в среда MATLAB™.

Научна новост

Изведени и валидирани са от експериментални данни МТСК модели на сложен технологичен обект за управление - нивото на разтвор в ККл. Обектът се характеризира с нелинейност, променливост на параметрите, многосвързаност, моделна неопределеност, динамична несиметричност и влияние на редица индустриални смущения.

Синтезирани са различни варианти на ПИ и ПИД РР, РР с компенсация на основното измеримо смущение и АРР при отчитане на изискванията, свързани с промишлената реализация на системата с РР за улеснено реализиране в програмируем логически контролер (ПЛК) за управление в реално време и индустриални условия, робастна устойчивост и робастно качество.

Предложен е АРР на основа на ПД РР с входове на РЕ за грешката и производната на регулируемата величина и паралелен линеен интегратор. Адаптацията на параметрите на регулатора се извършва чрез ПРК механизъм при промяна на текущата стойност на регулируемата величина или нейното задание.

Анализирана е робастността на система с ПИД АРР чрез модификация на зададени условия за робастна устойчивост и робастно качество на система с РР. Показано е, че системата с АРР е еквивалентна на робастната система с фиксирани параметри.

Създадена е методика за оптимизация на параметрите при извеждане на МТСК моделите на обекта и настройка на РР на основа на ГА, експериментални данни, симулация и предложени целеви функции (ЦФ).

Практическа приложимост

Разработените РР и АРР са реализирани в „Солвей Соди“ АД, гр. Девня в съществуващия ПЛК на Honeywell с общо предназначение, като РЛ е изградена посредством наличните аритметични и логически функции. За намаляване на влиянието на индустриалните смущения при изчисляване на производната на регулируемата величина е използвана крайна разлика на два филтъра пълзящо средно.

Проведени са симулации в MATLAB™ и експериментални изследвания в индустриална среда и работеща ККл на затворените системи с РР и АРР. Качеството на регулиране на някои от изследваните системи е оценено по предложен обобщен показател,

отчитащ постигнатите динамична точност на системата и гладкост на управлението.

Апробация

Настоящият дисертационен труд обхваща изследвания, получили обективна оценка при публикации в индексирани научни списания и доклади и презентации на международни научни конференции.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са отпечатани в общо шест публикации. От тях в съавторство са пет статии - в SCOPUS индексираните издания „Engineering Science and Technology“, „WSEAS Transactions on Systems and Control“, „Jordan Journal of Electrical Engineering“, „Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie“ и доклад на IEEE „International Conference Automatics and Informatics‘2022“ във Варна. Отпечатан е и един самостоятелен доклад от „International Conference AUTOMATICS‘2022“ в Созопол.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 145 страници, като включва Въведение, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, Заключение с изброените основни приноси, списък на публикациите по дисертацията и на използваната литература. Цитирани са общо 135 източника, като 101 са на латиница и 21 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Дисертацията съдържа 51 фигури и 14 таблици. Номерата на фигурите, формулите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

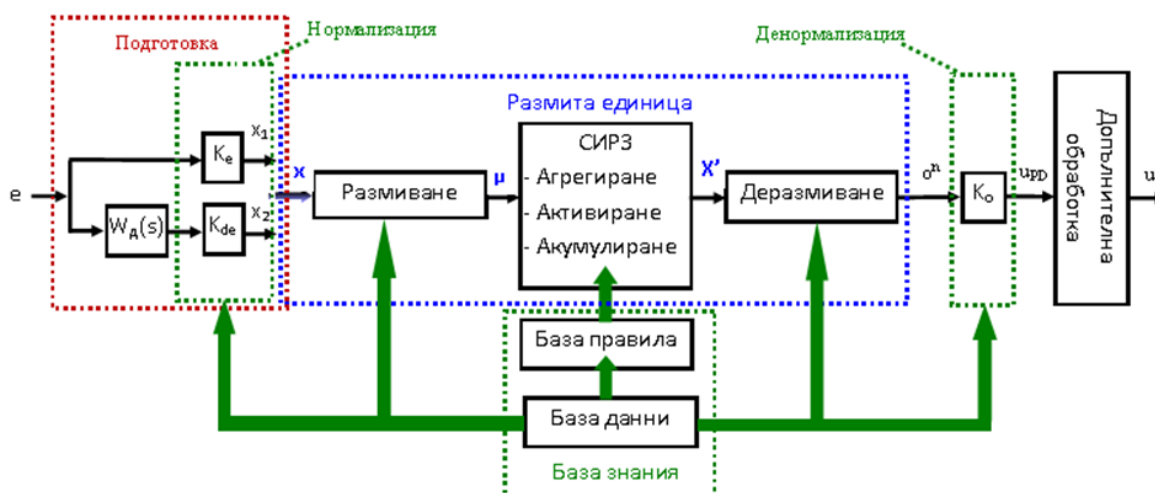
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ПРЕГЛЕД НА МЕТОДИТЕ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА РАЗМИТИ РЕГУЛАТОРИ

Под размити системи за целите на автоматичното управление се разбира приложението на размити модели и РР. Размитото моделиране се основава на размити множества (РМ) и РЛ, чрез представяне и обработка на данни с нестатистическа неопределеност, изразени с думи и извеждане на заключение по начин подобен на човешкото мислене на базата на изчисления с думи. РР могат да се разглеждат като формализиран модел на действията т.е. на взетите решения на експерт или опитен оператор за управление на даден обект. Сред най-разпространените РМ са класическите РМ, т.е. Тип-1, интуиционистките на Атанасов, РМ Тип-2 и РМ с интервални стойности.

1.2.1. Размити регулатори

Съществува голямо разнообразие от РР в зависимост от тяхната структура и функциите, които реализират. Широко разпространени са ПИД РР. Най-използваната базова структура на РР е показана на фиг. 1.2, където е грешката – разликата между заданието и изхода на обекта, $W_d(s)$ е предавателната функция (ПФ) на диференциатора, K_e и



Фиг. 1.2 Блокова схема на размит регулатор

K_{de} са нормализиращи, а K_o е денормализиращ коефициент, o^n е нормализираният изход на РЕ, u_{PD} е изходът след денормализация, u е изходът на регулатора.

За получаване на ПИД РР в допълнителната обработка е необходимо звено с ПФ от вида $W_{PI}(s) = K_p + K_i/s$ и като резултат управлението ще съдържа П, И и Д нелинейни части.

Сред най-разпространените варианти на структури на РР са: а) Използва се ПД РР с паралелен на него линеен интегратор на грешката за получаване на размит ПД+И регулатор; б) Изходът на ПД РЕ се интегрира и след това се сумира с паралелен на нея линеен блок с коефициент k_{de1} , реализиращ $k_{de1}.de^n$ за получаване на размит ПИ+Д регулатор; в) с две паралелни ПД РЕ, като изходът на първата се интегрира и след това се сумира с изхода на втората за получаване на размит ПИД (ПИ+ПД) регулатор.

В промишлеността РР намират приложение за управление на нелинейни, нестационарни, многосвързани, без саморегулиране обекти и в случаите, когато е неефективно използването на класически линейни регулатори.

1.2.2. Класически и модифициран Такаги-Сугено-Канг модел

Класическият Такаги-Сугено-Канг (ТСК) модел представлява съчетание на РМ и РЛ с принципите на линейната теория за управление. За прилагането на ТСК модел се изхожда от допускането, че областта на работа на един нелинеен обект може да се раздели на M на брой работни зони, в околността на всяка от които той се апроксимира като линеен. За всеки локален линеен модел се използва представяне в пространство на състоянията. Поведението на нелинейната динамична система се описва чрез размито смесване на локалните линейни динамични модели в заключенията на размитите правила.

Допълнително развитие на класическия ТСК модел представлява МТСК моделът. При него се реализират размитите правила в Сугено

модел, който е с толкова изводи, колкото са зоните на линеаризация M . Динамичната част на МТСК модела е изградена от паралелно работещи звена с експертно дефинирани ПФ, които имат общ вход - входът на обекта. Изводите на Сугено модела са с функции на принадлежност (ФП) сингълтъни 1 и 0, задаващи нивото на активация на локалните ПФ. По този начин се извършва плавно смесване за получаване на общия изход – чрез претеглено средно от изходите на всеки от паралелните локални линейни модели.

1.2.3. Размити регулатори с паралелно разпределена компенсация

На базата на ТСК модела е разработен регулатор известен като **РР с ПРК**. При него има същия брой размити правила и същите условия както при ТСК модела на обекта, но изводните им части представляват линейни обратни връзки по изход на обекта или линейни регулатори с описание в пространство на състоянието.

Модифицираният ПРК РР се изгражда на база на структурата на МТСК модела на обекта. Предимството му спрямо класическия РР с ПРК е, че заключенията му са изпълнени в отделна динамична част от паралелно работещи локални линейни регулатори, описани със съответните ПФ. Управляващото въздействие на модифицирания ПРК РР се получава като претеглено средно от изходите на локалните линейни регулатори.

1.3. Методи за синтез на системи с размити регулатори

При синтезът на САУ с РР от особена важност са въпросите свързани с тяхната устойчивост. Тя се изследва чрез методи основани на класическите нелинейни системи или на динамичните размити системи. Във времевата област най-разпространените са Метод на фазовата равнина, Пряк метод на Ляпунов и модификации на непрекия метод на Ляпунов, базирани на ТСК размити динамични модели. В честотната област са Методът на описващите функции, Метод на ограничените вход и изход, Критерий за малкия коефициент, Кръгов критерий и Метод на Попов.

1.3.1. Метод на Морари за робастна устойчивост и робастно качество на линейна система

При методът на Морари реалният обект се замества от семейство обекти, дефинирано от номинален обект и мултипликативна моделна неопределеност. Условието за робастна устойчивост изисква Найквист характеристиката (НХ) на отворената система за номинален обект заедно с насложените дискове на неопределеност да остава вдясно от точката на Найквист $(-1, 0j)$ за всяка честота ω . Условието за робастно качество добавя към критерия за робастна устойчивост и абсолютната стойност на производението на ограничената отгоре функция на чувствителност, показваща как се изменя грешката $e(s)$ при единица промяна на смущението $d(s)$, с ПФ на зададеното с филтър смущение на изхода на обекта, валидно за всяка неотрицателна ω .

1.3.2. Модифициран метод на Попов за робастна устойчивост и робастно качество

Той е подходящ за САУ с РР и представлява съчетание на метода на Попов с метода на Морари. Прилага се за синтез на РР с единствен вход. Структурата на САУ се преобразува, като се представя чрез обособени нелинейна статична част, съдържаща РЕ и линейна динамична част, включваща последователно свързаните звена от подготовката, допълнителната обработка и обекта. Нейната НХ трябва да е разположена вдясно от правата на Попов, прекарана през точката $(-1/K_c, j0)$, $K_c = K-r$, като K и r са наклоните на правите, зададени съответно от най-стръмния наклон на нелинейната статична характеристика и от коефициентът на отрицателната обратна връзка, обхващаща линейната динамична част, за да стане тя устойчива и компенсирана с паралелна на РЕ обратна връзка с коефициент r . За тази цел се използва настройка на K и r при синтеза на РЕ и определяне на параметрите от предварителната и допълнителната обработка, осигуряващи устойчив обект с насложени дискове на неопределеност и подходящо положение на НХ.

1.4.1. Размито адаптивно управление

При АРР се извършва автоматична настройка на регулатора с цел постигане на желани показатели за качество на управление при промяна на обекта или работните условия. Адаптират се коефициентите за нормализация и денормализация, ФП – техните върхове или сингълтни и базата правила – обикновено се променят заключенията им.

Голямо разпространение имат системите с твърда адаптация при които онлайн и нелинейно се променят параметрите на линеен ПИД или на РР чрез регулатор с РЛ от по-високо ниво в зависимост текущата работна точка.

1.4.2. Параметрична оптимизация в размитите системи

Оптимизацията е целенасочена дейност за получаване на най-добър резултат в определен смисъл и при определени условия. Основни елементи са обектът, критерият, т.е. ЦФ и методът за оптимизация. Като техника за оптимизиране ГА са базирани на генетиката и на естествения подбор. Те са бърз и ефективен метод за случайно и безградиентно търсене на глобален екстремум на зададени неаналитично мултимодални ЦФ на голям брой управляващи параметри. Чрез селекция се възпроизвеждат индивидите с най-добри ЦФ и посредством кръстосване между тях се търси подобряване на резултата. Чрез мутация се излиза от локален екстремум и се създават нови индивиди, липсващи в предходни поколения. Генетичните алгоритми намират широко приложение при синтез на РР и извеждане на размити модели.

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ НА ОБЕКТА ЗА УПРАВЛЕНИЕ. ИЗВЕЖДАНЕ И ВАЛИДИРАНЕ НА МОДИФИЦИРАНИ ТАКАГИ-СУГЕНО-КАНГ МОДЕЛИ

2.1. Описание на карбонизационна колона и обекта за управление

Производството на синтетична калцинирана сода – натриев карбонат (Na_2CO_3) днес се базира предимно на метода на Солвей, наричан още „мокър амонячен метод“.

Изходни суровини за технологията са готварска сол (NaCl), варовик (CaCO_3) и вода (H_2O). Основен процес в него е карбонизацията на амонизирания солен разтвор (АР), която протича в ККл и се изразява със следната реакция:



Като апарати с непрекъснато действие ККл функционират на принципа на противотока. Пълният оперативен цикъл на всяка ККл се състои от два режима – работа (режим на утаяване) и промивка. Съотношението на периодите им от време е 72 часа към 24 часа или 3:1. Всяка ККл е конструирана като вертикален апарат с височина 28 m и диаметър 3 m, комплектуван от цилиндрични пръстени. Максималното натоварване в режим на работа/промивка е 70/210 m^3/h .

Обект за регулиране е нивото на течността в режим работа на ККл чрез промяна положението на регулиращия орган за предкарбонизиран разтвор (ПКР), получен след промивката на ККл. Обобщеният обект включва радарен нивомер и изпълнително устройство.

Нивото на ККл е подложено на редица смущения, най-силно въздействие от които има промяната на налягането P в хранящия колектор за ПКР. Допълнителни смущения са натоварването на ККл, положението на регулиращата клапа за изходящата от ККл бикарбонатна суспензия, охлаждането в топлообменната част, което влияе на хода на реакцията (2-1). Макар в по-малка степен и по-бавно във времето върху хода на реакцията (2-1) оказват въздействие и параметрите на ПКР (неговата температура и степен на пресищане), на АР (концентрация на NaCl , степен на насищане с NH_3 и температура) и на двата входящи газа – „смесен“ и „слаб“ (концентрация на CO_2 и температура).

Нивото на ККл е нелинеен и нестационарен обект за регулиране – неговите параметри се променят по време на работния режим от 72 часа. Това затруднява използването на класически линейни регулатори и изисква прилагането на модерни стратегии за постигане на управление с по-добри показатели за качество..

2.2. Извеждане и валидиране на модифицирани Такаги-Сугено-Канг модели

В зависимост от натоварването и от смущението са разработени три варианта на МТСК модели на обекта за целите на симулационни изследвания. Извеждането им е направено по обща методика,

базирана на параметрична оптимизация с ГА и ЦФ средно-квадратичната грешка на модела:

$$F_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (y_{\text{exsk}}^m - y_{\text{TSKk}})^2 \quad (2-2)$$

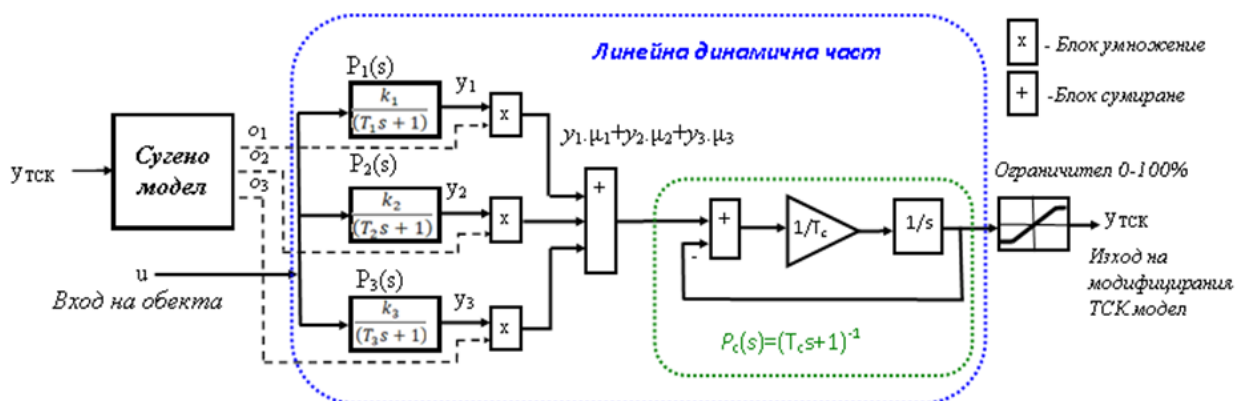
където N е големината на извадката - броят на направените измервания в дискретни моменти от време $t_k = k \cdot \Delta t$, $k=0 \div N$ с период на отчитане $\Delta t_k = 1$ s, а $e_{mk} = y_{\text{exsk}}^m - y_{\text{TSKk}}$ е грешката на модела получена като разлика между изгладената стойност от експеримента y_{exsk}^m (от данните за моделиране) и стойността на модела y_{TSKk} в момента k при един и същ вход. Валидирането на изведения МТСК модел на обекта се извършва с различни данни $(u_{\text{exs}}^v, y_{\text{exs}}^v)$ спрямо тези, използвани при моделирането.

На фиг. 2.4 е показан Вариант 1 на МТСК модел, който се реализира в MATLAB™ и се използва в т. 4.2. Статичната му част се състои от Сугено модел с вход изходът y_{TSK} (при точен модел $y_{\text{TSK}} = H_{\text{exs}}$) и с три изхода - степените на принадлежност μ_1 , μ_2 и μ_3 на текущата стойност на y_{TSK} към всяка експертно определена зона на линеаризация, $\sum \mu_i = 1$, $\mu_i \in [0, 1]$, $i=1 \div M$, $M=3$. Входът y_{TSK} има експертно определени стандартни и ортогонални ФП. Те са с триъгълна форма за С (средна) и трапецовидна за крайните Нс (ниска) и В (висока), като включват най-често използваните стойности на заданието $H_i = 40, 50$ и 60 % и са дефинирани както следва: Нс $[0 \ 0 \ 35 \ 50]$, Н $[35 \ 50 \ 65]$ и В $[50 \ 65 \ 100 \ 100]$ % ниво. Изходите $o_1 \div o_3$ са с ФП сингълтъни 1 и 0, отразяващи степените на принадлежност $\mu_1 \div \mu_3$ към трите зони чрез размити правила:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{ IF } y_{\text{TSK}} \text{ is Hc THEN } o_1^1 = 1, o_2^1 = 0, o_3^1 = 0 \\ R_2: & \text{ IF } y_{\text{TSK}} \text{ is C THEN } o_1^2 = 0, o_2^2 = 1, o_3^2 = 0 \\ R_3: & \text{ IF } y_{\text{TSK}} \text{ is B THEN } o_1^3 = 0, o_2^3 = 0, o_3^3 = 1, \end{aligned} \quad (2-3)$$

където o_i^j е i -тия извод на j -тото правило, като $i, j=1 \div 3$. Така $o_1 = \mu_1 \cdot o_1^1 + \mu_2 \cdot o_1^2 + \mu_3 \cdot o_1^3 = \mu_1$ и аналогично $o_2 = \mu_2$ и $o_3 = \mu_3$.

Линейната динамична част има три локални и линейни за всяка зона модели на обекта с ПФ $P_1(s) \div P_3(s)$ с общ вход управлението u . Общото апериодично звено $P_c(s) = (T_c s + 1)^{-1}$ отразява инертността на всички локални обекти, намалява общия брой параметри на модела и



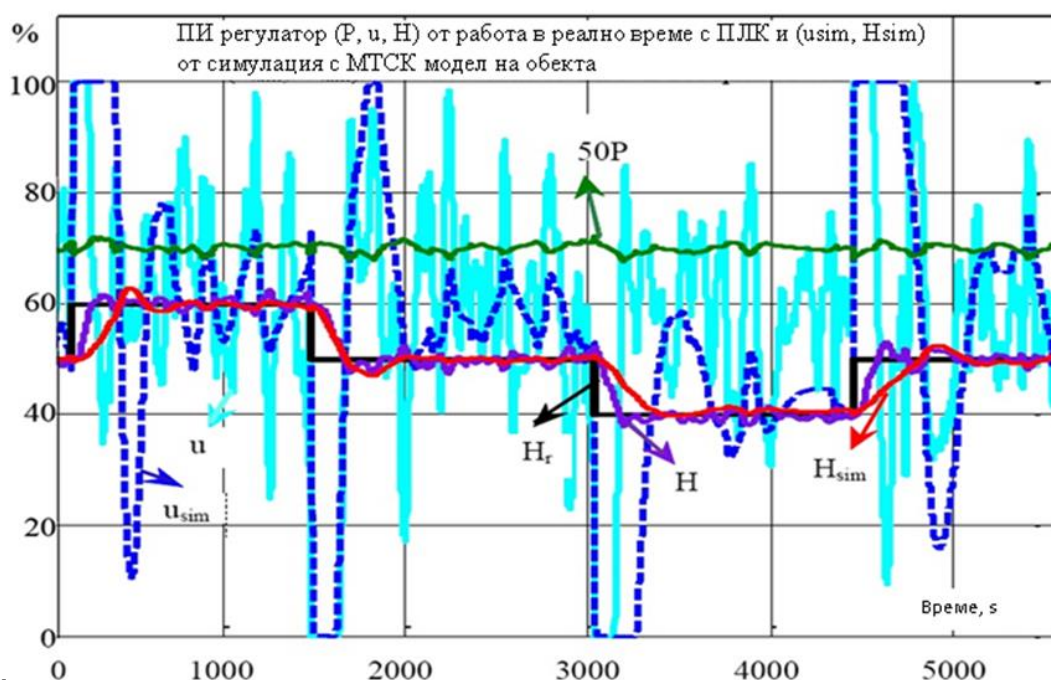
Фиг. 2.4 Вариант 1 на модифициран Такаги-Сугено-Канг модел на обекта

позволява да се въведат ненулеви начални условия за нивото $H(0)=y(0)$ чрез началната стойност на интегратора.

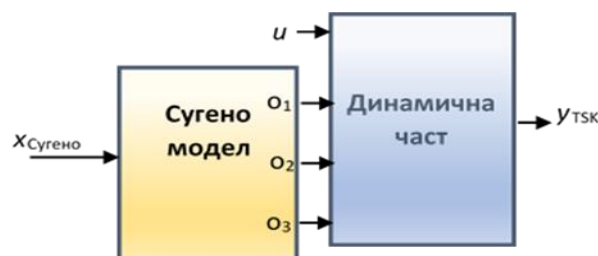
Параметрите на МТСК модела на обекта $\mathbf{q}_{\text{TSK}}=[K_1 \ T_1 \ K_2 \ T_2 \ K_3 \ T_3 \ T_c \ H(0)]$ се получават като резултат от оптимизация с ГА и симулации с данни $u_{\text{exs}}-y_{\text{exs}}$ (вход-изход на обекта). Входно-изходните данни са получени от съществуващата затворена САУ от експерименти при управление на нивото в реално време с класически ПИ регулатор. Използваните сигнали са богати на честоти и амплитуди в целия обхват на работа на обекта, за да може ТСК моделът да отрази неговия нелинеен характер.

На фиг. 2.5 са показани графиките при изменение на заданието H_r в последователността 50-60-50-40-50 % за промяната на нивото, на управлението и на основното смущение - P на ПКР (т. 2.1.). При регулиране в реално време с линеен ПИ регулатор (H и u) и при симулациите с изведения МТСК модел (H_{sim} и u_{sim}) преходните процеси на фиг. 2.5 са близки.

Изведените три варианта на МТСК модели могат обобщено да се представят с блоковата диаграма от фиг. 2.11. Те се изграждат от три



Фиг. 2.5 Преходни процеси на затворената система с Вариант 1 на модела от симулация (H_{sim} , u_{sim}) и с карбонизационна колона в работен режим (H , u)



Фиг. 2.11 Обобщена структура на изведените модифицирани Такаги-Сугено-Канг модели

Табл. 2.1 Параметри на изведените модифицирани Такаги-Сугено-Кане модели

q_{TSK}	K_1	T_1, s	K_2	T_2, s	K_3	T_3, s	$T_c/T_4, s$	$H(0), \%$
Вариант 1	1.3	187	1.2	17	1.23	97	678	50
Вариант 2	0.31	24	0.75	219	0.99	481	164	29
Вариант 3	0.35	24	0.49	80	0.58	73	183	26

локални линеаризирани модела на обекта и имат размит Сугено модел за нелинейната статична част с три изхода и входен вектор $\mathbf{x}_{\text{Сугено}}$. При Вариант 1 и Вариант 2 на МТСК моделите $\mathbf{x}_{\text{Сугено}}=[y_{\text{TSK}}]$, а при Вариант 3 $\mathbf{x}_{\text{Сугено}}=[u^n \ \Delta P^n]$, където ΔP^n е нормализираното изменение на смущението P .

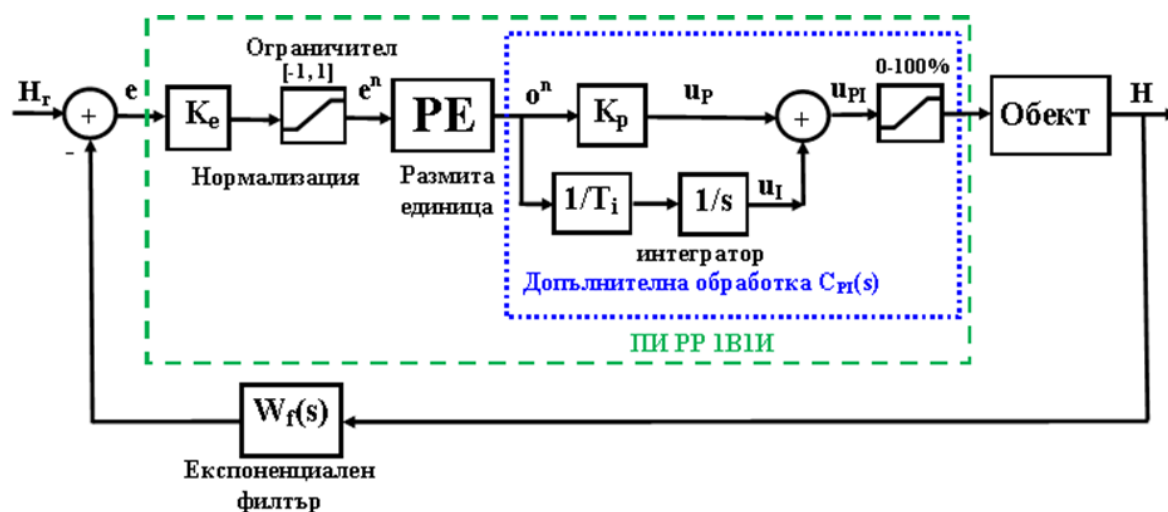
Получените след оптимизация с ГА параметри на МТСК моделите са систематизирани в Табл. 2.1. Идентични по структура МТСК модели имат различни параметри, тъй като са изведени от системи работещи при **различно** натоварване на инсталацията

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ И ПРОМИШЛЕНА РЕАЛИЗАЦИЯ НА СИСТЕМА ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА НИВО НА РАЗТВОРА В КАРБОНИЗАЦИОННА КОЛОНА СЪС СУГЕНО ПИ РАЗМИТ РЕГУЛАТОР С ЕДИН ВХОД

3.1. Синтез на Сугено ПИ размит регулатор

Структурата на САУ със синтезирания ПИ РР на база на РЕ с един вход и един изход (1В1И) е показана на фиг. 3.1. Сигналът от изхода на обекта – нивото H на ПКР в ККл - се филтрира от измервателни шумове. Филтърът е с ПФ $W_f(s) = (T_f s + 1)^{-1}$, като $T_f = 0.2 \text{ min}$, K_e е нормализиращият коефициент на грешката $e = H_r - H$, а H_r е заданието за нивото. С РЕ 1В1И се изпълнява статично нелинейно преобразуване на нормализираната грешка e^n в нормализирания изход o^n с обхвати $[-1, 1]$.

Нормализиращият коефициент K_e се изчислява на базата на приетата максимална абсолютна стойност за грешката $|e|_{\max} = 20 \%$, което съответства на най-голямата промяна в заданието $\Delta H_r = \pm 20 \%$ по

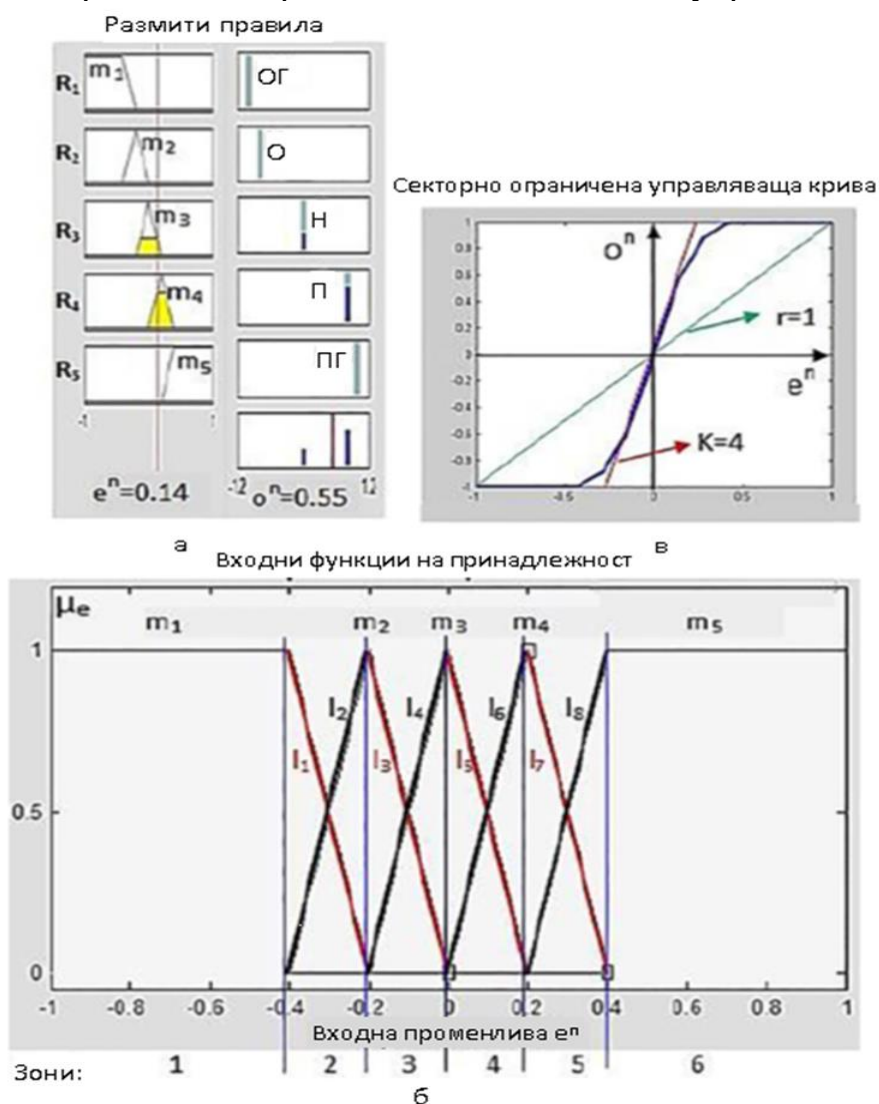


Фиг. 3.1 Структурна схема на ПИ размит регулатор с един вход и един изход

време на работния цикъл на ККл. Поради това $K_e = 1/|e|_{\max} = 1/20$ нормализира e^n в обхвата $[-1, 1]$. С ПФ $C_{PI}(s) = K_p + 1/T_i s$ се описва алгоритъма на допълнителната ПИ обработка, където коефициентът на пропорционалност K_p и времеконстантата на интегриране T_i ($K_i = 1/T_i$) са параметри за настройка. Грешката e е с обхват $[-100, 100] \%$, а H_r , H и управляващото въздействие u_{PI} са $[0, 100] \%$. По технологични причини ККл работи с ниво в границите $[30, 80] \%$, а стойностите за H_r обикновено са в диапазона $[35, 65] \%$.

3.2. Синтез на размита единица

Входните ФП на РЕ са 5 ортогонални и стандартни с триъгълна форма за вътрешните и трапецовидна за крайните, както са показани на фиг. 3.2а и фиг. 3.2б, където m_1 има смисъл на отрицателна голяма (ОГ_е), m_2 – на отрицателна (О_е), m_3 – на норма (Н_е), m_4 – на положителна (П_е) и m_5 – на положителна голяма (ПГ_е). Изходните ФП на РЕ са 5 сингълтъна: $[-1$ (ОГ) -0.8 (О) 0 (Н) 0.8 (П) 1 (ПГ)], показани в заключенията на размитите правила на фиг. 3.2а. Нелинейната управляваща



Фиг. 3.2 Размити правила (а), функции на принадлежност на входа на размитата единица (б) и управляваща крива (в)

крива на РЕ е показана на фиг. 3.2в. Тя е инвариантна във времето и секторно ограничена от правите с ъглови коефициенти $K=4$ и $r=1$.

3.3. Настройка на параметрите за ПИ допълнителната обработка

1. Настройка на K_p и T_i от експертно знание и евристични съображения.

Коефициентът K_p преобразува изходът на РЕ в управляващо въздействие $u_p = K_p \cdot o^n$ в обхвата $[30, 80]$ %. Поради това, подходящите стойности са от същия диапазон – от $K_p=30$ % за бавни преходни процеси и по-голяма нечувствителност към смущения до $K_p=80$ % за бързи преходни процеси и добро елиминирание на смущения. Тук е избрана стойността $K_p=80$ %.

Времеконстантата на интегриране T_i се определя от емпирични методи за настройка като функция на експертно оценена времеконстанта на обекта $T \approx 200$ s, оттук $T_i = (0,3 \div 1,6)T = 60 \div 320$ s. Избраната стойност е $T_i=132$ s.

2. Настройка на K_p и T_i от изведени критерии за устойчивост и робастност на затворената с ПИ 1В1И РР система.

Този метод комбинира условията на Попов за устойчивост на нелинейната затворена система с критерий за робастност, дефиниран за линейни системи.

Първо, САУ с РР се преобразува в „система на Попов“, която съдържа две части. Едната е стационарна статична нелинейна част, ограничена в сектор, а другата е устойчива динамична част, която е линейна и инвариантна във времето. Секторът е заключен между абсцисата и права, минаваща през началото на координатната система и определена от най-стръмния наклон (K) на нелинейната статична характеристика. В системата с РР, статичната част съдържа РЕ с 1В1И, чиято нелинейна характеристика е ограничена между абсцисата и правата дефинирана от K на фиг. 3.2в. Динамичната част включва последователно свързани линеен номинален модел на обекта $P^o(s)$ и ПИ допълнителна обработка $C_{PI}(s)$ на РР, т.е. $[P^o(s) \cdot C_{PI}(s)]$. Моделът на обекта се предполага, че може да се представи чрез оценени от експерти номинален линеен модел $P^o(s)$ и моделна неопределеност:

$$l(s) = [P^v(s) - P^o(s)]/P^o(s), \quad (3-1)$$

където $P^v(s)$ е промененият модел на обекта.

За описание на обекта се използва Циглер-Николс (ЦН) модел:

$$P(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts+1}, \quad (3-2)$$

за който номиналният обект има параметри (k^o , T^o , τ^o). Промененият модел на обекта $P^v(s)$ отчита най-неблагоприятните промени в параметрите ($k^v > k^o$, $T^v < T^o$, $\tau^v > \tau^o$) по отношение на устойчивостта на затворената система. Така, неизвестният реален обект бива представен чрез семейство от модели дефинирани чрез двойката $[P^o(s), l(s)]$, като $P^o(s)$ е най-вероятният линеен модел за основната

работна точка, а $l(s)$ е обвивката около $P^o(s)$. В честотната област $l(j\omega)$ определя радиуси на дискове около всяка точка от НХ за номиналния обект $P^o(j\omega)$ за дадена честота ω_i . За реалния обект НХ за ω_i [$\text{Re } P(j\omega_i)$, $\text{Im } P(j\omega_i)$] се намира вътре в съответния диск за тази честота. Следователно, критерият за робастна устойчивост трябва да се удовлетворява за модифицираната НХ на номиналния обект с насложените дискове на неопределеност за всички съществени честоти.

Динамичната част $[P^o(s).C_{PI}(s)]$ не е устойчива поради наличието на интегриращия компонент в $C_{PI}(s)$. Затова първо тя се прави устойчива чрез въвеждането на локална обратна връзка с коефициент r :

$$P_s(s) = P^o(s).C_{PI}(s)/[1 + r.P^o(s).C_{PI}(s)]. \quad (3-3)$$

Тази промяна в затворената система с РР се компенсира чрез паралелна на РЕ връзка с коефициент r , което се отразява в стеснение на сектора за разполагане на нелинейната управляваща крива на 1В1И РЕ, определен от правите с ъглови коефициенти K и r , $K > r$ на фиг. 3.2в.

Еквивалентно трансформираната затворена САУ с РР позволява прилагането на критерия за устойчивост на Попов, модифициран от изискванията за робастност на Морари, с отчитане на номиналния модел на обекта с насложени дискове на неопределеност към него. В резултат системата с РР е робастно устойчива, ако НХ на модифицираната устойчива динамична част

$$P_m(j\omega) = \text{Re}[P_s(j\omega)] + j\omega \cdot \text{Im}[P_s(j\omega)] \quad (3-4)$$

за номинален модел на обекта с насложени дискове за неопределеност, се намира вдясно и под линията на Попов, прекарана под точката $(-1/K_c, j0)$, където $K_c = K - r$.

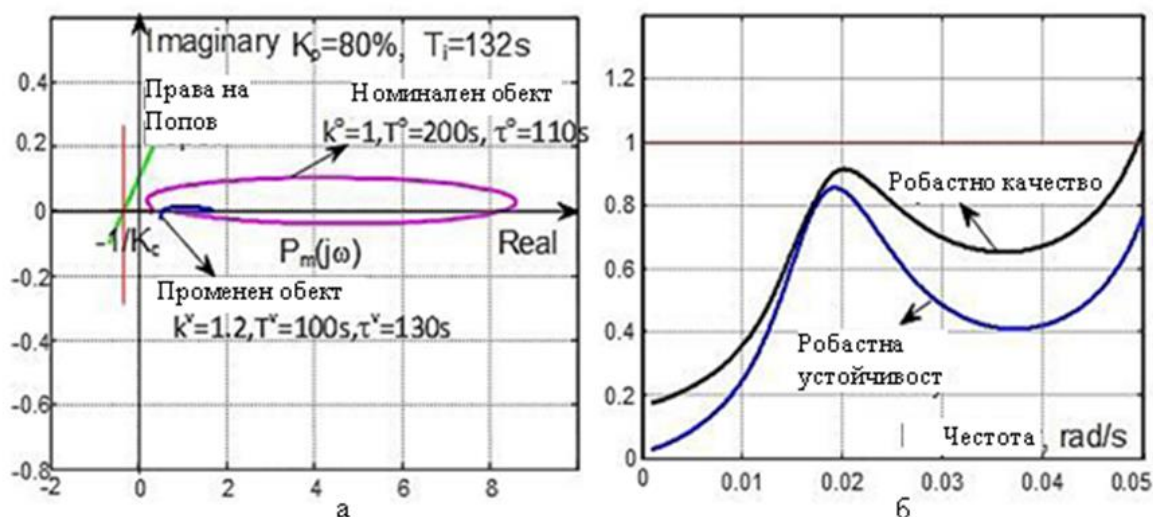
За нелинейна система с РР критериите робастна устойчивост и робастно качество се прилагат след като се линеаризира управляващата крива на РЕ, което се изразява в изпълнението съответно на следните условия:

$$|\Phi^o(j\omega).l(j\omega)| < 1, \text{ за } \forall \omega \in D_\omega \quad (3-5)$$

$$|S^o(j\omega).W_{fr}(j\omega)| + |\Phi^o(j\omega).l(j\omega)| < 1 \text{ за } \forall \omega \in D_\omega, \quad (3-6)$$

където $\Phi^o = P^o(s).C(s).[1 + P^o(s).C(s)]^{-1}$ е ПФ на затворената система, наричана още допълваща функцията на чувствителност $S^o(s)$ до 1 понеже $\Phi^o(s) + S^o(s) = 1$ и $e^o(s) = -S^o(s).W_{fr}(s)$, за номиналния модел на обекта $P^o(s)$ и линейния регулатор $C(s)$. С $W_{fr}(s)$ е означен филтър формиращ на изхода си различни смущения в зависимост от оператора $W_{fr}(s)$ и параметрите му, като входът му е 1.

На фиг. 3.3а са начертани НХ на $P_m(j\omega)$ за номинален и променен обект при емпирично определената настройка $K_p = 80\%$ ($K_p = \max$) и $T_i = 132$ s. Те са разположени вдясно и под правата на Попов, което доказва постигане на робастна устойчивост. На фиг. 3.3б са показани кривите на робастна устойчивост на системата с нелинейна РЕ и робастно качество на системата с линеаризирана РЕ, получени при



Фиг. 3.3 Система с размит регулатор - ходограф на Найквист $P_m(j\omega)$ (а); криви за робастна устойчивост и робастно качество (б)

изчисляването на левите части на (3-5) и (3-6) и избран $|W_{fr}(j\omega)|=0.5$. И двете са под 1 за съществения честотен диапазон, което показва, че САУ с РР е робастна.

3.4. Реализация в програмируем логически контролер на проектирания размит регулатор

Разработеният ПИ 1В1И РР е реализиран в ПЛК на системата за разпределено управление DCS (Distributed Control System) Experion™ PKS на Honeywell, която се използва за управление на производството на калцинирана сода. Програмният код е разработен чрез стандартните функционални блокове на развойната среда Control Builder. Софтуерът на ПЛК не разполага с инструментариум за реализация на РЛ, поради което ФП и размитите правила на РЕ са програмирани чрез основните логически и аритметични функции. Стойностите на ФП m_i , $i=1\div 5$ се изчисляват като равни на 0, на 1 или от уравнението $m_i=a_i \cdot e^n+b_i$ на съответните прави $l_1\div l_8$ от фиг. 3.2б, съобразно зоната, в която попада e^n . Крайният изход се изчислява по метода на претеглено средно:

$$o^n = \frac{m_1 \cdot (-1) + m_2 \cdot (-0.8) + m_3 \cdot (0) + m_4 \cdot (0.8) + m_5 \cdot (1)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}, \sum_{i=1}^5 m_i = 1.$$

Например за $e^n=0.36$, $m_1=m_2=m_3=0$, $m_4=-5 \times 0.36 + 2 = 0.2$, $m_5=5 \times 0.36 - 1 = 0.8$, то: $o_K^n = \frac{0 \times (-1) + 0 \times (-0.8) + 0 \times 0 + 0.2 \times 0.8 + 0.8 \times 1}{0 + 0 + 0 + 0.2 + 0.8} = \frac{0.16 + 0.8}{1} = 0.96$.

3.5. Изследване на системата за регулиране в реално време на нивото на разтвора в карбонизационна колона

Експериментите с разработения ПИ 1В1И РР са проведени при последователна смяна на заданието за ниво 50-60-50-40-50 % и смущение P . Избрани са следните показатели: Пререгулиране $\sigma = (\Delta H / \Delta H_r) \cdot 100, \%$, Време за установяване t_{srt} , min, Максимално изменение на управляващото въздействие Δu_{max} , %, Средна стойност на управлението u_{mean} , %, Средно-квадратична грешка $I_{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N e_k^2$, Относителна дисперсия на управлението $u=u_{PI}$ за единица задание

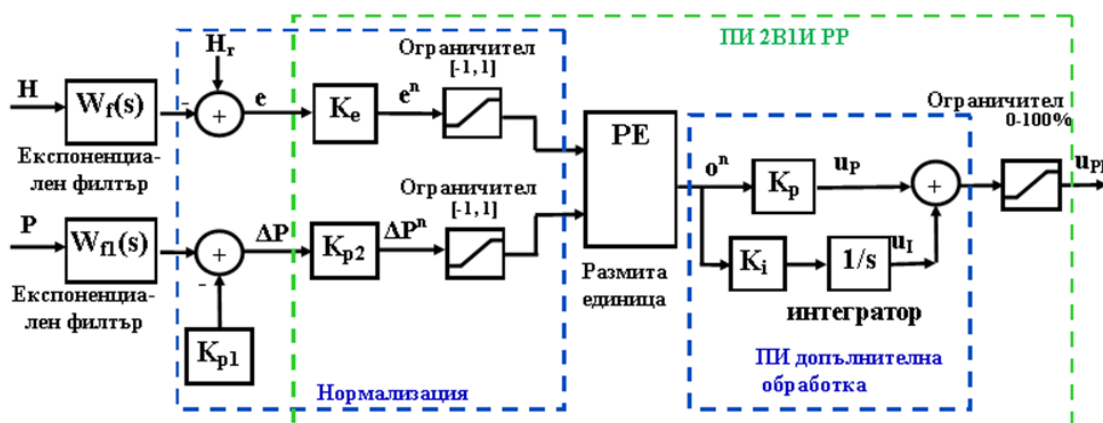
$D_u(u/H_r)$ спрямо дисперсията $D_p(P)$ на налягането P , $D_{up} = \frac{D_u(u/H_r)}{D_p(P)}$, Общо натрупано управляващо въздействие спрямо неговата максимална стойност $u_{\max}=100\%$ и за единица задание, съответно $SU = \frac{1}{100} \sum_{k=0}^N u_k$ и $SUr = \frac{1}{100} \sum_{k=0}^N \frac{u_k}{H_{rk}}$. Показателите D_{up} , SU и SUr оценяват консумираната енергия, влиянието върху другите САУ с работни ККл и изхабяването на изпълнителното устройство, като D_{up} отчита и влиянието на основното смущение.

Изследвани са преходните процеси на две САУ с ПИ 1В1И РР – Система 1 с изчислени параметри за настройка $K_p=80\%$ и $T_i=132\text{ s}$ и Система 2 с параметри $K_p=55\%$ и $T_i=300\text{ s}$. Показателите им за качество са сравнени съществуващата система с ПИ ПРК РР. Анализът на резултатите е, че Система 1 осигурява най-добри I_{MSE} , σ и t_{sr} , а D_{up} и SUr са най-ниски при системата с ПИ ПРК РР, между тях са показателите на Система 2. Система 1 е на второ място по показателя SU и това я прави най-добрата от изследваните системи.

ГЛАВА 4. СИНТЕЗ, ПРОМИШЛЕНА РЕАЛИЗАЦИЯ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА НИВО СЪС СУГЕНО РАЗМИТ РЕГУЛАТОР С ДВА ВХОДА

4.1.1. Синтез на ПИ Сугено размит регулатор с компенсация на смущението

Изследва се система с РР, който използва разгледания в Глава 3 ПИ 1В1И РР за регулиране на нивото на ПКР в ККл, усъвършенствайки го с компенсация на измеримо смущение с цел за допълнително подобряване качеството на регулиране. Синтезираната структура на ПИ 2В1И РР с компенсация на смущението е показана на фиг. 4.1. С P е означено измерваното налягане в колектора за ПКР. За филтриране на шумовете в сигналите на H и P са поставени нискочестотни филтри с ПФ респективно $W_f(s)$ и $W_{f1}(s)=(T_{f1}.s+1)^{-1}$ с времеконстанта $T_{f1}=60\text{ s}$. Константата K_{p1} представлява осреднената стойност на налягането P_{mean} , т.е. $K_{p1}=P_{\text{mean}}=1.38\text{ bar}$. Чрез коефициента K_{p2} се извършва



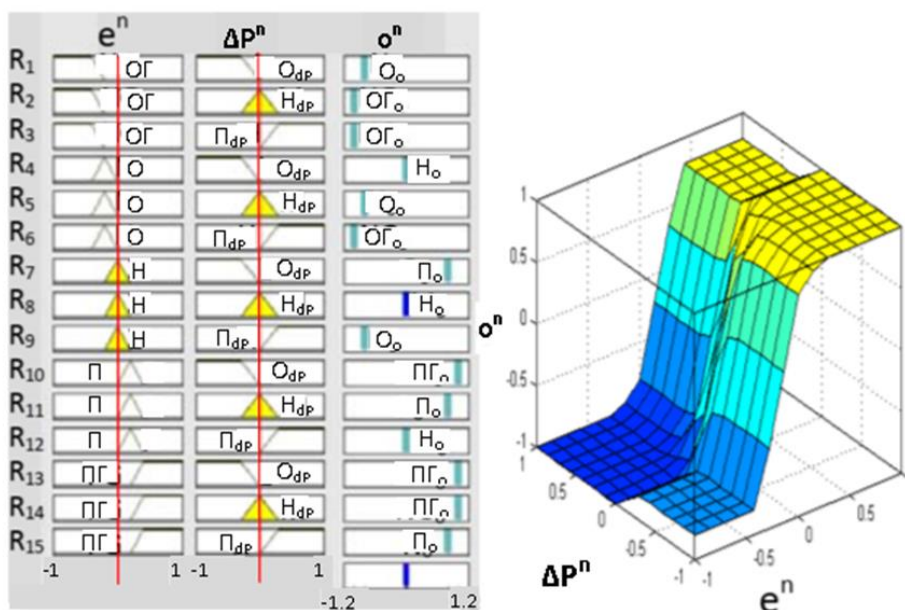
Фиг. 4.1 Структура на ПИ размит регулатор с компенсация на смущение

нормализация на девиацията в измереното налягане като $\Delta P^n = K_{p2} \cdot (P - K_{p1})$. Нормализираният в обхвата $[-1, 1]$ изход o^n на РЕ се подава към блока за ПИ допълнителна обработка. Този блок заедно с ограничителя $[0, 100] \%$ са аналогични на съответните блокове, описани в т. 3.1.

Дадената на фиг. 4.1 РЕ има пет входни ФП за нормализираната грешка e^n и три за нормализираното изменение на смущението ΔP^n . Изходните ФП са пет сингълтна. Всички ФП са стандартни, ортогонални, експертно дефинирани и са изобразени заедно с управляващата повърхнина на фиг. 4.2. Използваните означения за зоните са Отрицателно (О), Положително (П), Голямо (Г), Норма/Нормално (Н), Средно (С), Ниско (Нс), Високо (В). Размитата единица има правила, дадени с $R_1 \div R_{15}$, получени като модификация на стандартната база правила за РЕ с входове e и производната на грешката, но при отчитане влиянието на промяната на налягането върху o^n . Реализацията в ПЛК е чрез описания в Глава 3 подход. За определяне на оптималните параметри на РР са използвани ГА и симулационен модел на затворената система, съдържащ показания на фиг. 4.1 РР и изведения като Вариант 3 МТСК модел на обекта от т. 2.2. Избраната ЦФ е:

$$FID = I_{MSE} + \theta \cdot D_{up}, \quad (4-1)$$

която обединява два критерия, а $\theta=0.1$ е емпиричен тегловен коефициент за осигуряване на един и същ порядък на двата члена на FID . Изчислените оптимални параметри на ПИ 2В1И РР са $q_{PP}=[K_e=0.1 \quad K_{P2}=6 \quad K_P=53\% \quad K_i=K_P/T_i=0.11\%/s]$. Разработената САУ „ПИ 2В1И РР – МТСК модел на обекта“ е изследвана за робастна устойчивост и



Фиг. 4.2 Функции на принадлежност, размити правила и управляваща повърхнина на размитата единица с компенсация на смущение

робастно качество, чрез съчетаване на критериите на Попов и Морари.

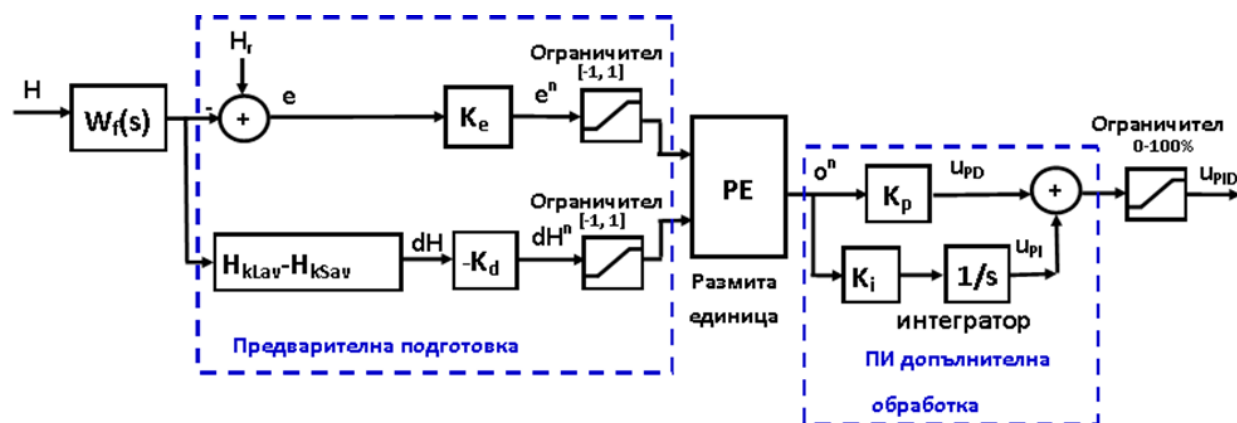
4.1.3. Изследване на системата с ПИ размит регулатор с компенсация на смущението чрез симулации и експерименти в реално време с карбонизационна колона

Цел на изследването на САУ с проектирания ПИ 2В1И РР от фиг. 4.1 ($K_e=0.1$, $K_{P2}=6$, $K_P=53\%$, $K_i=0.11\%/s$) – Система 1 е да се оценят подобренията, дължащи се на компенсацията на смущението. Тя се сравнява със Система 2 с ПИ 1В1И РР с вход е без компенсация на смущението ($K_e=0.1$, $K_{P2}=0$, $K_P=80\%$, $K_i=0.75\%/s$) и Система 3 с ПИ 1В1И РР с вход е и линейна компенсация на смущението [$K_e=0.1$, $K_{P2}=0(7)$, $K_P=69\%$, $K_i=0.11\%/s$]. Тази система използва аналогична на заложената в ПЛК адитивна приставка за линейна компенсация на смущението за класически ПИД регулатор (PID with FF), като се извършва сумиране на изхода на 1В1И РЕ с $7 \cdot \Delta P^n$.

Изследването се основава на получени преходни процеси за нивото и налягането като смущение при различни промени на заданието при проведени експерименти с ККл в работен режим. Сравнението на трите системи е базирано на следните показатели за качество на регулиране - I_{MSE} , D_u , I_{MSE} отнесена към смущението: $ID = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i^2 / \Delta P_i)$ и SUr . От получените резултати Система 1 е с най-добри I_{MSE} и D_u , докато Система 3 има най-добри ID и SUr за сметка на най-лоши I_{MSE} и D_u . Резултатите на Система 2 са между тези на Система 1 и Система 3.

4.2.1. Синтез на ПИД размит регулатор с входове за грешката и производната на регулируемата величина

Блоковата схема на разработения ПИД 2В1И Сугено РР е показана на фиг. 4.6. Регулаторът има два входа – първи за е и втори за производната на регулируемата величина, която е аналогична на производната на е при класическия ПИД РР. Производната на нивото на ККл се получава като крайна разлика от два филтъра от тип пълзящо средно. Размитите правила са съобразени с условията на грешката на системата, а ФП са определени от изискване за малка промяна на управлението при малки стойности на входовете. Частта за предварителна подготовка на РР извършва изчисляване във всеки



Фиг. 4.6 Блокова схема на ПИД Сугено размит регулатор с два входа

момент от време t_k на грешката $e_k = H_{rk} - H_k$ за текущото задание H_{rk} , текущото ниво H_k както и на производната нивото dH_k . Тя се определя от израза $dH_k = dH_{kLav} - dH_{kSav}$, където dH_{kLav} и dH_{kSav} са изходите на двата филтъра от типа пълзящо средно, като $S=60$ и $L=30$.

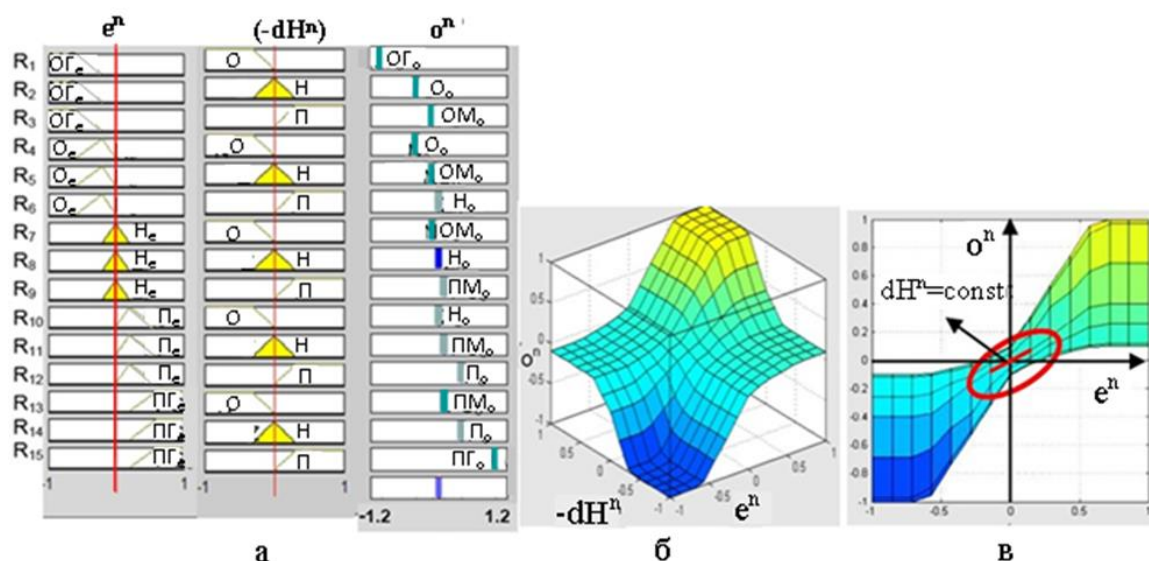
На фиг. 4.7 са показани ФП, размитите правила (М-Малко), управляващата повърхнина и нейната проекция в равнината o^n-e^n . Кривите $o^n=f(e^n)$ в проекцията o^n-e^n съответстват на константни стойности на втория вход dH^n . Размитите правила и стойностите на сингълтърните осигуряват малки промени на o^n за стойности на e^n около нормата (на фиг. 4.7в оградената в червено зона на проекцията в равнината o^n-e^n). Това води до икономично и плавно управление с малка дисперсия. За реализацията на ФП и размитите правила на РЕ в ПЛК е използван аналогичен на изложения в Глава 3 подход. Параметрите за настройка $q=[K_e K_d K_p K_i]$ на ПИД 2В1И РР са изчислени чрез офлайн оптимизация с ГА и приета ЦФ:

$$FID_U = I_{MSE} + \theta \cdot D_u, \quad (4-4)$$

където $\theta=100$ е емпиричен тегловен коефициент. Чрез тази ЦФ се постига редуциране на системната грешка, намалена консумация на енергия от изпълнителното устройство и по-бавното му износване. Изследваната чрез симулации САУ включва разработения ПИД 2В1И РР и нелинеен модел на обекта, разгледан като Вариант 1 на МТСК модел. Получените оптимални стойности на параметрите са $q=[K_e=0.1 K_d=0.18 K_p=48\% K_i=0.1\%/s]$, които дават $FID_U=13$ с $I_{MSE}=10$ и $D_u=0.032$ за извадка $N=5576$ отчета.

4.2.4. Изследване на системата с ПИД размит регулатор

Изследвани и сравнени са следните системи – Система 1 с разгледания в т. 4.2.1. ПИД 2В1И РР, Система 2 със съществуващия линеен ПИ регулатор и Система 3 с аналогичен на Система 1 РР, но с параметри $[K_e=0.1 K_d=0.05 K_p=30\% K_i=0.12\%/s]$ и настроен за твърди



Фиг. 4.7 Размита единица с 2В1И – функции на принадлежност и размити правила (а), управляваща повърхнина (б) и нейната o^n-e^n проекция (в)

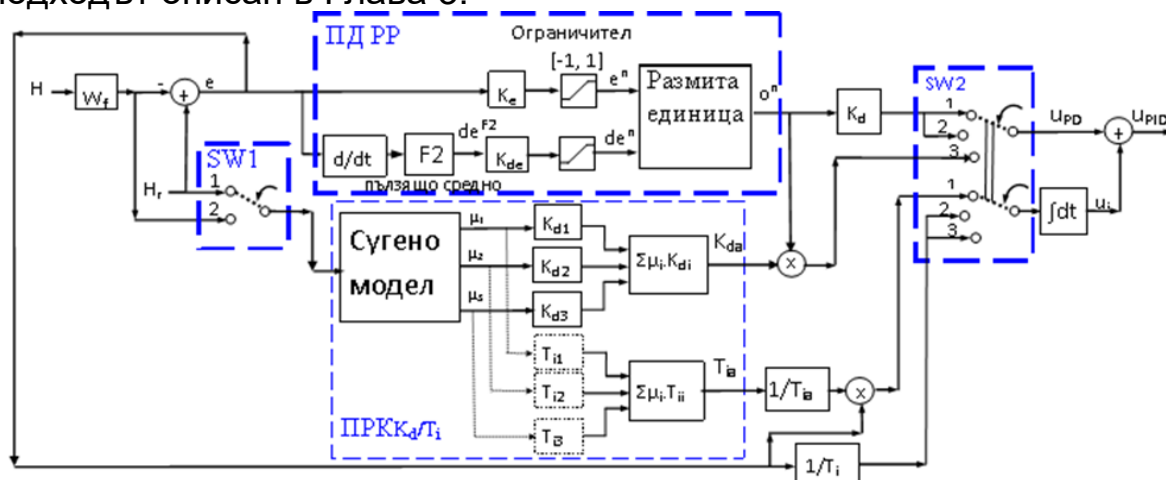
правила. Показателите за качество на регулиране на трите системи са оценени чрез експерименти с ККл в работен режим на база преходни процеси с промяна на заданието 50-60-50-40-50 %.

Система 1 е с най-добри σ_{AV} - Средно пререгулиране σ за 4 преходни процеса, $D(u)$ - Дисперсия на управлението, D_u , $D_{uPmean} = D \left[\frac{u}{H_r \cdot \frac{|P-P_{mean}|}{P_{mean}}} \right]$, FID_U и $FIDUPm = I_{MSE} + 10 \cdot D_{uPmean}$. Най-добри за Система 2 са I_{MSE} и t_{sAV} - Средно време за установяване t_s за 4 преходни процеса, а за Система 3 u_{MEAN} - Средна стойност на управлението и SUr . Най-добра е Система 1, тъй като нейните интегрални критерии FID_U и $FIDUPm$ са най-добри, както и критериите оценяващи въздействието на основното смущение.

ГЛАВА 5. СИНТЕЗ, ПРОМИШЛЕНА РЕАЛИЗАЦИЯ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМА С ПИД АДАПТИВЕН РАЗМИТ РЕГУЛАТОР

5.1. Емпиричен синтез на ПИД адаптивен размит регулатор за ниво на разтвор в карбонизационна колона

На фиг. 5.1 е показана структурната схема на синтезирания ПИД 2В1И АРР за регулиране на ниво на ПКР в ККл. Влиянието на шумовете върху производната, получена като крайна разлика, се намалява чрез филтъра F2 от типа пълзящо средно за последните $n=30$ стойности. При което се получава $de_k^{F2} = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n}^k de_i$ на изгладената в момента t_k ($k > n$) производна, където de_i е стойността на производната в момента t_i . Изходът на АРР u_{PID} [0, 100] % се получава от: $u_{PID} = u_{PD} + \frac{1}{T_i} \int_0^t edt$, където t е текущото време. Нормализиращите коефициенти са $K_e = K_{de} = 0.05$ (т. 3.2.), а входните ФП и правилата на РЕ са аналогични на тези от т. 4.2.1. Изходните ФП са сингълтъни: $K1=-1$ (ОГ), $K2=-0.6$ (ОМ), $K3=-0.2$ (О), $K4=0$ (Н), $K5=0.2$ (П), $K6=0.6$ (ПМ), $K7=1$ (ПГ). За реализацията на ФП и размитите правила на РЕ в ПЛК е приложен подходът описан в Глава 3.



Фиг. 5.1. Структурна схема на ПИД адаптивен размит регулатор на ниво на карбонизационна колона

Модулът $ПРК K_d/T_i$ за нелинейна онлайн промяна на демасхабацията коефициент K_d на изхода на ПД РР или на времеконстантата T_i на интегратора е изграден на принципа на ПРК. Той съдържа Сугено модел с вход H или H_r , избирани чрез превключвателя SW1, идентичен на 1В3И Сугено модела на Вариант 1 на МТСК модела, описан в т. 2.2. Линейната част на модула $ПРК K_d/T_i$ съдържа локални коефициенти на денормализация $K_{d1}=40\%$, $K_{d2}=50\%$ и $K_{d3}=70\%$ и локални времеконстанти на интегриране $T_{i1}=0.3\text{ min}$, $T_{i2}=1.4\text{ min}$ и $T_{i3}=1.7\text{ min}$, които са определени емпирично.

5.1.2. Експериментални изследвания на затворената система

Системата с ПИД 2В1И АРР се изследва в промишлена среда, като се анализира влиянието на размитата адаптация на K_d и T_i , на база приети показатели за качеството на регулиране - I_{MSE} , D_{up} и σ . Съобразно тях се извършва сравнение между: Система 1 с ПИД 2В1И РР с $K_d=\text{const}=50\%$ и $T_i=\text{const}=2.3\text{ min}$ (SW2=2, SW1 е без значение) и системи с ПИД 2В1И АРР - Система 2 с адаптивен K_d в зависимост от H_r и $T_i=\text{const}=2.3\text{ min}$ (SW1=1, SW2=3), Система 3 с адаптивен K_d в зависимост от H и $T_i=\text{const}=2.3\text{ min}$ (SW1=2, SW2=3), Система 4 с фиксиран $K_d=\text{const}=55\%$ и адаптивна T_i в зависимост от H_r (SW1=1, SW2=1) и Система 5 с фиксиран $K_d=\text{const}=55\%$ и адаптивна T_i в зависимост от H (SW1=2, SW2=1).

В Табл. 5.4 са дадени изчислените показатели за качество на регулиране. Нормирането им спрямо най-високата им стойност е чрез обобщен показател за оценка на качеството, означен със сума (Σ) от бездимензионните относителни показатели. Това дава възможност за цялостно сравняване на представянето на изследваните системи. Нормираните показатели са дадени в Табл. 5.4 под основните.

Стойност „1“ има за тази система, която е с най-висок (т.е. най-лош)

Табл. 5.4 Показатели за качество на изследваните системи

Показатели за качество на регулиране	Параметри на регулатора				
	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4	Система 5
	$K_d=50\%$, $T_i=2.3\text{min}$ $N=4882$	$K_d(H_r)\%$ $T_i=2.3\text{min}$ $N=4891$	$K_d(H)\%$ $T_i=2.3\text{min}$ $N=4891$	$K_d=55\%$, $T_i(H_r)\text{min}$ $N=5050$	$K_d=55\%$, $T_i(H)\text{min}$ $N=5050$
$I_{MSE}=\Sigma e^2/N$	11	13.13	12.92	10.2	10.8
$I_{MSE}/I_{MSE\text{max}}$	0.84	1	0.99	0.78	0.82
$D=D(u/H_r)/D(P)$	707	880	623	439	352
$D/D\text{max}$	0.8	1	0.71	0.5	0.4
$\sigma=\Delta H/ \Delta H_r .100, \%$	53.8	33.3	66.7	76.9	55.6
$\sigma/\sigma\text{max}$	0.7	0.43	0.87	1	0.72
$\Sigma=I/I\text{max}+D/D\text{max}+\sigma/\sigma\text{max}$	$\Sigma=2.34$	$\Sigma=2.43$	$\Sigma=2.57$	$\Sigma=2.28$	$\Sigma=1.94$

показател. Най-добра е Система 5, следвана от Система 4 – те имат изцяло нелинейно управление.

5.2. Оптимизация на параметрите на ПИД адаптивен размит регулатор

На фиг. 5.6 е дадена структурната схема на системата с оптимизиран ПИД 2В1И АРР, като повечето блокове са идентични с тези от фиг. 5.1. Разликата е в добавената възможност (при позиция 2 на превключвателя) да се адаптират и двата параметъра K_d и T_i спрямо текущото ниво H .

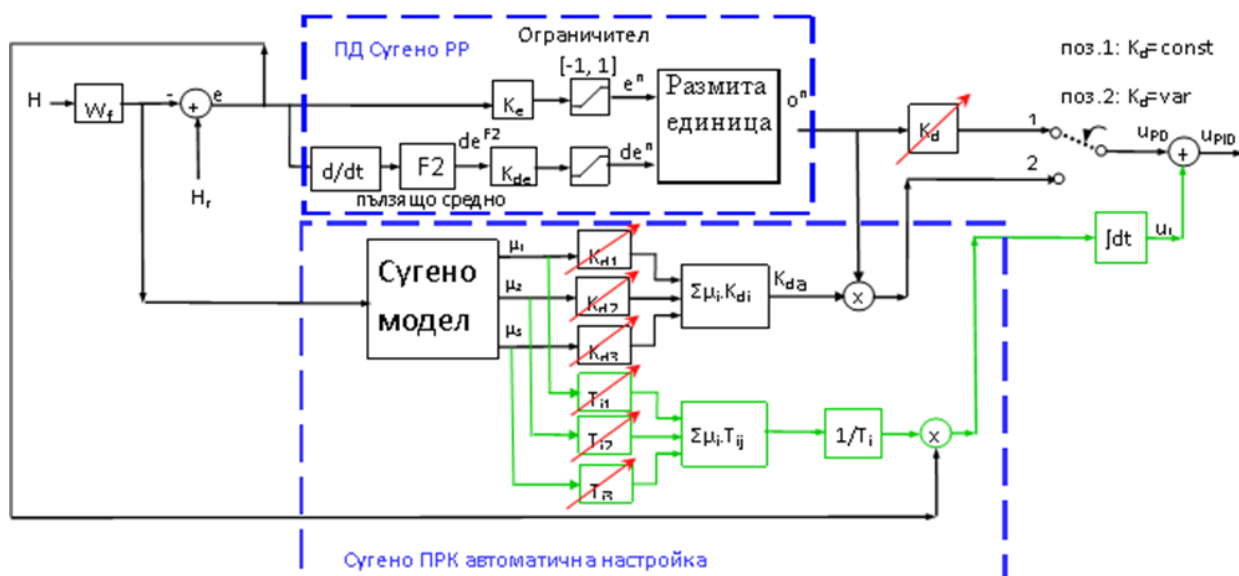
Автоматичната настройка на параметрите K_d и T_i чрез ПРК адаптиращ механизъм се базира на 1В3И Сугено модел. Действието му е аналогично на описания в т. 5.1. модул за ПРК автоматична настройка, а стойностите на параметрите T_i и K_d , получени в хода на адаптацията, се изчисляват съгласно:

$$K_d = K_{da} = \frac{[\sum_{i=1}^3 \mu_i(H) \cdot K_{di}]}{[\sum_{i=1}^3 \mu_i(H)]} \text{ и } T_i = T_{ia} = \frac{[\sum_{i=1}^3 \mu_i(H) \cdot T_{ii}]}{[\sum_{i=1}^3 \mu_i(H)]}, \quad (5-5)$$

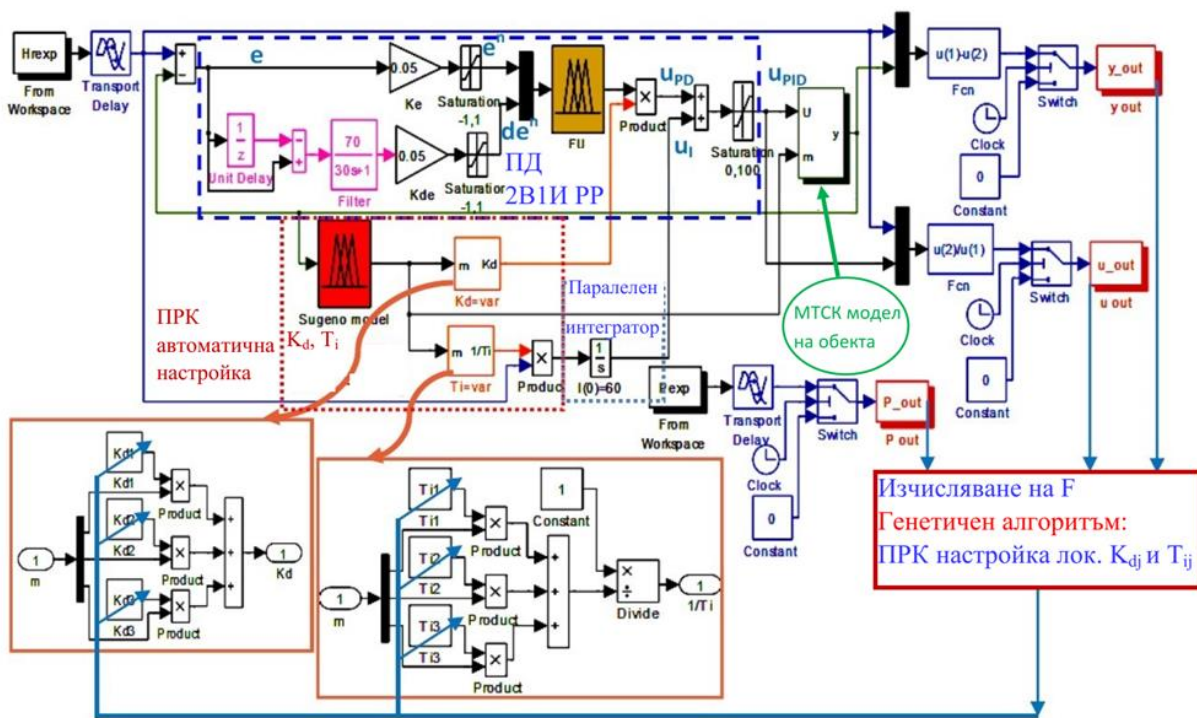
където $\sum_{j=1}^3 \mu_j(H) = 1$ за ортогонални ФП.

Използват се разработените системен симулационен модел на основата на емпирично настроената най-добър ПИД АРР от т. 5.1. и изведеният МТСК модела на обекта като Вариант 2 от т. 2.2. След това се оптимизират с ГА параметрите за настройка на ПИД АРР и се изследват две стратегии за адаптация. Стратегия 1 – чрез онлайн ПРК автоматична настройка на T_i с оптимизирани K_d и локални T_{ij} , $j=1 \div 3$, като се базира на най-добрия ПИД АРР, реализиран в ПЛК от т. 5.1. Стратегия 2 - чрез онлайн ПРК автоматична настройка на K_d и T_i с оптимизирани локални K_{dj} и T_{ij} , $j=1 \div 3$.

Избраната ЦФ за офлайн параметричната оптимизация с ГА е (4-1). На фиг. 5.9 е показан симулационният модел на системата включваща

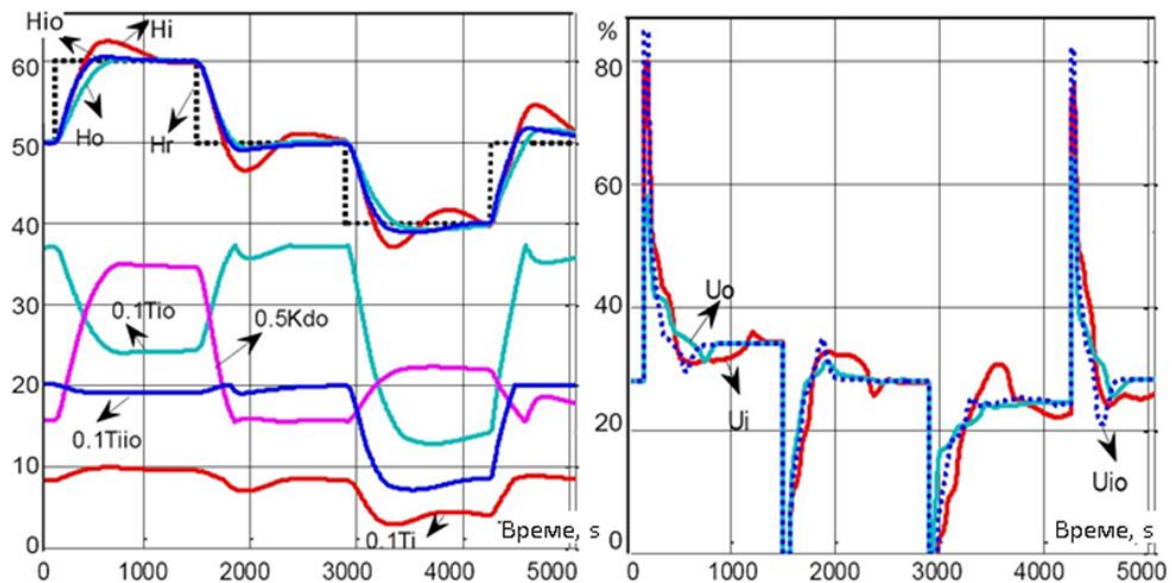


Фиг. 5.6 Сугено ПИД адаптивен размит регулатор с онлайн адаптация само на T_i (позиция 1 на ключа) или едновременно на T_i и K_d (позиция 2), като функцията от нивото H



Фиг.5.9 Simulink модел на затворената система за оптимизация с генетични алгоритми на локалните T_{ij} и K_{dj}

двете стратегии на адаптация. В Стратегия 1 за адаптация на параметрите за настройка в блока "Kd=var" се редуцират до един чрез присвояването $K_{d1}=K_{d2}=K_{d3}=K_d$. Оптимизацията с ГА дава оптималните параметри за ПИД APP за Стратегия 1 $\mathbf{q}_{\text{ПРК1}}^{\text{opt}}=[K_d=63\%, T_{i1}=26\text{ s}, T_{i2}=202\text{ s}, T_{i3}=186\text{ s}], FID=14.5, I_{\text{MSE}}=8.7$ и за Стратегия 2 $\mathbf{q}_{\text{ПРК2}}^{\text{opt}}=[K_{d1}=51\%, K_{d2}=32\%, K_{d3}=89\%; T_{i1}=34\text{ s}, T_{i2}=374\text{ s}, T_{i3}=179\text{ s}], FID=13.93, I_{\text{MSE}}=10.6$. На фиг. 5.10 са показани преходните процеси на изследваните системи с ПИД APP по отношение на нивото, управляващото въздействие и



Фиг. 5.10 Преходни процеси от симулации на системи с адаптация на: 1) T_i с емпирично определени K_d и T_{ij} – (H_i, U_i, T_i); 2) T_i с оптимизирани K_d и T_{ij} – (H_{i0}, U_{i0}, T_{i0}); 3) K_d и T_i с оптимизирани K_{dj} и T_{ij} – (H_o, U_o, T_o, K_o)

адаптираните параметри K_d и T_i от симулациите. Използвани са съответните означения за Система 1 - H_i, U_i, T_i с адаптиране на T_i и емпирично определени K_d и T_{ij} , Система 2 - H_{io}, U_{io}, T_{io} с адаптиране на T_i и оптимизирани K_d и T_{ij} и Система 3 - H_o, U_o, T_o, K_{do} с адаптиране на K_d и T_i и оптимизирани K_{dj} и T_{ij} , $j=1\div 3$. Системите са оценени по показателите за качество на регулиране $FID, I_{MSE}, \sigma, t_s, U_{peak}/U_\infty$ - върхова U_{peak} спрямо установена U_∞ стойности на управляващото въздействие и неговия максимален размах $|\Delta U|_{max}$. Най-добра е Система 3 с едновременно адаптирани T_i и K_d , използващи оптимизирани с ГА локални стойности за K_{dj} и T_{ij} , тъй като има най-добри $FID, \sigma, t_s, U_{peak}/U_\infty$ и $|\Delta U|_{max}$.

ГЛАВА 6. ИЗСЛЕДВАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТТА НА СИСТЕМА С АДАПТИВЕН РАЗМИТ РЕГУЛАТОР

6.1. Теоретични основи

В тази глава от дисертацията се използва описания в т. 3.3. модифициран критерии на Попов за робастна устойчивост и робастно качество на системата с РР, отчитащ всички линейни обекти от семейството и линеаризация на РЕ. При нелинейна САУ с РР линейният номинален модел на обекта $P^o(s)$ в (3-5) и (3-6) се замества с линейната номинална динамична част $P_s^o(s)$, която е устойчива и линейният регулатор $C(s)$ се замества с линеаризираната нелинейна 1В1И РЕ на РР $o=\Psi(e)\approx(K-r)e$, което е еквивалентно на П регулатор с коефициент $(K-r)$. Така условията за робастна устойчивост и робастно качество в (3-5) и (3-6) се изменят за линеаризираната САУ с РР съответно в:

$$|\Phi_{lin}^o(j\omega) \cdot l_s(j\omega)| < 1, \text{ за } \forall \omega \in D_\omega \quad (6-1)$$

$$|S_{lin}^o(j\omega) \cdot W_f(j\omega)| + |\Phi_{lin}^o(j\omega) \cdot l_s(j\omega)| < 1 \text{ за } \forall \omega \in D_\omega, \quad (6-2)$$

където $\Phi_{lin}^o = P_s^o(s) \cdot (K-r) \cdot [1 + P_s^o(s) \cdot (K-r)]^{-1}$ е ПФ на затворената система с линеаризиран РР и устойчива динамична част с номинален модел на обекта $P_s^o = W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot P^o(s) \cdot [1 + r \cdot W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot P^o(s)]^{-1}$, а $S_{lin}^o = 1 - \Phi_{lin}^o(s)$ е функцията на чувствителност на системата и аналогично:

$$l_s(s) = [P_s(s) - P_s^o(s)]/P_s^o(s) \quad (6-5)$$

е мултипликативната неопределеност на устойчивата динамична част.

6.2. Робастна устойчивост и робастно качество на система с адаптивен размит регулатор

Разглежда се системата с предложения в т. 5.1. Сугено ПИД 2В1И АРР с ПРК механизъм за адаптация на K_d или T_i в зависимост от измереното ниво и с параметри дадени в Табл. 6.1. Схемата с едновременно адаптация на K_d и T_i във функция от нивото е дадена на фиг. 5.6. Нелинейният обект с неизвестен модел се представя със семейство от линейни модели $F_P=[P^o(s), \Delta P(s)]$, определени от номиналния линеен модел на обекта $P^o(s)$ и от $\Delta P(s)=P(s)-P^o(s)$ - приета

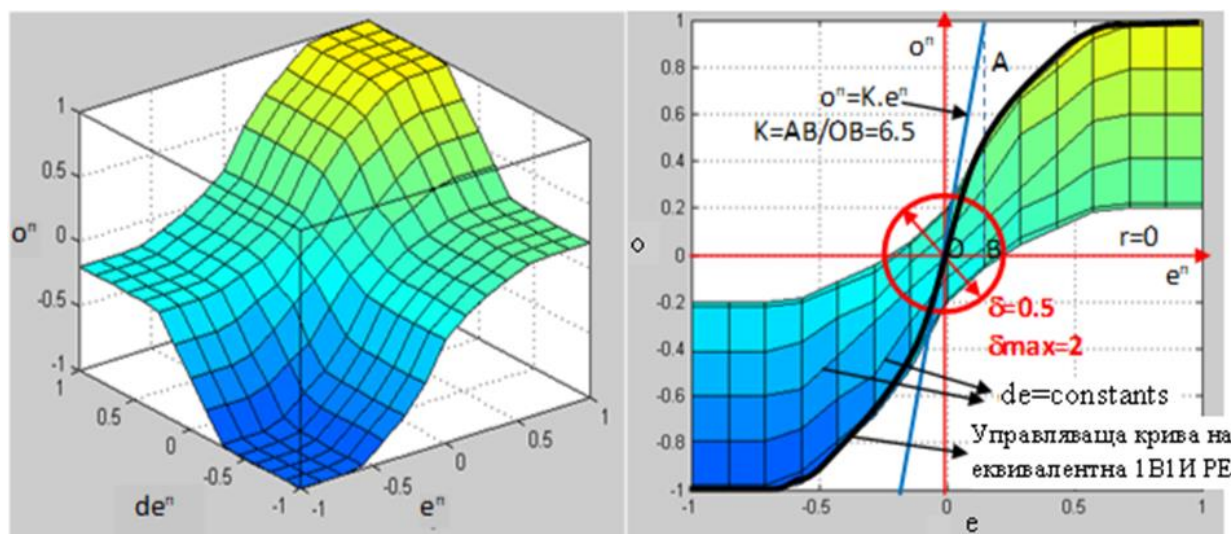
Табл. 6.1 Параметри на ПРК система с ПИД адаптивен размит регулатор

Параметри	От начални данни	От критерий за робастност	От ГА оптимиз.
Сигнали	$ e _{\max}=20\%$	$D_{\omega}=[10^{-4} \div 5](2\pi/T^0)$ rad/s	*
Предварителна обработка	РЕ		
ПРК	$K_{d2}=4, T_{d2}=30\text{ s}, K_e=0.05,$ $K_{ds}=0.01, T_f=12\text{ s}$	$K=6.5, \delta=0.5,$ $\delta_{\max}=2, a=0.075$	*
Обхвати за номинален	Най-голямо отклонение		
ПРК	$K_d^0 = [40 \div 60] \%,$ $K_{ad}^0 = [40/a \div 60/a] \%,$ $K_i^0 = [1/300 \div 1/50] s^{-1}$	$\Delta K_d=30 \%,$ $\Delta K_{ad}=30/a \%,$ $\Delta K_i=1/100 s^{-1}$	$K_d^0 = 40 \%,$ $K_i^0 = 1/300 s^{-1}$ $K_d=[51\ 32\ 89] \%,$ $K_i=[1/34\ 1/374\ 1/179] s^{-1}$
Модел на обекта	Номинален $k^0=0.5, T^0=150\text{ s}, \tau^0=20\text{ s}$	Променен $k^V=1, T^V=120\text{ s}, \tau^V=50\text{ s}$	*

моделна неопределеност. В случая $P^0(s)$ е (3-2) с параметри k^0, T^0 и τ^0 , а най-лошият по отношение устойчивостта на системата променен модел на обекта е с параметри k^V, T^V и τ^V .

Аналогично за всеки от параметрите за настройка K_d и K_i ($K_i=1/T_i$) който се променя с H в хода на адаптацията, се представя чрез семейство $F_{K_d} = (K_d^0, \Delta K_d)$ и $F_{K_i} = (K_i^0, \Delta K_i)$, определени от съответната локална стойност на K_d^0 респ. K_i^0 и от неопределеността му ΔK_d респ. ΔK_i . Неопределеността на параметрите е експертно определена като най-голямата допустима промяна в хода на адаптацията.

Управляващата повърхнина на 2В1И РЕ е показана на фиг. 6.2 (вляво), а проекцията ѝ в равнината σ^n - e^n на фиг. 6.2 (вдясно). Секторът между абсцисата и правата с наклон K определя действителната еквивалентна 1В1И РЕ. Секторно ограниченото условие за устойчивост



Фиг. 6.2 Управляваща повърхнина на размита единица с два входа и един изход (вляво) и нейната проекция в равнината σ^n - e^n (вдясно)

Структурната схема на системата с еквивалентния ПИД 1В1И РР добива вида показан на фиг. 6.4. С $W_1(s)$ и K_{ds} са означени съответно резултатните ПФ и коефициент на разстоянието ds , получени след трансформацията до ПД 1В1И РР. С ΔK_{ad} и ΔK_i са дадени неопределеността на параметрите за настройка - съответно на номиналния K_{ad}^o и на номиналния коефициент на интегратора K_i^o – като най-лоша корекция по отношение на устойчивостта на системата. Показаната на фиг. 6.4 РЕ с 1В1И е линеаризирана, за да стане П-регулатор с коефициент K . Така ПФ на линеаризирания ПИД 1В1И РР с номинални коефициенти е:

В резултат затворената система с линеаризирания ПИД 1В1И РР има следната ПФ за номиналния модел на обекта и адаптираните параметри:

където номиналната ПФ на устойчивата динамична част от системата на Попов е:

Мултипликативната моделна неопределеност се получава от (6-5) като:

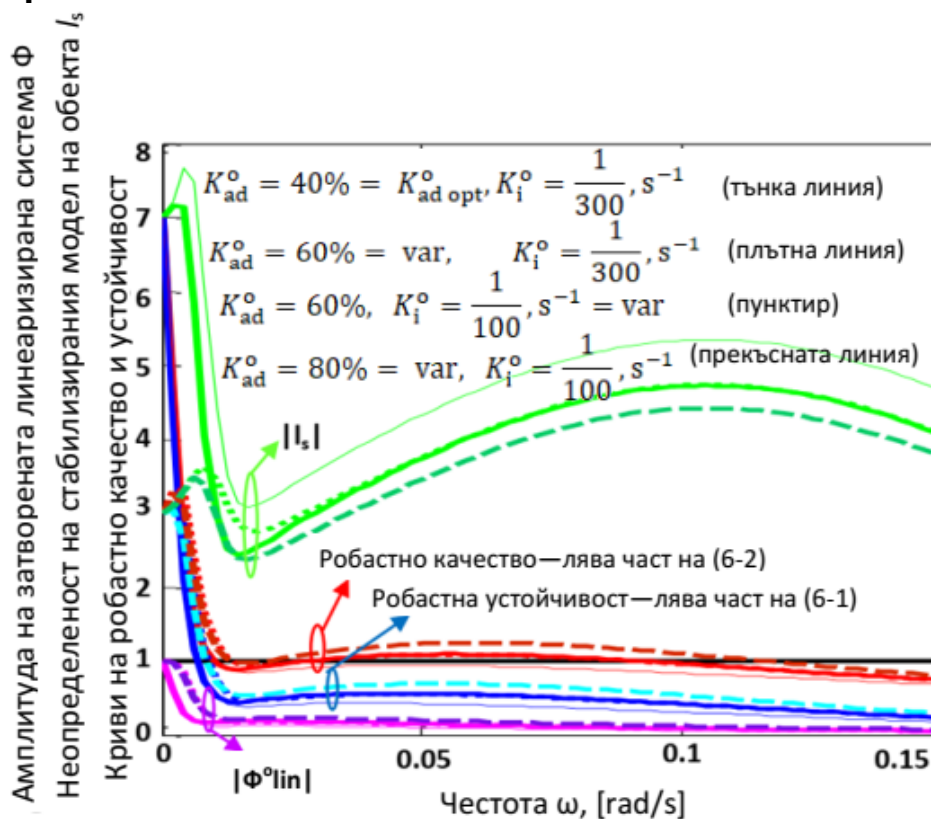
Критериите за робастна устойчивост и робастно качество за 1В1И РР са съответно (6-1) и (6-2), където $\Phi_{lin}^o(j\omega)$ при $s=j\omega$ се определя за АРР от (6-7), $l_s(j\omega)$ се изчислява за $P_s^o(s)$ от (6-8) и $P_s(s)$ се получава от (6-9). Диапазонът от съществени за системата честоти D_ω , за който неравенствата (6-1) и (6-2) са изпълнени, е свързан с честота на



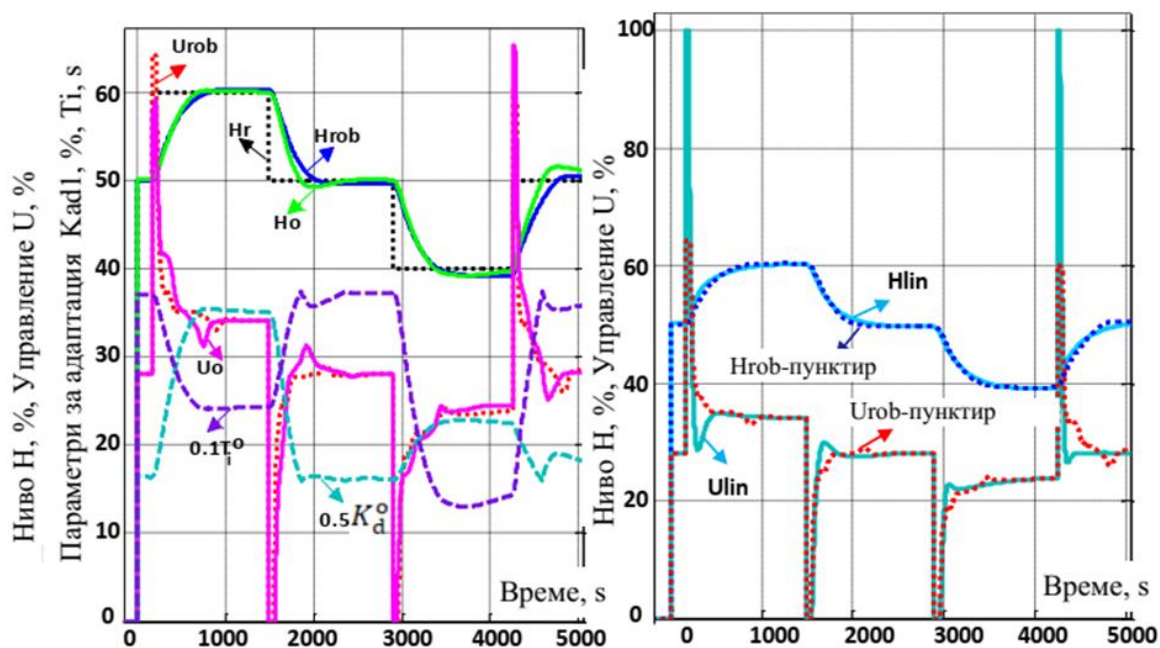
срязване на отворената система. Приблизителното определяне на D_ω се базира на връзка с времеконстантата T^0 на номиналния модел на обекта: $D_\omega \approx [(10^{-4}, 10^{-1}).(2\pi/T^0), (10^{-1}, 10^3).(2\pi/T^0)]$ rad/s. Коефициентът K_d на първоначалния ПД 2В1И АРР се получава от връзката му с коефициента K_{ad} на ПИД 1В1И РР $K_d = a.K_{ad}$ като $K_d^0 = a.K_{ad}^0$ и $\Delta K_d = a.\Delta K_{ad}$. Коефициентът на мащабиране a се изчислява, така че да се свие до приемливо малък размер площта на проекцията в равнината o^n-e^n , където условието за секторно ограничени криви на фиг. 6.2 (вдясно) за някои константни стойности на de е нарушено. С изпълнението на условията (6-1) и (6-2) за РР с линеаризирана РЕ с 1В1И за семейството от модели на обекта, чрез което се представя нелинейния обект, както и за очакваните диапазони в адаптирането на параметрите на РР, се осигурява устойчивост и на първоначалния 2В1И АРР.

Графиките с изчислените леви страни на (6-1) и (6-2) за стойности на ω са дадени на фиг. 6.6. Показани са и амплитудните характеристики на мултипликативната моделна неопределеност $|l_s(j\omega)|$ от (6-5) и ПФ на номиналната затворена система $|\Phi_{lin}^0(j\omega)|$ с линеаризирания ПИД 1В1И РР с за различни стойности на адаптираните параметри. Условията (6-1) и (6-2) се удовлетворяват, когато графиките на левите страни на неравенствата са под 1 за повечето честоти от дефинирания D_ω .

6.4. Изследване чрез симулации на системата с адаптивен размит регулатор



Фиг. 6.6 Анализ на робастна устойчивост и робастно качество на система с ПИД АРР при различни номинални параметри



Фиг. 6.7 Преходни процеси на системи с ПИД размит регулатор с 2 входа и 1 изход: адаптивна и оптимизирана с генетични алгоритми – H_o , U_o ; робастна H_{rob} , U_{rob} ; с еквивалентен ПИД с 1 вход и 1 изход с линеаризиран размит регулатор – H_{lin} , U_{lin}

Симулациите са базирани на изведен и валидиран МТСК модел на обекта, създаден по експериментални данни и офлайн параметрична оптимизация с ГА. Заданието за ниво на точност в ККл се променя стъпално 50-60-50-40-50 %. Сравнени са следните системи с преходни процеси, показани на фиг. 6.7:

- Система 1 (адаптивна) с ПРК механизъм за адаптация с оптимизирани с ГА локални стойности на параметрите K_d и K_i , дадени в Табл. 6.1. Преходните процеси са обозначени с долен индекс „o”;
- Система 2 (робастна) с K_{d2} , K_d^o и K_i^o , която изпълнява условието за робастно качество от (6-2). Преходните процеси са с долен индекс „rob”;
- Система 3 с линеаризирана 1В1И РЕ с $K_{ad}^o = K_d^o/a$ %, за която са изведени критериите за робастна устойчивост и робастно качество. Симулираните преходни процеси на Система 3 са с долен индекс „lin” на фиг. 6.7 (вдясно) и чрез тях се доказва допускането за еквивалентността ѝ със Система 2.

Анализът на устойчивостта на система с АРР с едновременна адаптация на два параметъра дава възможност за определяне диапазона им на изменение така, че да се запазва устойчивостта. Разработен е за системи с 1В1И и с 2В1И АРР. Този подход може да се приложи и към други системи с АРР с различни принципи на адаптация и при разработването на системи с РР.

Заключение

На база изложеното до тук, поставените в дисертацията цел и задачи са изпълнени. Изучен и изследван е сложен технологичен обект,

синтезирани и внедрени са различни варианти на РР. Методиката за извеждане на МТСК модели може да се приложи и за други обекти в содовото производство и ТЕЦ, които имат изразена нелинейност, например рН. Различните структури на РР също могат да се използват за управление на различни процеси, когато е необходим нелинеен ПИ или ПИД закон, нелинейна компенсация на смущение или АРР и може да се изведе МТСК модел на обекта.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

А. Научно-приложни приноси

1. Изведени са МТСК модели на обект от данни от експерименти съгласно методика, предназначени за целите на симулационни изследвания. Моделите са успешно валидирани по независими експериментални данни.

2. Разработени са различни варианти на ПИ и ПИД РР, както и РР с компенсация на основното измеримо смущение, с използване на експертни емпирични знания и зададени условия за робастна устойчивост и робастно качество.

3. Разработен е ПИД АРР на основа на ПД РР с входове грешката и производната на регулируемата величина и паралелен линеен интегратор с ПРК адаптация на параметрите му, за подобряване на показателите за качеството на размитото управление при промени в обекта и за намаляване на субективността на експертните знания при синтеза на РР.

4. Анализирана е робастността на система с ПИД АРР чрез модификация на зададени условия за робастна устойчивост и робастно качество на система с РР. Показано е, че системата с АРР е еквивалентна на робастна система с фиксирани параметри.

5. Параметрите на изведените МТСК модели на обекта и на синтезираните РР са оптимизирани офлайн с ГА на база на симулация на моделите и на затворените системи за изчисляване на предложени ЦФ по данни от експерименти, покриващи обхвата на работа.

Б. Приложни приноси

1. Експериментално е изследван сложен технологичен обект за управление - нивото в ККл, който се характеризира с нелинейност, променливост на параметрите при смяна на натоварване и работна точка, моделна неопределеност и влияние на редица индустриални смущения.

2. Разработените РР и АРР са реализирани в ПЛК с общо предназначение, в който липсва инструментариум за РЛ. За изграждане на Д-частта на ПИД 2В1И РР е използвана производната на регулируемата величина, изчислена като крайна разлика на два филтъра от типа пълзящо средно, като по този начин се намаляват пиковете и шумовете при диференциране.

3. Разработените системи са изследвани чрез симулации в MATLAB™ и чрез експерименти в реално време с работеща промишлена инсталация. Показателите за качество на управление са оценени и сравнени. Въведен е обобщен показател, който подпомага сравнителния анализ по различните оценки на изследваните системи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Yordanova S., Gueorguiev B., Slavov M. "Design and Industrial Implementation of Fuzzy Logic Control of Level in Soda Production," *Engineering Science and Technology, an International Journal (JESTECH)*, vol. 23, no. 3: pp.691-699, Sept 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.08.005>

2. Yordanova S., Slavov M., Prokopiev G. "Disturbance Compensation in Fuzzy Logic Control of Level in Carbonisation Column for Soda Production," *WSEAS Transactions on Systems and Control*, vol. 15, no. 8, pp. 64-72, 2020.

<https://doi.org/10.37394/23203.2020.15.8>

3. Slavov M. "Design and Investigation of Adaptive Fuzzy Level Control System for Carbonisation Column," *Proceedings of the Technical university of Sofia*, vol. 72, no. 2, 2022.

https://e-university.tu-sofia.bg/e-conf/files/169/paper_10.47978@TUS.2022.72.02.004.pdf

4. Yordanova S., Slavov M., Prokopiev G., Stoitseva-Delicheva D. "Industrial Bound Design and Application of Fuzzy Logic PID Controller for Liquid Level in Carbonisation Column," in *IEEE International conference Automatics and Informatics' (ICAI)*, Varna, Bulgaria, pp. 210-217, 6-8 Oct 2022.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9960121>

5. Yordanova S., Slavov M., Stoitseva-Delicheva D. "Design and Genetic Algorithms Based Optimisation of Industrial Adaptive PID FLC System of Liquid Level," *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 24, no. 4, pp. 181—189, 2023.

<https://doi.org/10.17587/mau.24.181-189>

6. Yordanova S., Slavov M. "Stability Analysis of Model-Free Adaptive Fuzzy Logic Control System Applied for Liquid Level Control in Soda Production," *Jordan Journal of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp.14-30, March 2023.

<http://jjee.ttu.edu.jo/docs/vol9no1/JJEE%20Vol.%209,%20No.%201,%202023,%20pp.%2014-30.pdf>

SUMMARY

PhD thesis: Fuzzy Control of Technological Processes in the Chemical Industry

Author: MEng. Milen Nikolaev Slavov

Abstract: This thesis is dedicated to the development and industrial applications of control algorithms based on fuzzy logic. Methods for synthesis using expert knowledge of the plant, robust control theory, and offline optimization with genetic algorithms have been employed. The developed systems aim to improve the control of an industrial process - the level of a carbonization column (CC) in the soda ash plant of "Solvay Sodi" SA, Devnia, Bulgaria.

A complex chemical process, characterized by nonlinearity, nonstationary, and dynamic asymmetry, has been studied. For simulation purposes, modified Takagi-Sugeno-Kang (MTSK) models based on experimental data have been derived. Proportional-integral (PI) and proportional-integral-derivative (PID) fuzzy logic controllers (FLC) with one and two inputs, as well as a FLC with disturbance compensation, have been designed. The developed controllers are model-free and based on expert knowledge. Closed-loop systems are studied for stability using an approach combining Popov's criteria for nonlinear systems with the Morari-Zafiriou method for robust stability and robust performance of linear systems.

An adaptive FLC (AFLC) has been developed to improve the performance indicators and reduce the individuality of the expert knowledge during its design. The parameters of the AFLC, and the MTSK models of the plant have been optimized by genetic algorithms. A new approach for analyzing the robust stability and robust performance of a closed-loop system with AFLC has been developed.

An industrial implementation of the developed FLCs has been carried out in a Honeywell programmable logic controller, which lacks software tools for fuzzy logic. The closed-loop systems with FLC have been studied through simulations in MATLAB™. Real-time experiments have been performed for the solution level in an operating CC under existing industrial disturbances. Improvements have been evaluated based on defined performance indicators, and different systems have been compared. Novelties are a generalized performance indicator for the overall assessment of performance and a formation of the D-part of the PID FLC by using the derivative of the controlled variable, which is calculated as a finite difference of two sliding average filters.