



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет Автоматика

Катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“

Маг. инж. Борис Симон Грасиани

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЯКОИ ПРИЛОЖЕНИЯ НА
ОБОБЩЕНОТО ДРОБНО СМЯТАНЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА
УПРАВЛЕНИЕ**

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

Научни ръководители: Проф. д.т.н. Емил Николов
Доц. д-р инж. Нина Николова

СОФИЯ, 2017г.

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 10.02.2017 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 08.06.2017 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №ОЖ-85 / 20.02.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д.т.н. Емил Николов – председател
2. Доц. д-р Весела Карлова-Сергиева
3. Проф. д-р Коста Бошнаков
4. Проф. д.т.н. Тодор Стоилов
5. Проф. д.т.н. Никола Маджаров

Рецензенти:

1. проф. д.т.н. Никола Енчев Маджаров
2. доц. д-р Весела Ангелова Карлова-Сергиева

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

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

Автор: маг. инж. Борис Грасиани

Заглавие: Изследване на някои приложения на обобщеното дробно смятане в системите за управление

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

Благодарност: *Изказвам дълбока признателност и благодарност на първо място на моите научни ръководители проф. д.т.н. Емил Николов и доц. д-р Нина Николова, както и искрена благодарност към екипа на катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства“ за оказаната подкрепа, цените забележки и конструктивните дискусии, без които този труд нямаше да бъде възможен.*

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Високите темпове на развитие на фракталния математически анализ напоследък бе възможно благодарение на ефективността от резултатите на неговото приложение в различни области на науката и техниката. Това са най-вече високите технологии и области като: биология и биофизика, физика, управление и автоматика, електротехника, електромагнетизъм, електроника, термодинамика, механика, мехатроника, електрохимия, физикохимия, геология, транспорт и мн. др.

Потвърждение за перспективността и развитието на приложимостта на **GFC** (*Generalized Fractional Calculus*) в областта на управлението са множеството специализирани световни форуми и периодични списания в областта на теорията на автоматичното управление с основна тематика фракталният математически анализ и неговите конкретни приложения.

С повишаване на изискванията към качеството на съвременните системи за автоматизация на технологичните обекти все повече нараства интересът към класовете системи за управление на нестационарни обекти в условията на априорна неопределеност и немоделирана динамика. Класът системи, които се използват в практиката се определя от класа на обектите за управление, типа на управляващите и на смущаващи въздействия и от целта за управление. В случаите, когато доминират са параметричните смущения в обектите и едно от основните изисквания към качеството на системата е устойчивост и робастна устойчивост на системата, прилагането на системи използващи алгоритми, основани на операторите от обобщеното дробно смятане е препоръчително като ефективно.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на настоящият дисертационен труд е разработването на подход за противодействие и на параметрични и на външни смущения при управлението на реални пневматични обекти и създаването на методи и алгоритми за синтез на реализиращите го системи за управление, основаващ се на оператори от обобщеното дробно смятане.

За постигане на така дефинираната цел са формулирани следните **задачи**:

1. Изследване на възможностите за синтез и анализ на фрактални системи за управление на индустриални пневматични обекти.
2. Изграждане в лабораторни условия и аналитично моделиране на пневматичен обект за управление.
3. Синтез, времеви, робастен и честотен анализ на фрактална система за управление.

4. Експериментално потвърждение на приложимостта на фракталните алгоритми при управлението на лабораторен пневматичен обект.
5. Оценка на качеството и на реалната приложимост на синтезираните фрактални системи.

Научна новост

Разглежданите алгоритми за управление са изследвани симулационно, след което са приложени върху реален пневматичен обект в лабораторни условия.

Практическа приложимост

Техническата реализация на устройства, основаващи се на резултати от газовата динамика (раздел от физиката, изучаваща равновесието и движението на газовете [163÷169]), е наречена пневматика. Тя се прилага в много отрасли на индустрията за управление на процеси и системи.

Пневматичните изпълнителни механизми се използват широко в промишлеността. Подобно на мрежите за електрозахранване, в промишлените предприятия се изграждат мрежи за подаване на сгъстен въздух (или друг газ), използван за задвижването на пневматичните изпълнителни механизми.

При по-голяма част от тях има наличие на триене, нелинейност породена от техническата реализация на различните елементи.

Предложените фрактални системи в разработката са приложени върху конкретно пневматично позициониращо устройство с обратна връзка. Фракталните системи показаха, че имат по-добри филтриращи свойства, както за параметрични така и за външни смущения породени от триене, в сравнение с ПИД системите за управление.

Апробация

Синтезираните системи за управление са тествани върху лабораторен стенд намиращ се в лаборатория № 2523 на ТУ-София, който бе реализиран посредством налични технически средства за автоматизация.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в пет научни статии, от които: две самостоятелни, две в международна конференция и три в списания.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 114 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 177 литературни източници, като 162 са на латиница и 11 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 101 фигури и 3 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОБЗОР НА АЛГОРИТМИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ С ОПЕРАТОРИ ОТ ОБОБЩЕНОТО ДРОБНО СМЯТАНЕ

Енигмата „фрактално диференциране“, считана за недостижима ирационалност, е разчупена от *Oustaloup A.* през 1975 г. с конкретна реализация в инженерната практика. Това е система за управление на лазерна инсталация с фрактален диференциатор в качеството на автоматично регулиращо устройство. В последствие в работите на *Oustaloup A.* се появява метод използващ диференциране от непълен ред в робастните системи за управление, т.н. CRONE (*Commande Robuste d'Ordre Non Entier*). Това е възможен и ефективен метод за честотен синтез при неопределеност.

Впоследствие са се появили и разработките на фрактални регулатори за индустриално приложение на *Nakagawa M., Podlubny I., Blas M. Vinagre, Petráš I., Dorcak L., Matsuda Koichi, Machado J. A.* и др., очевидно доказали качеството и ефективността си в експлоатационни условия. По същество тези системи са от пълен ред, апроксимиращи с рационални функции свойствата на хипотетичните ирационални фрактални динамични системи. Феноменални са свойствата на робастните фрактални системи. Те ги привеждат в класа на робастните системи за управление. Особен интерес представлява тяхното свойство колимация, съществено отличаващо ги от системите за управление от пълен ред.

Идеята за управление и стабилизация на индустриални обекти с помощта на фрактален диференциатор е доразвита с използването на фрактален интегратор в качеството на регулатор.

Развитието на обобщеното дробно смятане през последните години се дължи на ефективните резултати от неговото приложение в различни области на науката и техниката. Видни представители в това отношение са резултатите в работите на *Phillips, Torvik, Somorjai u Bishop*. Не трябва да се изпускат и работите на *Kiryakova, McBride, Nishimoto, Oldham u Spainer, Miller u Ross, Samko*, в които е направена систематизация в областта на обобщеното дробно смятане.

В днешно време алгоритмите за управление от непълен ред използващи оператори от обобщеното дробно смятане намират широко приложение в индустрията. Индустриалните приложения на **GFC**-операторите от теорията на автоматичното управление в промишлените системи за управление на технологични величини са в: ■ авиационни и ракетни системи; ■ напоителни канали и иригационни съоръжения със значително закъснение; ■ ниво на флуиди и насипни материали в сферични резервоари; ■ плътността на автомобилния трафик в автомагистрала; ■ температура, влажност и скорост на циркулация в HVAC системи за комфорт; ■ индустриална хладилна и криогенна техника; ■ промишлени сушилни инсталации; ■ топлоенергийни обекти, пароподготовка, котли; ■ биологични процеси в системи; ■ PLC- и embedded- системни

приложения; ■ индустриална силова електроника, инвертори и преобразуватели; ■ параметри в автомобила; ■ позициониране и скорост на постояннотокови електрозадвижвания; ■ високоточни позициониращи системи; ■ електрозадвижвания в прибори на фина механика; ■ електрически апарати ниско и високо напрежение и електроизмервателни прибори; ■ комуникационна високочестотна техника и цифрови филтри; ■ скорост и траектория на манипулатори и роботи, мехатронни системи, механични торсионни и спирални системи; ■ процеси в машиностроенето и металообработката, разкрояващи и пробивни машини, лазерни металообработващи машини и мн. др.

Измежду множеството специализирани световни форуми (само в областта на теорията на автоматичното управление), потвърждаващи активността в приложението на **GFC** в областта на управлението, следва да бъдат отбелязани: ■ *1st IFAC Workshop on Fractional differentiation and its applications, FDA'04, Bordeaux, France, 19-21 July, 2004*; ■ *2nd IFAC Workshop Fractional Differentiation and its Applications FDA'06, Porto, Portugal, 19-21 July, 2006*; ■ *3rd IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications FDA'08, Ankara, Turkey, 05-07 November, 2008*; ■ *4th IFAC Workshop Fractional Differentiation and its Applications. FDA'10, Badajoz, Spain, 18-20 October, 2010*; ■ *5th IFAC Symposium on Fractional Differentiation and its Applications, FDA'12, Nanjing, China. 14-17 May, 2012*; ■ *6th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications, FDA'13 Grenoble, France, 4-6 February, 2013*; ■ *7th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications, FDA'14 Catania, Italy, 23-25 June, 2014*. В допълнение е необходимо да бъдат посочени и трите периодични списания, специализирани в съответната област:

- ***Journal of Fractional Calculus***, © Publisher Koriyama, Japan, Descartes Press Co.; Editor-in-Chief: Katsuyuki Nishimoto; ISSN: 0918-5402;

URL: <http://www.worldcat.org/title/journal-of-fractional-calculus/oclc/29046195>;

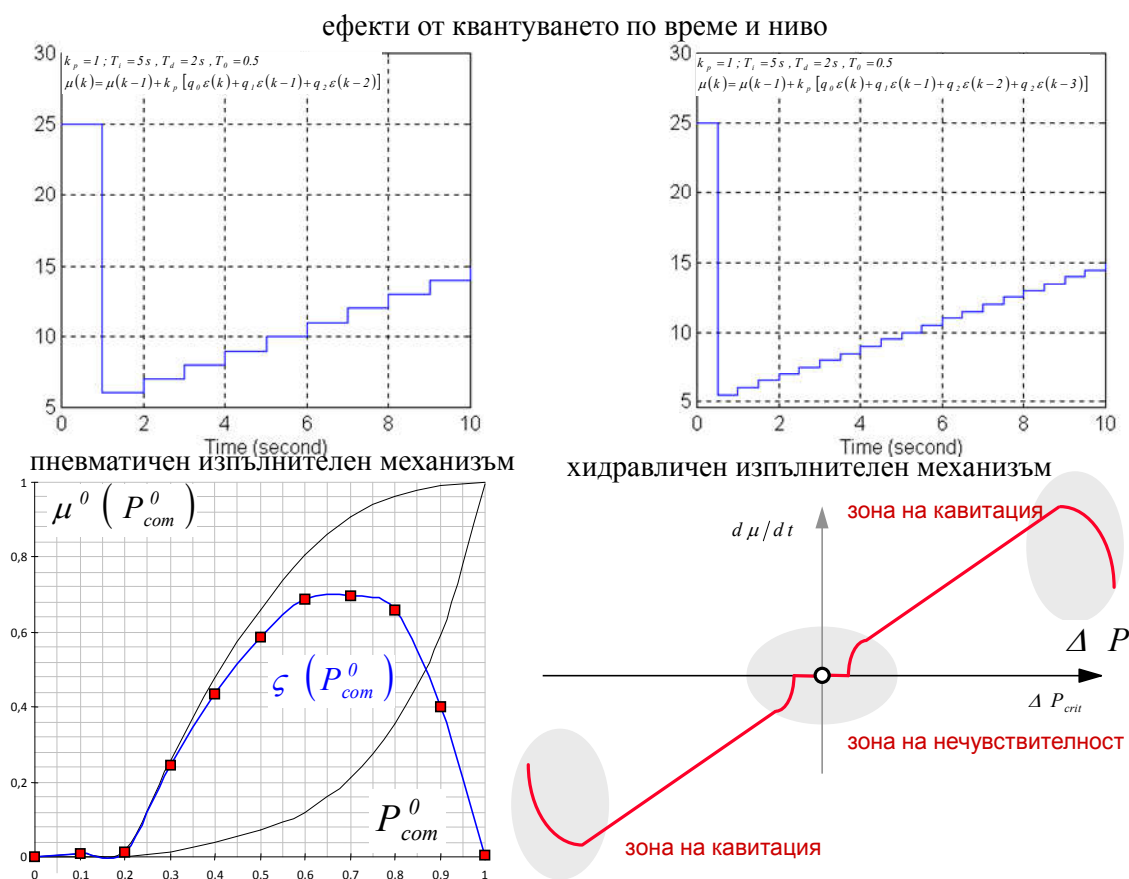
Starting year: 1992;

- ***Fractional Calculus & Applied Analysis***, © Founding Publisher and Supporting Organization: Institute of Mathematics & Informatics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia - Bulgaria; Managing Editor: Virginia Kiryakova; Print ISSN 1311-0454, Electronic ISSN 1314-2444; **URL:** http://www.math.bas.bg/_fcaa; <http://www.diogenes.bg/fcaa> ; Starting year: 1998;

- ***Fractional Dynamic Systems***. © Ele-Math's Element d.o.o. Publishing House; Editors-in-chief: Josip Pecaric, Yong Zhou; **URL:** <http://fds.ele-math.com/> ; Starting year: 2010.

Между реалните функционални възможности на серийно произвежданите технически средства за автоматизация и еталонните алгоритми за управление и регулиране съществуват различия, основаващи се преди всичко на реализацията на промишлените технически средства [75] за автоматизация с електрически, пневматични, хидравлични и механични градивни елементи. Факторите, определящи тези различия, могат да се обобщят в две основни групи:

- **Вътрешни фактори** – механично триене, натоварване, механични луфтове, механични ограничения, маса и подвижни елементи, еластични елементи, изменящ се режим на движение на работни флуиди, дискретизация на сигнал по ниво, дискретизация по време; дискретизация по ниво и време (фиг.1.11) и др.;
- **Външни фактори** – те се определят от околната и работната среда: флуктуации в енергозахранване (електрическо, пневматично, хидравлично); флуктуации на температурата, влажността, налягането на околната среда; химическа и биологическа агресивност и на околната среда и на работната среда.



Фиг.1.11.

Наличието на вътрешни и външни фактори налагат своите отражения върху характеристиките и върху аналитичното описание на промишлените технически средства за автоматизация и автоматични регулиращи устройства.

Обзорът на приложението на фракталните оператори в системите за управление в условията на априорна неопределеност, анализа на тенденциите за тяхното развитие и особеността на промишлените средства за автоматизация отчита факта, че съществуват реални възможности за повишаване на тяхната ефективност и приложимост в инженерната практика. На тази основа

Целта на настоящият дисертационен труд е разработването на подход за противодействие и на параметрични и на външни смущения при управлението на реални пневматични обекти и създаването на методи и алго-

ритми за синтез на реализиращите го системи за управление, основаващи се на оператори от обобщеното дробно смятане.

За постигане на така дефинираната цел са формулирани следните задачи: ■ Изследване на възможностите за синтез и анализ на фрактални системи за управление на индустриални пневматични обекти. ■ Изграждане в лабораторни условия и аналитично моделиране на пневматичен обект за управление. ■ Синтез, времеви, робастен и честотен анализ на фрактална система за управление. ■ Експериментално потвърждение на приложимостта на фракталните алгоритми при управлението на лабораторен пневматичен обект. ■ Оценка на качеството и на реалната приложимост на синтезираните фрактални системи.

ГЛАВА 2. ПНЕВМАТИЧЕНО ПОЗИЦИОНИРАЩО УСТРОЙСТВО КАТО ОБЕКТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

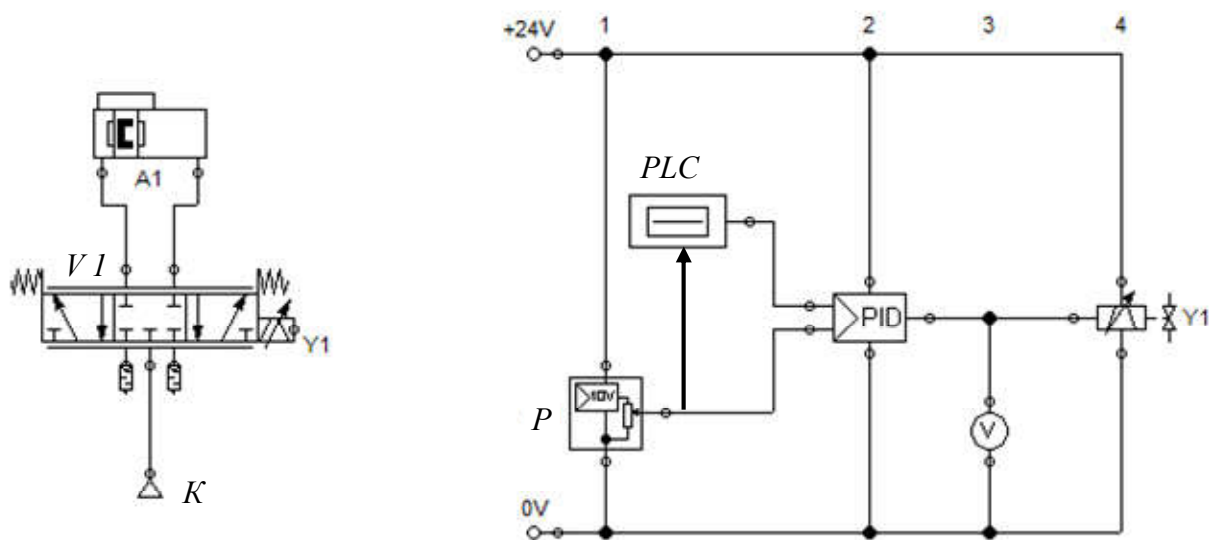
Позицията μ на *ППУ* с *обратна пропорционална връзка* е изходната физическа величина на обобщен обект за автоматизация (*ООА*), използван в следващите раздели на изследванията. Входна величина *ООА* е позицията l на *РО*.

Пневматичната и електрическата структурна схема на физическа лабораторна инсталация за експериментално заснемане на характеристиките на *ООА* е показана на фиг.2.14. Разглежданият *ООА* е съставен от: компресор (подготвителна група) *K*, пропорционален разпределител клапан *V1*, пневматично задвижване *A1*, потенциометър *P*, контролер (PLC).

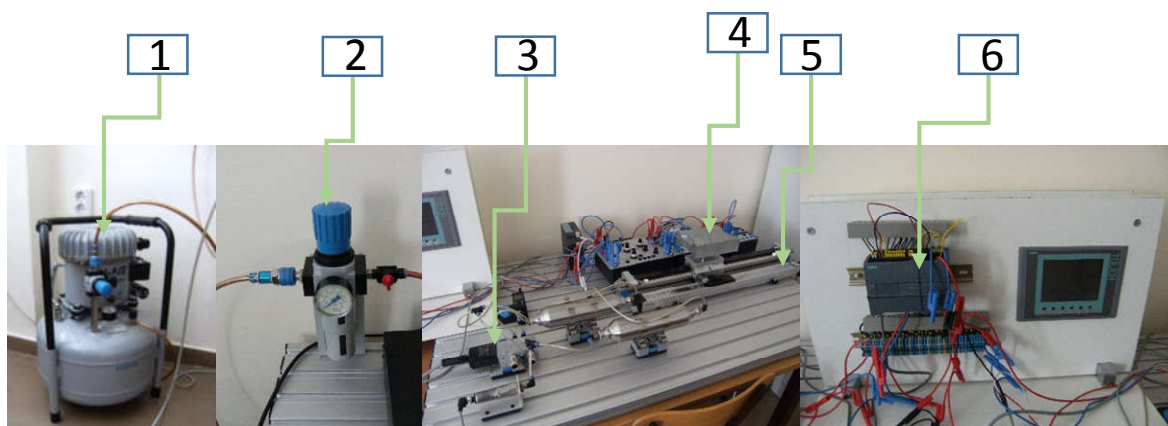
На фиг.2.15 е показана реалната физическа система за експериментално заснемане на характеристиките на *ООА*, където: 1 - компресор с електрозадвижване и автономна система за стабилизация на изходното налягане; 2 - филтър-регулатор за подготовка на въздуха; 3 - регулиращ орган; 4 - пневматично задвижване *ППУ*; 5 - потенциометър; 6 - контролер.

Компресорът създава постоянно налягане, като сгъстения въздух се преработва от филтър-регулатор. След това компресирания въздух се подава към *V1*, който управлява потока на въздуха спрямо това в коя посока трябва да се движи *ППУ*, съобразно механичната позиция l на дроселиращата му система. Размерът и функцията на промяна на входната величина l на *ООА* се определя с помощта на цифров контролер (PLC) в режим на генератор на тестови сигнали. Изходната величина на обекта - позицията μ на *ППУ*, се преобразува линейно в еквивалентен електрически сигнал с помощта на потенциометър.

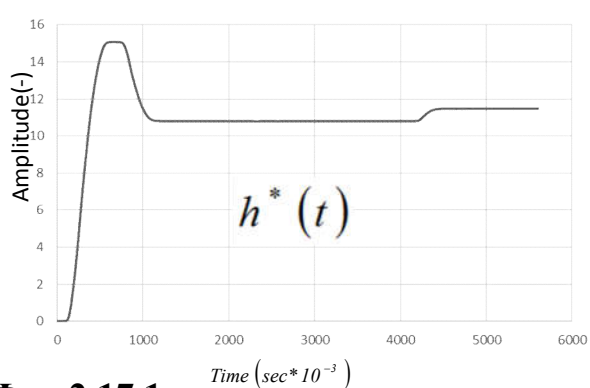
Характеристиката от фиг.2.17.1 по-нататък в работата се приема, че е преходна функция на *ООА* в номинален режим, а на фиг.2.17.2 е характеристиката на *ООА* в смутен режим. След идентификация, въз основа на тези характеристики, ще бъдат определени номиналният модел $G^*(p)$ и смутеният на „най-горна граница“ модел $G^\bullet(p)$ на *ООА*.



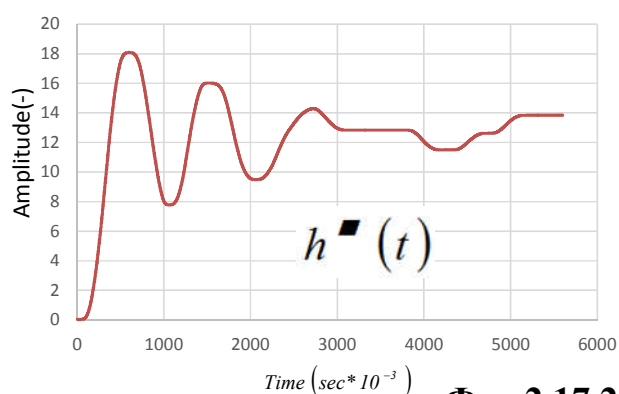
Фиг.2.14.



Фиг.2.15.



Фиг.2.17.1.



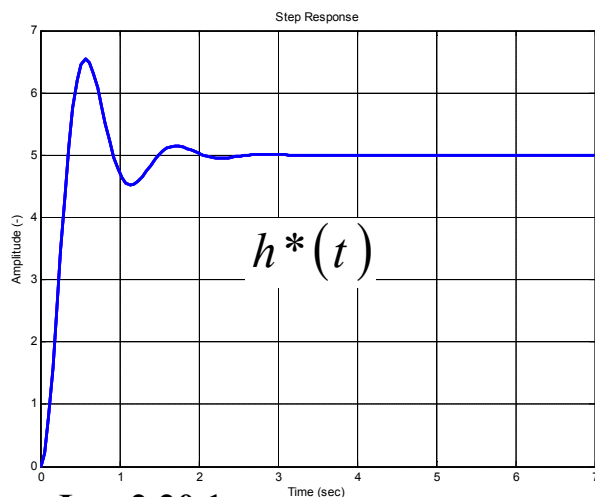
Фиг.2.17.2.

По експериментално сметите преходни характеристики (фиг.2.17) на **ООА** по позиция, чрез идентификация по преходна характеристика на колебателно звено са апроксимирани аналитичните модели на номинален $G^*(p)$ (2.20) и смутен на „най-горна граница“ модел $G^{\blacksquare}(p)$ (2.21) на обекта.

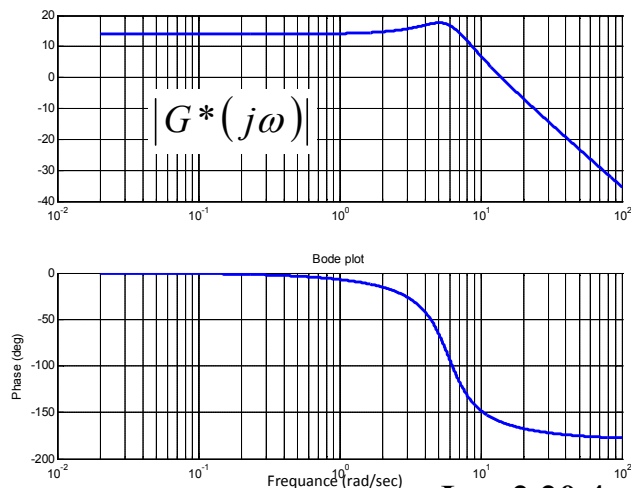
$$G^*(p) = \frac{5}{0.0289 p^2 + 0.119 p + 1} \quad (2.20)$$

$$G^\blacksquare(p) = \frac{132.2}{p^2 + 2.6 p + 26.44} \quad (2.21)$$

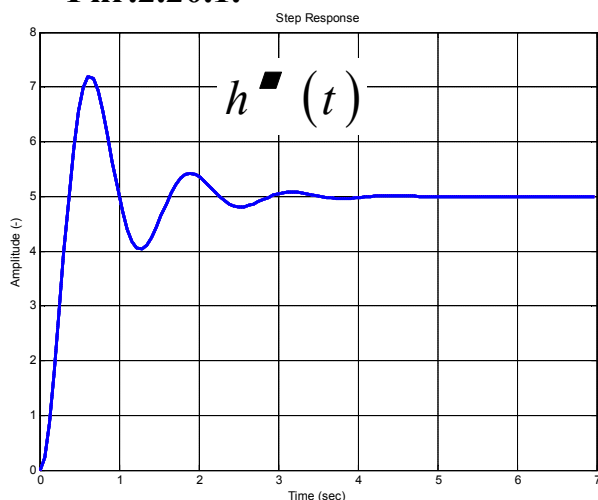
Така получените в номинален и в смутен на „най-горна граница“ модели на **ООА** са моделирани и симуирани в средата на *Matlab*. Техните времеви и честотни характеристики са показани съответно: за номинален модел $G^*(p)$ на **ООА** (2.20) на фиг.2.20, а за смутения на „най-горна граница“ модел $G^\blacksquare(p)$ на **ООА** (2.21) на фиг.2.21. И за двата модела на **ООА** са визуализирани преходна функция $h^*(t)$ на фиг.2.20.1 и $h^\blacksquare(t)$ на фиг.2.21.1, както и честотните характеристики $G^*(j\omega)$ по *Bode* фиг.2.20.4, както и за $G^\blacksquare(j\omega)$, фиг.2.21.4.



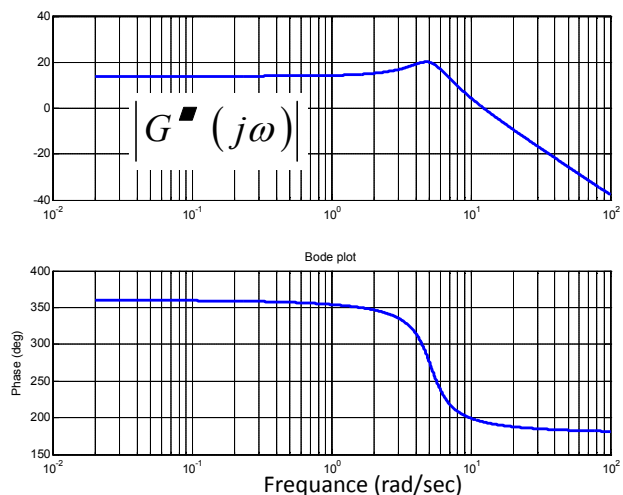
Фиг.2.20.1.



Фиг.2.20.4.



Фиг.2.21.1.



Фиг.2.21.4.

Основните резултати в тази част от обяснителната записка могат да бъдат обобщени като:

1. За целите на разработката, като обобщен обект за автоматизация **ООА** е избран пневматично позициониращо устройство (**ППУ** с пропорцио-

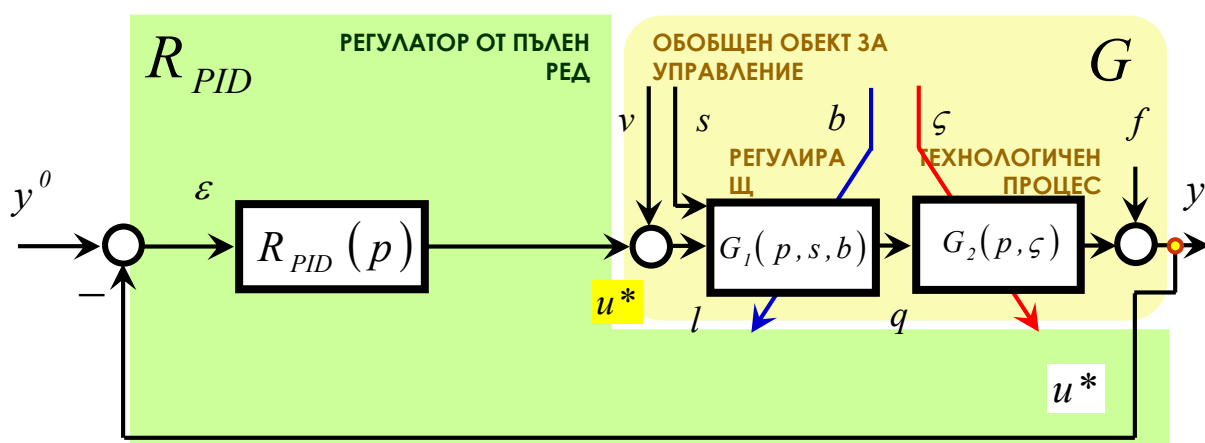
нална обратна връзка), който е реализиран в лабораторни условия. Направено е подробно описание на програмното осигуряване за експерименталното заснемане реални данни от лабораторен стенд.

2. С помощта на подходящи методи за идентификация по преходна характеристика са определени структурата и параметрите на моделите на обобщения обект за управление, в номинален и в смутен режим, по данни от експериментално заснети преходни характеристики.
3. За получените аналитични модели на обекта за управление са снети и визуализирани в средата на *Matlab* времеви и честотни характеристики.

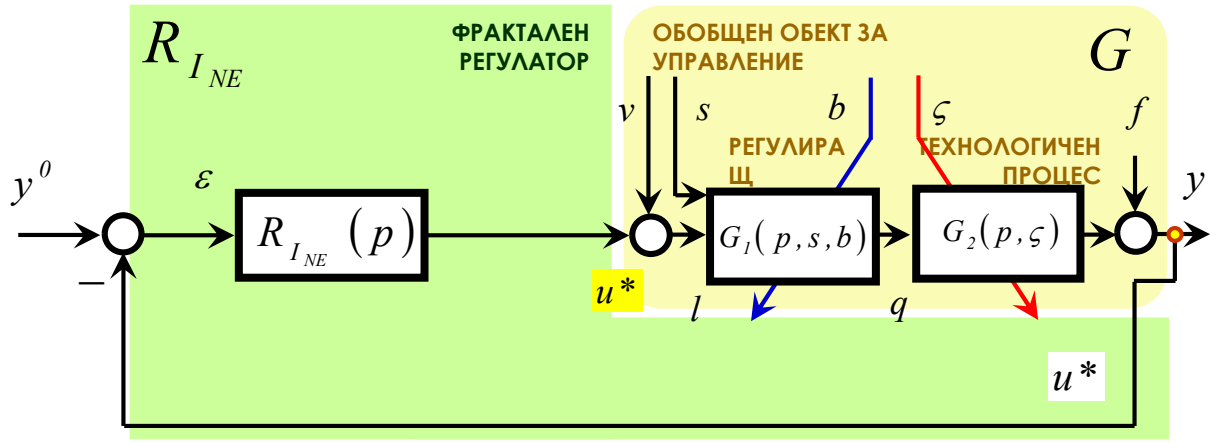
ГЛАВА 3. ФРАКТАЛНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ППУ С ПРОПОРЦИОНАЛНА ОБРАТНА ВРЪЗКА

Към получения аналитичен номинален модел на обекта за управление $G^*(p)$ (2.16) от втора глава на настоящата разработка се предлага [116,117,125,146] управление с класически целочислен ПИД R_{PID} регулатор. На фиг.3.2 е показана структурната схема на системата за управление на позицията. Регулаторът в системата е настроен графоаналитично, чрез позициониране на неговите полюси и нули. Избран е ПИД регулатор, поради наличието на И съставка, която трябва да нулира грешката в установен режим при стъпално входно въздействие. Нулите на ПИД регулатора са комплексни и са разположени в околност на полюсите на предавателната функция на обекта (2.20). Локалните критерии за качество при настройката на регулатора е апериодичен преходен процес с бързодействие 5 сек.

Към същия аналитичен номинален модел на обекта за управление $G^*(p)$ (2.16) е проектиран и интегриращ регулатор от непълен ред $R_{I_{NE}}$. Структурата на фракталната система за управление е дадена на фиг.3.3.



Фиг.3.2.



Фиг.3.3.

$$R_{PID}(p) = k \left(1 + \frac{I}{T_i p} + T_d p \right) \frac{I}{Tp + I} \quad (3.1)$$

$$k = 0.000996; T_i = 0.006049; T_d = 0.018808; T = 0.25$$

$${}_a I_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(-\alpha)} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha+1}} d\tau, \quad (\alpha, a \in \mathbb{R}, \alpha = 0.9) \quad (3.13.a.)$$

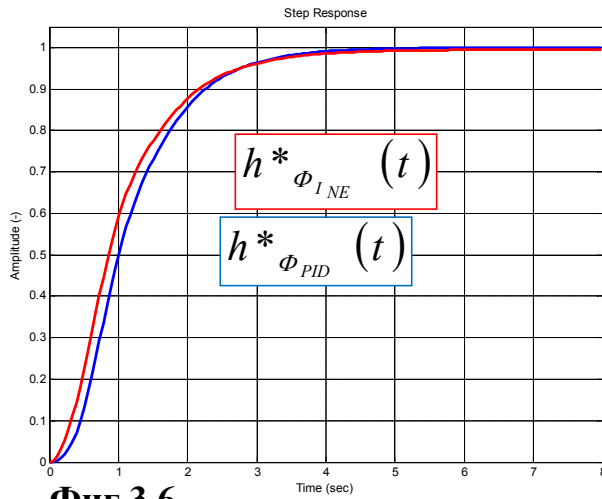
$$R_{I_{NE}}(p) \equiv I_{app}^{0.9}(p) = 0.01747 \frac{(17.1p+1)}{(24.75p+1)} \cdot \frac{(13.48p+1)}{(19.91p+1)} \cdot \frac{(10.23p+1)}{(0.00203p+1)} \quad (3.13.b.)$$

Синтезирани системи (фиг.3.2, фиг.3.3) за управление са моделирани и симулирани в средата на *Matlab*, както в номинален параметричен режим, така и в смутен параметричен режим.

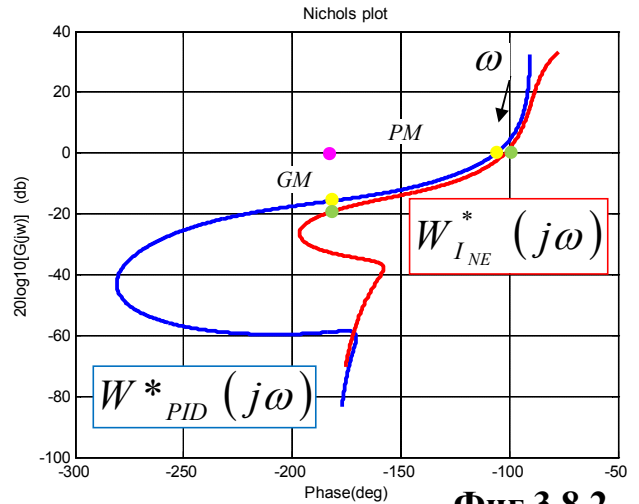
- В номинален режим са визуализирани следните характеристики:
- Преходната функция h_{PID}^* и $h_{I_{NE}}^*$ фиг.3.6. От характеристиката е видно, че и двете системи (с $R_{I_{NE}}$ и с R_{PID}) имат почти едно и също бързодействие (3.16), а процеса е с аperiодичен характер;
- Честотните характеристики на отворените W_{PID}^* и $W_{I_{NE}}^*$ системи фиг.3.8. От тях може да бъде направена оценка на запасите по модул и фаза на двете системи (3.17). Системата с фракталния $R_{I_{NE}}$ алгоритъм за управление е с по-големи запаси по модул и фаза в сравнение с класическата система за управление с R_{PID} регулатор. И двете системи са устойчиви.

$$t_{reg}^{I_{NE}} \approx t_{reg}^{PID}, \quad (3.14)$$

$$GM_{R_{I_{NE}}} \gg GM_{PID}; \quad PM_{R_{I_{NE}}} \gg PM_{PID}, \quad (3.15)$$



Фиг.3.6.



Фиг.3.8.2.

Визуализирани са резултатите от честотен **2D Nyquist**-робастен анализ на качеството по характеристиките на отворените (фиг.3.12) и на затворените (фиг.3.13) системи при априорна неопределеност. Показани са: робастната устойчивост RS (3.20), робастното качество RP (3.21) по характеристиките на затворените системи и по характеристиките на отворените системи RS (3.26) и RP (3.27); запасите на робастна устойчивост k_{MSOL} (3.22), на робастното качество k_{MPOL} (3.23), фиг.3.16 с използване на функциите на чувствителност (3.24) и допълнителна чувствителност (3.25). Очевидно е, че проектираните системи са с доказана робастна устойчивост RS_i и с доказано робастно качество RP_i в контекста на параметричната флуктуация на $G^\bullet$ (2.17) спрямо G^* (2.16), заложена при синтеза на системите (фиг.3.2), (фиг.3.3). Резултатите от сравнителната оценка на количествените показатели на робастните свойства на системите са дадени съответно с характеристиките изобразяващи: запасите на робастна устойчивост k_{MSOL} (3.22) и запасите на робастно качество (фиг.3.13) k_{MPOL} (3.23).

$$t_{reg, (y^0=I(t))} \in [t_{0,95}, t_{1,05}] , \quad (0,95 h(\infty) < h(t) < 1,05 h(\infty)) , \quad (3.16)$$

$$GM = 20 \log_{10} |W^*(j\omega_\pi)|, [dB]; PM = -(\arg(W^*(j\omega_0)) + 180^\circ), \quad (3.17)$$

$$\left(\omega_\pi : \arg W^*(j\omega_\pi) \equiv \pi; \quad \omega_0 : |W^*(j\omega_0)| \equiv 1 \right)$$

$$\alpha_i^{(\omega_p)} = (de_i(\omega_p)/d\omega_p), \quad (3.18)$$

$$\Delta y_i^{(\omega_p)} = y_{i,max}^{(\omega_p)} - y_{i,min}^{(\omega_p)}, \quad (3.19)$$

$$RS(\omega) \Rightarrow \|\eta(\omega) \bar{\ell}_m(\omega)\|_\infty < 1, \forall \omega, (\omega \in [0; \infty)), \quad (3.20)$$

$$RS(\omega) \Rightarrow |1 + G^*(\omega)R(\omega)| > |G^*(\omega)R(\omega)| \bar{\ell}_m(\omega), (\forall \omega, \omega \in [0, \infty))$$

$$RP(\omega) \Rightarrow |\eta^*(\omega) \bar{\ell}_m(\omega)| + |e^*(\omega) v(\omega)| < 1, \forall \omega, (\omega \in [0; \infty)), \quad (3.21)$$

$$RP(\omega) \Rightarrow \min_R \max_{G \in \Pi} \int_0^\infty (\varepsilon(t))^2 dt \hat{=} \min_R \max_{G \in \Pi} \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left| \frac{1}{1+G(\omega)R(\omega)} \right|^2 |v|^2 d\omega$$

$$k_{MSOL}(\omega) = r^0(\omega) |1+R(j\omega)G^*(j\omega)|^{-1} \leq 1, (\forall \omega, \omega \in [0, \infty)), \quad (3.22)$$

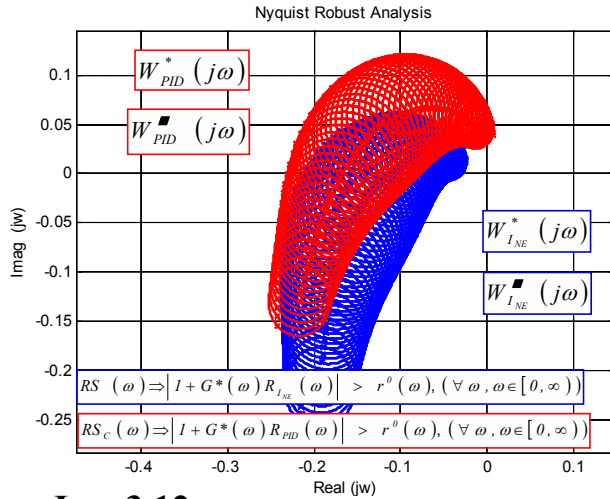
$$k_{MPOL}(\omega) = (|1+R(j\omega)G^*(j\omega)| - r^0(\omega)) |1+R(j\omega)G^\square(j\omega)|^{-1} \leq 1 \quad (3.23)$$

$$e(\omega) = (1+R^*(\omega)G^*(\omega))^{-1} \equiv \Phi_{y^0_e}(\omega), (e(\omega) = 1-\eta(\omega)), \quad (3.24)$$

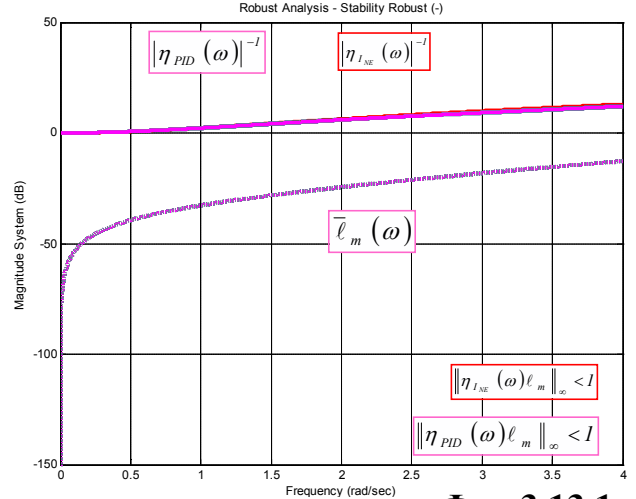
$$\eta(\omega) = R^*(\omega)G^*(\omega)(1+R^*(\omega)G^*(\omega))^{-1} \equiv \Phi_{y^0_y}(\omega), (\eta(\omega) = 1-e(\omega)) \quad (3.25)$$

$$|1+G^*(\omega)| > r^0(\omega), \forall \omega \quad (3.26)$$

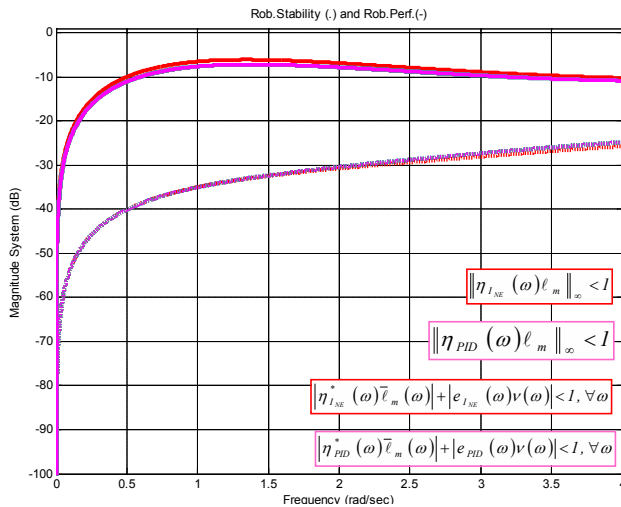
$$|1+G^*(\omega)R(\omega)| > |G^*(\omega)R(\omega)| \bar{\ell}_m(\omega), \forall \omega \quad (3.27)$$



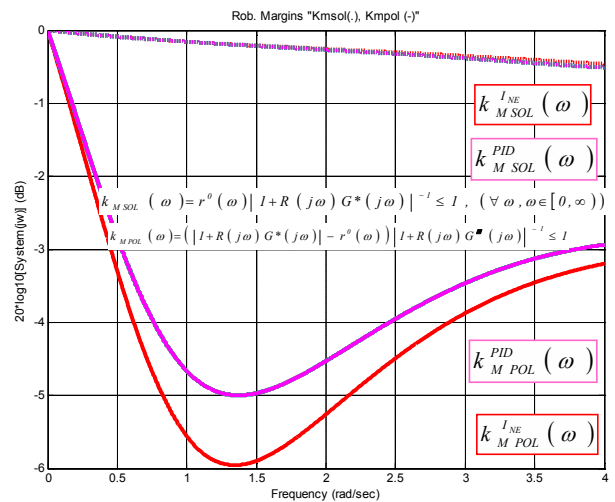
Фиг.3.12.



Фиг.3.13.1.



Фиг.3.13.2.



Фиг.3.16.

След направените симулационни изследвания, регулаторите (3.1) и (3.13) са програмирани в контролера (фиг.2.14, фиг.3.2, фиг.3.3), за да се снимат експериментални характеристики на физическата лабораторна система за управление.

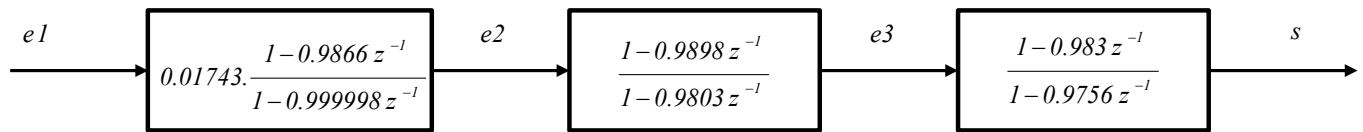
За целта проектираните регулатори са дискретизирани с такт на дискретизация $T_0 = 0,001s$ по метода на *Tustin*, съответно R_{PID} (3.27) и $R_{I_{NE}}$ (3.28), след което са представени с диференчно уравнение, съответно (3.29) и (3.30), фиг.3.17. За програмното осигуряване са използвани функционални блокове.

$$R_{PID} = \frac{0.003985 - 0.007957 z^{-1} + 0.003973 z^{-2}}{1 - 1.996 z^{-1} + 0.996 z^{-2}} \quad (3.27)$$

$$R_{I_{NE}} = 0.01743 \cdot \frac{(z - 0.9866)}{(z - 0.999998)} \cdot \frac{(z - 0.9898)}{(z - 0.9803)} \cdot \frac{(z - 0.983)}{(z - 0.9756)} \quad (3.28)$$

$$y(k) = 1.996008 y(k-1) - 0.996008 y(k-2) + 0.00398467 u(k) - 0.00795664 u(k-1) + 0.00397263 u(k-2) \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} e2(k) &= 0.999998 e2(k-1) + 0.017437 (e1(k) - 0.9866 e1(k-1)) \\ e3(k) &= 0.9803 e3(k-1) + e2(k) - 0.9898 e2(k-1) \\ s(k) &= 0.9756 s(k-1) + e3(k) - 0.983 e3(k-1) \end{aligned} \quad (3.30)$$



Фиг.3.17.

Програмните кодове са дадени за:

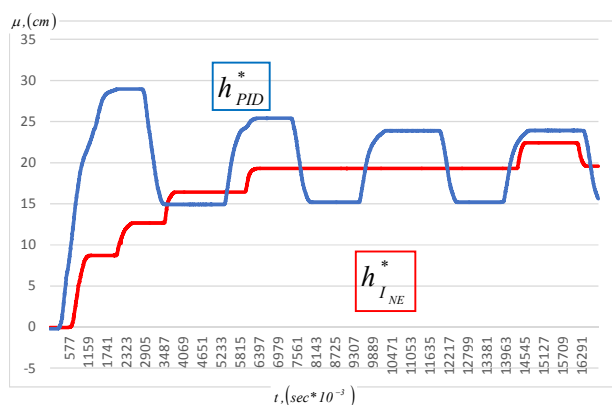
- R_{PID} регулатор

```
#e := #sp - #pv;
#mv := 1.996008 * #y1 - 0.996008 * #y2 + 0.00398467 * #e - 0.00795664 * #e1 +
0.00397263 * #e2;
#mv := #mv * 1;
IF #mv > 1 THEN
    #mv := 1;
END_IF;
IF #mv < -1 THEN
    #mv := -1;
END_IF;
#y2 := #y1;
#y1 := #mv;
#e2 := #e1;
#e1 := #e;
```

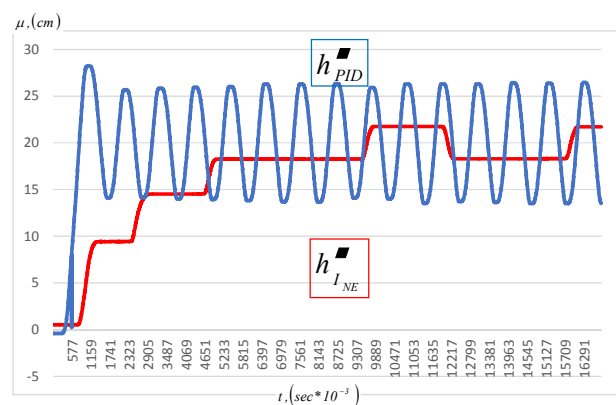
- фрактален регулатор $R_{I_{NE}}$:

```
#e := #sp - #pv;
#e1 := 0.017437 * #e;
#e2 := 0.999998 * #y1_1 + #e1 - 0.9866 * #e1_1;
#y1_1 := #e2;
#e1_1 := #e1;
#e3 := 0.9803 * #y2_1 + #e2 - 0.998 * #e2_1;
#y2_1 := #e3;
#e2_1 := #e2;
#mv := 0.97569 * #y3_1 + #e3 - 0.983 * #e3_1;
IF #mv > 1 THEN
    #mv := 1;
END_IF;
IF #mv < -1 THEN
    #mv := -1;
END_IF;
#y3_1 := #mv;
#e3_1 := #e3;
```

Върху реалния лабораторен стенд за управление на *ППУ* с пропорционална обратна връзка с R_{PID} и $R_{I_{NE}}$ алгоритми са направени множество експериментални изследвания в номинален и смутен режим на работа на системите. Направена е съпоставка на работата на системите за управление от пълен R_{PID} и непълен $R_{I_{NE}}$ ред в: • номинален режим h_{PID}^* и $h_{I_{NE}}^*$, фиг.3.21; • смутен режим $h_{PID}^{\blacksquare}$ и $h_{I_{NE}}^{\blacksquare}$, фиг. 3.24.



Фиг.3.21.



Фиг.3.24.

Анализ и изводи

Основните резултати в настоящия раздел на разработката могат да бъдат обобщени като:

1. Синтезирани са системи от пълен и от дробен ред за управление на лабораторен обобщен обект ООА (*ППУ* с пропорционална обратна връзка) във втора глава на разработката.

2. Синтезираните системи за управление са моделирани и симулирани в *MATLAB*.
3. Направен е симулационен сравнителен анализ на работата на двете системи както в номинален, така и в смутен параметричен режим (за затворените и за отворените системи). Направен е робастен анализ по характеристиките и на отворените и на затворените системи за управление. От проведените анализи се доказват робастните свойства на синтезираните системи. Доказано е превъзходството на фракталната система за управление (по големи запаси по модул и фаза) в сравнение с класическата система за управление с *ПИД* алгоритъм.

Проведени са реални експерименти върху лабораторен стенд на синтезирани системи за управление. Резултатите от тях потвърждават симулационните. Но при реалните експерименти има наличие на триене (нееднозначност в характеристиките на обекта, което не е отчетено в неговия аналитичен модел), което е видно от записа. Триенето наслагва смущение с периодичен характер върху полезния сигнал. Това поставя нова задача за решение, а именно търсене на подход за ефективно противодействие с това смущаващо хармонично въздействие. Един подход за нейното решение е представен в следващия раздел на разработката.

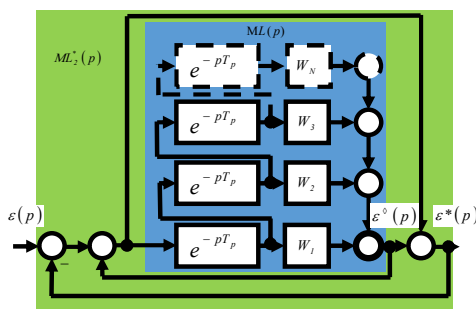
ГЛАВА 4. РЕПЕТИТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА ППУ С ПРОПОРЦИОНАЛНА ОБРАТНА ВРЪЗКА

В работата е избрана модифицирана структура на репетитивен ML -филтър. Тя е подходяща за настоящото изследване за приложение при управлението на пневматичен лабораторен стенд (*ППУ* с пропорционална обратна връзка), защото осигурява разширение на честотната лента на отсичане.

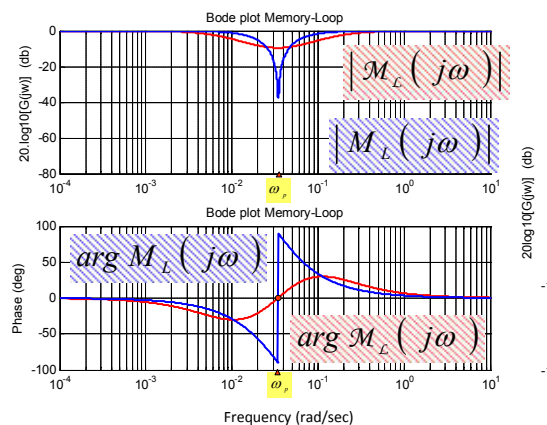
Синтезът на репетитивния регулатор в система за управление се провежда в два етапа. Той се състои в проектирането на:

- базовия регулатор;
- робастния репетитивен филтър ML (фиг.4.4) (4.10),

които са независими една от друга процедури, а също и независими по използваните методи за синтез.



Фиг.4.4.1.



Фиг.4.4.2.

По така предложената двустепенна процедура за синтез на репетитивната система, решението се изразява в аналитичното проектиране на базови регулатори R_{PID} и R_{INE} (това беше обект на разглеждане в трета глава на настоящата разработка), робастен $\mathcal{ML}$ -филтър (4.10) с памет и репетитивни регулатори $ML \circ R_{PID}$ и $ML \circ R_{INE}$, аналитично представени с (4.11), (4.12).

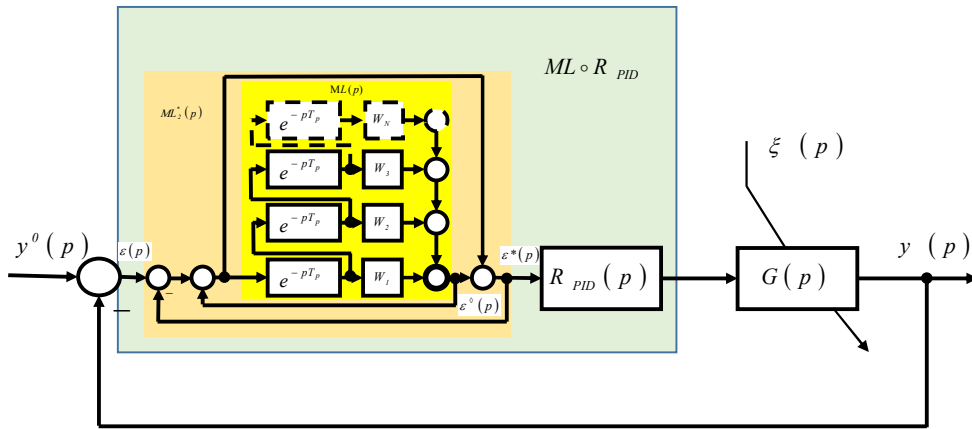
Тези резултати (4.10)÷(4.12) по същността си са решения за синтеза на две категории системи за управление на обекта G (2.17): репетитивна с класически $ПИД$ алгоритъм $\Phi_{ML \circ PID}$ (фиг.4.5) и репетитивна с фрактален алгоритъм $\Phi_{ML \circ INE}$ (фиг.4.6) системи.

$$\mathcal{M}_L(p) = \left(2 - \sum_{k=1}^m W_k(p) e^{-p k T_p} \right)^{-1} \triangleq \left(2 - e^{-p T_p} \right)^{-1}, \quad (4.10)$$

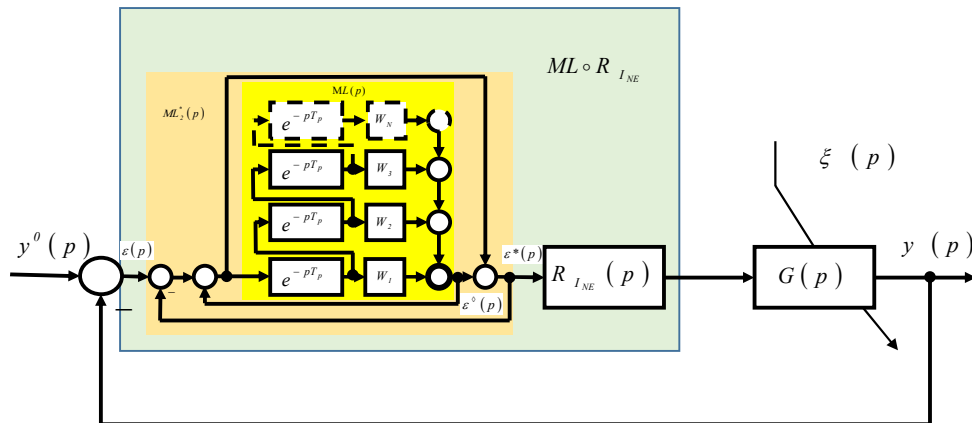
$$(k=1; T_p \equiv T_{pf} = 2\pi (\omega_{pf})^{-1} = 2\pi (1,2)^{-1})$$

$$\mathcal{M}_L(p) R_{PID}^*(p) = \frac{0.005977p^2 + 0.01858p + 0.988}{1.5p^2 + 6p} \cdot \frac{1}{\left(2 - e^{-p T_p} \right)} \quad (4.11)$$

$$\mathcal{M}_L(p) R_{INE}^*(p) = 0.01747 \frac{(17.1p+1)(13.48p+1)(10.23p+1)}{(24.75p+1)(19.91p+1)(0.00203p+1)} \cdot \frac{1}{\left(2 - e^{-p T_p} \right)} \quad (4.12)$$



Фиг.4.5.



Фиг.4.6.

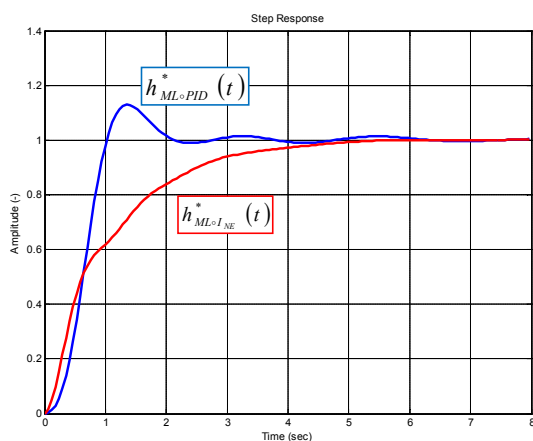
Синтезираните системи за управление фиг.4.5 и фиг.4.6 са моделирани и симулирани в средата на *MATLAB*. Резултатите от симулацията на моделите - времевите и честотните характеристики на решението за затворените Φ_i и за отворените W_i системи за управление на обекта G са визуализирани **в номинален** $G \triangleq G^*$ (2.17) и **смутен** $G \triangleq G^\#$ (2.18) **параметричен режим** ($\xi = const$, $d_i \equiv 0$) без наличието на постоянно действащо периодично външно сигнално смущение d , както следва:

- В **номинален режим**:

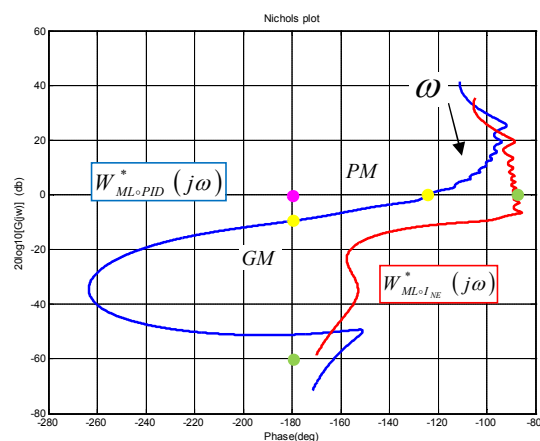
- Преходната функция фиг.4.7, от която е видно, че в реакцията на системата с целочисления алгоритъм за управление и репетитивен филтър се появява пререгулиране, докато реакцията на системата с фрактален регулатор и репетитивен филтър продължава да има апериодичен характер;
- Честотните характеристики на отворените системи фиг.4.9, от които се вижда ясно, че фракталната репетитивна $W_{ML \circ I_{NE}}$ система за управление има по-голям запас по модул и фаза в сравнение с $W_{ML \circ PID}$ системата;

Анализът на качеството на системите (фиг.4.5, фиг.4.6) **потвърждава**, че и двете системи:

- удовлетворяват обобщените критерии за качество (фиг.4.7, фиг.4.9);
- са устойчиви (фиг.4.7), както **в номинален** $G \triangleq G^*$ (2.17), така и в **смутен** $G \triangleq G^\#$ (2.18) **параметричен режим**;
- удовлетворяват предявените изисквания за качество в задачата за синтез.



Фиг.4.7.

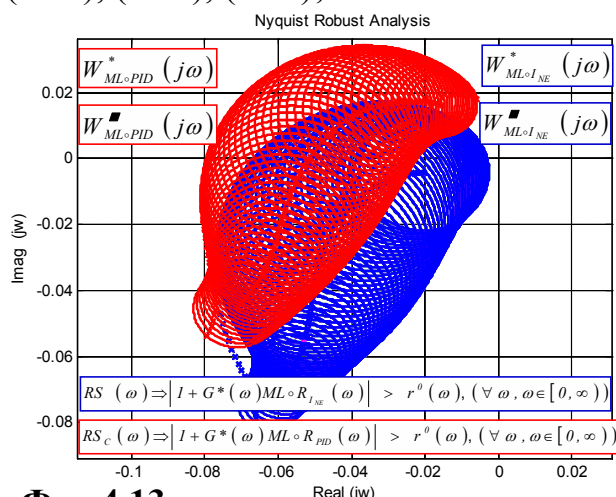


Фиг.4.9.2.

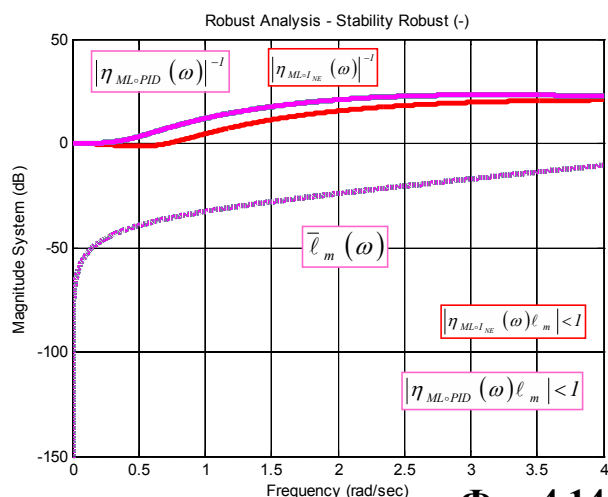
Визуализирани са резултатите от честотен **2D Nyquist**-робастен анализ на качеството по характеристиките на отворените (фиг.4.13) и на затворените системи (фиг.4.14 и фиг.4.15). Показани са робастната устойчивост RS (3.20), робастното качество RP (3.21) по затворените системи и по отворените системи

RS (3.26) и RP (3.27), запасите на робастна устойчивост k_{MSOL} (3.22) и робастно качество k_{MPOL} (3.23), а на фиг.4.14 и фиг.4.15 с използване на функциите на чувствителност (3.24) и допълнителна чувствителност (3.25). Очевидно е, че проектираните системи са с доказана робастна устойчивост RS_i и с доказано робастно качество RP_i в контекста на параметричната флуктуация на $G^{\bullet}$ (2.17) спрямо G^* (2.16), заложена при синтеза на системите (фиг.3.2), (фиг.3.3). Резултатите от сравнителната оценка на количествените показатели на робастните свойства на системите по стойностите на запасите на робастна устойчивост k_{MSOL} (3.22) и на робастно качество k_{MPOL} (3.23) са дадени на фиг.4.18.

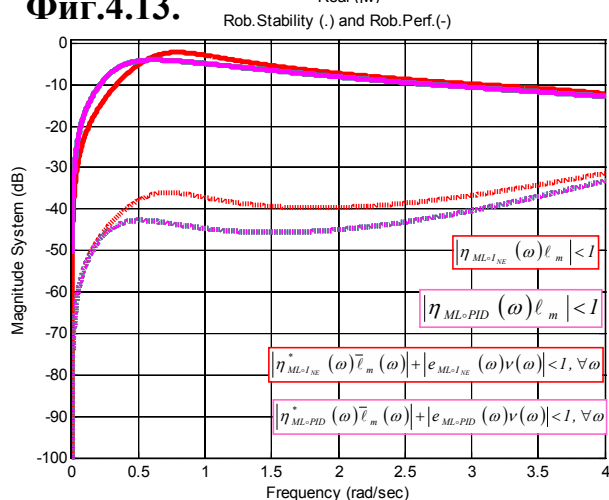
Резултатите (фиг.4.13)÷(фиг.4.18) от робастния анализ по характеристиките на отворените и на затворените системи **аналитично доказват** и еднозначно визуализират, че в условията на репараметризиране/реструктуриране ξ , $\xi^{\bullet}$ на номиналния модел на обекта (2.17), че репетитивната система с ПИД регулатор (фиг.4.5) и репетитивната с фрактален регулатор (фиг.4.6) притежават робастна устойчивост RS и робастно качество RP , тъй като техните характеристики удовлетворяват изискванията формулирани (3.20)÷(3.23), (3.26), (3.27);



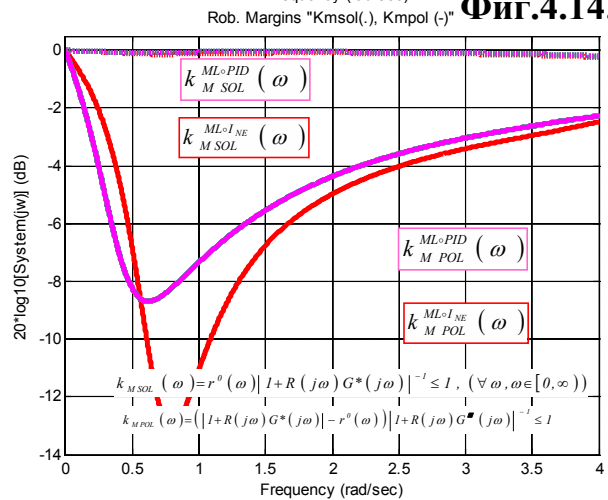
Фиг.4.13.



Фиг.4.14.

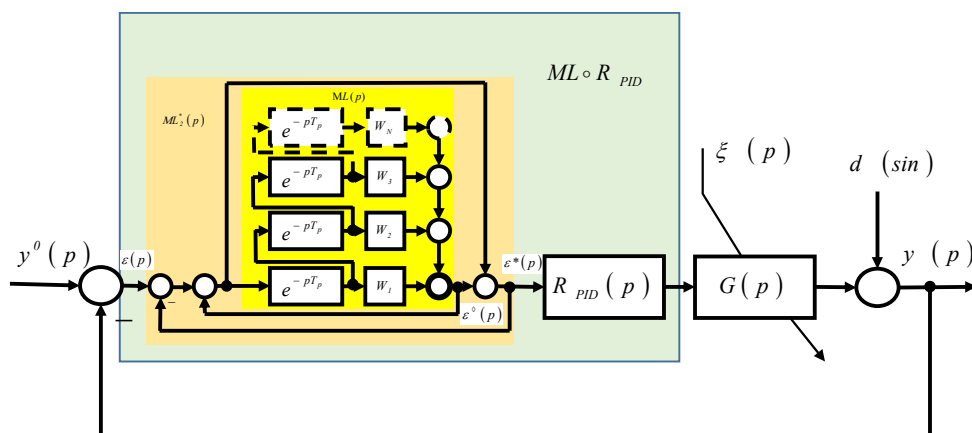


Фиг.4.15.

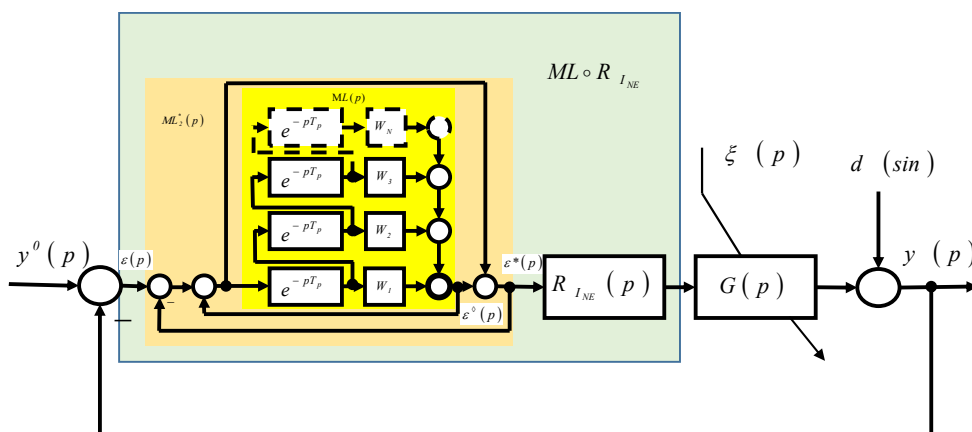


Фиг.4.18.

След направените времеви и честотни анализи на синтезираните репетитивни системи за управление е проведен времеви анализ с помощта на тестови синусоидални смущения [171] с период $T_p = 1,2 \text{ s}$, които действат само по канала на измерване, което е показано на фиг.4.19 и фиг.4.20.



Фиг.4.19.



Фиг.4.20.

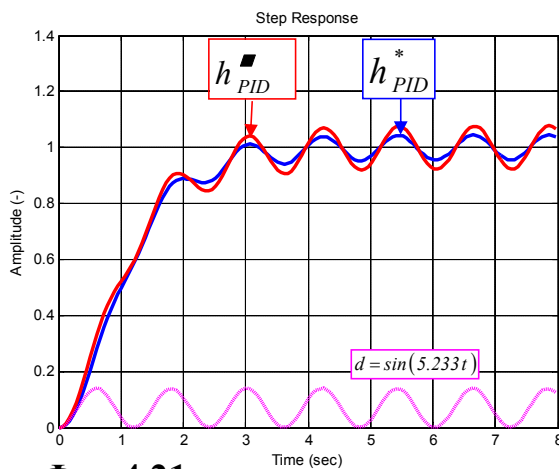
Анализът, предназначен да изследва противодействието на външното въздействие и с това принципа на действие на репетитивните системи, разглежда паралелното поведение на проектираните системи. Същността на метода на времеви анализ с „тестови“ въздействия се състои в моделиране на системите и оценка на симулационните резултати по времеви критерии. Системите са моделирани, а преходните функции и добавено периодично въздействие $d(t)$ по измерване са симулирани. Времевите характеристики на системите (за краткост означени $h_{ML \circ PID}^*$, $h_{ML \circ I_{NE}}^*$, h_{PID}^* и $h_{I_{NE}}^*$) в **номинален** и системите (за краткост означени $h_{ML \circ PID}^\blacksquare$, $h_{ML \circ I_{NE}}^\blacksquare$, $h_{PID}^\blacksquare$, $h_{I_{NE}}^\blacksquare$) в **смутен** режим са дадени в паралел, както следва:

- на фиг.4.21 - h_{PID}^* и $h_{PID}^\blacksquare$;
- на фиг.4.22 - $h_{I_{NE}}^*$ и $h_{I_{NE}}^\blacksquare$;
- на фиг.4.25 - $h_{ML \circ PID}^*$ и $h_{ML \circ PID}^\blacksquare$;

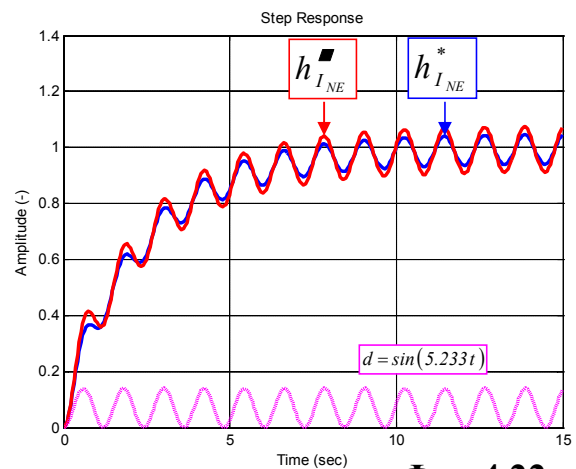
- на фиг.4.26 - $h_{ML \circ I_{NE}}^*$ и $h_{ML \circ I_{NE}}^{\blacksquare}$;
- на фиг.4.29 - h_{PID}^* и $h_{ML \circ PID}^*$;
- на фиг.4.31 - $h_{I_{NE}}^*$ и $h_{ML \circ I_{NE}}^*$.

Очевидни от показаните резултати на изследването по метода на **времения анализ на филтриращите свойства на системите с „тестови“ въздействия** са следните изводи (по отношение на количествените оценки за качеството на процесите - пререгулиране, брой пререгулирания, време на регулиране):

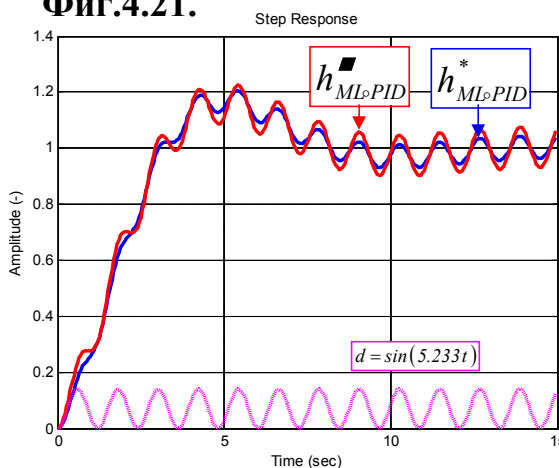
- репетитивните системи (фиг.4.5 и фиг.4.6) са инвариантни към хармоничните въздействия $d(t)$;
- не съществува показател за сравнение измежду изброените, по който репетитивната система с класически *ПИД* алгоритъм (фиг.4.5) да превъзхожда репетитивната система с фрактален алгоритъм (фиг.4.6);
- по отношение на количествените оценки за качество репетитивните системи (фиг.4.6) превъзхожда и репетитивната система с класически *ПИД* алгоритъм (фиг.4.5), и класическата (фиг.3.3) и фракталната (фиг.3.4) системи с ефективността си да противодейства на постоянни смущения $d(t)$ по измерване с честота $\omega_{p2} = 5,233 \text{ rad} / \text{s}$.



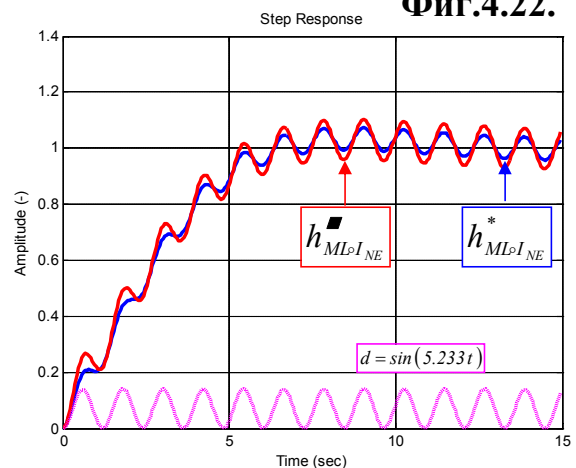
Фиг.4.21.



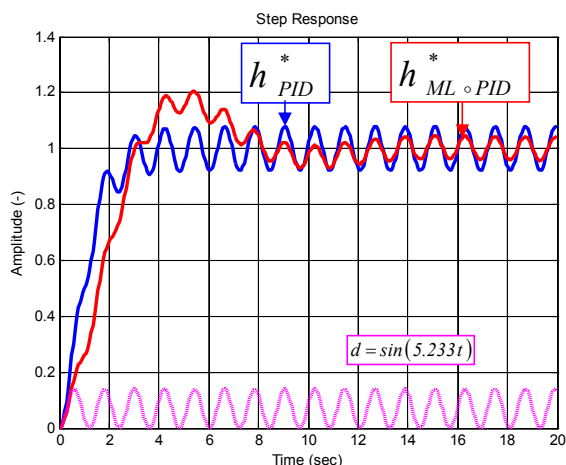
Фиг.4.22.



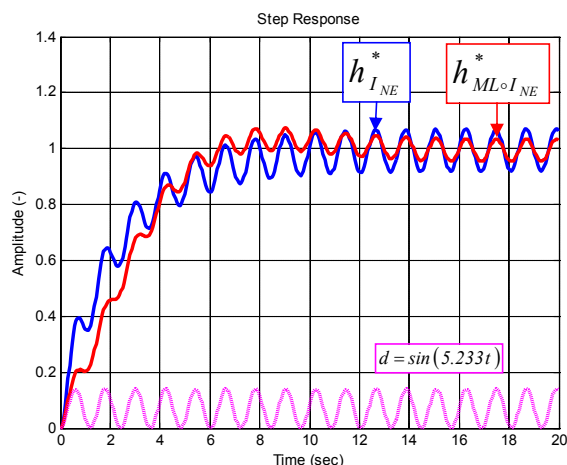
Фиг.4.25.



Фиг.4.26.



Фиг.4.29.



Фиг.4.31.

За аналитичното отразяване, изследване и сравнителна оценка на филтриращите свойства на системите се предлага използването на метод на **честотния** $\alpha_i^{(\omega)}$ -анализ с използване на **алгебрична производна** [16] по направление на **чувствителността на системите** (фиг.3.1, фиг.3.3, фиг.4.5, фиг.4.6) в номинален параметричен режим ($G \hat{=} G^*$, $\xi = const$, $d_i \equiv 0$) (2.17). Той е **аналитичен метод** и се състои в ефективното използване **на алгебричната производна** [168] по направление $\alpha_i^{(\omega_i)}$, дефинирана с (4.12)÷(4.15) за всяка една от анализирани системи (фиг.3.2, фиг.3.3, фиг.4.5, фиг.4.6). За сравнение на фиг.4.33 и на фиг.4.34 са показани характеристиките на чувствителността и алгебричните производни (4.12)÷(4.15) на системите (фиг.4.33, фиг.4.34). Анализът на стойностите на алгебричните производни (фиг.4.35, фиг.4.36) по направление на чувствителността на сравняваните системи еднозначно доказва, че те са в съотношение (4.16), еквивалентно отразено и с (4.17).

$$\alpha_{i, PID}^{(\omega_i)}(\omega) \hat{=} \frac{de_{PID}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\left((I + R_{PID}(j\omega)G^*(j\omega))^{-1}\right)}{d\omega} \equiv \frac{d\left(\Phi_{y^0\varepsilon}^{PID}(\omega)\right)}{d\omega} \quad (4.12)$$

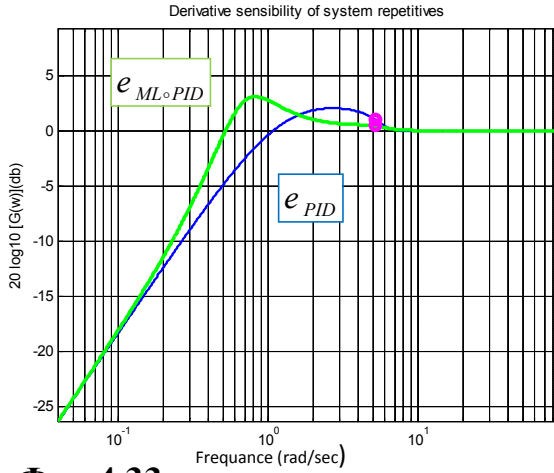
$$\alpha_{i, ML \circ PID}^{(\omega_i)}(\omega) \hat{=} \frac{de_{ML \circ PID}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\left((I + R_{ML \circ PID}(\omega)G^*(\omega))^{-1}\right)}{d\omega} \equiv \frac{d\left(\Phi_{y^0\varepsilon}^{ML \circ PID}(\omega)\right)}{d\omega} \quad (4.13)$$

$$\alpha_{i, I_{NE}}^{(\omega_i)}(\omega) \hat{=} \frac{de_{I_{NE}}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\left((I + R_{I_{NE}}(j\omega)G^*(j\omega))^{-1}\right)}{d\omega} \equiv \frac{d\left(\Phi_{y^0\varepsilon}^{I_{NE}}(\omega)\right)}{d\omega} \quad (4.14)$$

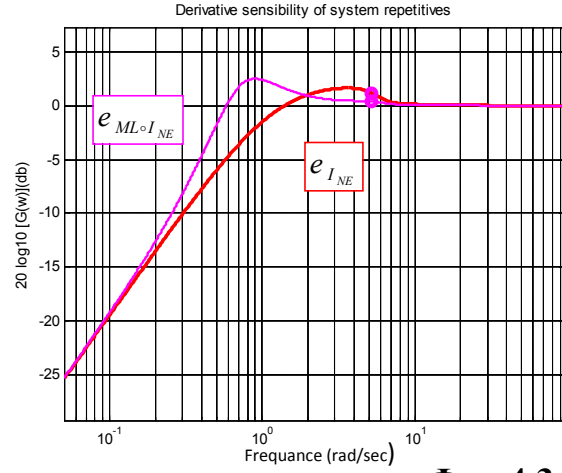
$$\alpha_{i, ML \circ I_{NE}}^{(\omega_i)}(\omega) \hat{=} \frac{de_{ML \circ I_{NE}}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\left((I + R_{ML \circ I_{NE}}(j\omega)G^*(j\omega))^{-1}\right)}{d\omega} \equiv \frac{d\left(\Phi_{y^0\varepsilon}^{ML \circ I_{NE}}(\omega)\right)}{d\omega} \quad (4.15)$$

$$\alpha_{i, ML \circ I_{NE}}^{(\omega_i)}(\omega) \Big|_{\omega=\omega_p} << \alpha_{i, ML \circ R_{PID}}^{(\omega_i)}(\omega) \Big|_{\omega=\omega_p} << \alpha_{i, I_{NE}}^{(\omega_i)}(\omega) \Big|_{\omega=\omega_p} << \alpha_{i, PID}^{(\omega_i)}(\omega) \Big|_{\omega=\omega_p} \quad (4.16)$$

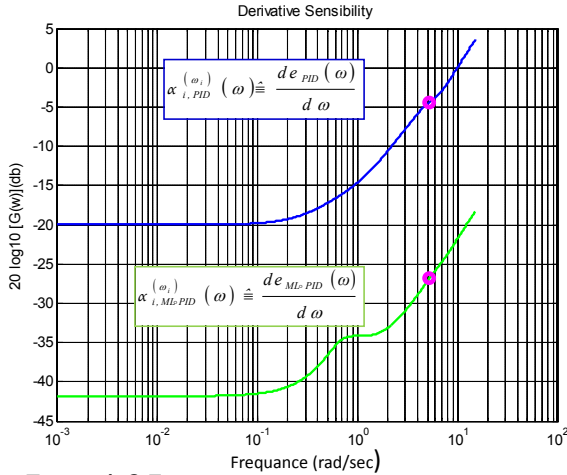
$$\left| \frac{de_{ML \circ I_{NE}}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_p} \ll \left| \frac{de_{ML \circ R_{PID}}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_p} \ll \left| \frac{de_{I_{NE}}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_p} \ll \left| \frac{de_{PID}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_p} \quad (4.17)$$



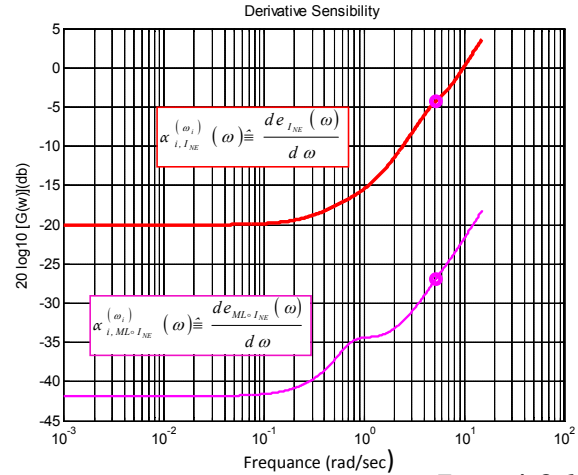
Фиг.4.33.



Фиг.4.34.



Фиг.4.35.



Фиг.4.36.

След направените аналитични и симулационни изследвания на репетитивните системи за управление, които са синтезирани в предходния раздел на настоящата глава от разработката са проведени и лабораторни експеримени. За да се реализират те се дискретизира функцията на репетитивния филтър. Дискретизираният репетитивен филтър (4.18.1), (4.18.3) е приведен в диференчно уравнение (4.18.2), (4.18.4), което е програмирано в контролера показан на фиг.2.14 и фиг.2.15. Тактът на дискретизация е $T_0 = 0,001s$. За програмната реализация отново е използван функционален блок.

$$e^{-zT_p} = \frac{z^2 - 2.004979z + 1.004988}{z^2 - 1.995004z + 0.995013} \quad (4.18.1)$$

$$y(k) = 1.995004y(k-1) - 0.995013y(k-2) + u(k) - 2.004979u(k-1) + 1.004988u(k-2) \quad (4.18.2)$$

$$W_k(z) = \frac{0.632106}{z - 0.367871} \quad (4.18.3)$$

$$y(k) = 0.367871 y(k-1) + 0.632106 u(k-1) \quad (4.18.4)$$

Програмния код на репетитивния филтър има следния вид:

```
#e1 := #e - #e2;
#x := #e1 + #z;
#y := 1.995004 * #y1 - 0.995013 * #y2 + #x - 2.004979 * #x1 + 1.004988 *
#x2;
#z := 0.367871 * #z1 + 0.632106 * #y1;
#y2 := #y1;
#y1 := #y;
#x2 := #x1;
#x1 := #x;
#z1 := #z;
#e2 := #z + #e1;
#e3 := #e2;
```

Програмирания филтър се добавя към програмния код на регулаторите от пълен и дробен ред, проектирани и анализирани в предходната глава на разработката. Добавянето се осъществява като се извиква функционалния блок на репетитивния филтър в кода реализиран във функционалните блокове на синтезираните регулатори. Окончателната програмна реализация на репетитивните системи за управление от пълен и дробен ред имат съответно следните записи:

- за $ML \circ R_{PID}$ регулатор с репетитивно управление:

```
"ML_DB"(e := #sp - #pv,
e3 => #e);*)
#mv := 1.996008 * #y1 - 0.996008 * #y2 + 0.00398467 * #e - 0.00795664 *
#e1 + 0.00397263 * #e2;
(*#mv := 1.936 * #y1 - 0.9355 * #y2 + 90 * #e - 179.7 * #e1 + 89.72 *
#e2;*)
(*#mv := 1.8215 * #y1 - 0.8215 * #y2 + 84.14 * #e - 168.0915 * #e1 +
83.9533 * #e2;*)(*alex_reg*)
IF #mv > 1 THEN
    #mv := 1;
END_IF;
IF #mv < -1 THEN
    #mv := -1;
END_IF;
#y2 := #y1;
#y1 := #mv;
#e2 := #e1;
#e1 := #e;
```

- за фрактално репетитивно $ML \circ R_{I_{NE}}$ управление програмния код има следния вид:

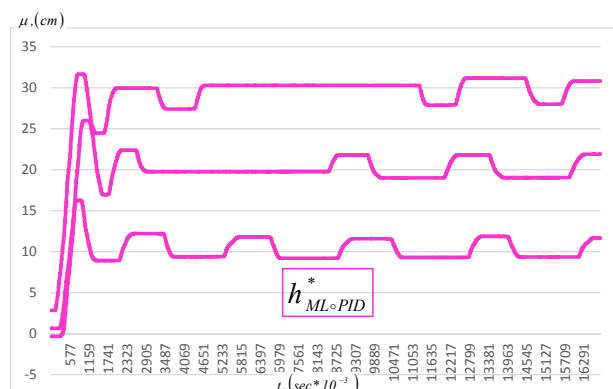
```
"ML_DB"(e := #sp - #pv,
    e3 => #e);
#e1 := 0.017437 * #e;
#e2 := 0.999998 * #y1_1 + #e1 - 0.9866 * #e1_1;
#y1_1 := #e2;
#e1_1 := #e1;
#e3 := 0.9803 * #y2_1 + #e2 - 0.998 * #e2_1;
#y2_1 := #e3;
#e2_1 := #e2;
#mv := 0.97569 * #y3_1 + #e3 - 0.983 * #e3_1;
IF #mv > 1 THEN
    #mv := 1;
END_IF;
IF #mv < -1 THEN
    #mv := -1;
END_IF;
#y3_1 := #mv;
#e3_1 := #e3;
```

Резултатите от проведените експерименти са показани както следва:

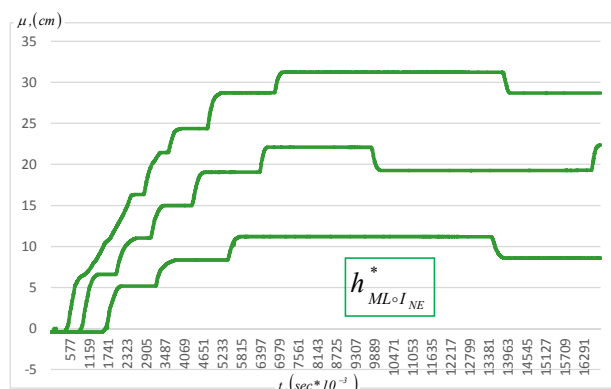
- на фиг.4.37 - $h_{ML \circ PID}^*$ за три различни стойности на заданието;
- на фиг.4.38 - $h_{ML \circ I_{NE}}^*$ за три различни стойности на заданието;
- на фиг.4.41 - $h_{ML \circ PID}^*$ и h_{PID}^* ;
- на фиг.4.45 - $h_{ML \circ PID}^*$ и $h_{ML \circ I_{NE}}^*$.

Очевидни от показаните резултати на реалните експерименти са следните изводи (по отношение на количествените оценки за качеството на процесите - пререгулиране, брой пререгулирания, време на регулиране):

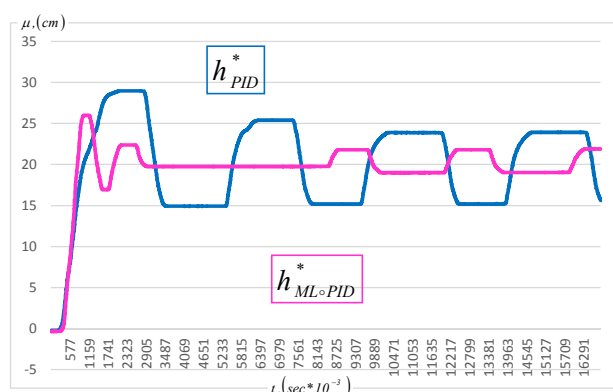
- репетитивните системи (фиг.4.5 и фиг.4.6) са инвариантни към хармоничните въздействия $d(t)$;
- не съществува показател за сравнение измежду изброените, по който репетитивната система с класически ПИД алгоритъм (фиг.4.5) да превъзхожда репетитивната система с фрактален алгоритъм (фиг.4.6);
- по отношение на количествените оценки за качество фракталната репетитивна система (фиг.4.6) превъзхожда и репетитивната система с класически ПИД алгоритъм (фиг.4.5), и класическата (фиг.3.3) и фракталната (фиг.3.4) системи с ефективността си да противодейства на постоянни смущения $d(t)$ по измерване с честота $\omega_{p2} = 5,233 \text{ rad} / \text{s}$.



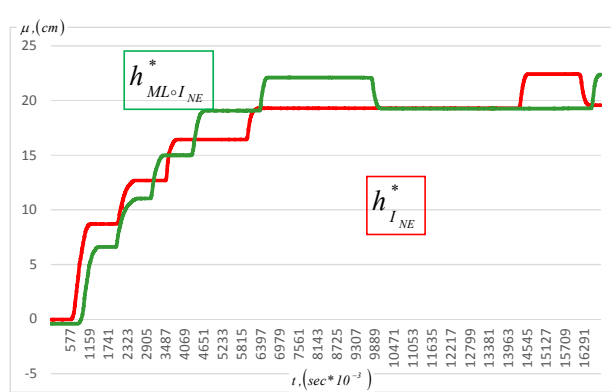
Фиг.4.37.



Фиг.4.38.



Фиг.4.41.



Фиг.4.45.

В заключение може да се каже, че експерименталните резултати потвърждават проведените симулационни изследвания. Показателно е от фиг.4.37÷фиг.4.45, че фракталната репетитивна система превъзхожда останалите три системи, които са проектирани и е сравнена с тях както в номинален така и в смутен параметричен режим.

Анализ и изводи

Основните резултати в тази част от дисертационната разработка могат да бъдат обобщени като:

1. Разгледани са конфигурациите и аналитичните описания на някои от основните видовете репетитивни филтри, които се използват в репетитивни системи за управление за режетирание влиянието на смущаващи въздействия с предварително известен период на повторение.
2. Синтезирани са репетитивни системи за управление на ППУ с пропорционална обратна връзка използващи модифицираните структури на репетитивен филтър с памет, тъй като те дават възможност за разширение на честотния диапазон на отсичане.
3. Анализирани са робастните филтриращи свойства на синтезираните репетитивни системи анализът по четири метода: *анализ на качеството* в номинален и смутен параметричен режим; *времеви анализ на филтрира-*

щите свойства на системите както с „тестови“ въздействия, така и реални лабораторни условия; **робастен анализ** на системите по характеристиките както на отворените, така и на затворените системи; **честотен $\alpha_i^{(\omega)}$ -анализ на филтриращите свойства** на системите с използване на алгебрична производна по направление **на чувствителността на системите**.

4. Проведени са реални експерименти на синтезираните системи върху лабораторен стенд, където са тествани възможностите на репетитивните системи да противодействат на периодични смущения, които са в следствие на триене.

Експериментално в лабораторни условия е потвърдено превъзходството на фракталните и на фракталните репетитивни системи за управление в сравнение с класическите репетитивни и *ПИД* системи за управление.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно приложни:

- **Систематизирани са** оператори от обобщеното дробно смятане, методи за апроксимация, алгоритми за реализация на операторите от обобщеното дробно смятане, методи за дискретизация на операторите от обобщеното дробно смятане.
- **Изследвани са** възможностите на известен в литературата метод за управление с използването на оператори от обобщеното дробно смятане и неговото развитие в аспект на ефективното му приложение при управлението на реален пневматичен обект.
- **Предложен е** нов подход за съчетано противодействие и на параметрични смущения и на постоянно действащи смущения породени от триене, но периодични с априори известна честота на повторение, използвайки известни подходи: фрактално и репетитивно управление.
- **Аналитично е доказана** робастната устойчивост и робастното качество на синтезираните в работата системи.

Приложни:

- Използвайки технически средства за автоматизация **е структуриран и реализиран** пневматичен изпълнителен механизъм с позиционер. След експериментално заснемане на преходната му функция, използвайки метода на идентификация по преходна характеристика на колебателно звено е направена апроксимация. Моделът на обекта е прецизиран, моделиран и анализиран.
- **Разработено е** програмно осигуряване в средата на TIA Portal (Siemens) за внедряване на предложените алгоритми за управление на реален пневматичен стенд.
- **Потвърдени и оценени са** работоспособността и ефективността на подходите за противодействие на параметрични смущения и смущения породени от триене, чрез приложение на оператори от обобщеното дробно смятане и репетитивни филтри за конкретен реален пневматичен обект. Използван е метода за сравнителен анализ и оценка на качеството по обобщени показатели чрез паралелна симулация на модели на синтезираните системи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A-1] Nikolov E., N. Nikolova, V. Stoilova, B. Grasiani (2012), *Fractional control with approximate dimension of the spatial distribution, Proceedings of the Technical University Sofia*, ©2015 Publishing House of Technical University of Sofia, Vol 62, Issue 4 ISSN 1311-0829, pp. 169-178
- [A-2] Грасиани Б. (2015), *Изследване на робастни репетитивни системи за управление с вътрешен модел и параметрична компенсация*, ©2015 Proceedings of the Technical University Sofia, Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 0374-342X, ISSN 1311-0829, Vol 65, (2), pp. 157-166
- [A-3] Николов Е. К., Н. Г. Николова, Б. Грасиани (2016), *Аналитично моделиране, изследване и управление на физически лабораторен FESTO-модел на технологична инсталация - част 1 (моделиране и анализ)*, In Proc. of the International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'16, Session "MODELING, INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS", October 04-05, 2015, Sofia, © 2015 Union of Automatics and Informatics, ISBN-1313-1850, CD- ISBN-1313-1850, ISSN-1313-1869-CD, 183-190 стр.
- [A-4] Николов Е. К., Н. Г. Николова, Б. Грасиани (2016), *Аналитично моделиране, изследване и управление на физически лабораторен FESTO-модел на технологична инсталация - част 2 (синтез и управление)*, In Proc. of the International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'16, Session "MODELING, INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS", October 04-05, 2016, Sofia, © 2016 Union of Automatics and Informatics, ISBN-1313-1850, CD- ISBN-1313-1850, ISSN-1313-1869-CD, 191-196 стр.
- [A-5] Грасиани Б. С. (2016), *Моделиране, изследване и управление на физическа пневматична FESTO-инсталация*, © 2016 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, Vol 66, (3), pp. 213-222

SUMMARY

The paper entitled "Study of some applications of generalized fractional calculus in control systems" by Boris Grasiani was developed in the following parts: introduction, four chapters, which are solved major problems, analysis of results, references, list of publications on the dissertation.

In the first chapter gives an overview of the operators of generalized fractional calculus, it has been systematization of bases: • methods of rational approximation operators of generalized fractional calculus; • approximation methods of fractal operators with discrete functions; • implementations of approximated fractal operators with continuous functions • control algorithms by operators of generalized fractional calculus; analyzed trends in the development of control systems in a priori uncertainty.

The second chapter are covered automation means by which it is implemented pneumatic positioning device feedback in the laboratory, which were dropped transient characteristics which are calculated mathematical models of summaries object automation.

In the third chapter are synthesized control systems a classical PID control algorithm and system from the fractional order. They are modeled and simulated in parallel to prove their properties. For the same is conducted and robust analysis demonstrating the properties in terms of a priori uncertainty. Experiments were conducted in the laboratory, where algorithms are applied to control, but due to the superimposition of interference with sinusoidal character on the record provided repetitive systems in the fourth chapter.

In the fourth chapter are synthesized repetitive control systems, which are conducted simulation: time and frequency analysis filtering properties, and also conducted experiments, the results of which confirmed the simulation results.