



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ**

**НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ СЕКТОР**

**Многомоделно и предсказващо управление с  
откриване и компенсиране на неизправности**

**ГОДИШЕН ОТЧЕТ**

по проект N 102ни046-08

(от вътрешните конкурси - сесия 2010)

Колектив по проекта: доц. д-р Александър Каменов Ищев (ръководител) – ФА  
проф. д-р Камен Георгиев Ищев – СУ, ФА  
доц. д-р Елена Александрова Хараланова – СУ, ФА  
гл.ас. д-р Цоньо Николаев Славов – СУ, ФА  
гл.ас. д-р Аспарух Марковски – СУ, ФА  
гл.ас. д-р Андрей Йончев – СУ, ФА  
гл.ас. д-р Албена Милчева Танева – СУ, ФЕА  
маг. инж. Севил Аптула Ахмед (докторант) – СУ, ФА  
Гергана Илиева Йорданова (студент) - СУ, ФА  
Петър Желязков Андонов (студент) - СУ, ФА

2010 г.

## СЪДЪРЖАНИЕ

Анотация .....	3
Публикации по проекта .....	4
Увод .....	6
1. Многомоделен подход за диагностика и управление.....	8
2. Откриване и изолиране на неизправности .....	11
2.1. Диагностика на неизправности чрез оптимизационна процедура .....	11
2.2. Диагностика на неизправности чрез уравнения на подобие.....	19
3. Управление и компенсирание на неизправности.....	27
3.1 Управление при неизправности .....	27
3.2 Компенсирание на неизправности чрез модифициране на заданието ...	29
3.3 Компенсирание на неизправности чрез реконструиране на изхода.....	30
3.4 Експерименти със система за пренос на топлина .....	31
4. Невронно-размито предсказващо управление .....	36
5. Размито управление на аеродинамична система .....	45
Заключение .....	66
Финансов отчет за първата година.....	68

## АНОТАЦИЯ

В Проект N 102ни046-08 се търсят решения на задачи за управление, с което се осигурява работата на системата дори и след възникване на неизправности. Поради актуалността и нарастващото в световен мащаб значение на възобновяемите енергийни източници, в проекта се визират най-вече обекти от типа на ветрогенераторите и хидрогенераторите. Като се отчита тяхната нелинейна, разпределена и нестационарна динамика, като и стохастичния характер на въздействията върху тях, в проекта се предлага, наред с традиционните, да се използват и размити и невронно-размити модели [П2, П3, П8].

В съответствие със заданието и с работната програма са разработени и/или модифицирани методи и алгоритми за многомоделно и предсказващо управление на такива обекти [П1, П7, П8, П9]. Извън работната програма са предложени възможности за управление, базирани на линейни матрични неравенства и е изследвана чувствителността на решенията [П4, П5].

За осигуряване на безотказна работа на системите в условията на силните външни въздействия, е отделено подобаващо внимание на своевременно автоматично откриване, диагностика и компенсиране на евентуални неизправности [П1, П7, П9].

Алгоритмите и програмната им реализация, както и закупеното по проекта допълнително оборудване - специализирана цифрова система за управление, захранващи модули и др. осигуряват добри възможности както за извършване на предвидените за втората година на проекта експериментални изследвания върху реалните (физически) модели на обектите, така и за бъдещи внедрявания в практиката. Всъщност, част от реалните експерименти (тези върху аеродинамичните и следящата системи) започнаха още през тази година и част от тях са описани в отчета и в публикациите на колектива по проекта.

Окомплектовката на лабораторните модели, програмните реализации на методите и алгоритмите, реализируемите лесно експерименти и ясната визуализация на резултатите създават и друга допълнителна възможност - за внедряване на разработката и в учебния процес, за каквито приложения имат амбиция и вече работят младите членове на колектива.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ПРОЕКТА

Постигнатите до момента резултати са отразени в девет публикации:

- П1. **Ал. Ищев**. Многомоделно управление с откриване и компенсиране на неизправности. *Автоматика и Информатика* (приета за публикуване);
- П2 **Al. Ichtev**. From pid to fuzzy control. Application for azimuth control of an aerodynamical system. In Proc. Of 8-th International Conference “Challenges in Higher Education Research in the 21-st Century”, Sozopol, June, 2010, p.p. 114 - 118;
- П3 **Al. Ichtev**. Fuzzy control for pitch control of an aero-dynamical system. Design and tuning. In Proc. Of 8-th International Conference “Challenges in Higher Education Research in the 21-st Century”, Sozopol, June, 2010, p.p. 119 - 123;
- П4 **A. S. Yonchev**. Sensitivity Analysis of the Discrete-time LMI Based Bounded Output Energy Problem. In Proc. Of 8-th International Conference “Challenges in Higher Education Research in the 21-st Century”, Sozopol, June, 2010, p.p. 48 - 52;
- П5 **A. S. Yonchev**. LMI based Control of Satellite System. In Proc. Of 8-th International Conference “Challenges in Higher Education Research in the 21-st Century”, Sozopol, June, 2010, p.p. 44 - 47;
- П6 **К. Ищев, Ал. Ищев, Н. Атанасов**. Базово бакалавърско обучение по теория на управлението. Научна конф. с международно участие “Автоматика, Управление и информационни технологии”, ТУ-Варна, 22-24 септември 2010 г., приета за публикуване в “Годишник на ТУ-Варна” за 2010 г.;
- П7 **Г. Йорданова, А. Иванов** (ръководител - **Ал. Ищев**) Диагностика на неизправности и многомоделно управление на сервосистема. VI Национална Студентска Научно-Техническа Конференция- 26-30 септември 2010, Созопол;
- П8 **С. Ахмед, М. Петров, Ал. Ищев**, Невронно-размито предсказващо управление на лабораторен модел на двуроторен хеликоптер. Международна конференция АВТОМАТИКА И ИНФОРМАТИКА'10, стр. I.139 – I.142;
- П9 **Ал. Ищев**, Fault diagnosis with output optimization procedure. 8-th SUMMER SCHOOL Sozopol'10, Part 2, p.p. 127 – 133.

Две от тях [П1, П6] са приети за публикуване статии: научна - в сп. *Автоматика и Информатика* и с учебно-методична насоченост - в годишника на ТУ-Варна. Пет публикации [П2, П3, П4, П5, П8] са доклади на международни конференции в България. Един доклад [П9] е изнесен пред лятна школа. Един доклад [П7] е изнесен пред Национална Студентска Научно-

Техническа Конференция. В авторските колективи на 7 от публикациите [П1, П2, П3, П4, П5, П7, П9] участват само млади членове на колектива (до 35 години). В останалите две публикации млади членове на колектива са съавтори на по-възрастни преподаватели. Доклад от докторанта пред семинара на кат. СУ, който включва [П8] и резултати от другата нейна работа по този проект, бе снетен за съществена част на подготвяната от нея дисертация.

Във всички публикации е отбелязано, че научните изследвания са финансирани единствено по този проект. Публикуването и изнасянето на докладите е осигурено в съответствие с приложената към договора план-сметка. Публикациите са приложени към отчета и са качени и в сайта на ръководителя на договора:

([http://81.161.244.244/Prepodavateli/A\\_Ichtev/A\\_Ichtev.html](http://81.161.244.244/Prepodavateli/A_Ichtev/A_Ichtev.html))  
[http://81.161.244.244/Prepodavateli/A\\_Ichtev/Proekt\\_102ni046\\_08.html](http://81.161.244.244/Prepodavateli/A_Ichtev/Proekt_102ni046_08.html)

## УВОД

В отчетният доклад на проф. М. Хаджийски на поредната международна конференция „Автоматика и информатика'09” бяха посочени най-актуалните направления в теорията и практиката на управлението. Сред тях са моделното предсказващо управление, диагностиката и управлението при неизправности. Понастоящем усилията на научните изследвания в областта на предсказващото управление са насочени към прилагането му в системи със сложни и нелинейни обекти, каквито са и визираните в проекта - от типа на възобновяемите енергийни източници. Диагностиката и управлението на системи дори и след възникване на неизправности е също интензивно развиваща се област. Интересът се дължи на факта, че приложението на нейните методи може да доведе до съществено повишаване на надеждността и ефективността на системите за управление. В теоретично отношение проектът е базиран именно на тези направления. Чрез тяхното обединяване се цели да се постигнат нови резултати, които да осигурят методично, алгоритмично и програмно както разработки на реални системи така и обучение на студенти в тези направления.

В първия раздел на настоящия отчет е описан многомоделен подход за решаване на задачите за диагностика и управление дори и след възникване на неизправности. Това се постига чрез съставяне на моделно множество, което описва системата, както в изправни работни режими, така и при наличие на различни неизправности. Разширението на моделното множество до линейни диференциални включвания позволява да се описват и частични неизправности, които са изпъкнала комбинация от моделите в моделното множество.

Във втория раздел се предлагат два алгоритъма за откриване и изолиране на неизправности. Първият използва оригинална процедура за оптимизация. Най-същественото достойнство на предложението е, че не се изисква предварително познаване на вероятността за настъпване на съответна неизправност. Откриват се както моделирани неизправности, така и такива, които са изпъкнала комбинация от моделираните. Това се постига без да е необходимо да се въвеждат допълнителни модели в моделното множество. Друго съществено предимство е, че полученото управление зависи от моделните вероятности и за разлика от класическите методи за управление при неизправности е възможно да се осъществи безударно управление. Плавната адаптация към съответната неизправна ситуация или работен режим съществено подобрява качеството на системата за управление при неизправности.

Вторият алгоритъм за диагностика на неизправности използва уравнения на подобие. При него се постига надеждно изолиране на неизправности. Надеждността идва от факта, че грешка в измерваната стойност или моментен шум в системата няма да доведат от грешно откриване и изолиране на неизправности. С този алгоритъм се постига нечувствителност на процедурата за откриване и изолиране на неизправности към определен брой смущения в

системата, както и към измервателен шум. Недостатък на предложеният алгоритъм е, че предимствата му се извяват предимно за многомерни системи.

В третия раздел са описани предложените от колектива подходи за елиминиране на негативният ефект от възникването на неизправност в системата. Предложени са три метода. При първия управлението се формира като претеглена сума от управляващи устройства, синтезирани на базата на отделните модели. За тегла се използват моделните вероятности, получени например чрез оптимизационния алгоритъм. Другите две предложения за компенсиране на негативния ефект причинен от неизправности са схеми за модифициране на заданията и за реконструиране на измерваните променливи. Схемата с компенсиране на заданията дава най-добри резултати при частични неизправности на изпълнителни устройства, докато схемата с реконструиране на измерваната променлива е по-удачна за компенсиране на негативния ефект от частична неизправност в измервателно устройство. Схемите за компенсиране се справят успешно с повечето от възникващите неизправности – в измервателни и изпълнителни устройства. За другите неизправности следва да се прилага първият предложен алгоритъм – с претеглената сума.

В четвъртия раздел се предлага моделно предсказващо управление за управление на нелинейни обекти. Обектът се моделира с помощта на невроноразмити модели от тип Такаги-Сугено. Предложената реализация на алгоритъма е съобразена с изискванията за работа в реално време, като са взети специални мерки за ускоряване на изчисляването на управляващия сигнал. Разгледаният пример е с аеродинамична система.

В петия раздел е използван размит модел на аеродинамична система. Разгледани са въпросите за синтез и настройка на размит ПИД регулатор. Процедурата стартира на базата на конвенционален ПИД регулатор, синтезиран за линеен модел на обекта, като след първоначалното размиване се прилагат мерки за по-добро управление на нелинейния модел. По този начин се съчетава предимствата от синтеза на конвенционалните ПИД регулатори, като се преодолява ограничението за тяхното приложение само в линейни системи.

За всяка от точките на отчета е избрана следната структура. След нейното заглавие следва цитиране на публикация/публикации на колектива по договора, в която/които има по-подробно описание. След описани на теоретичното изследване по конкретният проблем следва резултати от проведените по него експерименти, изводи и списък на използваната литература. Номерацията на формулите (в отделните точки) и списъка на цитираната литература също са отделни по точки.

# 1. МНОГОМОДЕЛЕН ПОДХОД ЗА ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПРИ НЕИЗПРАВНОСТИ [П1, П9]

Многомоделният подход може да се използва както за решаване на задачата за диагностика, така и за управление при неизправности. Името на подхода подсказва, че методите са базирани на модели на обекта. Идеята е, че при настъпването на неизправност системата се променя и, следователно, се променя и нейното описание, т.е. променя се нейният модел. При многомоделния подход предварително се оценяват възможните неизправности. След това се съставя моделно множество  $M : M_1, M_2, \dots$ . То включва в себе си както номиналния модел на системата, така и всички модели, отговарящи на съответни неизправности [1.1], [1.6]. Задачата за диагностика на неизправности се свежда до определяне кой от моделите от моделното множество „съответства” в най-добра степен на моментното състояние на наблюдаваната система. Предимство е директната връзка между неизправност и съответен модел, което позволява много лесно да се открие коя неизправност е настъпила. Определянето на действителният за момента математичен модел може да се използва за целите на управлението.

Диагностиката на неизправностите обикновено се прави като се тестват хипотези, чиято цел е да се определи моделът в дадения момент, т.е. да се извърши избор на един модел  $M_i$  от моделното множество  $M$ . Втората част е реализиране на управление, което е определено на базата на избрания модел. Главният недостатък на този подход е, че той позволява само „твърдо” решение, т.е. само един модел от моделното множество може да бъде избран в даден момент [1.2]. Подходът не дава добро представяне на частичните неизправности (по-голямо или по-малко влошаване на характеристиките на съответната компонента), което води до незадоволително управление. Разбира се, съществува възможността да се разшири моделното множество, като към него се добавят модели, които представляват и частични неизправности, но това също не е добро решение, защото, когато моделите станат прекалено близки един до друг, възникват проблеми със статистическото им тестване. Други проблеми при подобни реализации възникват в моментите, когато от един модел системата се превключва в друг. Тогава се получават скокове в управлението.

В системата може да възникват както внезапни така и постепенно развиващи се неизправности. Един от начините за описание на такива системи е представянето им чрез хибридни динамични модели, чиито състояния може да се променят както постепенно, така и скокообразно. Скоковете в състоянията се използват за да се моделират случайните внезапни промени в обекта. Тук се предполага, че промените са причинени от внезапно появили се неизправности.



Динамиката между скоковете се използва за да се опише обекта, когато няма неизправност или промяна в неизправната ситуация или когато в системата има постепенно развиваща се неизправност.

Моделът на хибридна система има вида:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(m(k+1))\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(m(k+1))\mathbf{u}(k) + \mathbf{T}(m(k+1))\boldsymbol{\eta}(k) \quad (1.1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(m(k+1))\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (1.2)$$

където  $m(k+1)$  е използвания модел на обекта в момента  $k+1$ .

Направено е и предположението, че известният модел достатъчно добре описва обекта, както и, че скоковете се описват като Маркова верига от първи ред с вероятности за преход от един модел в друг:

$$P(m_i(k+1)/m_j(k)) = m_j(k) \quad \text{със} \quad \sum_j \pi_{i,j}(k) = 1 \quad (1.3)$$

Матрицата на вероятностите за преход ( $\boldsymbol{\pi}$ ) е от съществено значение за работата на интерактивния много-моделен (ИММ) алгоритъм, описан в [1.3]. Проблем е, че единственият начин за определяне на тази матрица е с помощта на метода на пробите и грешките.

Многомоделният (ММ) метод предполага, че може се зададе множество  $N$  от модели, които апроксимират хибридна система със следните  $N$  двойки уравнения:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}_j\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}_j\mathbf{u}(k) + \mathbf{T}_j\boldsymbol{\eta}(k) \quad (1.4)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}_j\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (1.5)$$

$$\text{за } j = 1, 2, \dots, N. \quad (1.6)$$

По-долу наборът от всички модели ще бъде наричан моделно множество  $M$ . Всяка двойка от уравнения съответства или на работен режим на системата или на наличието на неизправност. Ако е известно математическото описание на обекта, може да се получат директно модели при наличие на неизправност. Например 60% частична неизправност на измервателно устройство може да бъде моделирана като се умножи съответният ред на номиналната матрица  $\mathbf{H}$  с  $\theta$ . Тотална повреда може да бъде моделирана като той се умножи с  $\theta$ .

## Литература:

- [1.1] Ron J. Patton and Paul M. Frank and Robert N. Clark (Eds.), Issues of fault diagnosis for dynamic systems, Springer, London, UK, 2000
- [1.2] Youmin Zhang and Jin Jiang, An interacting multiple-model based fault detection, diagnosis and fault-tolerant control approach, Proceedings of 38-th Conference on Decision Control, Phoenix, Arizona USA, 1999, 1527--1537
- [1.3] А. Ищев. Откриване на повреди при управляеми мостови съоръжения, ВСУ'2002, том I, стр. I – 137-142.
- [1.4] Richard Dorf and Robert Bishop, Modern Control systems, 11e by ISBN-10: 0132270285 ISBN-13: 9780132270281

- [1.5] Hassan Nouram, Didier Theilliot, Jean-Christophe Ponsart, Abbas Chamseddine, Fault-tolerant Control Systems. Design and Practical Applications, ISBN: 978-1-84882-652-6, 2009
- [1.6] Hao Yang, Bin Jiang, Vincent Cocquempot, Fault Tolerant Control Design for Hybrid Systems, ISBN: 978-3-642-10680-4, 2010

## 2. ОТКРИВАНЕ И ИЗОЛИРАНЕ НА НЕИЗПРАВНОСТИ

### 2.1. Диагностика на неизправности чрез оптимизационна процедура [П9]

В литературата се разглеждат два подхода в разработването на методи за откриване и за изолиране на неизправности. При първия откриването и изолирането на неизправности се извършва на базата на излишък от измервателни, изпълнителни устройства и компоненти, а другият включва методи, които използват аналитични излишъци [2.1], [2.2], [2.13], [2.14]. Първият подход предполага използване на излишна апаратура. Важен пример за този подход е авиационната и космическата индустрии, при които се използват три (а понякога и четири) системи за изпълнението на една и съща задача. Това води до оскъпяване на реализацията, поддръжката и експлоатацията на системата и поради това в този проект е предложено да се използва вторият подход.

В подходът за откриване и изолиране на неизправности с използване на модели има два основни етапа: (i) предварително получаване на моделите на системата и (ii) получаване в реално време на остатъците, които след това се анализират за всеки един момент от времето. Остатъкът е аналитично изчислена величина, която представлява разлика между измерени от обекта величини и аналитично изчислени такива. Остатъците се определят на базата на модел на обекта и на действително измерените стойности. Те представляват разликата на действителността с нашето очакване за поведението на системата.

В реалните системи винаги присъстват шумове и смущения и поради тази причина остатъците обикновено не са с нулева стойност. Разработени са специални методи за да бъдат остатъците направени нечувствителни към шумовете и към определен брой смущения. Такива методи са: използване на Калманов филтър, на диагностични наблюдатели, на равенствени отношения, оценка на параметрите, анализ на симптомите и др. [2.1][2.2]. Предложеният тук метод спада към групата методи, базирани на филтъра на Калман. Чрез използване на набор от Калманови филтри се постига и изолиране на неизправностите. В литературата е известен и подход използващ много-моделната (ММ) постановка на задачата. От тази група особено внимание заслужават методите и модификациите описани в [2.3][2.4][2.5][2.6][2.7][2.8].

Тук се предлага нов метод от този клас, чието най-голямо достойнство е способността му да открива както частични неизправности, така и много неизправности настъпващи в един и същ момент от време. При известните методи се предполага, че всяка следващата неизправност настъпва след като е отстранена предишната, но това не е така при възникването на сериозни аварии или при неизправности, които от своя страна предизвикват поява на други

неизправности. Друго съществено предимство на предложения метод е елиминиране на изискването предварително да се познава матрица на вероятностите за преход  $\pi$ , за която в споменатата литература се отбелязва, че не е известен метод за нейното получаване, но която има съществено значение за работоспособността на алгоритмите. Получаването на модели се извършва преди да се въведе в експлоатация системата и поради това не е от съществено значение за скоростта при откриването на неизправности. По-важната характеристика е скоростта на алгоритъма при работата му с обекта в реално време.

## **Постановка на задачата**

Откриването и изолирането на неизправности обикновено се извършва като се направи тест на хипотеза, чиято цел е да определи модела в дадения момент. Това се постига като се избира един модел от множеството  $M$ , за който се предполага че е действителния модел. Това се превръща в проблем при решаването на задачата за управление при наличие на неизправности и при поява на частична неизправност.

Един от начините за решаването на тази задача е моделното множество да се разшири до линейни диференциални включвания. Нека разгледаме моделното множество  $M$ . Линейните диференциални включвания се дефинират като множеството от всички обекти, които са изпъкнала комбинация от  $N$  модела в  $M$ :

$$M = \sum_{i=1}^N \mu_i M_i \text{ със } \sum_{i=1}^N \mu_i = 1 \quad (2.1)$$

Използваното смесване е изпъкнала комбинация (претеглена сума) на състоянията и е от вида:

$$\mathbf{x}(k) = \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i(k) \mu_i = \sum_{i=1}^N (\mathbf{F}_j \mathbf{x}(k-1) + \mathbf{G}_j \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{T}_j \xi(k-1)) \mu_i \quad (2.2)$$

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{i=1}^N (\mathbf{H}_j \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\eta}) \mu_i \quad (2.3)$$

където  $\boldsymbol{\mu}$  е вектор, съдържащ вероятностите за всеки от моделите. Всеки от елементите на този вектор съответства на един модел и представлява вероятността този модел да е истинския в дадения момент. Този вектор ще бъде наричан вектор на вероятностите.

Тук се предлага още едно смесване, базирано на изходите на системата:

$$\mathbf{y}(k) = \sum_i^N \mathbf{y}_i(k) \mu_i \quad (2.4)$$

Съображенията за това смесване ще бъдат описани по-долу.

Ако е известно множеството  $M$ , т.е. предварително е определено кои неизправности ще предизвикат проблеми при работата на обекта и се цели само тяхното наблюдаване, тогава задачата за откриване и изолиране на

неизправности се свежда до изчисляването на теглата  $\mu_i$  във всеки момент от време. Ако вероятността, която съответства на номиналния модел на обекта е достатъчно близо до единица и вероятностите, които отговарят на неизправности в обекта, са достатъчно малки (близки до нула) тогава в системата не присъства неизправност. Всяка различна ситуация дава индикация, че в системата има неизправност, което е *откриване на неизправност*. Изчисляването на вероятностите ни дава и нещо повече. Чрез проследяването на модела с най-голяма вероятност се установява и коя неизправност отговаря на него, т.е. може да се извърши и *изолиране на неизправността*.

## **Алгоритъм**

Основата на ММ алгоритмите се състои в използването на отделни описания, като в случая се разглежда набор от Калманови филтри - по един за всеки от моделите в моделното множество [2.3][2.4][2.5][2.6][2.7][2.8]. Всеки филтър е настроен за работа с един от моделите в моделното множество. Оценка на състоянието на системата от всеки един от филтрите се изчислява за всеки един момент. ИММ алгоритъма е итеративен алгоритъм и се състои от четири основни части:

- 1 ***Моделно зависимо реинициализирне***. В тази част е застъпена итеративността на алгоритъма. Тя е много важна, защото при не итеративните алгоритми се предполага, че системата не се е променила, а именно промените в системата са от съществено значение в това изследване. От оценката на състоянието и ковариацията, изчислена в предишния момент от време, се избират началните стойности за всички Калманови филтри. Тази оценка е вероятностна сума от предишните оценки (вж. част 4 от този алгоритъм). По този начин различните Калманови филтри си взаимодействат. Тук отпада необходимостта от познаване на матрицата  $\pi$ , което е една от разликите между предложения алгоритъм и описания в [2.8].
- 2 ***Калманова филтрация***: Това е най-важната част от алгоритъма. Използва се по един Калманов филтър за всеки от моделите. Филтрите работят независимо един от друг.
- 3 ***Изчисляване на вероятностите за моделите и логика за откриване и изолиране на неизправности***. За  $j = 1, 2, \dots, N$ .

Най-съществената разлика с описаната в [2.8] метод е именно в тази част. Тук се предлага да се използва оптимизация, като за представените по-долу резултати е използвано квадратично програмиране. Подобни резултати се получават и при използване на други оптимизационни алгоритми, които решават задачата с ограничения.

При оптимизацията се задават две ограничения към вероятностите на моделите.

$$\sum_{j=1}^N \mu_j(k) = 1 \quad (2.5)$$

$$0 \leq \mu_j(k) \leq 1 \quad (2.6)$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

Минимизацията на всяка стъпка е

$$\min_{\mu} \left[ (\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_c \mu)^T (\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_c \mu) \right] = \min_{\mu} \left[ \mu^T \mathbf{X}_c^T \mathbf{X}_c \mu - 2 \mathbf{X}_c^T \mathbf{X}_m \mu \right], \quad (2.7)$$

където  $\mathbf{X}_m$  е вектор, съдържащ оценката на състоянието на системата,  $\mathbf{X}_c$  е вектор съдържащ изчислените състояния за всеки от  $N$  те модела, а  $\mu$  е вектор, съдържащ вероятностите за всеки от моделите.

$$\mathbf{X}_m(k) = [x_1(k) \quad x_2(k) \quad \dots \quad x_n(k)]^T \quad (2.8)$$

$$\mu(k) = [\mu_1(k) \quad \mu_2(k) \quad \dots \quad \mu_N(k)]^T \quad (2.9)$$

$$\mathbf{X}_c(k) = \begin{bmatrix} x_{11}(k) & x_{12}(k) & \dots & x_{1N}(k) \\ x_{21}(k) & x_{22}(k) & \dots & x_{2N}(k) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ x_{n1}(k) & x_{n2}(k) & \dots & x_{nN}(k) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Предлага се и модификация, при която оптимизацията да се извърши не по състоянията, а по изходите на системата. С това се цели да се ускори алгоритъма, като не се правят оценки на състоянията, а се симулират системите. Трябва да се подчертае, че за целите на откриването и изолирането на компонентни неизправности, е по-добре да се използва оптимизация по състояния, докато за откриване на неизправности в изпълнителни и особено в измервателни устройства е по-удобно да се използва оптимизация по изходите. Не е за изпускане и факта, че при управление допускащо неизправности, устойчивост и качество на системата могат да се докажат за случая с изпъкнала комбинация от състоянията и изчисленото на тяхна база управление. Ако се използва минимизация на изходите критерият е от вида:

$$\min_{\mu(k)} \left[ (Y_m(k) - Y_c(k) \mu(k))^T (Y_m(k) - Y_c(k) \mu(k)) \right] = \min_{\mu(k)} \left[ \mu(k)^T Y_c(k)^T Y_c(k) \mu(k) - 2 Y_m(k)^T Y_c(k) \mu(k) \right] \quad (2.11)$$

където  $Y_m$  е вектор, съдържащ измерените изходи на системата

$$Y_m(k) = [y_1(k) \quad y_2(k) \quad \dots \quad y_n(k)]^T, \quad (2.12)$$

а  $Y_c$  е вектор, съдържащ изчислените изходи за всеки един от моделите

$$Y_c(k) = \begin{bmatrix} y_{11}(k) & y_{12}(k) & \cdots & y_{1N}(k) \\ y_{21}(k) & y_{22}(k) & \cdots & y_{2N}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1}(k) & y_{n2}(k) & \cdots & y_{nN}(k) \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Оптимизацията се извършва при същите ограничения.

В някои случаи, най-вече при рязка смяна на работната точка и при силен шум, е възможно да се получат временни несъответствия между истинските и изчислените стойности на вероятността. Поради това се предлага да се използва оптимизация базирана на пълзящ времеви прозорец. Това ще доведе до забавяне на скоростта на откриване на неизправностите, но в значителна степен ще се справи със споменатия проблем.

- 4 **Комбиниране на оценките:** В тази последна част от алгоритъма се определя състоянието и ковариацията за следващия момент от време. Те се изчисляват като претеглени суми от състоянията на моделите и ковариациите им, като теглата са вероятностите на съответните модели.

### Пример

Като илюстративен пример тук се разглежда дълго мостово съоръжение. Този обект добре би представил метода, т.к. за целите на управлението на такова съоръжение е необходимо използване на голям брой измервателни и изпълнителни устройства.

**Математични модели:** За математичен модел на обекта на управлението се приема матричното диференциално уравнение от втори ред:

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{Y}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d \mathbf{Y}}{dt} + \mathbf{K} \mathbf{Y} = \mathbf{D} \mathbf{V} + \mathbf{B} \mathbf{U}, \quad (2.14)$$

където  $\mathbf{Y}$  е  $n$ -мерен вектор на преместванията в основните възли на съоръжението,  $\mathbf{V}$  е вектор на външните въздействия,  $\mathbf{U}$  е вектор на управляващите въздействия, а  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  са съответно матрици на масите, затихванията, коравините, входа и управлението. Като се въведе  $2n$ -мерен вектор на състоянието  $\mathbf{X}^T = [\mathbf{Y}^T \quad \dot{\mathbf{Y}}^T]$ , моделът добива вида

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} \end{bmatrix} \mathbf{V} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{U}. \quad (2.15)$$

**Резултати от експеримента:** Номиналните матрици в модела на обекта са от вида:

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m_1 \quad m_2 \quad m_3 \quad m_4 \quad m_5], \quad (2.16)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & -c_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{1,2} & c_{2,2} & -c_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & -c_{2,3} & c_{3,3} & -c_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & -c_{3,4} & c_{4,4} & -c_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & -c_{4,5} & c_{5,5} \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & -k_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ -k_{1,2} & k_{2,2} & -k_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{2,3} & k_{3,3} & -k_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{3,4} & k_{4,4} & -k_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & -k_{4,5} & k_{5,5} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_2 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{B} = \text{diag}[b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5], \quad (2.19)$$

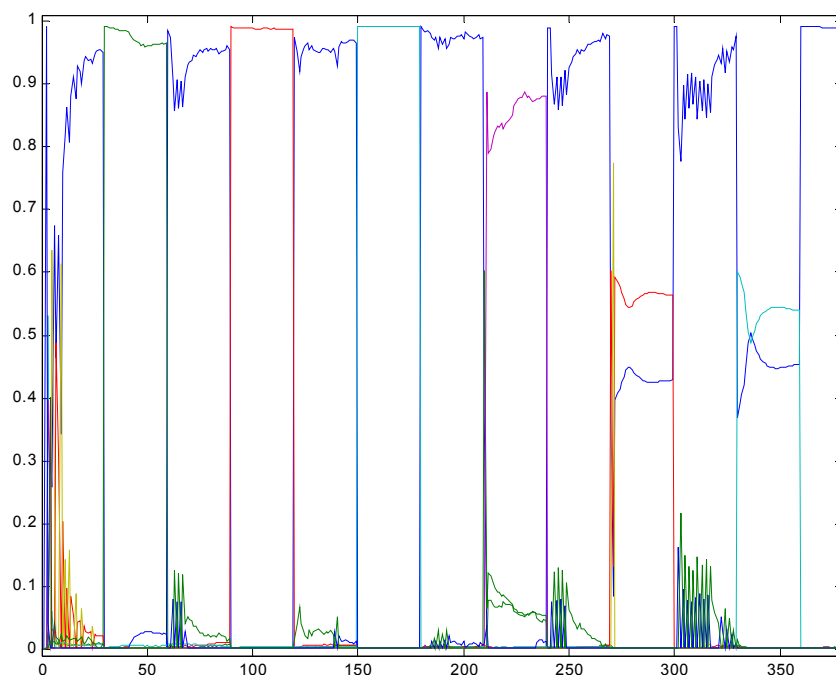
Техните параметрите имат следните числени стойности:

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 1; \quad k_{i,i} = 2, \quad i = 1, 2, 3; \quad k_{i,i+1} = 1, \quad i = 1, 2; \\ c_{i,j} = 0.01k_{i,j}; \quad d_1 = d_2 = b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = 1. \quad (2.20)$$

Експериментът включва симулирани неизправности в измервателни устройства. Разгледани са три пълни неизправности: на сензори 1, 2 и 5, както и три частични неизправности, които са 40% грешка в измерванията. Експериментът е направен, като през първите 30 такта (3 секунди) мостът и измервателната апаратура са изправни. В следващите 30 такта системата е под влияние на неизправност 1. Нататък се редуват изправен режим и съответна неизправност със същата честота. При последните две неизправности са симулирани частични неизправности, които не са от моделното множество. По този начин се проверява способността на метода да се справя с неизправности, които са изпъкнала комбинация от моделираните. Това се постига без да се въвеждат допълнителни модели в моделното множество.

Както се вижда от Фиг. 2.1 алгоритъмът открива правилния модел. Като се изключи първият интервал, който е преходен, се вижда, че вероятността на правилния модел е повече от 90% (0,9). Ако се вземе граница 50% (или дори 70%) т.е. се приеме за верен моделът с най-голяма вероятност, се вижда, че алгоритъмът работи идеално, дори и в първия (преходен) интервал.





Фигура 2.1 Вероятности за всеки от моделите

Интересен е резултатът от последните интервали. В тях са симулирани неизправности, които заемат междинно положение между моделите в моделното множество. Успешното им откриване, изолиране и идентифициране показва, че предложеният метод може да оцени всяка частична неизправност и то без добавянето на допълнителни модели. Това предимство на метода, спрямо останалите методи в литературата, е съществено при управление при наличие на неизправности. Управлението на системи при наличие на неизправности е разгледано в [2.10][2.11].

## **Заключение**

В тази точка е предложен нов метод за откриване и изолиране на неизправности. Най-същественото му достойнство е, че с негова помощ е възможно да се откриват частични неизправности без да е необходимо да се използват допълнителни модели.

## **Литература:**

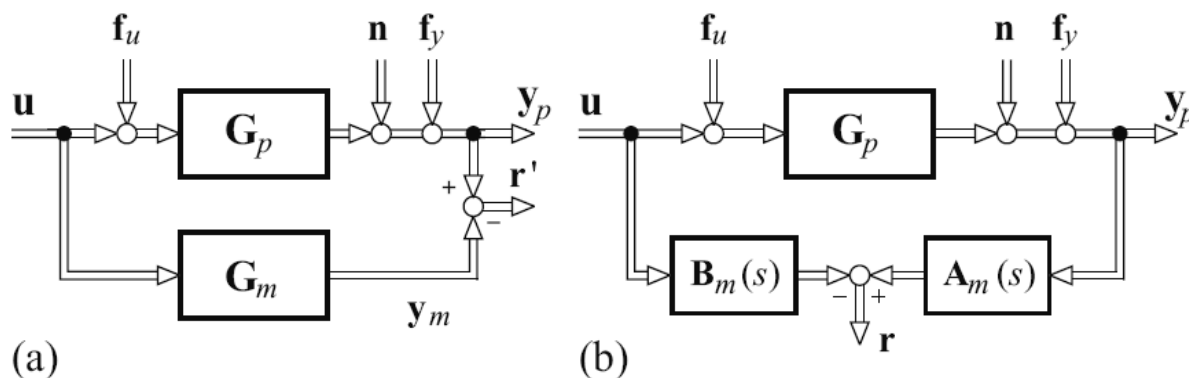
- [2.1] Gertler, Janos, Fault Detection and Diagnosis in engineering systems, Marcel Dekker, Inc., USA, 1998
- [2.2] Ron J. Patton and Paul M. Frank and Robert N. Clark (Eds.), Issues of fault diagnosis for dynamic systems, Springer, London, UK, 2000
- [2.3] Youmin Zhang and X. Rong Li, Detection and Diagnosis of Sensor and Actuator Failures Using IMM Estimator, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 34, 4, 1998, 1293-1313
- [2.4] Youmin Zhang and Jin Jiang, An interacting multiple-model based fault detection, diagnosis and fault-tolerant control approach, Proceedings of 38-th Conference on Decision Control, Phoenix, Arizona USA, 1999, 1527--1537
- [2.5] X.Rong Li and Youmin Zhang, Numerically Robust Implementation of Multiple-Model Algorithms, Proceedings of the 14th World Congress of IFAC, 1999, 235-240
- [2.6] Maybeck, P.S. and Hanlon, P.D., Performance Enhancement of a Multiple Model Adaptive Estimator, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 31, 4, Окт. 1995, стр. 1240-1254
- [2.7] Menke, T.E. and Maybeck, P.S., Sensor and Actuator Failure Detection in the Vista F-16, by Multiple Model Adaptive Estimation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 31, 4, 1995, стр. 1218-1229
- [2.8] А. Ищев. Откриване на повреди при управляеми мостови съоръжения, ВСУ'2002, том I, стр. I – 137-142.
- [2.9] A. Ichtev, J. Hellendoorn, R. Babuska, Fault Detection and Isolation Using Multiple Takagi-Sugeno Fuzzy Models, FUZZ-IEEE Melbourne, 2001, Australia, Volume: 3, 1498 -1502
- [2.10] A. Ichtev, J. Hellendoorn, R. Babuska, S. Mollov, Fault Tolerant Model Based Predictive Control Using Multiple Takagi-Sugeno Fuzzy Models, FUZZ-IEEE 2002, Hawaii, USA, Volume: 1, 346 -351
- [2.11] A. Ichtev, P. Petkov, Fault Tolerant Control by Compensating Partial Faults, 6th WSEAS conference, Crete, Greece, July 7-14, 2002, 259-264
- [2.12] Richard Dorf and Robert Bishop, Modern Control systems, 11e ISBN-10: 0132270285 ISBN-13: 9780132270281
- [2.13] Hassan Nouram, Didier Theilliot, Jean-Christophe Ponsart, Abbas Chamseddine, Fault-tolerant Control Systems. Design and Practical Applications, ISBN: 978-1-84882-652-6, 2009
- [2.14] Hao Yang, Bin Jiang, Vincent Cocquempot, Fault Tolerant Control Design for Hybrid Systems, ISBN: 978-3-642-10680-4, 2010

## 2.2. Диагностика на неизправности чрез уравнения на подобие [П7]

Уравнението на подобие е метод за откриване на неизправности, базиран на сравнението между конкретен модел на системата и реалния обект (сравнението има ролята на проверка дали между тях съществува разлика) [2.19], [2.25], [2.15], [2.28], [2.29]. Ако се появят значителни разминавания, това означава, че в обекта е настъпила промяна; ако тази разлика не се компенсира от регулатора – в системата се наблюдава неизправност.

Разликата между модела на системата и реалния обекта се дефинира като остатък. Остатъкът има стойност нула, когато системата е изправна и различна от нула при наличие на неизправност [2.20], [2.21]. Предполага се, че неизправностите в измервателно и/или изпълнителното устройство са адитивни, т.е. техният ефект се добавя към конкретното измерване/управление и не зависи от неговата абсолютна стойност. Входната и изходната неизправности се означават съответно с  $f_u$  и  $f_y$  [2.15].

За реализирането на уравнението на подобие се използват следните две блок-схеми, показани на Фиг.2.2:



Фигура 2.2. Блок-схеми за реализиране на уравнение на подобие

В рамките на този проект е реализирана схемата от Фиг.2.2 (a). При нея е извършено сравнение между изхода на обекта и изхода на модела при еднакво входно въздействие. Ако моделът е достатъчно точен и липсват шумове и смущения ( $n = 0$  и  $f_y = 0$ ), остатъкът  $r'$  ще клони към нула.

$$r'(p) = y_p(p) - y_m(p) \quad (2.21)$$

На практика обаче, в реалните системи  $n$  и  $f_y$  винаги са различни от нула и тогава изразът за  $r'$  има вида (2.22).

$$r(p) = \Delta W_m u(p) + W_o(p) f_u(p) + n(p) + f_y(p) \quad (2.22)$$

При едномерна система има само един остатък. Той би имал стойност „нула” само ако има идеално съвпадение на модела с обекта, няма шум и няма входна и изходна неизправности. В общия случай на едномерна система отделянето на съответните компоненти е невъзможно. Това означава, че дори и при изправна работа на системата остатъците ще се отличават от нула. Поради тази причина обикновено остатъците се сравняват спрямо зададени допустими стойности [2.15].

$$r = \begin{cases} 0 & \text{ако } |r_i(t)| \leq r_n \\ 1 & \text{ако } |r_i(t)| > r_n \end{cases} \quad (2.23)$$

където  $r_n$  дефинира допустимите стойности.  $r=1$  означава, че един от праговете е преминал [2.15].

Уравнението на подобие позволява локализиране на неизправността. За целта е необходимо остатъците, които се получават, да бъдат структурирани, т.е. да бъдат известни комбинациите между входни и изходни измервания и измененията, които могат да настъпят между тях.

Един от начините за проектиране на структурираните остатъци е да се направи така, че неизправностите да въздействат на някои от остатъците, но да нямат никакво влияние върху други. Тогава може да се създаде вектор или таблица, които да покажат взаимовръзка между остатъците за откриването на неизправност. Трябва да има поне един остатък, който да не е засегнат от дадена неизправност [2.15]. Примери за такива взаимовръзки са представени в Табл. 2.1, Табл. 2.2 и Табл. 2.3.

В Табл. 2.1 е представен пример за задаване на остатъците чрез заделяне на един специализиран остатък за всяка възможна неизправност (взаимовръзката е реализирана за три остатъка след като са приложени ограниченията от уравнение (2.23)) [2.15].

Таблица 2.1 Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

	Без неизправност	$f_1(p)$	$f_2(p)$	$f_3(p)$
$r_1(p)$	0	1	0	0
$r_2(p)$	0	0	1	0
$r_3(p)$	0	0	0	1

Таблица 2.2 Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

	Без неизправност	$f_{y1}(p)$	$f_{y2}(p)$	$f_u(p)$
$r_1^*(p)$	0	0	1	1
$r_2^*(p)$	0	1	0	1
$r_3^*(p)$	0	1	1	0

В Табл. 2.2 е представен пример за генериране на остатъци, които добре изолират неизправността (за целта е необходимо остатъкът да е независим от тази неизправност). Такъв пример е показан в Табл.2.2 [2.15].

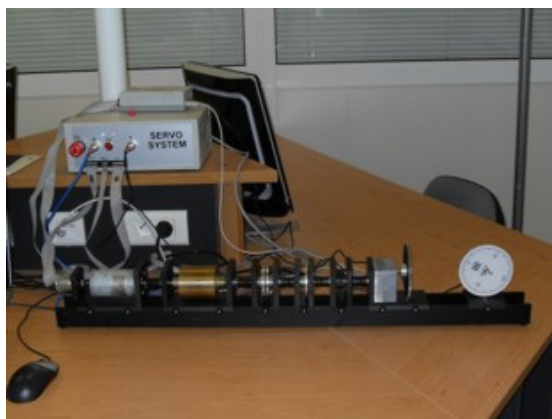
В Табл.2.3 е представен пример за това как вследствие на една грешка се изолира друга неизправност. Неизправностите не могат да се изолират, ако взаимовръзките им са неразличими [2.15].

Таблица 2.3 Взаимовръзка между остатъците за откриване на неизправност

	Без неизправности	$f_u(p)$	$f_{y1}(p)$	$f_{y2}(p)$
$r_1(p)$	0	1	1	0
$r_2(p)$	0	1	0	1

## ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД „СЕРВОСИСТЕМА”

За целите на настоящия проект се извършва експеримент с помощта на лабораторния стенд „сервосистема”, произведен от фирмата Inteco<sup>®</sup>, който представлява обект с един вход и два изхода (Фиг.2.3).



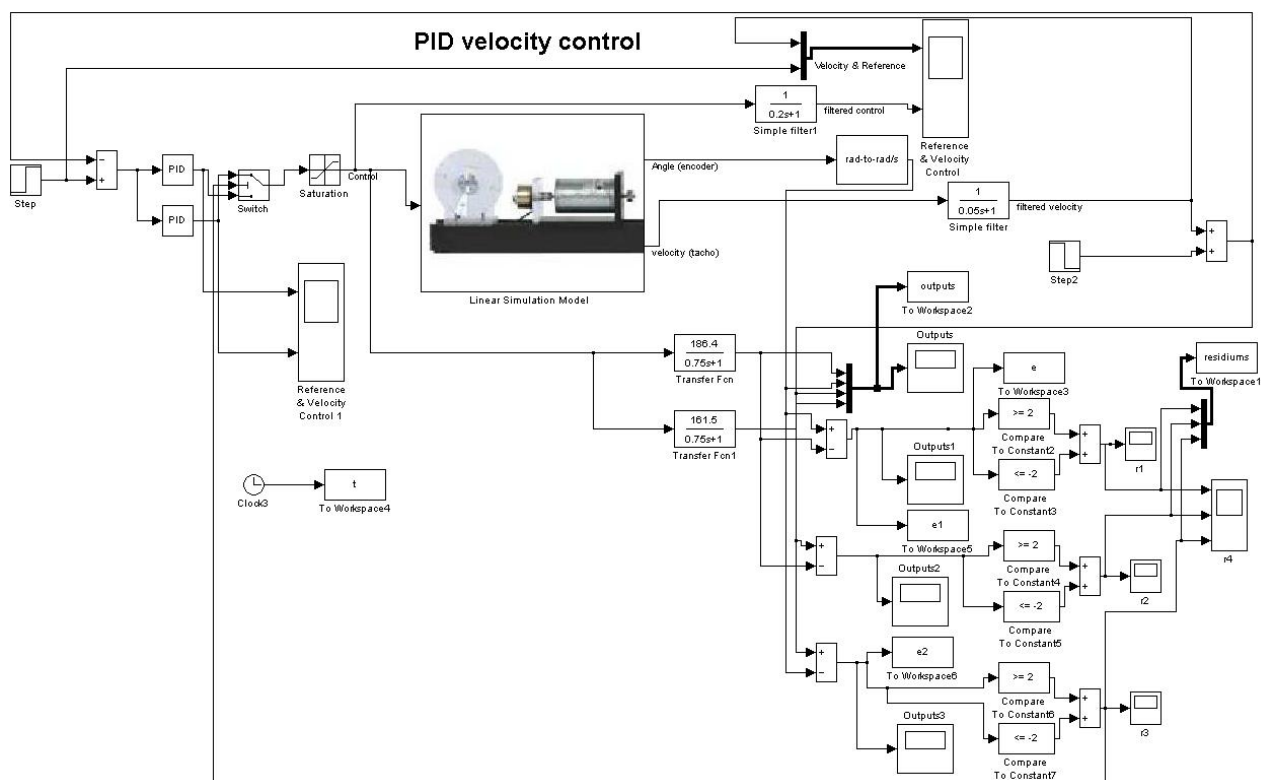
Фигура 2.3. Лабораторният стенд „сервосистема”

Лабораторният стенд се състои от следните отделни модули: постоянен ток двигател, чиято ъглова скорост се измерва чрез тахогенератор; инерционен товар; зона на нечувствителност; енкодер; магнитна спирачка и предавателна кутия с диск за отчитане на изходната величина. Принципът на действие на сервосистемата е следния: тахогенераторът е свързан директно към постоянен ток двигател и генерира сигнал, пропорционален на ъгловата скорост. Постояннотоковият двигател задвижва вал, към който са прикачени останалите отделни модули. Ъгълът на завъртане на вала на постоянен ток двигател се измерва чрез енкодер. Цялата логика изисква да се активират и обработят сигналите от енкодера и да се генерира подходяща последователност от широчинно-импулсно модулирани сигнали (ШИМ) за управление на

постояннотоковия двигател. ШИМ-ът променя ефективната стойност на напрежението на постояннотоковия двигател по формулата:  $u(t) = v(t)/v_{\max}$ . Максималната стойност на напрежението е  $v_{\max} = 12 [V]$ , а управлението е ограничено в диапазона  $[-1;1]$  (знака на запълването на ШИМ определя посоката на въртене на постояннотоковия двигател) [2.17].

## Експериментални резултати

Експериментите са проведени посредством използване на предварително изградена блок-схема в средата на MATLAB/Simulink<sup>®</sup> със Real Time Workshop<sup>®</sup>. Блок-схемата на системата е представена на Фиг.2.4.



Фигура 2.4. Блок-схема на Simulink

При проведената симулация за управляващи устройства са използвани два ПИ регулатора (реализирани са чрез блокове ПИД регулатор). Двата регулатора са свързани към ключ. Посредством него се избира (взема) изчисленото управление на едни от предварително настроените ПИ регулатори. Всеки един от тях е синтезиран за работи в съответен работен режим (без неизправност и с неизправност). Коefициентите на горния ПИ регулатор имат стойности:  $K_p = 0.50$  и  $K_i = 3.75$ , а на долния:  $K_p = 0.20$  и  $K_i = 2.5532$ .

В първите двадесет секунди на симулацията в системата няма неизправност. Двигателят се развърта и работи в номиналния си режим. В двадесетата секунда се появява адитивна неизправност.

За да се получат структурираните остатъци при диагностика чрез метода на подобие, са необходими предварителни изчисления.

Взаимовръзките между входовете и изходите се дават от:

$$y_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1} u(p) \quad (2.24)$$

$$y_2(p) = \frac{K_2}{T_2 p + 1} u(p) \quad (2.25)$$

Уравненията (2.24) и (2.25) могат да бъдат представени във вида:

$$0 = y_1(p) - \frac{K_1}{T_1 p + 1} u(p) \quad (2.26)$$

$$0 = y_2(p) - \frac{K_2}{T_2 p + 1} u(p) \quad (2.27)$$

И записани във векторна форма:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} y_1(p) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_2(p) + \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{T_1 p + 1} \\ \frac{K_2}{T_2 p + 1} \end{bmatrix} u(p) \quad (2.28)$$

Матрицата за генериране на остатъци  $W$  трябва да има три реда, за да се получи независимост на остатъците от трите сигнала (два изхода и единият вход) -  $y_1(p)$ ,  $y_2(p)$  и  $u(p)$ .

$$W = \begin{bmatrix} w_{y_1}^T(p) \\ w_{y_2}^T(p) \\ w_{y_3}^T(p) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

За да се получи независимост към  $y_1(p)$ ,  $y_2(p)$  и  $u(p)$  (уравнение (2.28)), съответните редове във  $W$  са:

$$w_{y_1}^T(p) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow w_{y_1}^T(p) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$w_{y_2}^T(p) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow w_{y_2}^T(p) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$w_u^T(p) \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{T_1 p + 1} \\ \frac{K_2}{T_2 p + 1} \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow w_u^T(p) = \begin{bmatrix} \frac{K_2}{T_2 p + 1} \\ -\frac{K_1}{T_1 p + 1} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Структурираната матрица на остатъците се получава след като в уравнение (2.28) се замести получената матрица  $W$ .

$$r_1^*(p) = y_2(p) - \frac{K_2}{T_2 p + 1} u(p) \quad (2.33)$$

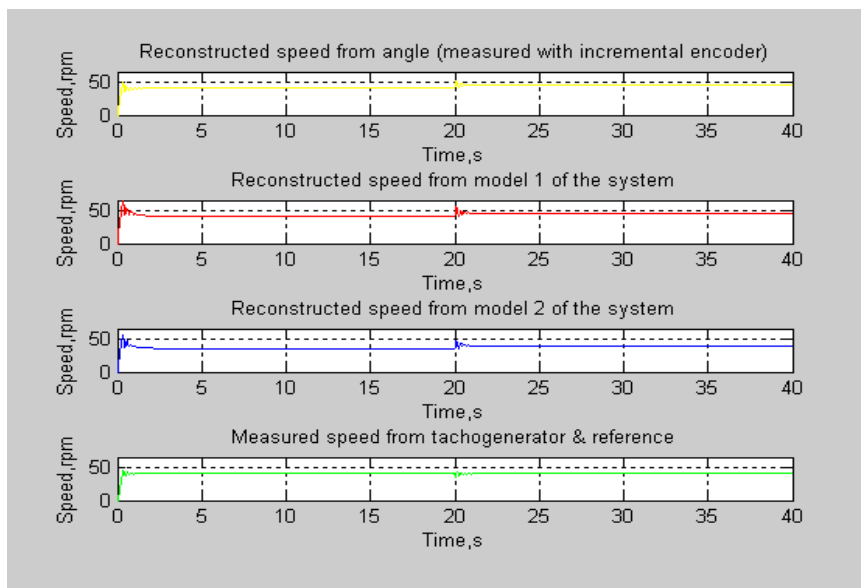
$$r_2^*(p) = y_1(p) - \frac{K_1}{T_1 p + 1} u(p) \quad (3.34)$$

$$r_1^*(p) = \frac{K_2}{T_2 p + 1} y_1(p) - \frac{K_1}{T_1 p + 1} u(p) \quad (3.35)$$

От уравнения (3.33-3.35) може да се види, че първият остатък е независим от първият изход, вторият остатък – от вторият изход, а третият остатък – от входния сигнал. Тези остатъци имат взаимовръзки, показани в Табл.2.2 и са силно изолируеми [2.15].

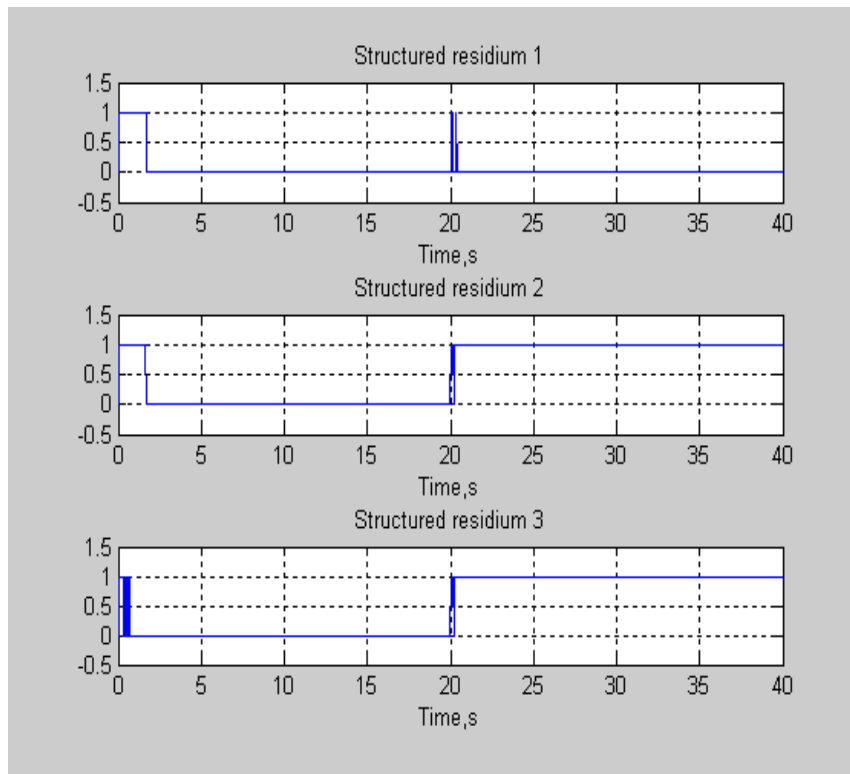
За целите на провеждането на симулацията са реализирани десните части на уравненията (3.33-3.35). По този начин са моделирани структурираните остатъци. Зададени са и допустими стойности. След прилагането им са получени окончателните бинарни остатъци.

На Фиг.2.5 и Фиг.2.6 са представени визуализации съответно за изходите на обекта и получените бинарни остатъци.



Фигура 2.5. Изходи на обекта





Фигура 2.6. Бинарни остатъци

## АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

- При проведения експеримент се наблюдава плавно отработване на заданието.
- В момента на настъпване на неизправността се активират вторият и третият остатък. Това означава неизправност в първото измервателно устройство. Следователно, системата за диагностика на неизправности открива и изолира конкретно тази неизправност.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази точка е приложен един от методи за моделно базирана диагностика на неизправности – използване на уравнения на подобие. Формирани са остатъци, т.е. разликата между измерената стойност на изходния сигнал и изчислената на базата на модел. Синтезирани са и структурирани остатъци, които позволяват конкретното откриване и изолиране на неизправности. Задачата е представена както в общ вид, така и за конкретна сервосистема. Проведена е симулация с линейния модел на сервосистемата. Получените от експериментите резултати са анализирани.

## **ЛИТЕРАТУРА**

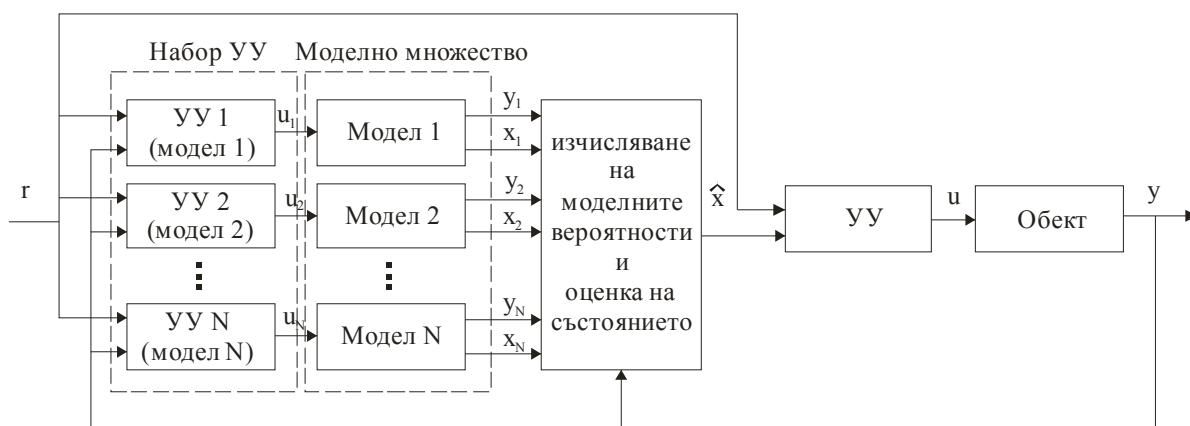
- [2.15] Ищев, А., Моделно базирана диагностика на неизправности. Приложение при следяща система.
- [2.16] Ищев, А., Многомоделно управление с откриване и компенсиране на неизправности.
- [2.17] Inteco<sup>®</sup>, Modular Servo System, User Manual.
- [2.18] Isermann, R., (1997), Balle P Trends in the application of model-based fault detection and diagnostics in the technical processes. Control Engineering Practice, 5(5), pp. 638-652.
- [2.19] Isermann, R., (2006), Fault-Diagnosis Systems, Springer.
- [2.20] Janos Gertler (1998), Fault Detection and Diagnosis in engineering system, Marcel Dekker, Inc., USA.
- [2.21] Kanev, S. and M. Verhaegen (2000), Controller reconfiguration for non-linear system, Control Engineering Practice, vol. 8 (11), pp. 1223-1235, November.
- [2.22] Maybeck, P.S. and P.D. Hanlon (1995), Performance enhancement of a multiple model adaptive estimator, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 31, no.4, pp. 1240-1254, October.
- [2.23] Menke, T.E. and P.S. Maybeck (1995), Sensor and actuator failure detection in the vista F-16, by multiple model adaptive estimation, Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 31, no.4, pp. 1218-1229.
- [2.24] Patton, R., (1997), Fault-tolerant control: the 1997 situation, In Prepr. IFAC SAFEPROCESS, volume 2, pp. 591-596.
- [2.25] Patton, Ron J., Paul M.Frank and Robert N.Clark Eds. (2000), Issues of diagnosis for Dynamic systems, -Diagnosis Systems, Springer, London, UK.
- [2.26] Puleva, T., Al. Ichtev (2008), Adaptive multiple model algorithm for hydro generator speed and power control, 8th International conference, Control of power systems'08, June 11-13, Strbske Pleso, High Tatras, Slovak Republic. Abstracts, p. 63. (Full text - published in CD).
- [2.27] Richard Dorf and Robert Bishop, Modern Control systems, 11e ISBN-10: 0132270285 ISBN-13: 9780132270281
- [2.28] Hassan Nouram, Didier Theilliot, Jean-Christophe Ponsart, Abbas Chamseddine, Fault-tolerant Control Systems. Design and Practical Applications, ISBN: 978-1-84882-652-6, 2009
- [2.29] Hao Yang, Bin Jiang, Vincent Cocquempot, Fault Tolerant Control Design for Hybrid Systems, ISBN: 978-3-642-10680-4, 2010

### 3. УПРАВЛЕНИЕ И КОМПЕНСИРАНЕ НА НЕИЗПРАВНОСТИ [П1]

#### 3.1 Управление при неизправности

Поради голямото разнообразие на възможни неизправности, на тяхното местоположение и на тяхната степен, е трудно да се предложи единен подход за неутрализиране на вредните им ефекти чрез използването само на аналитичен излишък [3.1], [3.2]. В тази точка се представят три авторски схеми за реализиране на управляващи устройства, които работят и при частични неизправности. Първата схема действа на базата на реконфигуриране в реално време на управляващото устройство, а останалите две използват компенсация на ефекта предизвикан от неизправностите.

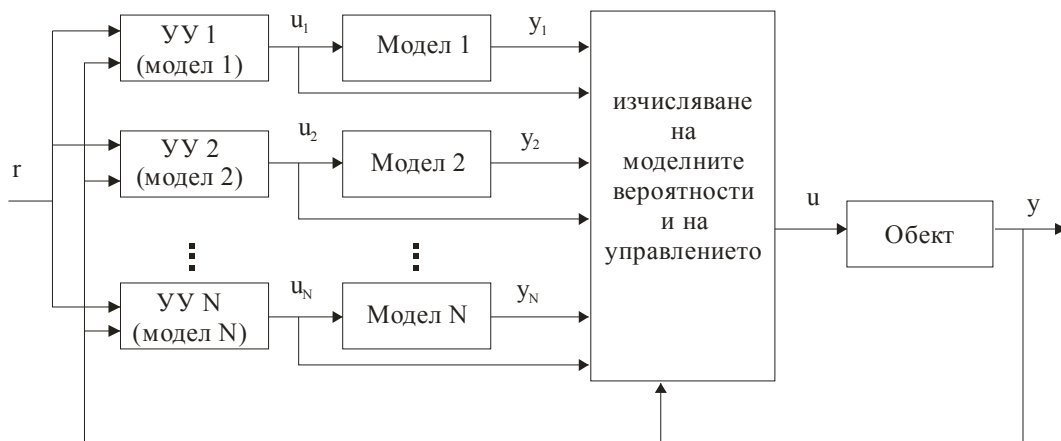
Понеже всички възможни модели на обекта могат да се представят като изпъкнала комбинация от моделите в множеството  $M$ , то логично е да се предложи [3.4] управляващото въздействие да се изчислява като същата претеглена сума от отделните (частните) управления (т.е. управленията, изчислени на базата на съответен модел от моделното множество). Оптималността на получената система не е доказана, но се гарантира нейната устойчивост и запазване, до известна степен, на нейните качествени показатели [3.4]. Подобен подход се използва и тук.



Фигура 3.1. Общ случай на много-моделно управление.

В общия случай системата има вида показан на Фиг. 3.1. Тя съдържа набор от управляващи устройства ( $УУ_1 \div УУ_N$ ) за всеки от моделите в моделното множество. На базата на изходите  $y_i$  и състоянията  $x_i$  на моделите и на измерения изход  $y$  от обекта се изчисляват моделните вероятности и се оценява състоянието  $\hat{x}$  на обекта. Управляващото устройство (УУ) реализира обратна връзка по оцененото състояние.

В частния случай, когато всички състояния са и изходи на обекта, е възможно да се използва схемата показана на Фиг.3.2.



Фигура 3.2. Много-моделно управление с измерими състояния.

Предимството е в по-лесното прилагане на метода и по-малките изисквания към необходимата изчислителната мощ на управляващото устройство. При това положение управляващият сигнал към обекта се изчислява по формулата:

$$u(k) = \sum_{i=1}^N u_i(k) \mu_i(k) \quad (3.1)$$

където  $u_i(k)$  е управлението, изчислено на базата на управляващото устройство за  $i$ -тия модел. В този случай задачите за диагностика и управление при неизправности са обединени.

### **Управление чрез компенсация на ефекти, предизвикани от неизправности**

В някои случаи, особено когато неизправността е в измервателното устройство, ефектът от неизправността може да бъде напълно неутрализиран и чрез компенсиращи въздействия. Общата идея може да се поясни по следния начин: в резултат на частична неизправност в измервателното устройство измерваната стойност е неточна. Управлението, обаче, трябва да се определи не по неточната стойност, а по реалния изход.

При наличието на частична неизправност в измервателно устройство, само един от моделите в моделното множество  $M$  представлява правилно обекта и това е неговият номинален модел (моделът без наличие на неизправности). При това положение управляващото въздействие към обекта трябва да се подаде по такъв начин, че да компенсира ефекта от неизправността в измервателното устройство. Един от начините да бъде направено това е да се направи компенсация чрез модификация на заданието. Това е предложено в точка 5.1. Реализацията на такава компенсация е много проста за едномерните системи. При многомерните системи трябва да се вземе под внимание ефектът на взаимовръзките между различните входове и изходи. В такива случаи е по-подходящо да се извърши директно реконструиране на изходната променлива (модификация на измерването), което се предлага в точка 3.3.

### 3.2. Компенсирание на неизправности чрез модифициране на заданието

При системи с отрицателна обратна връзка по изхода, заданието се подава на входа на системата, за да се формира желаната стойност на изхода. При наличие на неизправност в измервателно устройство се получават грешни измервания. Целта на компенсацията в този случай е да се модифицира заданието, така че да съответства на новите измервания, и това може да се реализира с показаната на Фиг.3.3 схема.



Фигура 3.3. Управление с модификация на заданието

Ако например, от системата за диагностика е констатирана 50%<sup>-тна</sup> неизправност в измервателното устройство, то управляващото устройство ще увеличава управлението докато разликата между заданието и измерения сигнал не стане равна на нула. За примера с 50% намаление на измерванията ще се окаже, че системата за управление ще се стреми да реализира двойно по-голяма от желаната стойност на изхода. Това може да се избегне, ако се зададе 50% по-малко задание. Тогава разликата между изход и задание ще е нула, когато обектът има желания изход.

В случая, когато от системата за диагностика на неизправности е констатирано, че е настъпила частична неизправност в обекта на управление и се познава ефектът от тази частична неизправност, то този нежелан ефект също може да се компенсира чрез модифициране на заданието.

При едномерна система, може да се предложи следната формула за изчисляване на модифицираното задание:

$$r_m(k) = r_n(k) - y_1(k) + \sum_{i=1}^N \mu_i(k) y_i(k) \quad (3.2)$$

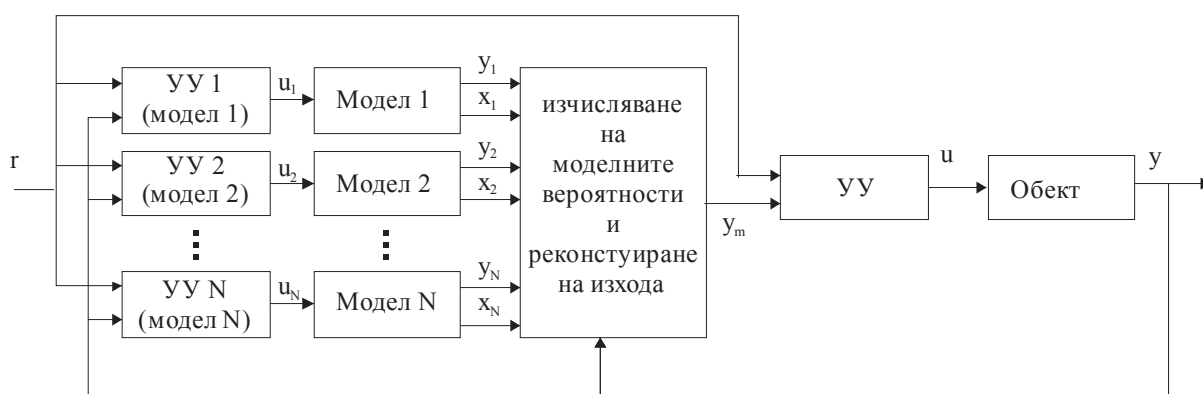
Тук  $y_1$  е изход на номиналния модел (без неизправности),  $r_n$  - номиналното задание (желаното задание за номиналната система), а  $r_m$  - модифицираното от алгоритъма задание.  $y_i$  е изход на  $i$ -тия модел, а  $\mu_i$  - неговата моделна вероятност.

Както лесно може да се провери, при работа в номинален режим ( $\mu_1 = 1$ ;  $\mu_i = 0$  за  $i = 2, 3, \dots, N$ ) двата последни члена във формулата (3.2) взаимно се компенсират и  $r_m(k) = r_n(k)$ , т.е. се използва номиналното задание. При неизправност се нулират първите два члена в дясната страна на равенство (3.2) (в установен режим и при липса на грешка от моделиране и зашумяване на обекта те са идентични). Това е предимство на алгоритъма, а не недостатък, т.к. дори и при липса на неизправност, грешката на управлението трябва да се отработи, а шумовата компонента се елиминира от филтъра на управляващото устройство. Заданието се модифицира в зависимост от моделните вероятности на съответните неизправности и изходите на съответните модели. Друго предимство е, че алгоритъмът позволява да се модифицира заданието, когато в системата е настъпила немоделирана неизправност, която е изпъкнала комбинация от моделирани неизправности.

Формула (3.2) може да бъде обобщена и за по-общия случай на многомерна система.

### 3.3. Компенсирание на неизправности чрез реконструиране на изхода

Основната цел е същата както в предишния раздел - да се компенсира неизправността. Разликата е, че тук въпросът е: Възможно ли е да се реконструират истинските изходи на обекта на базата на моделите на обекта и информацията, че неизправността присъства в обекта. Този подход е по-естествен (по-интуитивен) от предишния и може по-лесно да се приложи особено за многомерни системи, защото не е необходимо да се отчита ефектът на взаимосвързаност между входовете. Работната схема е показана на Фиг.3.4.



Фигура 3.4 Управление с реконструиране на изходите

Предлаганата тук формула за изчисляване на реконструирания изход на обекта  $y_m$  за случая на едномерна система е

$$y_m(k) = y_o(k) + y_1(k) - \sum_{i=1}^N \mu_i(k) y_i(k) \quad (3.3)$$

където  $y_0$  е измереният изход на обекта. Тази формула също може да бъде обобщена и за многомерна система.

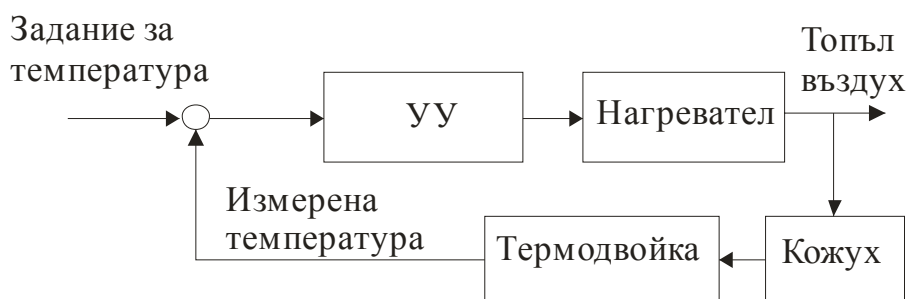
Компенсацията на неизправности при изпълнителните устройства също може да бъде направена по предложените схеми в тази и в предишната точка 3.1. Решението обаче има недостатък. Нека например е констатирана частична неизправност в изпълнително устройство, причината за която може да е на входа на обекта - например да се дължи на увеличено триене. В този случай, за да компенсира неизправността, управляващото устройство ще увеличи входното въздействие. При това положение може да възникнат проблеми с евентуални ограничения на входния за обекта сигнал. В такъв случай е по-добре тези неизправности да се разглеждат с метода, коментиран в точка 3.1 - като многомоделен хибриден модел. В този случай се променя управляващото устройство, вместо да се модифицират/реконструират заданието или изходите.

### 3.4. Експерименти със система за пренос на топлина

#### Постановка на задачата

За провеждането на експериментите е използвана система за пренос на топлина, състояща се от вентилатор, който духа въздух в тръба. На входа на тръбата е монтиран нагревател (подобно на сешоар). Температурата в тръбата се измерва от термодвойка, монтирана в кожух. Вход на системата е напрежението, приложено на електрониката която захранва нагревателя. Изход на системата е напрежение, получено от термодвойката. Частична неизправност се симулира чрез завъртане на кожуха на термодвойката, като по този начин се ограничава въздушният поток около измервателното устройство.

Блок-диаграмата на затворената система е показана на Фиг. 3.5. Управляващото устройство е ПИД регулатор, чиито настройки са синтезирани предварително и зависят от моделите в използваното множество. В проведения експеримент се използват два модела – единият е за изправен (номинален) обект и един за максимална неизправност в обекта (при максимално завъртане на кожуха на термодвойката).



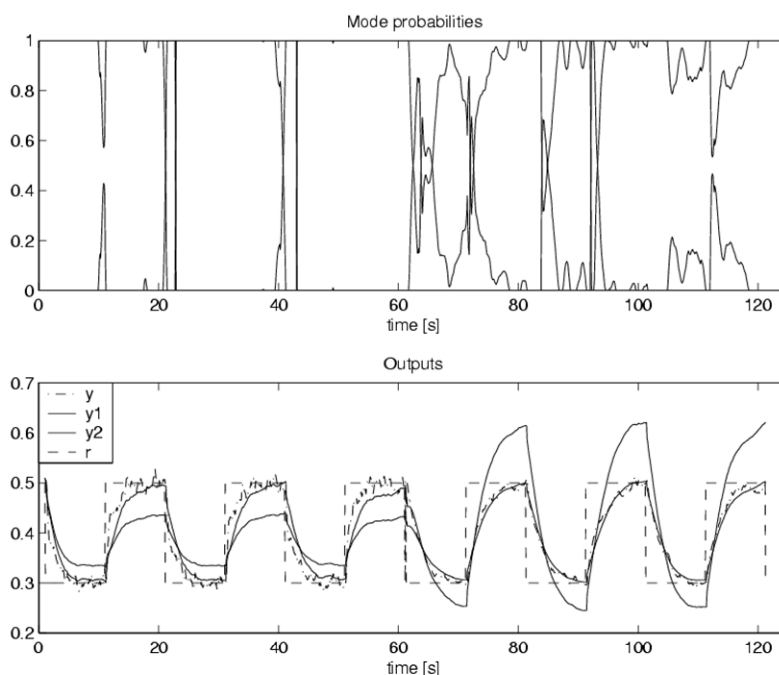
Фигура 3.5. Блок схема на система за пренос на топлина.

Експерименталното поведение на изправната и неизправната система за управление се описва на базата на входно-изходни данни чрез два размити

(Такаги-Сугено) модела с точност до конкретни параметри. По време на експеримента се променя заданието за температурата, като се използват правоъгълни импулси с нива 0.3 (38 градуса) и 0.5 (46 градуса) и период 20 секунди.

### **Компенсация на ефекта на неизправността.**

За целта се използва представената на Фиг.3.2 схема и формула (3.1). Проведен е експеримент в реално време със системата. През първата минута (60 сек.) системата е изправна (модел 1). През втората минута на експеримента присъства неизправност в обекта (модел 2). Моделните вероятности са изчислени с помощта на оптимизационна процедура, описана в точка 2.1. Те са представени на Фиг. 3.6а. Както може да се види работният режим се определя коректно. Малък проблем се забелязва само в моментите на промяна на работната точка във Фиг. 3.6б, където са показани заданието (представено с пунктирна линия), изходът на системата (с линия от точки и тирета) и изходите на двата модела (с непрекъснати линии).



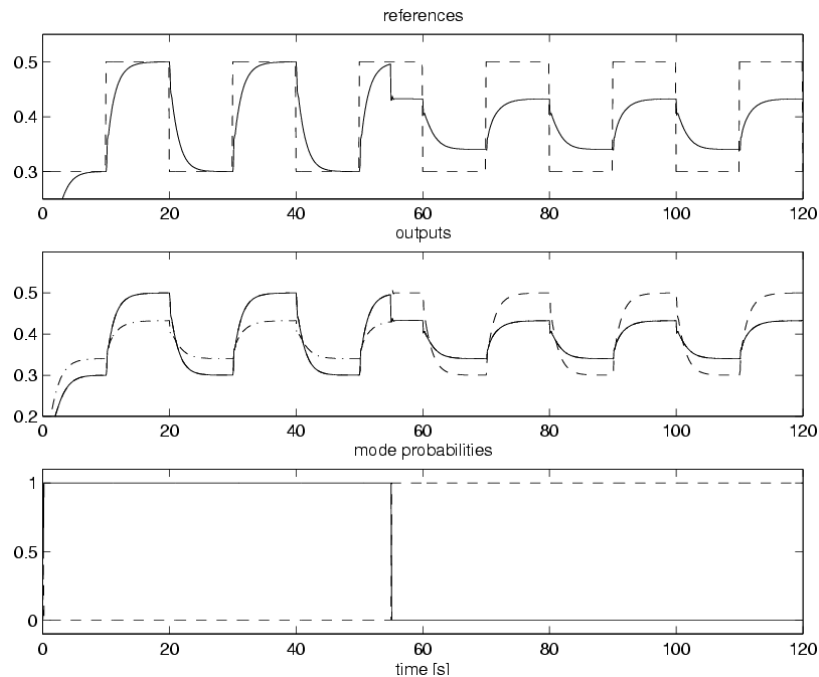
Фигура 3.6. Компенсация на неизправностите (а. - моделни вероятности, б. - сигнали на системата).

### **Модификация на заданието.**

Резултатите от експеримента са получени чрез прилагане на формула (3.2) в схемата от Фиг. 3.3. На Фиг. 3.7а са представени заданието (с пунктирна линия) и модифицираното задание. На Фиг. 3.7б са показани изходите от двата модела (съответно с линии от тирета и тирета и точки), както и измереният изход на системата (с непрекъснатата линия). Истинският изход (измервания с



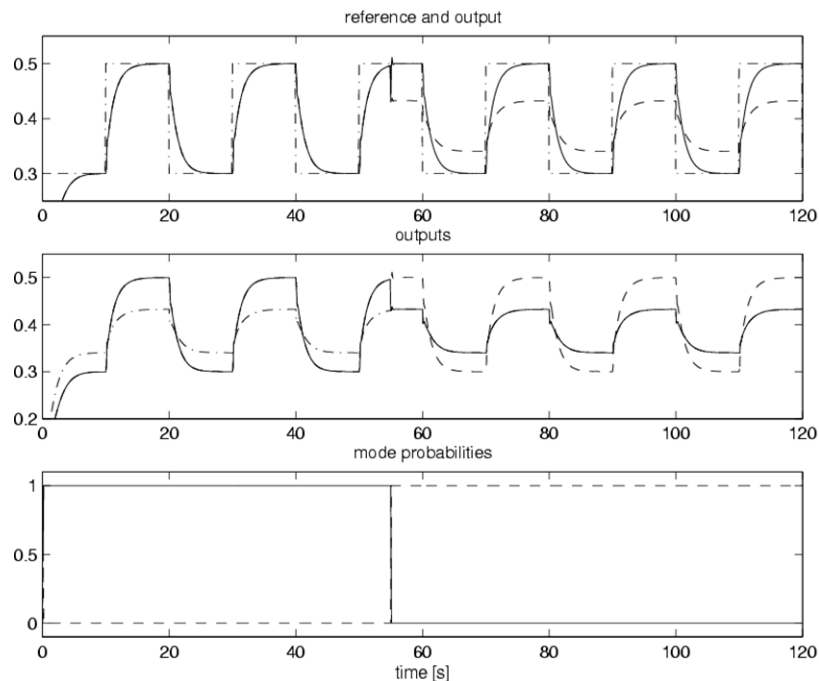
изправно измервателно устройство) е същият както на първия модел. Както може да се види, той следва заданието, дори и след настъпването на неизправността (в 55тата секунда). На Фиг. 3.7в са представени моделните вероятности за двата модела (с плътна линия за първия модел и с пунктирана за втория модел), които се определят правилно за целия диапазон. Методът с компенсация на заданието работи по-добре, отколкото разгледаният по-горе, метод за управление с компенсиране на ефекта от неизправността.



Фигура 3.7. Модификация на заданието (а. - задание, б. - изходи и в. - моделни вероятности).

### **Реконструиране на изхода.**

В този експеримент реконструираният изход използва формула (3.3) и схемата от Фиг. 3.4. Резултатите от експеримента са представени на Фиг. 3.8. Те са организирани по същият начин както по-горе – при използване на модификация на заданието. На Фиг. 3.8а е показан измереният изход (с непрекъснатата линия) и реконструираният изход (с линия от точки и тирета). Отново системата следва заданието дори и след настъпване на неизправността (в 55тата секунда). Получените резултати са подобни на тези получени при модификация на заданието.



Фигура 3.8. Реконструиране на изхода (а. - задание, б. - изходи и в. - моделни вероятности).

## Заклучение

В този раздел е приложен многомоделен подход, в който се съчетават задачите за диагностика и за компенсация/управление при неизправности. Предимство на този подход е, че позволява да се откриват и компенсират частични или постепенно развиващи се неизправности. Подходът е работоспособен и при няколко едновременно възникващи или развиващи се неизправности. Предложена е формула и схема на затворена система, в която се извършва компенсация на неизправности чрез модификация на заданието. Нейното приложение е ефективно за едномерни системи. Предложена е и схема за компенсация на неизправности чрез реконструиране на изхода на обекта. Тази схема е приложима и за многомерни системи. Проведените експерименти върху едномерна система потвърждават работоспособността на предложения подход за компенсиране на вредният ефект от неизправностите.

## Литература

- [3.1] Hassan Nouram, Didier Theilliot, Jean-Christophe Ponsart, Abbas Chamseddine, Fault-tolerant Control Systems. Design and Practical Applications, ISBN: 978-1-84882-652-6, 2009
- [2.2] Hao Yang, Bin Jiang, Vincent Cocquempot, Fault Tolerant Control Design for Hybrid Systems, ISBN: 978-3-642-10680-4, 2010
- [3.3] R. Isermann, Balle P Trends in the application of model-based fault detection and diagnostics in technical processes. Control Engineering Practice, 5 (5), pp 638-652, 1997.

- [3.4] S. Kanev and M. Verhaegen, "Controller reconfiguration for non-linear systems," *Control Engineering Practice*, vol. 8 (11), pp. 1223–1235, Nov. 2000.
- [3.5] Janos Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker, Inc., USA, 1998.
- [3.6] P.S. Maybeck and P.D. Hanlon, "Performance enhancement of a multiple model adaptive estimator," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 1240–1254, Oct. 1995.
- [3.7] Puleva, T., Al. Ichtev. Adaptive multiple model algorithm for hydro generator speed and power control, Slovak professional magazine for scientific and engineering issues AT&P journal PLUS, N2, 2008, pp.1-6.
- [3.8] A. Ichtev, J. Hellendoorn, R. Babuška. Fault Detection and Isolation Using Multiple Takagi-Sugeno Fuzzy Models. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'01), Melbourne, Australia, pp.1498-1502.

## 4. НЕВРОННО-РАЗМИТО ПРЕДСКАЗВАЩО УПРАВЛЕНИЕ [8]

### Въведение

Моделното предсказващо управление (МПУ) е един от най-широко прилаганите подходи за адаптивно управление на динамични системи в индустрията. Основната идея при МПУ е да се реши предварително дефинирана оптимизационна задача с цел намиране на вектор на управленията, който минимизира целевия критерий зададен в оптимизационната процедура за целия хоризонт на предсказване [4.2], [4.3]. Първоначално, МПУ е предназначено и се прилага само за линейни обекти и процеси [4.1]. В следствие то е разширено и доразвито за нелинейни приложения, в съответствие с характеристиките и нуждите на повечето обекти и процеси в индустрията.

В практиката преобладават широк клас промишлени процеси, които са съществено нелинейни и те са обект на нелинейното моделно предсказващо управление (НМПУ). В последните години редица изследователи публикуват разработки и алгоритми за НМПУ [4.2], в които се използват различни подходи за нелинейно моделиране. Някои от тези модели се базират на класическата теория за нелинейно управление, други използват емпирични данни с приложение на невронни мрежи и размита логика за построяване на нелинейни модели.

Точният модел на изследвания обект или процес определя в голяма степен ефективността и работоспособността на приложението използващо подхода на МПУ. Съществуват различни модификации на МПУ различаващи се по вида на използвания предсказващ модел – адаптивни модели [4.4], невронни модели [4.3] и др. Размитите и невронните модели се отнасят към широко известния и прилаган подход на „черната кутия”.

Променящата се динамика и наличието на смущения от различно естество при обектите налагат и използването на динамични модели. Невронните и размитите модели удовлетворяват тази необходимост за адаптация в реално време. Невронно-размития подход от своя страна съчетава свойствата и на двата типа модели и се превръща в мощен апроксиматор в реално време за обекти и процеси с нелинейни характеристики.

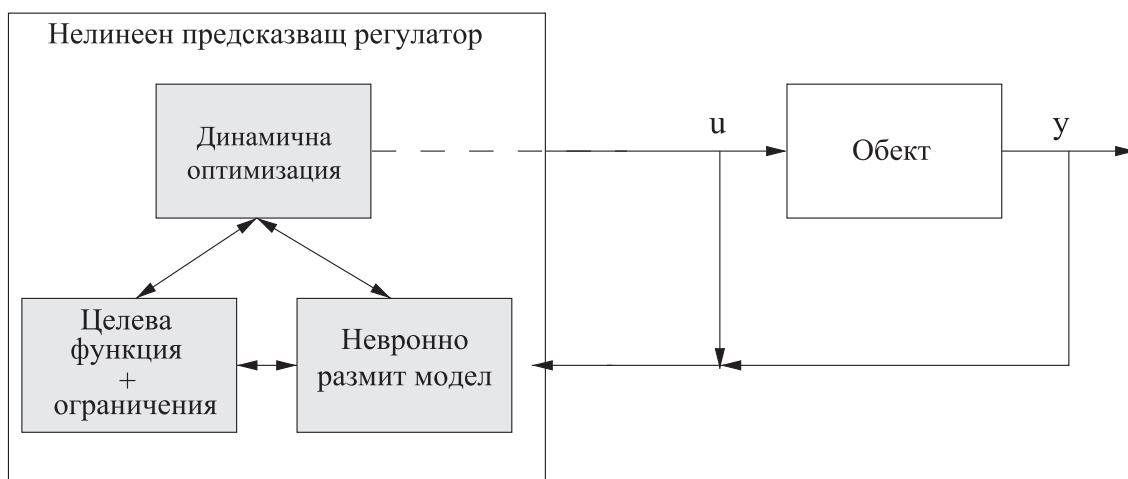
Другият основен етап при НМПУ е изчисляването на множество от бъдещите управляващи въздействия. Това е етапът на решаване на оптимизационната задача на НМПУ. Едно от най-големите предимства на МПУ е възможността за въвеждане на ограничения [4.1].

В този раздел се използва невронно-размит модел на Такаги-Сугено [4.6] в пространството на състоянията с приложение за предсказващо управление. Предложеният подход за невронно-размито НМПУ е представен чрез система

за управление на двуроторен аеродинамичен модел с две степени на свобода. Изследванията са проведени в симулационната среда на MATLAB/Simulink®.

## Невронно-размит предсказващ модел

Основният подход за НМПУ с използване на невронно-размит предсказващ модел на Такаги-Сугено е представен на Фиг. 4.1.



Фигура 4.1. Основно представяне на МПУ

Невронно-размитият модел на Такаги-Сугено е изключително подходящ за моделиране нелинейни системи. От друга страна е добре известно, че широк клас от нелинейни системи се представят с дискретната форма на описанието в пространството на състоянията. В настоящата разработка е използван именно такъв модел в пространството на състоянията за построяването на предсказващия модел на Такаги-Сугено.

Обобщеният запис за дискретната форма на описанието в пространството на състоянията има следния вид:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f_x(x(k), u(k)) \\ y(k) &= f_y(x(k), u(k)), \end{aligned} \quad (4.1)$$

където  $x(k)$ ,  $u(k)$  и  $y(k)$  са векторът на състоянието, входовете и изходите на обекта със съответните им размерности  $\dim(x_k)=n \times 1$ ,  $\dim(u_k)=m \times 1$ ,  $\dim(y_k)=q \times 1$ . Неизвестните нелинейни функции  $f_x$  и  $f_y$  се апроксимират чрез следното множество от размити правила:

$$R_i : \text{if } z_1(k) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots z_p(k) \text{ is } M_{ip} \text{ then } \begin{cases} x_i(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) \\ y_i(k) = C_i x(k) + D_i u(k) \end{cases} \quad (4.2)$$

където  $R_i$  е  $i$ -тото разрито правило,  $z_p$  представя входно-изходните регресори,  $M_{ip}$  е функцията на принадлежност от съответно разрито множество, а  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  и  $D_i$  са матриците от описанието в пространството на състоянията с  $\dim(A_i)=n \times n$ ,  $\dim(B_i)=n \times m$ ,  $\dim(C_i)=q \times n$ ,  $\dim(D_i)=q \times m$ .

Състоянието на системата в следващ момент от време се изчислява като претеглена сума на активираните размити правила:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \sum_{i=1}^L \bar{\mu}_{yi}(k) (A_i x(k) + B_i u(k)) \\ \hat{y}(k) &= \sum_{i=1}^L \bar{\mu}_{yi}(k) (C_i x(k) + D_i u(k)). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Отделните матрици от описанието също могат да се изчислят като претеглена сума на локалните матрици  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  и  $D_i$  от съответните активирани правила  $i$ :

$$\begin{aligned} A(k) &= \sum_{i=1}^L A_i \bar{\mu}_{yi}(k) & B(k) &= \sum_{i=1}^L B_i \bar{\mu}_{yi}(k) \\ C(k) &= \sum_{i=1}^L C_i \bar{\mu}_{yi}(k) & D(k) &= \sum_{i=1}^L D_i \bar{\mu}_{yi}(k) \end{aligned} \quad (4.4)$$

където  $\bar{\mu}_{yi} = \mu_{yi} / \sum_{i=1}^L \mu_{yi}$  е нормираната степен на принадлежност в  $i$ -то активирано правило, а  $L$  е броя на активираните от базата правила. Импликацията е представена чрез следния израз:

$$\mu_{yi} = \mu_{i11} * \mu_{i12} * \mu_{i1j} * \dots * \mu_{ipj} \quad (4.5)$$

където  $\mu_{ipj}$  е степента на принадлежност за активираното  $j$ -то разрито множество за  $p$ -ти входен сигнал съгласно избраната тук Гаусова функция на принадлежност:

$$\mu_{pj}(z_p) = \exp - \frac{(z_p - c_{Gpj})^2}{2\sigma_{pj}^2} \quad (4.6)$$

За (4.6)  $c_{Gpj}$  отразява центъра на функцията, а  $\sigma_{pj}$  е разпределението за  $j$ -тата функция на принадлежност за  $p$ -ти вход  $z_p$ .

В невронно-размития модел на Такаги-Сугено е необходимо да се определят неизвестните параметри – брой на функциите на принадлежност, тяхната форма и параметри, както и коефициентите във функциите  $f_x$  и  $f_y$  в следствената част на правилата. Редица методи са посветени на тази задача за идентификация.

В представената разработка е приложен сравнително опростен поход, чиято алгоритмична реализация и рекурентна форма, го правят подходящ за приложения в реално време. Той се базира на петслойна невронно-размита мрежа, в която всеки слой изпълнява специфична за размитата логика задача. В първия слой са разположени входните възли  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ . Те насочват входовете на системата към втория слой на мрежата, където се извършва операцията размиване. Третият слой интерпретира базата с логически правила. Предпоследният слой е слой за деразмиване, а последният пети е извеждащ (изходен) слой за мрежата. Параметрите за настройка са разположени във втория и четвъртия слой на структурата.

**Алгоритъм за обучение на предложения невронно-размит модел.** За обучение на предложения вътрешен невронно-размит модел е приложена двустъпкова градиентна оптимизационна процедура. Алгоритъмът се базира на минимизирането на текущата грешка, изчислявана като разликата между стойностите на реалния изход на обекта  $y(k)$  и моделирания изход  $\hat{y}(k)$ .

$$\varepsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (4.7)$$

$$E_{FNN}(k) = \varepsilon^2(k) / 2 \quad (4.8)$$

За целта е необходимо да бъдат настроени две групи параметри от невронно – размитата архитектура. Това са параметрите в предпоставъчната част на правилата и параметрите в тяхната следствена част. Параметри в следствената част са коефициентите попълващи матриците на състоянието във функциите  $f_x$  и  $f_y$  и се изчисляват със следното обобщено рекурентно уравнение [4.6]:

$$\beta_i(k+1) = \beta_i(k) + \eta \left( -\frac{\partial E_{FNN}}{\partial \beta_i} \right) \quad (4.9)$$

където  $\eta$  е скоростта на обучение, а  $\beta_i$  е оценявания  $i$ -ти параметър  $a_{li}$ ,  $b_{li}$ ,  $c_{li}$ , или  $d_{li}$ .

$$a_{li}(k+1) = a_{li}(k) + \eta \varepsilon(k) \bar{\mu}_{yi}(k) z_p(k) \quad l = 1 \div n \times n \quad (4.10)$$

$$b_{li}(k+1) = b_{li}(k) + \eta \varepsilon(k) \bar{\mu}_{yi}(k) z_p(k) \quad l = 1 \div n \times m$$

$$c_{li}(k+1) = c_{li}(k) + \eta \varepsilon(k) \bar{\mu}_{yi}(k) z_p(k) \quad l = 1 \div q \times n$$

$$d_{li}(k+1) = d_{li}(k) + \eta \varepsilon(k) \bar{\mu}_{yi}(k) z_p(k) \quad l = 1 \div q \times m$$

Параметри в предпоставъчната част на правилата са центърът  $c_{Gpj}$  и ширината  $\sigma_{pj}$  на активираното Гаусово размито множество за съответния вход на невронно-размитата структура. Те са обединени в параметъра  $\alpha_{pj}$ .

$$\alpha_{pj}(k+1) = \alpha_{pj}(k) + \eta \left( -\frac{\partial E_{FNN}}{\partial \alpha_{pj}} \right) \quad (4.11)$$

където  $E_{FNN}$  е грешката от изхода на мрежата, която е разпространена обратно към втория слой от структурата.

$$\frac{\partial E_{FNN}}{\partial \alpha_{pj}} = \frac{\partial E_{FNN}}{\partial \hat{y}} \cdot \frac{\partial \hat{y}}{\partial \mu_{pj}} \cdot \frac{\partial \mu_{pj}}{\partial \alpha_{pj}} \quad (4.12)$$

Съгласно уравнения (4.11-4.12) актуализацията за параметрите от предпоставъчната част придобива вида

$$c_{Gpj}(k+1) = c_{Gpj}(k) + \eta \varepsilon(k) \bar{\mu}_{yi}(k) \left[ f_{yi} - \hat{y}(k) \right] \frac{\left[ z_p(k) - c_{Gpj}(k) \right]}{\sigma_{pj}^2(k)} \quad (4.13)$$

$$\sigma_{pj}(k+1) = \sigma_{pj}(k) + \eta \varepsilon(k) \bar{\mu}_{yi}(k) \left[ f_{yi} - \hat{y}(k) \right] \frac{\left[ z_p(k) - c_{Gpj}(k) \right]^2}{\sigma_{pj}^3(k)} \quad (4.14)$$

## Оптимизационен алгоритъм

Чрез получения невротно-размит модел на Такаги-Сугено оптимизационният алгоритъм изчислява бъдещите стойности на управляващото въздействие във всеки такт на дискретизация. За целта се минимизира широко прилагания в МПУ целеви критерий от квадратичен вид със следната форма:

$$J(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p+H_w-1} \|\hat{y}(k+i) - r(k+i)\|^2 Q + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta\hat{u}(k+i)\|^2 R \quad (4.15)$$

където  $\hat{y}(k)$ ,  $r(k)$  и  $\Delta\hat{u}(k)$  са съответно векторите на предсказания изход на модела, заданието в системата за управление и предсказаното управляващо въздействие в момента  $k$ .  $Q \geq 0$  и  $R > 0$  са константни тегловни матрици, които осъществяват връзката между изискванията за точност на управление и големини на управляващите въздействия. Хоризонтът на предсказване, началният хоризонт на предсказване и хоризонтът на управление са отбелязани съответно с  $H_p$ ,  $H_w$  и  $H_u$ .

Целевата функция (4.15) може да се презапише в следния вид:

$$J(k) = \|Y(k) - T(k)\|^2 Q + \|\Delta U(k)\|^2 R \quad (4.16)$$

където

$$Y(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k + H_p - 1) \end{bmatrix} \quad T(k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ \vdots \\ r(k + H_p - 1) \end{bmatrix} \quad \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k + H_u - 1) \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q(2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q(H_p) \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} R(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R(2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R(H_u) \end{bmatrix}$$

Предсказаният изход също може да се запише в следната матрична форма

$$Y(k) = \Psi x(k) + \Gamma u(k-1) + \Theta \Delta U(k) \quad (4.17)$$

където

$$\Psi = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{H_p-1} \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} D \\ CB + D \\ CAB + CB + D \\ \vdots \\ C \sum_{i=0}^{H_p-2} A^i B + D \end{bmatrix} \quad \Theta = \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 \\ CB + D & D & & \vdots \\ CAB + CB + D & & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & D \\ C \sum_{i=0}^{H_p-2} A^i B + D & \dots & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C \sum_{i=0}^{H_p-2} A^i B + D & \dots & C \sum_{i=0}^{H_p-H_u-1} A^i B + D & \end{bmatrix}$$



За предсказаната грешка  $E(k)$  е валиден записът:

$$E(k) = T(k) - \Psi x(k) - \Gamma u(k-1) \quad (4.18)$$

Друга формулировка на целевия критерий се получава при заместване на изрази (4.17) и (4.18) в (4.15):

$$J(k) = \Delta U^T H \Delta U - \Delta U^T \Phi + E^T Q E \quad (4.19)$$

където

$$\Phi = 2\Theta^T Q E(k) \quad H = \Theta^T Q \Theta + R$$

Задачата за минимизирането на така получената целева функция (4.19) се разглежда като задача от квадратичното програмиране. Ако Хесианът  $H$  е положително дефиниран, то задачата за оптимизацията се разглежда като от „изпъкнал“ („convex“) тип, и решението ѝ може да се запише в следната съкратена форма:

$$\Delta U = \frac{1}{2} H^{-1} \Phi \quad (4.20)$$

Най-общо ограниченията в задачата за квадратичното програмиране (QP), може да се представят в следния вид:

$$W \Delta U(k) \leq w \quad F U(k) \leq f \quad G Y(k) \leq g \quad (4.21)$$

Размерността на матриците  $W$  и  $F$  може да се различава от тази на  $G$ , въпреки еднаквата им структура. Тъй като  $U(k)$  и  $Y(k)$  не участват в явен вид в оптимизационната задача, дефинираните по-горе ограничения могат да се запишат относно  $\Delta U(k)$ . Това води до следния запис:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ G \Theta_c \\ W \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -F_2 u(k-1) + f \\ -G(\Psi_c x(k) + \Gamma_c u(k-1)) + g \\ w \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Взимайки в предвид въведените ограничения (4.22), целевият критерий (4.15) придобива следния вид:

$$\begin{aligned} \min J(k) &= \Delta U^T H \Delta U - \Delta U^T \Phi + E^T Q E \\ \text{subject to } \Omega \Delta U &\leq \omega \end{aligned} \quad (4.23)$$

където  $\Omega \Delta U \leq \omega$  отразява (4.22).

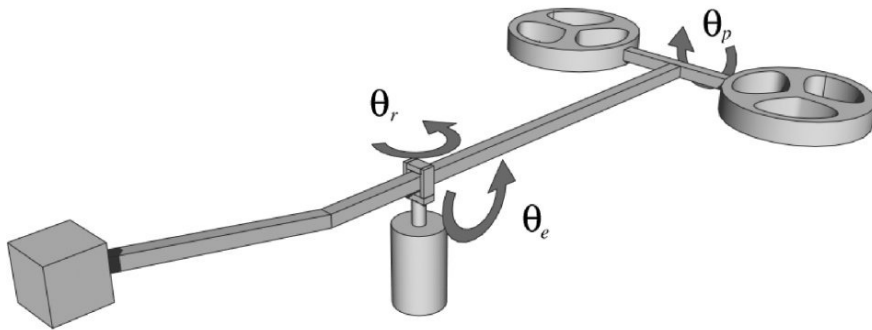
Така дефинирана оптимизационната задача е задача от квадратичното програмиране с ограничения от тип линейни неравенства (LICQP).

## **Симулационни резултати с аеродинамична система**

Разглежданият лабораторен стенд е аеродинамична система с две степени на свобода (Фиг.4.2.). Тя се състои две перки, които осигуряват маневрирането на модела. Срещуположно на тях по рамото е разположена противотежест. Моделът може да се върти около оста на неподвижната основа. На Фиг. 4.2. с  $\theta_e$  е отбелязан ъгълът между рамото и хоризонталната равнина,  $\theta_r$  е ъгълът на завъртане около оста, а  $\theta_p$  е ъгълът на гредата свързваща двете перки [4.7].

Динамиката на модела може да се опише със следните уравнения:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_e &= (K_f l_a / J_e)(V_f + V_b) - T_g / J_e \\ \ddot{\theta}_r &= -(F_a l_a / J_t) \sin \theta_p \\ \ddot{\theta}_p &= (K_f l_h / J_p)(V_f - V_b)\end{aligned}\quad (4.24)$$



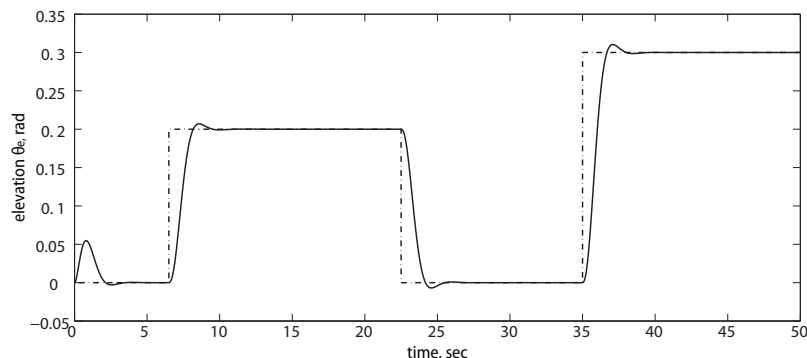
Фиг.4.2. Схема на изследвания обект –аеродинамична система

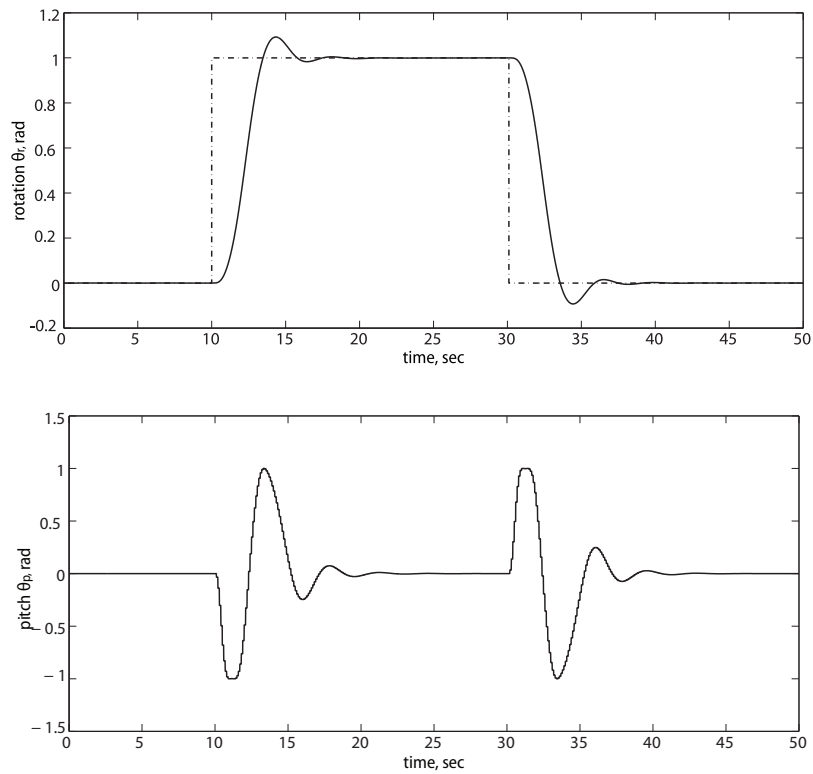
Входове за разглежданата система са напреженията на двата мотора  $V_f$  и  $V_b$ , съответно за двете перки. Напрежението варира в интервала  $[-2V; +3V]$ . Всички шест състояния  $x = [\theta_e \ \dot{\theta}_e \ \theta_r \ \dot{\theta}_r \ \theta_p \ \dot{\theta}_p]$  на системата са измерими. Ограничения са приложени на ъглите  $\theta_e$  и  $\theta_p$ .

$$-0.5 \text{ rad} \leq \theta_e \leq 0.6 \text{ rad} \quad -1 \text{ rad} \leq \theta_p \leq 1 \text{ rad} \quad (4.25)$$

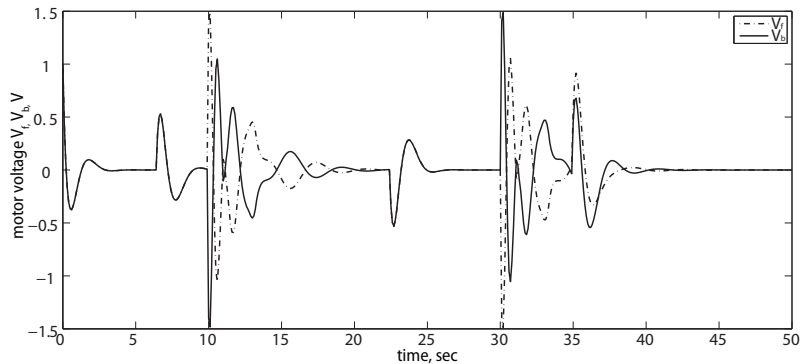
Симулационните резултати са получени при експерименти проведени със следните параметри:  $H_w=1$ ,  $H_p=30$ ,  $H_u=10$ ,  $T=50s$ . За моделиране на нелинейния обект е използван петслойна Такаги-Сугено размита невронна мрежа с по три Гаусови функции за принадлежност за всеки входно-изходен регресор.

Полученият невронно-размит модел осигурява матриците на състоянието и управлението за описанието в пространството на състоянията, които се използват при решаване на оптимизационната задача (4.23). Тегловните матрици, участващи в целевия критерий, са избрани както следва:  $Q(i)=\text{diag}([1,1])$  ;  $R(i)=\text{diag}([0.1,0.1])$ . При експеримента се управляват положенията  $\theta_e$  и  $\theta_r$ , при въведените горе ограничения за системата.





Фигура 4.3. Изходи на изследваната система при променящо се задание



Фигура 4.4. Входи на изследваната система при променящо се задание

Получените резултати показват работоспособността на предложения подход за НМПУ.

Последната графика на Фиг. 4.3. показва изхода на неуправлявания ъгъл  $\theta_p$ , за който обаче е в сила ограничение ( $-1 \text{ rad} \leq \theta_p \leq 1 \text{ rad}$ ). Вижда се, че системата достига задание, без да се нарушават ограниченията както за състоянията, така и за входовете на системата.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Невронно-рзмитият подход за моделиране на нелинейни обекти дава възможност за работа в реално време и води до добри резултати. Използването на модел на Такаги-Сугено в пространството на състоянията, опростява в значителна степен оптимизационната процедура при НМПУ, осигурявайки адекватен модел на всяка стъпка.

Моделът в пространството на състоянията позволява разглеждането на оптимизационната задача от МПУ като задача от квадратичното програмиране и най-важното - позволява включването на ограничения спрямо системните променливи. Това е от голямо значение, тъй като всички реални процеси имат ограничения спрямо параметрите си.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [4.1] Maciejowski J. M., Predictive Control with Constraints, Prentice Hall Inc., New York, USA, 2001.
- [4.2] Martinsen F., Lorenz T. Biegler, Bjarne A. Foss, A new optimization algorithm with application to nonlinear MPC, Journal of Process Control, vol.14, pp 853–865, 2004.
- [4.3] Mendonça L.F., J.M. Sousa J.M.G. Sá da Costa, Optimization Problems in Multivariable Fuzzy Predictive Control, Int. Journal of Approximate Reasoning, vol.36, pp. 199–221, 2004.
- [4.4] Qin S. J. and T. A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. Control Eng. Prac., 11(7):733 764, 2003.
- [4.5] Fletcher R. Practical Methods of Optimization.2nd.ed., Wiley, 2000
- [4.6] Ahmed S., M. Petrov, A. Ichtev, “Model predictive control of a laboratory model – coupled water tanks,” in Proceedings of International Conference Automatics and Informatics’09, October 1–4, 2009, Sofia, Bulgaria. pp. VI-33 - VI-35.
- [4.7] Johan Åkesson, MPCtools 1.0– Reference Manual, ISSN 0280-5316

## 5. РАЗМИТО УПРАВЛЕНИЕ НА АЕРОДИНАМИЧНА СИСТЕМА

### Размити регулатори.

По-голямата част от използваните размити регулатори са класически размити регулатори, които могат да се приравнят към класическите ПИД регулатори. Когато размитият регулатор има линейна управляваща повърхност той може да се разглежда като еквивалентен на класически П, ПИ или ПИД [5.3] регулатор. Тогава параметрите на размития регулатор могат да се определят като се използват вече изчислените параметри на класическия регулатор.

### **Размит П (FP) регулатор.**

Изходът на дискретния размит П регулатор се изчислява с помощта на формулата:

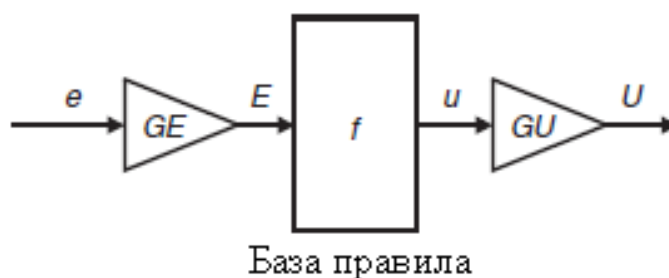
$$U(n) = f(GE * e(n)) * GU$$

където  $U(n)$  е изходния сигнал на регулатора,  $f(GE * e(n))$  показва зависимостта от правилата, използвани при размития регулатор. Когато правилата създават линейна права (закон) на управление  $f(GE * e(n))$  може да се апроксимира с:

$$f(GE * e(n)) \approx GE * e(n)$$

След заместване, изходния сигнал на регулатора добива вида:

$$U(n) = GE * e(n) * GU = GE * GU * e(n)$$



Фигура 5.1 – Блокова схема на размит П регулатор

Очевидно този регулатор има два параметъра за настройка  $GE$  - коефициент на усилване на грешката и  $GU$  - коефициент на усилване на управляващия сигнал. Коефициентът на усилване на регулатора, приравнен към класически П регулатор е :

$$GE * GU = K_p$$

## Размит ПД (FPD) регулатор

Изходът на дискретния размит ПД регулатор е:

$$U(n) = f(GE * e(n), GCD * \dot{e}(n)) * GU$$

където  $GCD$  е коефициент на усилване на първата производна

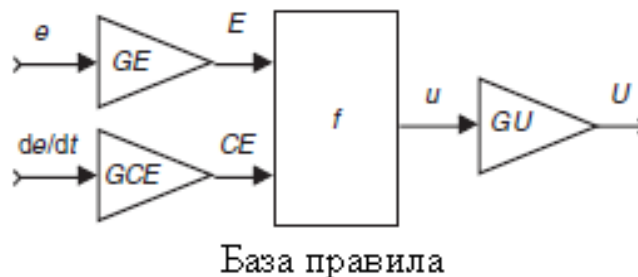
Изходът на този регулатор може да бъде приведен към стандартен ПД, ако се използва линейна повърхнина на управление. В този случай изхода на регулатора има вида:

$$U(n) = (GE * e(n) + GCD * \dot{e}(n)) * GU = GE * GU * \left( e(n) + \frac{GCE}{GE} \dot{e}(n) \right)$$

В този случай, връзката между параметрите на размития ПД регулатор и класическия ПД се дава от зависимостите:

$$GE * GU = K_p$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d$$



Фигура 5.2 – Блокова схема на размит ПД регулатор

## Размит скоростен (FInc) регулатор.

Този тип регулатор генерира изменение в управляващия сигнал ( $\Delta u$ ) спрямо текущата му стойност

$$u(n) = u(n-1) + \Delta u(n)T_s$$

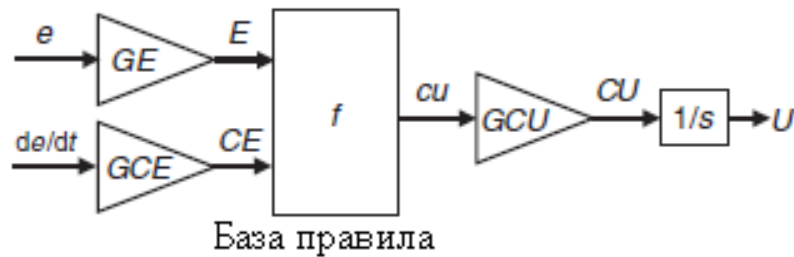
Размитият скоростен регулатор има почти същата конфигурация като размития ПД регулатор с разликата, че е добавен един интегратор. Изходът на регулатора се определя по формулата:

$$U(n) = \sum_{j=1}^n (f(GE * e(j), GCE * \dot{e}(j)) * GCU * T_s)$$

Връзката между параметрите на размития скоростен регулатор и класическия ПИД регулатор се дава от:

$$GCE * GCU = K_p$$

$$\frac{GE}{GCE} = \frac{1}{T_i}$$



Фигура 5.3 – Блокова схема на размит скоростен регулатор

### Размит ПД + И (FPD+I) регулатор

На практика в базата от правила не се добавят правила които да използват интеграла на грешката. При размития ПД + И регулатор се добавя отделно И съставка. И в този случай изходът на регулатора се изчислява по формулата:

$$U(n) \approx \left[ f(GE * e(n) + GCE * \dot{e}(n) + GIE \sum_{j=1}^n e(j)T_s) \right] * GU$$

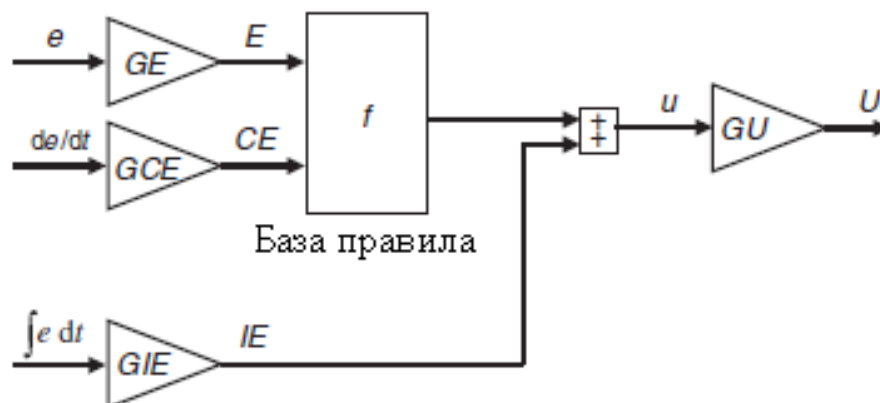
$$= GE * GU * \left[ e(n) + \frac{GCE}{GE} * \dot{e}(n) + \frac{GIE}{GE} \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right]$$

Връзката между коефициентите на размития ПД + И регулатор и класическия ПИД се дава от зависимостите:

$$GE * GU = K_p$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d$$

$$\frac{GIE}{GE} = \frac{1}{T_i}$$



Фигура 5.4 – Блокова схема на размит ПД + И регулатор

В Табл. 5.1 са дадени някои практически правила за настройка на ПИД регулатори, които могат да се използват за фина ръчна настройка на вече проектиран регулатор.

Таблица 5.1 – Влияние на параметрите на ПИД регулатор върху управлението

Действие	Скорост на изменение	Пререгулиране	Устойчивост
Увеличаване на $K_p$	По - бързо	Нараства	Намалява
Увеличаване на $T_d$	По - бавно	Намалява	Нараства
Увеличаване на $\frac{1}{T_i}$	По- бързо	Нараства	Намалява

В Табл. 5.2 са дадени връзките между коефициентите на размитите регулатори и коефициентите на ПИД регулатор.

Таблица 5.2 връзките между коефициентите на размитите регулатори и коефициентите на ПИД регулатор.

Регулатор	$K_p$	$\frac{1}{T_i}$	$T_d$
FP	$GE * GU$	-	-
FInc	$GCE * GCU$	$GE / GCE$	-
FPD	$GE * GU$	-	$GCE / GE$
FPD+I	$GE * GU$	$GIE / GE$	$GCE / GE$

В Табл. 5.3 са дадени основните предимства и недостатъци на отделните размити регулатори.

Таблица 5.3 – Основни предимства и недостатъци на отделните размити регулатори

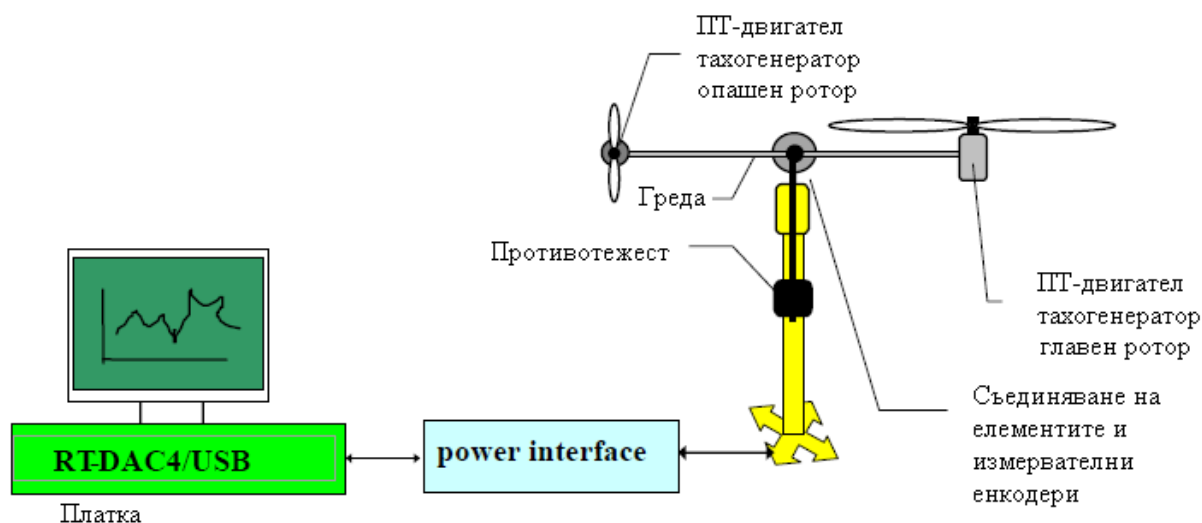
Регулатор	Предимство	Недостатък
FP	Прост	Грешка в установен режим
FInc	Премахва статичната грешка, гладък управляващ сигнал	Бавен
FPD	По – малко пререгулиране	Висока чувствителност към шумове, резки управления
FPD+I	Всичко в едно	Интегрално насищане, резки управления

### **Лабораторен стенд „аеродинамична система”.**

Експериментите са проведени и лабораторен стенд – аеродинамична система. Той е произведен от фирмата Inteco® и наподобява в много отношения поведението на хеликоптер. Лабораторния стенд се представя като нелинеен многомерен обект от висок ред. При аеродинамичната система се управляват по различни канали позицията във вертикалната равнина и хоризонталната равнина. Съществува взаимовръзка между отделните канали на управление.



Управлението на стенда става посредством компютър с инсталиран софтуер за настройка, тестове и управление. С помощта на Matlab® и Simulink® стенда може да се управлява в реално време с различни по тип регулатори. [5.5]



Фиг. 5.5 – Лабораторния стенд : система наподобяваща хеликоптер

На фигура 5.5 е показана схемата на лабораторния стенд, той се състои от греда захваната в средата така, че да може свободно да се върти в две равнини (хоризонтална и вертикална). В мястото на закрепване на гредата към стойката са разположени ендодери, които дават информация за вертикалното и хоризонталното положение на гредата. Сигналите от ендодерите представляват изходът на системата, обекта се управлява по положение (в хоризонталната равнина и във вертикалната равнина). В двата края на гредата са разположени двата ротора, които се задвижват с помощта на постояннотокови двигатели, като напреженията подавани на тези двигатели представляват входовете на обекта. Те се контролират посредством ШИМ, като използваното управление е аналогично на управлението на сервосистемата от точка 2. Единият от роторите служи за промяна на позицията във вертикалната равнина, а другият за промяна на позицията в хоризонталната равнина. Рамо с противотежест в края си, е свързано към гредата в мястото на свързването ѝ със стойката. Състоянието на системата се описва с помощта на четири променливи: хоризонтални и вертикални ъгли, измервани от ендодерите и ъгловите скорости на роторите измервани от тахогенератори свързани към постояннотоковите двигатели задвижващи роторите. Аеродинамичната сила се управлява с помощта на промяна на скоростта на въртене на роторите. Управляващите сигнали за този стенд са захранващите напрежения на постояннотоковите двигатели свързани към роторите. Промяна на напрежението води до промяна на положението на гредата. При работата си двата ротора си влияят значително.

## Регулатор за управление по хоризонтала.

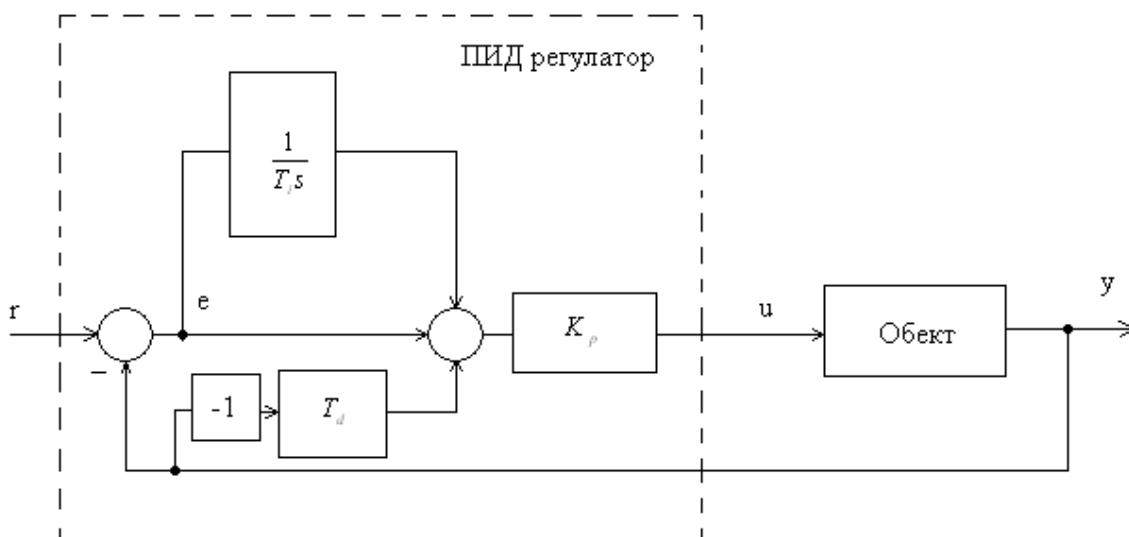
При проектирането на размит регулатор са следвани стъпките:

1. Избор на структура на регулатора.

Тъй като целта на изследването е да се постигнат възможно най-общи и най-добри качествени резултати, тук се избира регулатор от типа FPD+I със структурната схема показана на Фиг.5.4.

2. Избор на входните и изходните променливи.

При избраната структурна схема входните променливи към базата правила са грешката и първата производна на грешката, като интегралът на грешката се добавя след това като отделен елемент. Изходната променлива е управляващото въздействие подавано към обекта. В този случай структурната схема на регулатора е малко променена, вместо първата производна на грешката като входна променлива за регулатора се използва първата производна на изхода на системата, взета с обратен знак и блоковата схема е като тази на ПИД регулатор с променена структура, показана на Фиг.5.6.



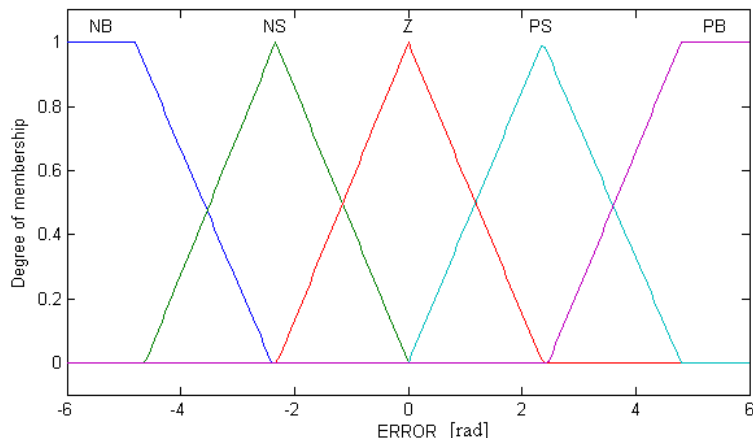
Фигура 5.6 – Блокова схема на използвания ПИД регулатор

На Фиг. 5.7 е представена графично лингвистичната входна променлива ERROR (грешка). Избран е обхват на изменение на грешката от -6 [rad] до 6 [rad]. Обхватът е избран поради физическите ограничения на лабораторния стенд и следващата от това максимална възможна грешка. Тази лингвистична променлива е разделена на пет терми, които обхващат целия диапазон на изменение. Избраните функции на принадлежност са трапецовидни и триъгълни.

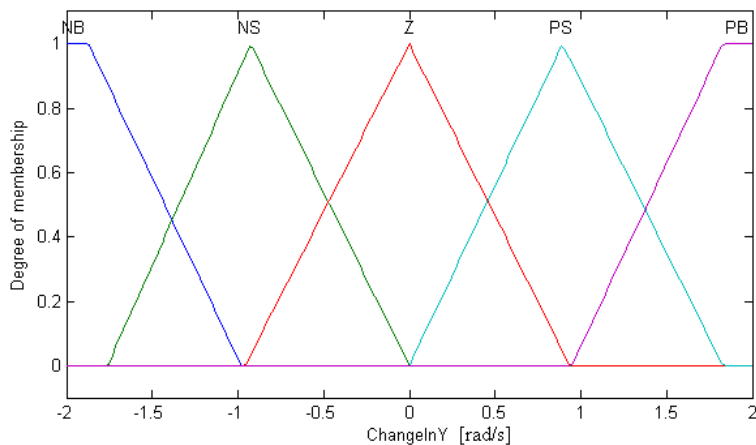
На Фиг. 5.8 е показана лингвистичната променлива ChangeInY, която представлява първата производна на изхода на обекта. Избраният обхват на изменение е от -2 [rad/s] до 2 [rad/s]. Лингвистичната променлива е разделена на пет терми за по-добро разграничаване на отделните стойности на

променливата. Отново са използвани трапецовидни и триъгълни функции на принадлежност.

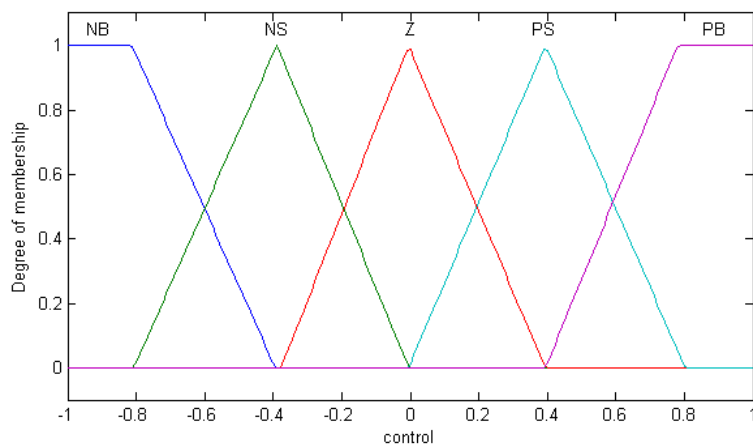
На Фиг. 5.9 е показана изходната променлива control (управление) , която отговаря на изходния сигнал на регулатора. Тя отново е разделена на пет терми и отново са използвани трапецовидни и триъгълни функции на принадлежност. Диапазонът на управление е от  $-1[\text{rad}]$  до  $1 [\text{rad}]$ . Той е избран поради използването на ШИМ управление.



Фигура 5.7 – Графично представяне на лингвистичната променлива грешка (ERROR).



Фигура 5.8 – Графично представяне на лингвистичната променлива ChangeInY.



Фигура 5.9 – Графично представяне на лингвистичната променлива control.

В графиките са използвани следните означения:

- NB – Negative big (отрицателно голямо);
- NS – Negative small (отрицателно малко);
- Z – Zero (нула);
- PS – Positive small (положително малко);
- PB – Positive big (положително голямо).

3. Избор на базата правила, с които ще работи регулатора  
 Наборът от правила за работата на размития пропорционално диференциален регулатор са представени в табличен вид в Табл 5.4.

Таблица 5.4 База правила в табличен вид за размит пропорционално диференциален регулатор

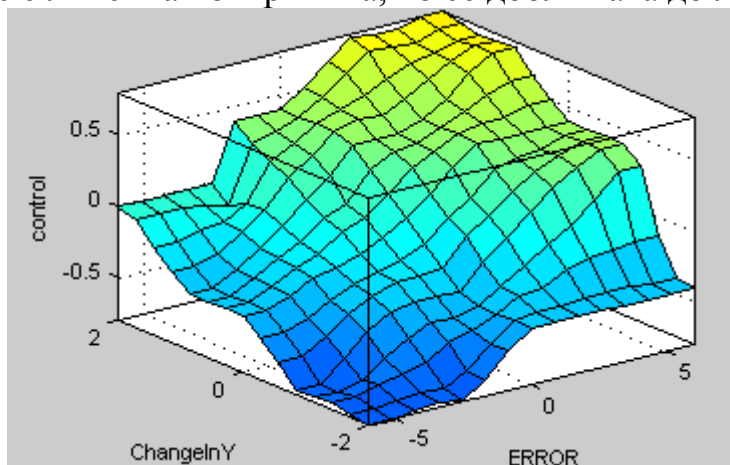
		ChangeInY				
		NB	NS	Z	PS	PB
ERROR	NB	NB	NB	NS	NS	Z
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB

На базата на Табл. 5.4 се получават 25 правила, чрез които работи регулаторът:

1. If (ERROR is NB) and (ChangeInY is NB) then (control is NB) (1)
2. If (ERROR is NB) and (ChangeInY is NS) then (control is NB) (1)
3. If (ERROR is NB) and (ChangeInY is Z) then (control is NS) (1)
4. If (ERROR is NB) and (ChangeInY is PS) then (control is NS) (1)
5. If (ERROR is NB) and (ChangeInY is PB) then (control is Z) (1)
6. If (ERROR is NS) and (ChangeInY is NB) then (control is NB) (1)
7. If (ERROR is NS) and (ChangeInY is NS) then (control is NS) (1)
8. If (ERROR is NS) and (ChangeInY is Z) then (control is NS) (1)
9. If (ERROR is NS) and (ChangeInY is PS) then (control is Z) (1)
10. If (ERROR is NS) and (ChangeInY is PB) then (control is Z) (1)
11. If (ERROR is Z) and (ChangeInY is NB) then (control is NS) (1)
12. If (ERROR is Z) and (ChangeInY is NS) then (control is NS) (1)
13. If (ERROR is Z) and (ChangeInY is Z) then (control is Z) (1)
14. If (ERROR is Z) and (ChangeInY is PS) then (control is PS) (1)
15. If (ERROR is Z) and (ChangeInY is PB) then (control is PS) (1)
16. If (ERROR is PS) and (ChangeInY is NB) then (control is NS) (1)
17. If (ERROR is PS) and (ChangeInY is NS) then (control is Z) (1)
18. If (ERROR is PS) and (ChangeInY is Z) then (control is PS) (1)
19. If (ERROR is PS) and (ChangeInY is PS) then (control is PS) (1)
20. If (ERROR is PS) and (ChangeInY is PB) then (control is PB) (1)
21. If (ERROR is PB) and (ChangeInY is NB) then (control is NS) (1)
22. If (ERROR is PB) and (ChangeInY is NS) then (control is PS) (1)

- 23. If (ERROR is PB) and (ChangeInY is Z) then (control is PS) (1)
- 24. If (ERROR is PB) and (ChangeInY is PS) then (control is PB) (1)
- 25. If (ERROR is PB) and (ChangeInY is PB) then (control is PB) (1)

При тези правила и при избраните входни и изходни променливи се получава повърхнина на управление, показана на Фиг. 5.10. От фигурата е очевидно, че това не е линейна повърхнина, но се доближава до линейната.



Фигура 5.10 – Повърхнина на управление

- 4. Избор на коефициентите на усилване на регулатора.

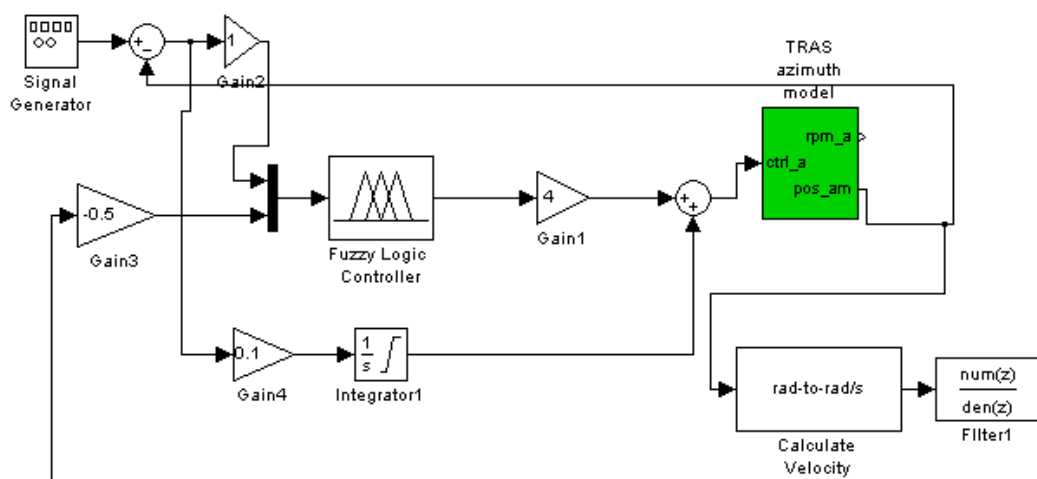
Стойностите на коефициентите на регулатора са:

$$GE = 1 \quad GCE = 0.5 \quad GIE = 0.1 \quad GU = 4$$

Еквивалентните коефициенти за ПИД регулатор биха били:

$$K_p = GE * GU = 4 \quad K_i = GIE / GE = 0.1 \quad K_d = GCE / GE = 0.5$$

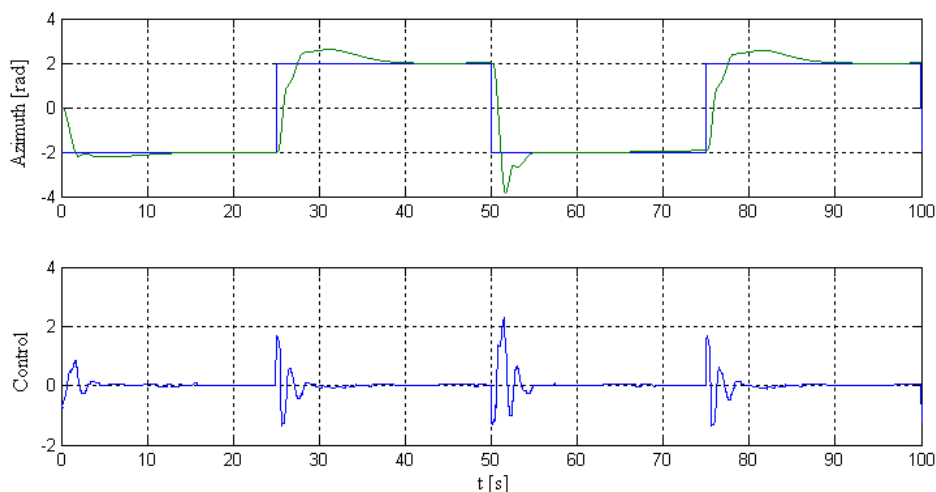
### Реализация на управлението в средата на Matlab/Simulink®



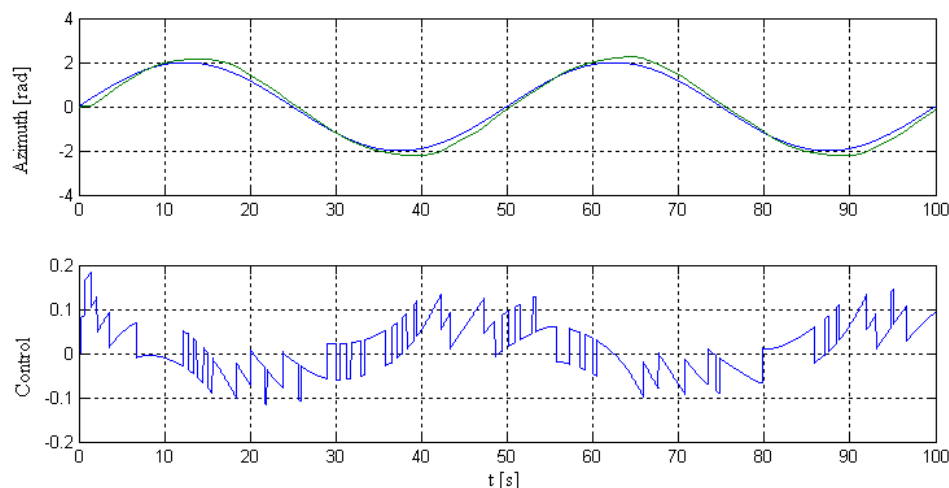
Фигура 5.11 – Блок схема използвана за симулациите в средата на Simulink®

При симулациите е използван нелинейният модел предоставен от фирмата Inteco®.

На Фиг. 5.12 са показани резултатите от симулацията, при стъпаловидно задание с амплитуда 2 [rad] и с честота 0.02 [Hz]. На горната част от фигурата е дадено заданието и изхода на системата а на долната част от фигурата е показан генерирания от FPD+I регулатор управляващ сигнал. На лабораторния стенд може да бъде подавано управляващо въздействие от -1 до 1 и за това се използва ограничител на управляващите въздействия подавани на лабораторния стенд. На долната част на Фиг. 5.12 е показан управляващият сигнал преди ограничителя.



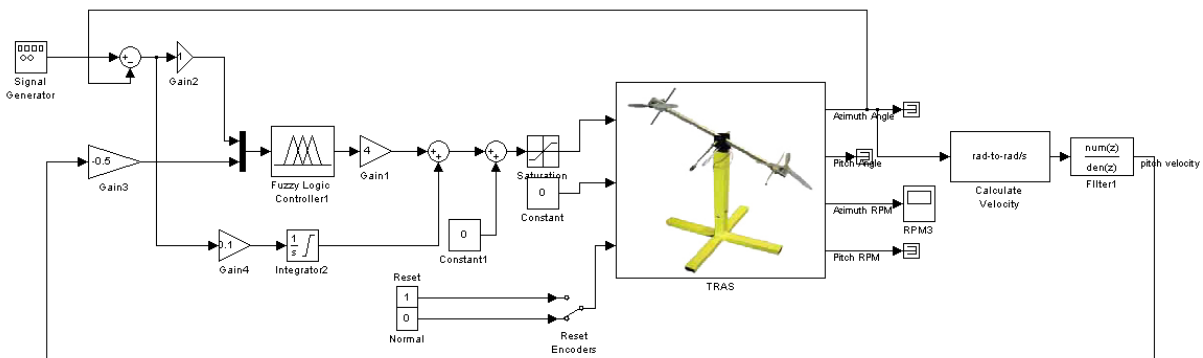
Фигура 5.12 – Резултати от симулацията при стъпаловидно задание с амплитуда 2 [rad] и с честота 0.02 [Hz].



Фигура 5.13 – Резултати от симулацията при синусоидално задание с амплитуда 2 [rad] и с честота 0.02 [Hz].

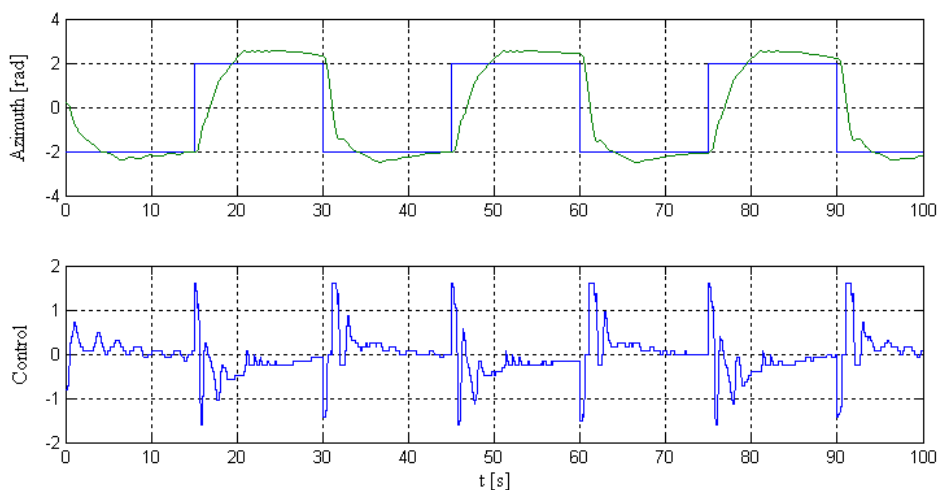
Изводи: При стъпаловидно задание системата обработва заданието със пререгулиране от 20 % и за 10 секунди, но няма грешка в установен режим. Управляващото въздействие за отработване на такова задание е значително но за кратки интервали от време. При отработване на синусоидално въздействие грешката е много малка и изходът на системата успява да следва добре заданието.

## Управление на аеродинамична система.



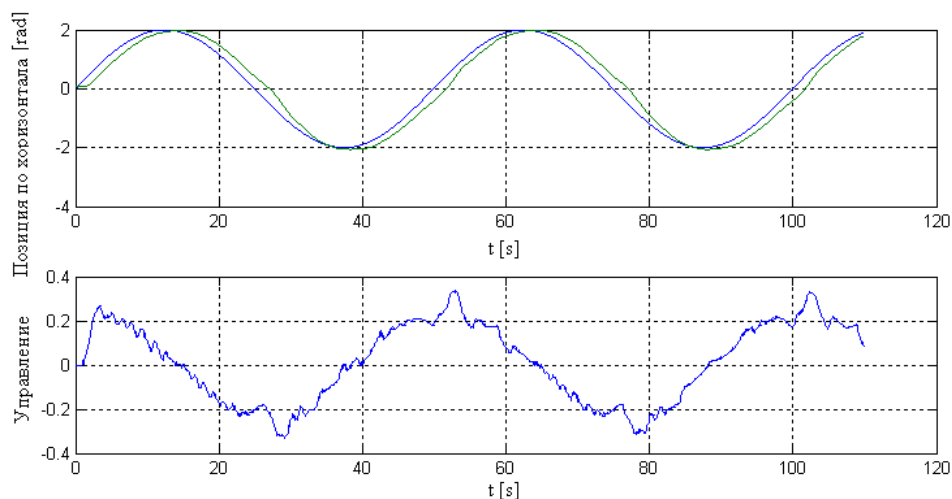
Фигура 5.14 – Блокова схема за управление на аеродинамична система

За управлението на аеродинамичната система са проведени експерименти с регулатора проектиран по-горе. Блоковата схема е показана на Фиг. 5.14. Резултатите от експериментите при стъпаловидно и синусоидално задание са показани съответно на Фиг. 5.15 и Фиг. 5.16



Фигура 5.15 – Резултати от управлението на аеродинамична система при стъпаловидно задание с амплитуда 2 [rad] и честота 0.04 [Hz].

Изводи: Резултатите значително се различават от тези получени при симулацията направена в Simulink®. Поради неточна апроксимация на реалния модел с линеен пререгулирането се запазва за значителен период, системата не може да достигне до заданието и като цяло резултатите са много незадоволителни. На Фиг. 5.15 е представено управлението на регулатора преди да бъде подадено към ограничителя на управлението.



Фигура 5.16 – Резултати от управлението на аеродинамична система при синусоидално задание с амплитуда 2 [rad] и честота 0.04 [Hz].

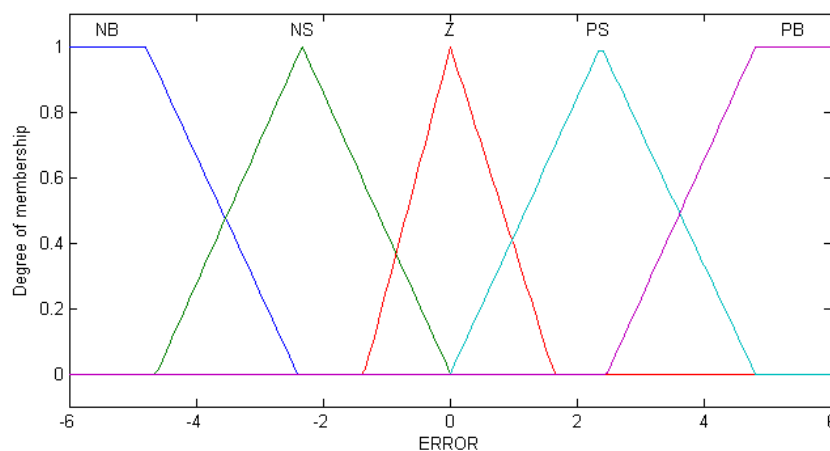
Линейния размит регулатор се справя относително добре с отработването на синусоидално задание.

Поради лошите резултати при отработване на стъпаловидно задание се налага да се промени използвания регулатор и по точно променят се правилата на работа на регулатора и в по-малка степен променливата на грешката.

При промяната на правилата използвани от регулатора са добавени още две правила. Добавени са следните правила:

- 26. If (ERROR is NS) then (control is not NS) (1)
- 27. If (ERROR is PS) then (control is not PS) (1)

Променена е и грешката на входа, като се намалява обхвата на терма „Z”. Така се намалява зоната, при която ще се активира правило генериращо нулев сигнал.

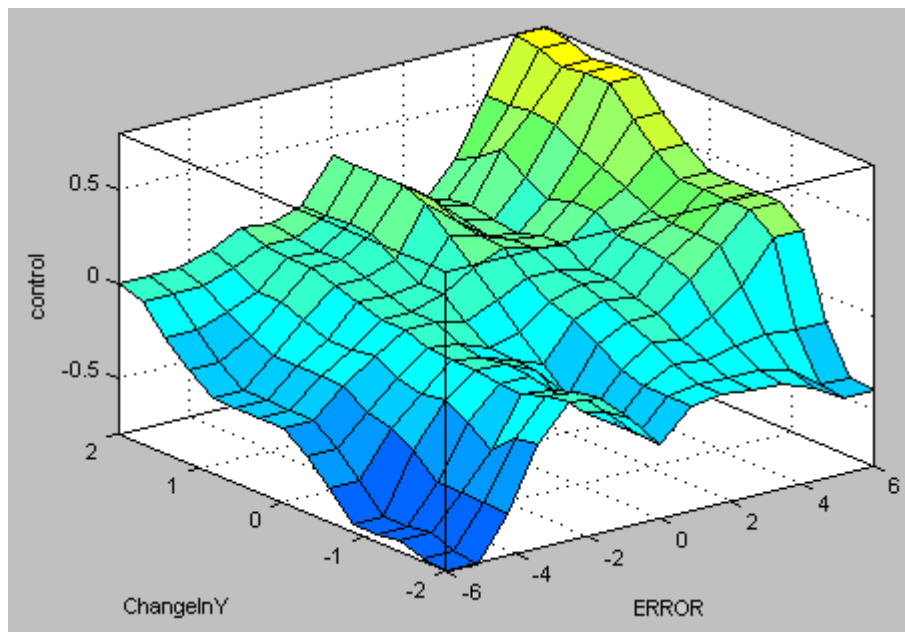


Фигура 5.17 – Графично представяне на променената лингвистичната променлива ERROR.



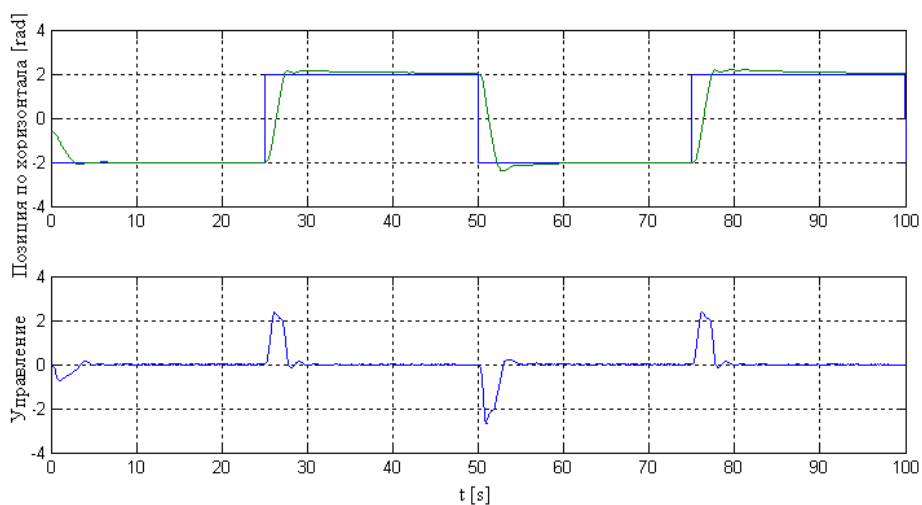
Целта на тази промяна е да се ограничи зоната, в която се приема грешката като нула, която отговаря за генериране на нулево управление. Благодарение на тази промяна може да се намали зоната, периодът от време за което има пререгулиране, тоест да се премахне пререгулирането, което се наблюдава на Фиг. 5.15.

В резултат на тези промени се променя и повърхнината на управление и тя става по-нелинейна – Фиг. 5.18.



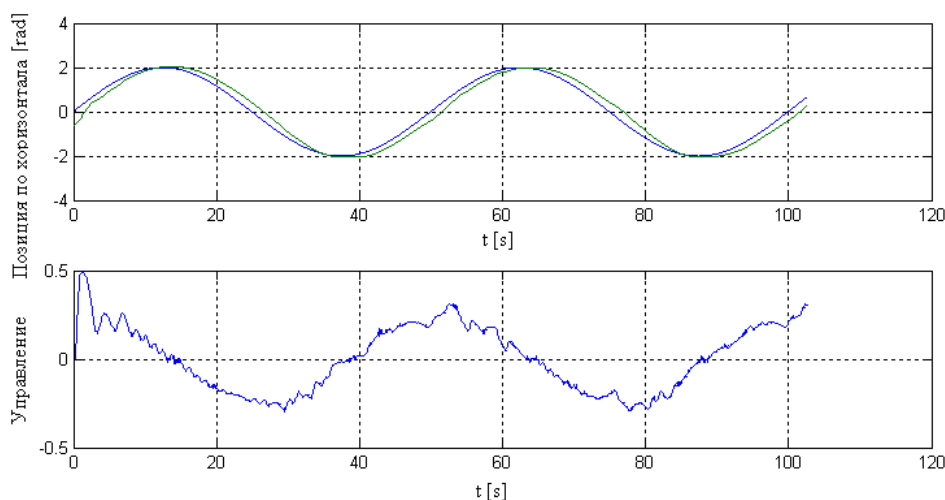
Фигура 5.18 – Променена повърхнина на управление

Тези изменения в правилата предизвикават значителна промяна в поведението на затворената система, показана на Фиг. 5.19 и Фиг. 5.20.



Фигура 5.19 – Резултат от управлението на аеродинамична система при стъпаловидно задание с амплитуда 2 [rad] и честота 0.04 [Hz]

Изводи: Резултатите са много по-добри. Пререгулирането е малко и заданието се обработва точно (заданието се обработва за около четири секунди, а пререгулирането е в приемливи граници).



Фигура 5.20 – Резултат от управлението на аеродинамична система при синусоидално задание с амплитуда 2 [rad] и честота 0.04 [Hz]

Изводи: Наблюдава се дефазирание и като цяло резултатите се доближават до тези при използване на линейния размит регулатор.

### **Реализация на регулатор за управление по вертикала.**

Проектирането на размит регулатор за управление на вертикалното положение се извършва със същите стъпки, както при синтеза на регулатора за управление на хоризонталното положение:

1. Избор на структура на регулатора.

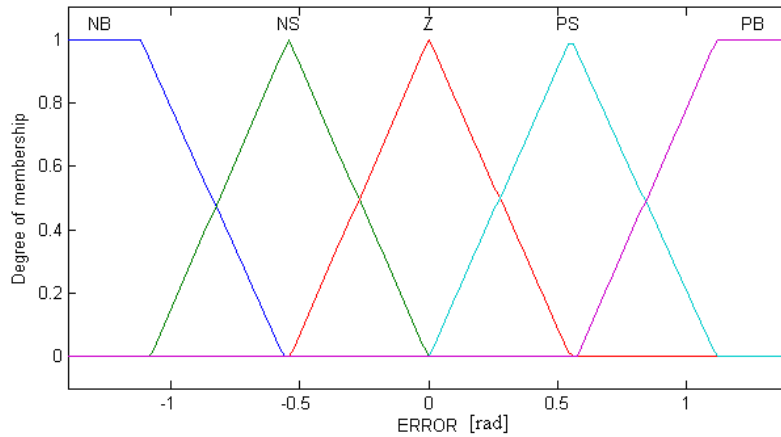
Отново се използва регулатор от типа FPD+I със структурната схема показана на Фиг. 5.4.

2. Избор на входните и изходните променливи.

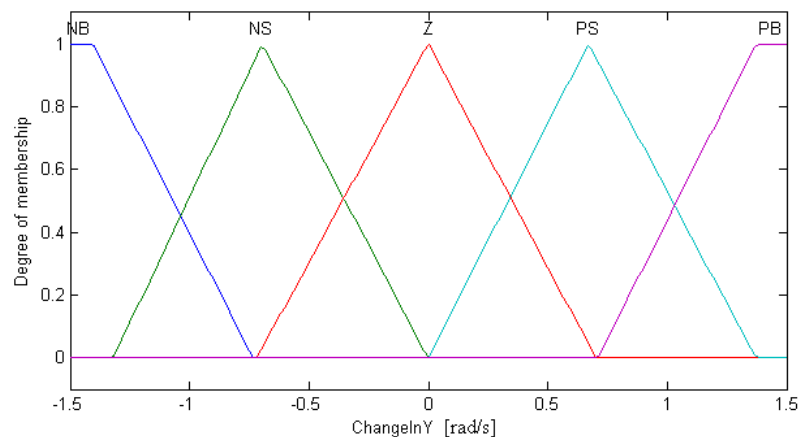
На Фиг. 5.21 е представена графично лингвистичната входна променлива ERROR (грешка). Избран е обхват на изменение на грешката от -1.4 [rad] до 1.4 [rad]. Такъв обхват е избран поради физическите ограничения на лабораторния стенд и следващата от това максимална възможна грешка. Тази лингвистична променлива е разделена на пет терми, които обхващат целия диапазон на изменение. Избраните функции на принадлежност са трапецовидни и триъгълни.

На Фиг. 5.22 е показана лингвистичната променлива ChangeInY, която представлява първата производна на изхода на обекта. Избраният обхват на изменение е от -1 [rad/s] до 1 [rad/s]. Лингвистичната променлива е разделена на 5 терми за по-добро разграничаване на отделните стойности на променливата. Използвани са отново трапецовидни и триъгълни функции на принадлежност.

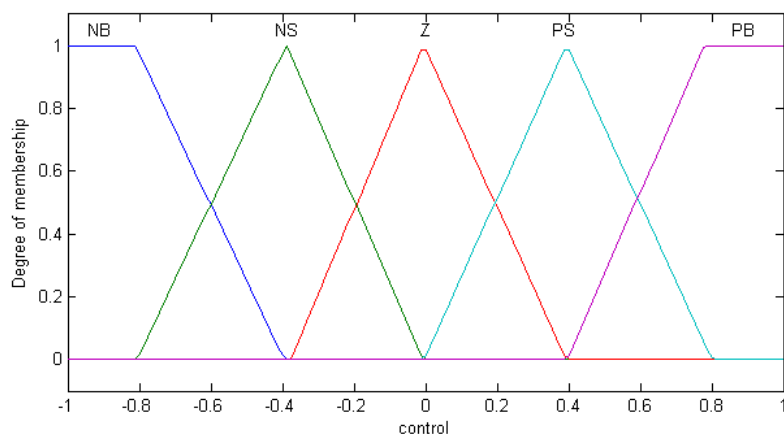
На Фиг. 5.23 е показана изходната променлива control (управление) , която отговаря на изходния сигнал на регулатора. Тя отново е разделена на 5 терми и са използвани трапецовидни и триъгълни функции на принадлежност. Диапазонът на управление е от -1 до 1, поради използването на ШИМ управление.



Фигура 5.21 – Графично представяне на лингвистичната променлива грешка (ERROR).



Фигура 5.22 – Графично представяне на лингвистичната променлива ChangeInY.

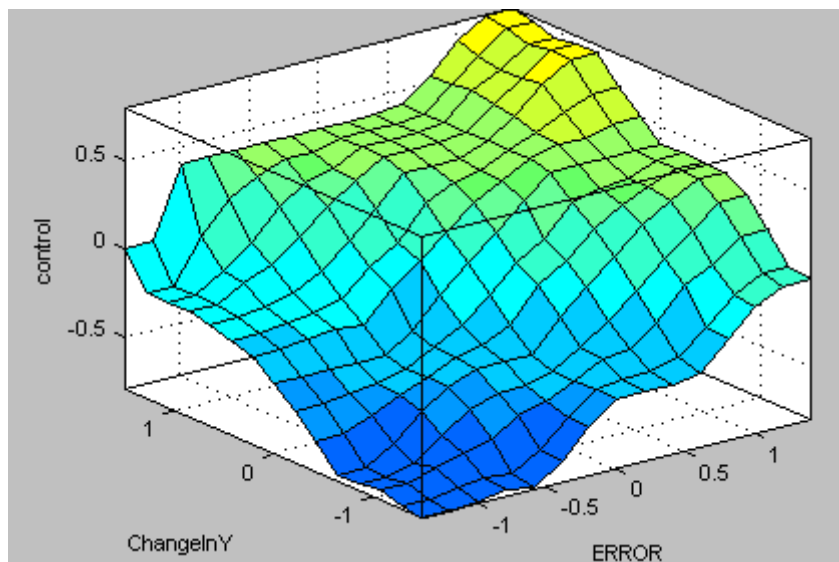


Фигура 5.23 – Графично представяне на лингвистичната променлива control.

### 3. Избор на правилата за функционирането на регулатора

Избрани са същите правила, с които работи регулаторът за управление по хоризонтала, а именно правилата показани в табличен вид в Табл. 5.4:

На базата на тези правила и избраните входни и изходни променливи се получава повърхнината на управление показана на Фиг. 5.24.



Фигура 5.24 – Повърхнина на управление

### 4. Избор на коефициентите на усилване на регулатора.

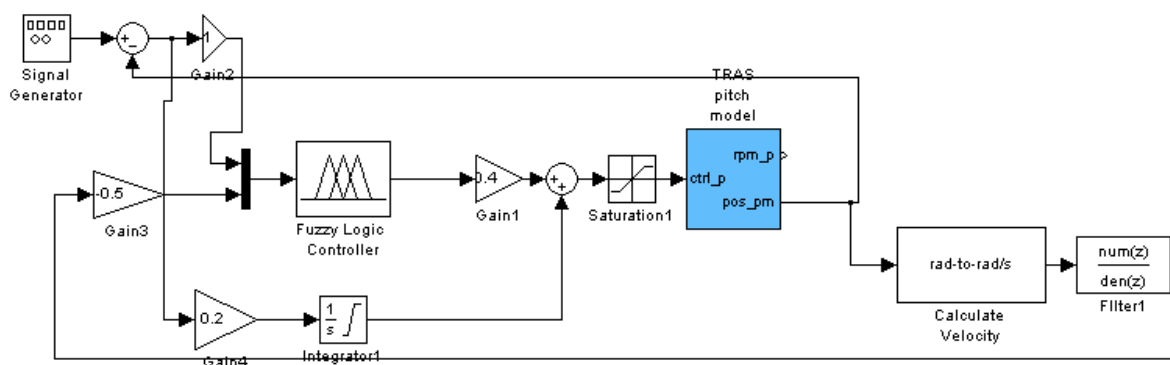
Стойностите на коефициентите на регулатора са намерени по

$$GE = 1 \quad GCE = 0.5 \quad GIE = 0.2 \quad GU = 0.4$$

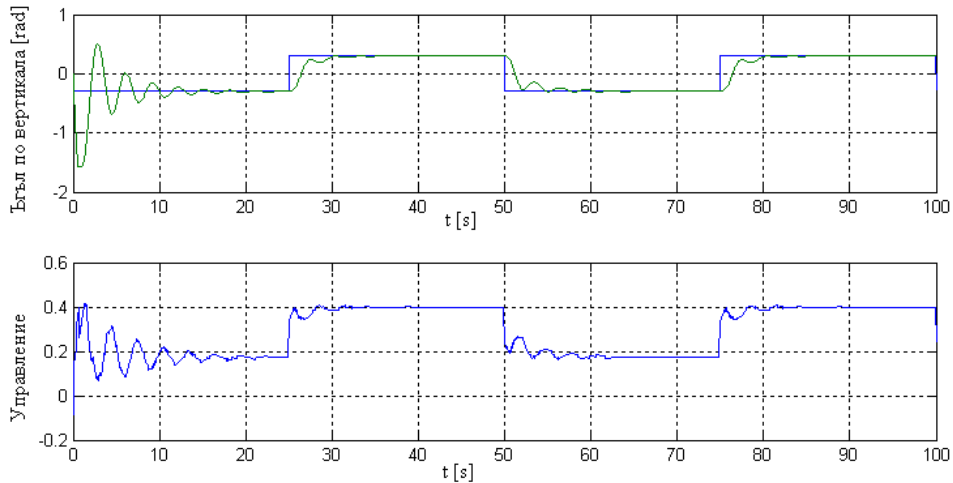
Еквивалентните коефициенти за ПИД регулатор биха били:

$$K_p = GE * GU = 0.4 \quad K_i = GIE / GE = 0.2 \quad K_d = GCE / GE = 0.5$$

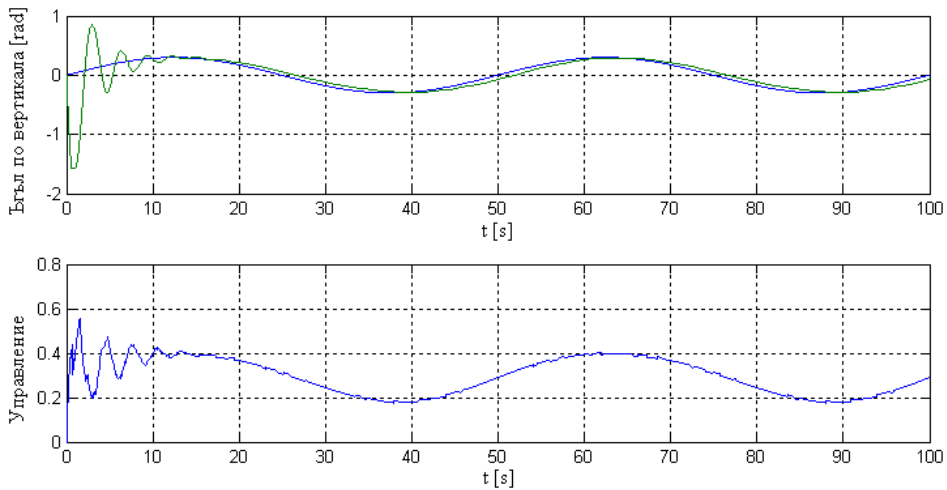
## Реализация на управлението в средата на Matlab/Simulink®



Фигура 5.25 – Блокова схема в Simulink® използвана за симулациите



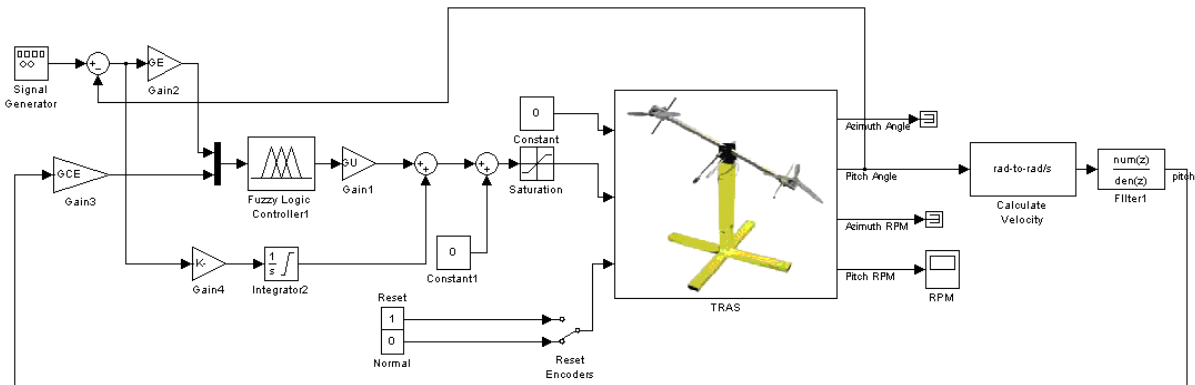
Фигура 5.26 – Резултати от симулациите в Simulink при стъпаловидно задание с амплитуда 0.3 [rad] и честота 0.02 [Hz].



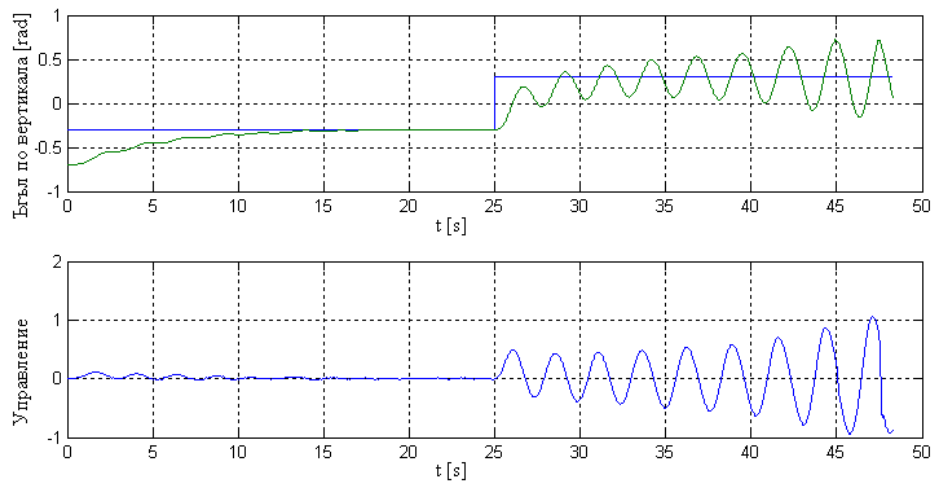
Фигура 5.27 – Резултати от симулациите в Simulink при синусоидално задание с амплитуда 0.3 [rad] и честота 0.02 [Hz].

Изводи: Резултатите от симулациите показват, че управляваната система следи заданието. При стъпаловидно задание, при преход към по-ниска позиция се получават по-големи колебания поради нелинейността на обекта.

## Управление на аеродинамична система.

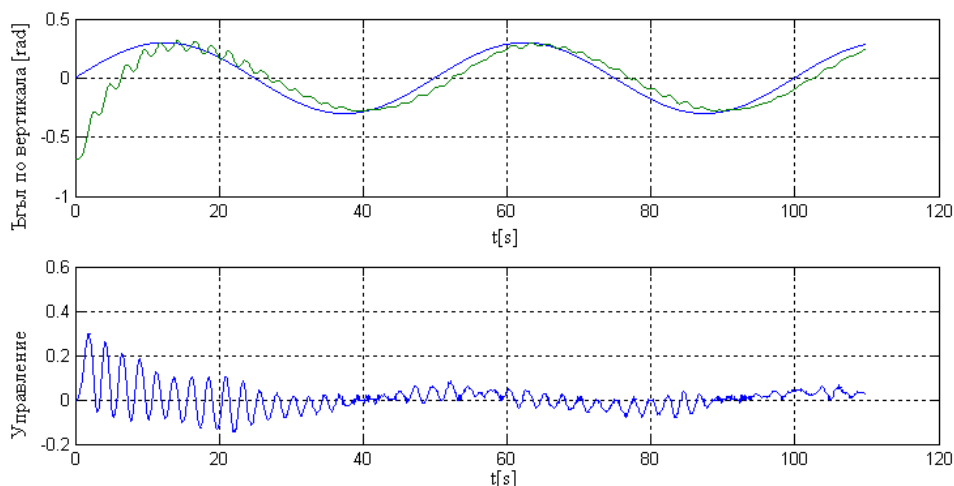


Фигура 5.28 – Блокова схема за управление на аеродинамична система



Фигура 5.29 – Резултат от управлението на аеродинамична система при стъпаловидно задание с амплитуда 0.3 [rad] и честота 0.02 [Hz]

От Фиг. 5.29 се вижда, че при управлението на реалния обект системата е силно колебателна и при промяната на заданието дори става неустойчива. На Фиг. 5.30 е показан резултатът от управлението на лабораторния стенд при подаване на синусоидално задание. Наблюдават се колебания в установен режим.

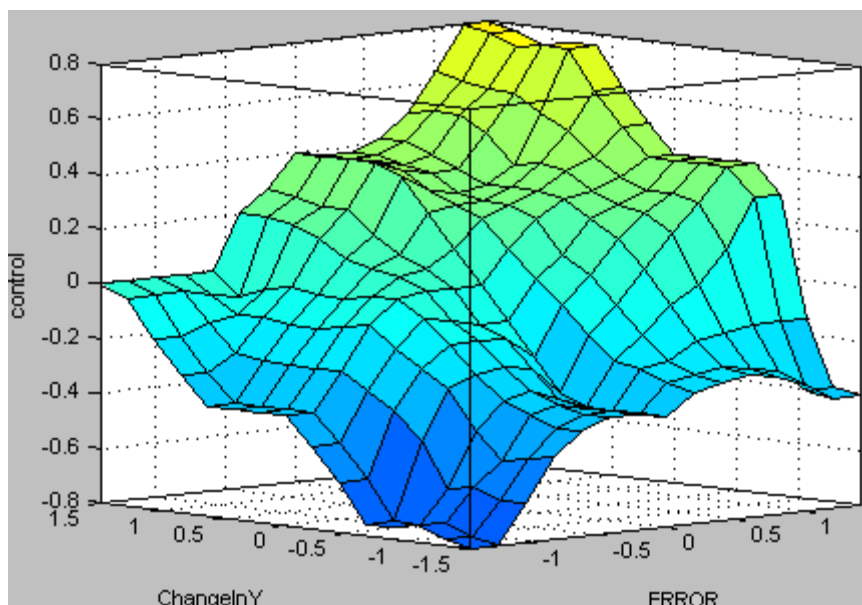


Фигура 5.30 – Резултат от управлението на аеродинамична система при синусоидално задание с амплитуда 0.3 [rad] и честота 0.02 [Hz]

Поради получените лоши резултати при управление на лабораторния стенд при управление по вертикала се променят правилата за работа на регулатора, както беше направено и при управлението по хоризонтала. Добавени са следните правила:

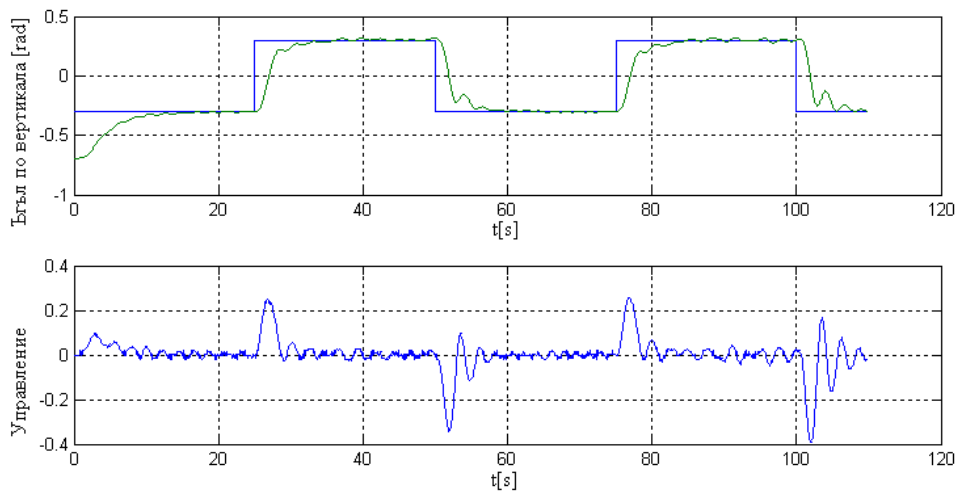
- 26. If (ERROR is NS) then (control is not NS) (1)
- 27. If (ERROR is PS) then (control is not PS) (1)

В следствие на направените промени се получава показаната на Фиг. 5.31 повърхнина на управление:

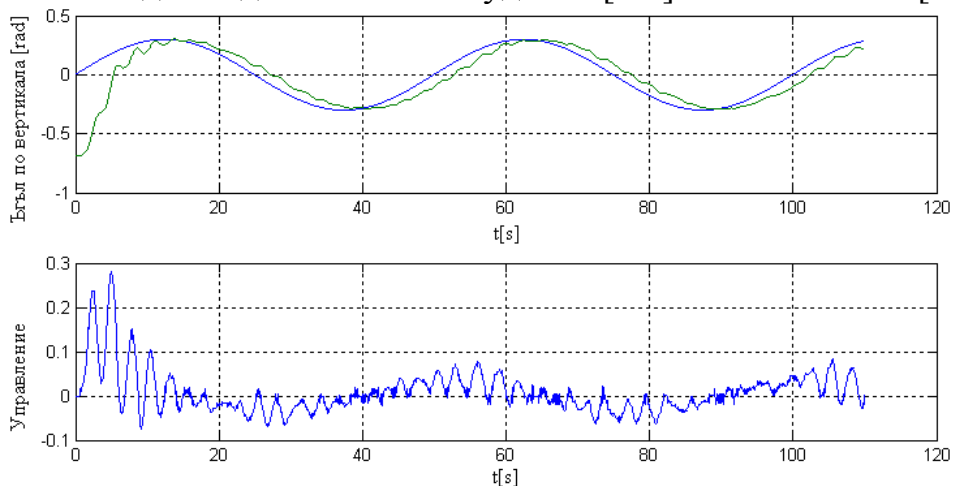


Фигура 5.31 – Променена повърхнина на управление

При направените промени се получават резултатите показани на Фиг. 5.32 и на Фиг. 5.33.



Фигура 5.32 – Резултат от управлението на аеродинамична система при стъпаловидно задание с амплитуда 0.3 [rad] и честота 0.02 [Hz]



Фигура 5.33 – Резултат от управлението на аеродинамична система при синусоидално задание с амплитуда 0.3 [rad] и честота 0.02 [Hz]

От Фиг. 5.32 и Фиг. 5.33, че системата не е неустойчива при рязка промяна на заданието и регулатора се справя със задачата за следене на заданието, но се наблюдават колебания в установен режим, както и при следене на синусоидално задание.



## **Литература**

- [5.1] В. Младенов, С. Йорданова (2006). *Размито управление и невронни мрежи*. София, Издателство на Техническия университет – София.
- [5.2] R. Babuska (2000). *Fuzzy and neural control*. Delft, Delft University of Technology.
- [5.3] J. Jantzen (2007). *Foundation of Fuzzy Control*. Wiley.
- [5.4] Е. М. Гарипов (2007). *Цифрови системи за управление. Част I. Проектиране на ПИД регулатори*. София, Издателство на Техническия университет – София.
- [5.5] Ръководство на двуроторна аеродинамична система на фирмата *Inteco*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В съответствие с работната програма за първата година на проект N 102ни046-08, колективът изпълни всички предвидени задачи:

- Проучвания и анализ на съвременното състояние на методите и съществуващите алгоритми за многомоделно и предсказващо управление, за откриване, изолиране и компенсирание на неизправности.
- Съставяне на подходящи модели на обектите и системите визирани в проекта. Съставяне на банки от модели, обхващащи различните работни режими и/или неизправности;
- Разработка и/или модификация на методи и алгоритми за управление на обектите, за откриване и за компенсирание на неизправности;
- Програмна реализация и тестване на алгоритмите;
- Подготовка на публикации.

Основните резултати с научно-приложен характер могат да се резюмират по следния начин:

- Предложен е многомоделен подход за откриване и компенсирание на неизправности. Той включва начин за съставяне на моделно множество от хибридни модели, което множество описва системата както в изправен режим, така и при наличието на различни, включително частични, не включени пряко в основното множество, неизправности;
- Предложен е алгоритъм за откриване и изолиране на неизправности, базиран на оптимизационна процедура. Той не изисква предварително познаване на вероятността за настъпване на съответна неизправност и, за разлика от класическите методи за управление при неизправности, осъществява безударно управление. Предложен е и алгоритъм, който използва уравнения на подобие. С него се постига нечувствителност на процедурата за откриване и изолиране на неизправности към определен брой смущения в системата, както и към измервателен шум;
- Предложени са три метода за управление при неизправности. Един от тях използва претеглена сума от управляващи сигнали. Другите два са базирани на схеми за модифициране на заданието и за реконструиране на измерваните променливи, чрез които се осъществяват компенсация на частични неизправности в измервателни и изпълнителни устройства;
- Предложен е алгоритъм за моделно предсказващо управление на нелинейни обекти. Обектът се моделира с помощта на невроно-размити модели от тип Такаги-Сугено. За да се осигури работа в реално време, са взети мерки за ускоряване на изчислението на управляващия сигнал;

- Предложен е размит модел на аеродинамична система и размит ПИД регулатор. Разгледани са въпросите за синтез и настройка на регулатора, за осигуряване на по-добро управление на конкретния нелинеен модел.
- Алгоритмите са реализирани програмно. Извършени са симулационни експерименти и/или реални експерименти върху лабораторни стендове, повечето от които (аеродинамични и следяща системи) имат отношение към визираните в проекта възобновяеми енергийни източници.
- Получените от колектива резултати са отразени в девет публикации по този проект.

В проекта се отчита значение, на задачите по използване на възобновяеми енергийни източници, в частност - хидро и вятърни генератори. За това **за втората година на проекта** се предвижда експерименталните изследвания на предлаганите алгоритми да се провеждат върху лабораторни стендове, които имат отношение към подобни системи. Такива изследвания бяха реализирани частично още през настоящата година върху наличните стендове - аеродинамични и следяща системи, които са близки по тип на използвани системи във ветрогенераторите. Тези изследвания са отразени по-горе отчета и в публикациите на колектива по проекта. Изследванията, разбира се, ще продължат и през втория етап на проекта, като ще бъдат обхванати и системи, имащи отношение и към хидрогенераторите. За тях още през тази година са осигурени условия в лабораториите, включително и доставено по друг проект допълнително оборудване на налични лабораторни физически модели (резервоари, устройства моделиращи обектите).

В работата по първия етап участваха (в различна степен) всички членове на колектива. Най-голямо е участието на: доц. Александър Ищев (участва активно в работата по всички раздели), на докторанта Севил Ахмед и гл. ас. Албена Танева (по моделното предсказващо управление, където се подготвя и глава от книга в международно издателство) и на проф. Камен Ищев (проучване на съвременното състояние на теорията и практиката на управлението, насоките за нейното развитие и отражението и в учебния процес). Гл. ас Андрей Йончев и студентката Гергана Йорданова разработиха въпросите по приложението на линейно матрични неравенства и приложението на многомоделно управление за работа на системата дори и след настъпването на неизправности и публикуваха своите резултати. Работата на останалите членове беше основно свързана с литературен обзор и участие в дискусиите по проекта.

## ФИНАНСОВ ОТЧЕТ ЗА ПЪРВАТА ГОДИНА

Съгласно план-сметката по проекта най-голям дял от средствата (4790лв.) са предвидени за дълготрайни (3665 лв.) и краткотрайни (1125 лв.) активи. Те са изразходвани напълно и в съответствие със спецификацията по договора по следния начин:

- 3216,60 лв. за доставената от Швейцария специализирана цифрова система за управление на безчетков двигател 24TKI83011 MCK28355 DSP кит за управление, която се използва за доокомплектовка на лабораторна аеродинамична система;
- 798,34 лв. за 2 броя захранвания за кита;
- 775 лв. за заявените в спецификацията книги, трансмитер, инструменти, и консумативи.

От заявените в план-сметката 1100 лв. за публикуване на резултати по проекта са изразходвани 1063,30 лв., с които са заплатени 6 такси за правоучастие на членове на колектива в конференциите.

От заявените в план-сметката 1100 лв. за командировки са изразходвани 591,30 лв., с които е осигурено участието на членовете на колектива в конференциите.

Към настоящия момент не са изразходвани предвидените средства за рецензиране на отчета (160 лв.) и за възнаграждения на колектива (3850 лв.). Предлага се последните да бъдат разпределени както следва:

- за четирима членове, (включително и докторанта), които участваха активно в подготовката, работата и публикуване на резултатите и работят по написване на глава от книга по предсказващо управление в западно издателство, се предлагат възнаграждения от порядъка на 700-800 лв.
- за двама от членовете на колектива (включително и един от студентите), които изнесоха доклади по проекта, са предвиждат по 200 лв.
- за останалите членове, за участие в прегледа на литературата и в обсъжданията по проекта се предвиждат по 100 лв.

10.11.2010 г.

Ръководител на проекта:

/доц. д-р Александър Ищев/