



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

маг. инж. Иван Веселинов Григоров

# АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на ОНС "ДОКТОР" на тема:

**РЕКУРСИВНИ МЕТОДИ ЗА ОЦЕНЯВАНЕ В АДАПТИВНИ  
СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ**

по докторска програма „Теория на автоматичното управление“  
към професионално направление 5.2 „Електротехника,  
електроника и автоматика“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Наско Атанасов

Рецензенти:

1 .....

2 .....

Варна, 2022г.

Дисертационният труд е обсъден на 21.12.2022г. в катедра „Автоматизация на производството“ и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Автоматизация на производството“.

Автор: *маг. инж. Иван Веселинов Григоров*

Заглавие: *Рекурсивни методи за оценяване в адаптивни системи за управление*

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

маг. инж. Иван Веселинов Григоров

# **АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за присъждане на ОНС “ДОКТОР“ на тема:

## **РЕКУРСИВНИ МЕТОДИ ЗА ОЦЕНЯВАНЕ В АДАПТИВНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ**

по докторска програма „Теория на автоматичното управление“  
към професионално направление 5.2 „Електротехника,  
електроника и автоматика“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Наско Атанасов  
Дисертационният труд съдържа 217 страници, от които 171  
страници основен текст, включително 104 фигури и 2 таблици в

Варна, 2022г.

основния текст на дисертацията. Материалът е оформен в 4 глави, завършващи с обобщения и изводи. Списъкът на използваната литература включва 169 заглавия, от които 39 на кирилица и 130 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на.....г. от ..... ч. в ,,....., на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../г.

**МАТЕРИАЛИТЕ ПО ЗАЩИТАТА (ДИСЕРТАЦИЯТА, РЕЦЕНЗИИТЕ И СТАНОВИЩАТА) СА НА РАЗПОЛОЖЕНИЕ НА ИНТЕРЕСУВАЩИТЕ СЕ ВЪВ ФД „ДОКТОРАНТИ“, СТАЯ 318 НУК.**

## ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Актуалност на проблема

Адаптивните системи и техните приложения са една от най-бързо развиващите се изследователски области през последните години. Ролята им нараства силно с развитието на микропроцесорната изчислителна техника. Това се дължи на по-гъвкавата техника за обработка на сигнали, развитието на нови технологии и нарастващата производителност на изчислителни и управляващи устройства. Рекурсивните методи за оценяване на параметри удовлетворяват изискванията към алгоритмите за идентификация в реално време тъй като имат голямо бързодействие и малък обем на паметта, като те изработват новите оценки на параметрите чрез корекция на старите, определени на предните етапи. С помощта на рекурсивните методи за идентификация могат да се получат математични модели на стационарни и нестационарни процеси, намиращи широко приложение в съвременните адаптивни системи за управление. Това обуславя актуалността на проблема.

### Същност на проблема

Основният проблем на настоящата дисертация се отнася до изследване на възможностите на различните модификации на база на метода на най-малките квадрати за оценяване на параметри в адаптивни системи.

### Цел и задачи на дисертационния труд

На база на направения литературен обзор е формирана следната цел на дисертационния труд:

### **ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ НА ГОЛЯМОТО РАЗНООБРАЗИЕ ОТ РЕКУРСИВНИ МОДИФИКАЦИИ НА БАЗА НА МЕТОДА НА НАЙ-МАЛКИТЕ КВАДРАТИ И ИНСТРУМЕНТАЛНАТА ПРОМЕНЛИВА ПРИ ПАРАМЕТРИЧНА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ДИНАМИЧНИ ОБЕКТИ.**

Постигането на тази цел е свързано с решаване на следните основни **задачи**:

- 1) Обзор на приложението на адаптивните системи и извеждане на изискванията към методите за оценяване на параметри.
- 2) Запознаване с особеностите и свойствата на по-често използваните класически варианти на методи за оценяване на параметри.
- 3) Извеждане на алгоритми за рекурсивни варианти на методи за оценяване на параметри в реално време. За целта: разработване на функции в средата на MATLAB.
- 4) Прилагане на рекурсивните варианти на методи за оценяване на параметри при параметрична идентификация на линейни и нелинейни типови модели. За целта: разработване на алгоритми и m-файлове в средата на MATLAB и изследване на възможностите на различните рекурсивни варианти на класическите методи за оценяване на

- параметри при използване на зашумени и незашумени данни.
- 5) Прилагане на рекурсивни методи за оценяване на параметри при параметрична идентификация на конкретни динамични обекти. За целта: разработване на алгоритми и m-файлове в средата на MATLAB и изследване на възможностите на рекурсивни методи за оценяване на параметри при идентификация на разглежданите обекти.
  - 6) Изводи и заключения. Насоки за бъдеща работа.

### **Обект и предмет на изследване**

Предмет на дисертационния труд е разработване на алгоритми и m-файлове в средата на MATLAB за параметрична идентификация на база на рекурсивни варианти на метода на най-малките квадрати и инструменталната променлива на:

- 1) Линейни и нелинейни типови модели;
- 2) Конкретни физични обекти:
  - Опростен ARX обект от втори ред
  - постояннотоков двигател с независимо възбуждане;
  - двумасова електромеханична система;
  - Реален постоянно токов двигател с независимо възбуждане;

### **Методи и изследователски техники**

За решаване на поставените задачи са използвани следните методи и изследователски техники: компютърно моделиране; симулационни изследвания; метод на най-малките квадрати; тестване на алгоритми.

### **Място на изследване**

Дисертационният труд е разработен по време на докторантурата в ТУ - Варна. Като основен инструмент е използвана програмната среда MATLAB. Работата е мотивирана от желанието да се приложат и да се изследват възможностите на рекурсивни методи за оценяване при идентификация на обекти в реално време в адаптивни системи за управление.

### **Апробация на резултатите**

Основните теоретични и приложни резултати от дисертационния труд са представени в общо 5 публикации, от които:

- 1 доклад на Ш<sup>та</sup> научна конференция с международно участие „Годишник на Технически Университет-Варна“, 2015 г., Варна, България;
- 1 доклад на конференция „51st International scientific conference on information, communication and energy systems and technologies, 2016“, 4 - 6 October 2016, Varna, Bulgaria;
- 1 доклад в списание „Computer science and technologies“, 2016;
- 1 доклад в списание „Computer Science and Technologies“, 2017;
- 1 доклад на научна конференция с международно участие „Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, Varna, Bulgaria;

Конференцията „51st International scientific conference on information, communication and energy systems and technologies, 2016 “ е индексирана в международната научна база данни „SCOPUS“.

### **Структура и обем на дисертацията**

Дисертационният труд е разработен в обем от 217 страници, разпределен между Увод, Списък на използваните означения и съкращения, 4 глави, Обобщения и заключения, Насоки за бъдеща работа, Научно-приложни и приложни приноси, Научни публикации, свързани с дисертационния труд, Списък на използваната литература, Приложения и Съдържание.

## **СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **ГЛАВА I. Същност на адаптивни системи за автоматично управление**

В първа глава е разгледана актуалността на проблема и е описана същността на системите за адаптивно управление. Извършен критичен анализ на това къде е нужна тяхната употреба. Описани са видовете системи за адаптивно управление и техните особености. Разгледани са начините за проектиране на адаптивен регулатор.

### **ГЛАВА II. Методи за оценка на параметри в адаптивни системи за управление**

Разгледани са особеностите на идентификацията в реално време и някои от най-често използваните класически методи за оценка на параметри. Изведени са основните изискванията към алгоритмите за идентификация в реално време, използвани в адаптивни системи за управление.

### **ГЛАВА III. Рекурсивни версии на класическите методи за оценка на параметри**

Изведени са алгоритми използващи рекурсивни версии на метода на най-малките квадрати и метода на инструменталната променлива за оценяване на параметри в реално време. Определени са критериите, по които се извършва оценяването. Въз основа на създадените алгоритми са разработени функции в средата на Matlab. Тези функции са с изграден потребителски интерфейс с вградена защита от некоректно въведени данни. С помощта на разработените m-функции са проведени редица експериментални изследвания с цел да се провери надеждността и точността им при рекурсивно оценяване на параметри в адаптивни системи. Разгледани са алгоритми за рекурсивно робастно оценяване на параметри в адаптивни системи за управление. Разгледано е бързодействието и точността на различните рекурсивни методи

за оценяване на параметри в адаптивни системи за управление. Въз основа на направените анализи са направени съответните изводи и заключения.

## **ГЛАВА IV. Експериментални изследвания и резултати**

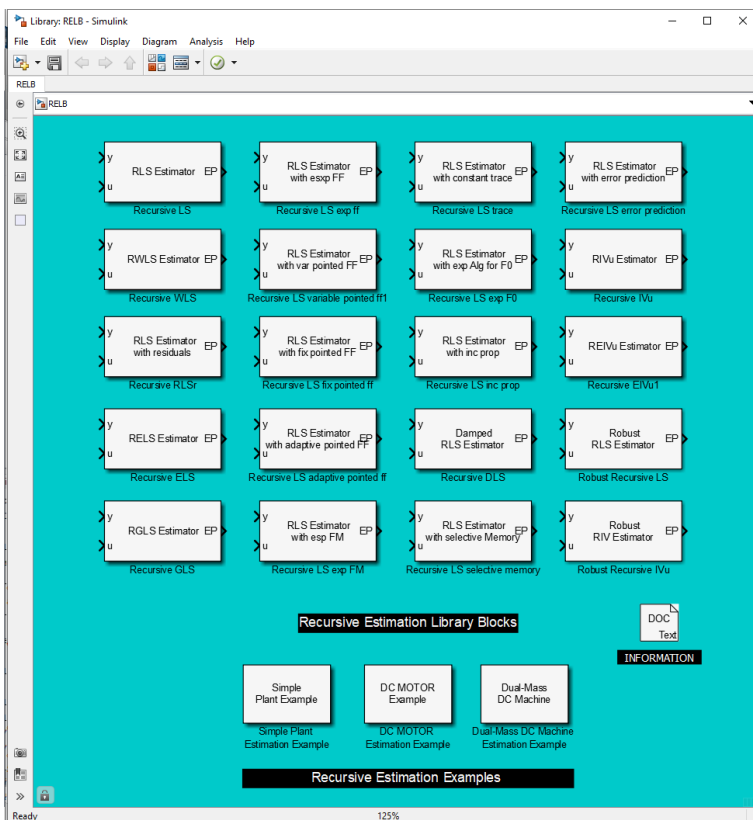
### **4.1. Експериментални изследвания**

Разгледаните рекурсивни методи за оценяване на параметри в адаптивни системи са едни от по-често използваните, като съществуват много техни модификации. С цел изследване на работоспособността, възможностите и надеждността на описаните вече рекурсивни методи за оценяване на параметри е разработена библиотека в програмната среда Matlab/Simulink. За тази цел са направени функционални блокове за рекурсивно оценяване на параметри в реално време както следва: рекурсивен метод най-малките квадрати(RLS), рекурсивен претеглен метод най-малките квадрати(RWLS), рекурсивни най-малките квадрати с отчитане на остатъците вместо грешката(RLSr), рекурсивни разширени най-малки квадрати(RELS), рекурсивни обобщени най-малки квадрати(RGLS), рекурсивен метод на най-малките квадрати с експоненциален фактор на забравяне(RLSexpFF), рекурсивен метод на най-малките квадрати с променливо-експоненциален фактор на забравяне (RLSvpff), рекурсивен метод на най-малките квадрати с фиксиран насочен фактор на забравяне (RLSfppf), рекурсивен метод на най-малките квадрати с адаптивно насочен фактор на забравяне (RLSapff), рекурсивен метод на най-малките квадрати с експоненциално забравяща матрица (RLSexpFM), рекурсивен метод на най-малките квадрати с алгоритъм за постоянно проследяване (RLStrace), рекурсивен метод на най-малките квадрати с експоненциален алгоритъм за забравяне и нулиране (RLSexpF0), рекурсивната инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop), рекурсивен метод на заглушените най-малки квадрати (RDLS), адаптивен оценяване със селективна памет (RLSSM), рекурсивен метод за предвиждане на грешката (RLSerpred), рекурсивен метод на инструменталната променлива(RIVu), рекурсивен разширен метод на инструменталната



променлива (REIVu), рекурсивни робастни най-малки квадрати(RRLS), рекурсивен робастен метод на инструменталната променлива (RRIVu). Към библиотеката са изработени модели на обикновена система(Simple Plant), постоянно токов двигател с независимо възбуждане и управление посредством широчинно-импулсна модулация (PTDNV) и двумасова електромеханична система с управление посредством широчинно-импулсна модулация (Dual-Mass DC Machine).

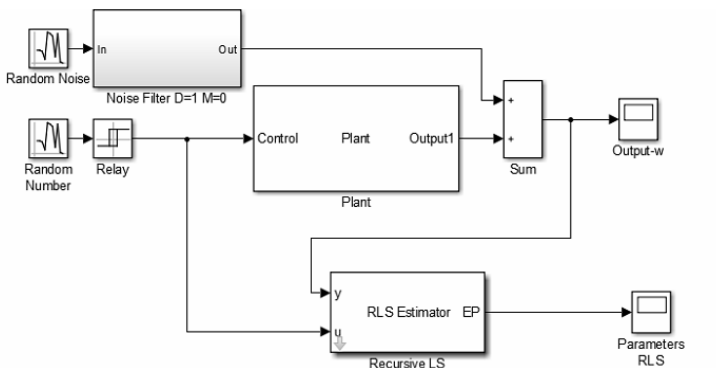
#### 4.1. Библиотека за рекурсивно оценяване



Фиг.4.1. Графичен прозорец на библиотеката за рекурсивно оценяване

Всеки един блок от направената библиотека предоставя възможност на оператора да променя параметри както на изпитвания модел така и на използвания метод за оценяване на параметрите на модела.

### 4.1.1. Модел на система

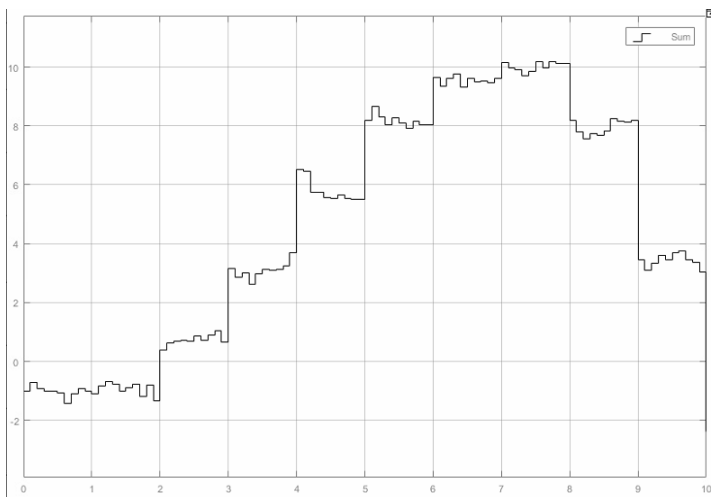


Фиг.4.2.а) Блок схема на система Simple Plant

Предавателната функция на блока Plant е следната:

$$W = \frac{1 + 0.5z^{-1}}{1 - 1.5z^{-1} + 0.7z^{-2}}$$

Фиг.4.2.а) представлява опростен ARX обект от втори ред със случайно входно въздействие и случаен шум с дисперсия D=1 и математическо очакване M=0.



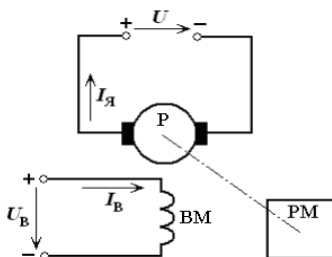
Фиг.4.2.б) Изход на системата със случайно входно въздействие

От резултатите в тази част се забелязва, че при рекурсивния метод на най-малките квадрати с отчитане на остатъците вместо грешката (RLS<sub>r</sub>),

рекурсивния метод на най-малките квадрати с експоненциален фактор на забравяне (RLSexpFF), рекурсивния метод на най-малките квадрати с адаптивно насочен фактор на забравяне (RLSapff), рекурсивния метод на най-малките квадрати с инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop), заглушените най-малки квадрати (RDLS), рекурсивен метод за предвиждане на грешката (RLSerpred), рекурсивен метод на инструменталната променлива (RIVu) и рекурсивен разширен метод на инструменталната променлива (REIVu) имат най-големи пикове и отклонения в изчислителната процедура. Това се дължи на факта, че тези методи е по-добре да бъдат използвани при по-динамични системи, когато има промяна на параметрите в течение на времето или за по-кратки процеси. За тях са нужни допълнителни настройки от страна на фактора на забравяне. В тези изследвания той е зададен идентично за всички системи, като единствено в непретегления вариант на рекурсивния метод на най-малките квадрати е единица. При рекурсивния метод на най-малките квадрати с експоненциален фактор на забравяне (RLSexpFF), рекурсивния метод на най-малките квадрати с адаптивно насочен фактор на забравяне (RLSapff), рекурсивния метод на най-малките квадрати с инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop), заглушените най-малки квадрати (RDLS) и рекурсивния метод за предвиждане на грешката (RLSerpred) това може да се коригира с използване на прозореца за настройка на текущия алгоритъм като се зададат различни граници на фактора на забравяне според алгоритъма, времетраенето на процеса и външните смущения. С така изработената библиотека за рекурсивно оценяване чрез прозорците за настройка тези промени могат да бъдат лесно направени от потребителя според изискванията на алгоритъма и изследвания обект, като не е нужно той да има дори начални познания в програмирането и идентификацията.

#### 4.1.2. Постоянно токов двигател с независимо възбуждане

Принципно устройство на двигатели за постоянен ток е показано на Фиг.4.3., където РМ е работна машина, ВМ е възбудителна намотка, а Р е ротор.

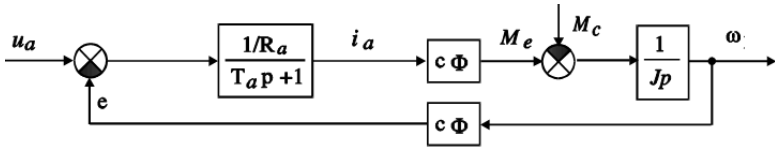


Фиг.4.21.Принципно устройство на ПТД

Динамичните свойства на постоянно токовия и двигател са описани с системата

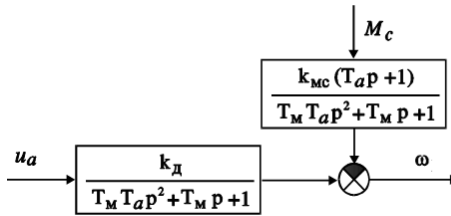
$$\begin{cases} u_a = R_a(T_a p + 1)i_a + c\Phi\omega \\ M_e = c\Phi i_a \\ M_e - M_c = Jp\omega \end{cases} \quad (4.1.1)$$

представена чрез структурната схема[26].



Фиг.4.22. Структурна схема на ПТД

която може да бъдат преобразувана в:

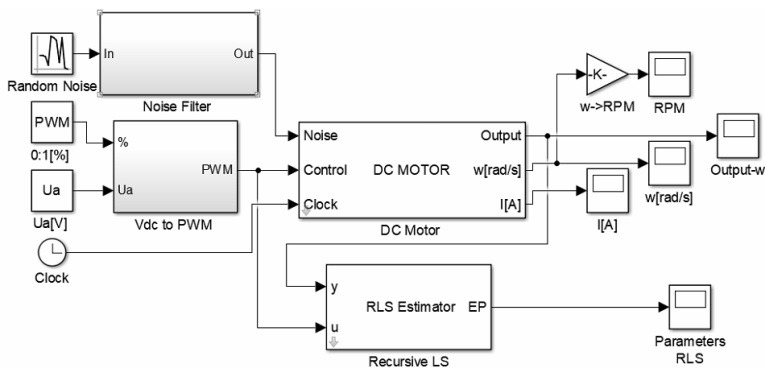


Фиг.4.23. Структурна схема на ПТД след преобразуване

където

$$\omega(p) = \frac{k_d}{T_m T_a p^2 + T_m p + 1} u_a(p) - \frac{k_{mc}(T_a p + 1)}{T_m T_a p^2 + T_m p + 1} M_c(p) \quad (4.1.2)$$

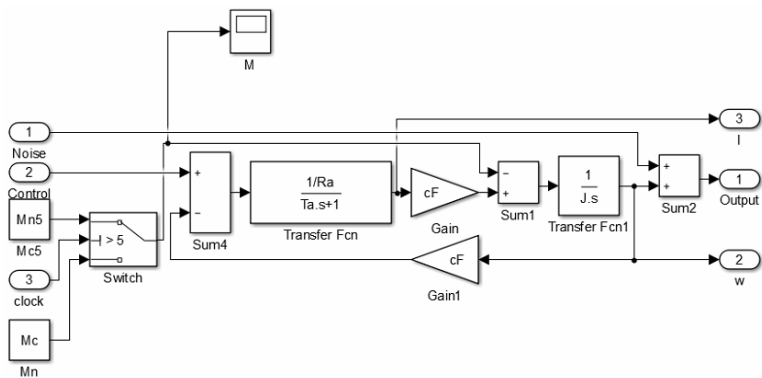
$$k_d = \frac{1}{c\Phi}; \quad k_{mc} = \frac{R_a}{(c\Phi)^2}; \quad T_a = \frac{L_a}{R_a}; \quad T_m = \frac{J R_a}{(c\Phi)^2} \quad (4.1.3)$$



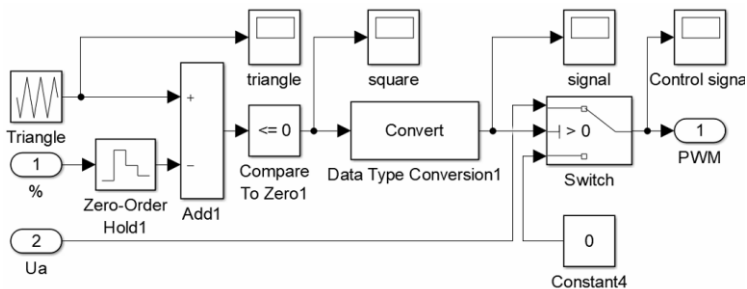
Фиг.4.24.Блок схема на система PTDNV

За база на модела на ПТДНВ е използван ПТД Pivt 6/25-3А. Параметрите на двигателя са изобразени на фиг. 4.27[26]

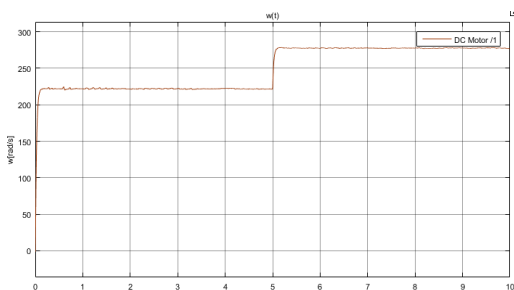
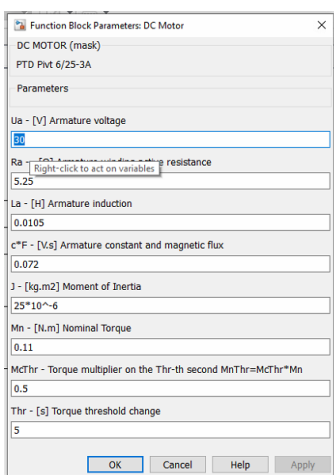
Чрез блока “0:1%” се задава импулсия сигнал от 0 до 100 % за регулиране на скоростта на постоянно токовия двигател.



Фиг.4.25.Блок схема на ПТД с независимо възбуждане



Фиг.4.26.Блок схема на широчинно импулсен преобразувател ( $V_{dc}$  to PWM)

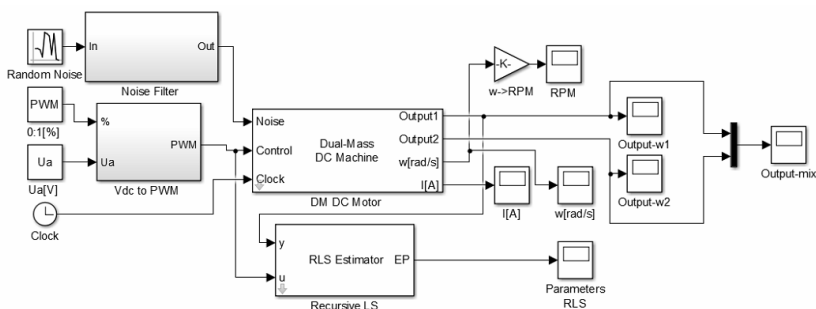


Фиг.4.27.Прозорец за промяна на параметрите и време характеристиката на ПТДНВ

От резултатите в тази част се забелязва, че при рекурсивния метод на най-малките квадрати с адаптивно насочен фактор на забравяне (RLSapff), рекурсивния метод на най-малките квадрати с експоненциален алгоритъм за забравяне и нулиране (RLSexpF0), рекурсивния метод на най-малките квадрати с инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop), рекурсивен метод за предвиждане на грешката (RLSerpred), рекурсивния разширен метод на инструменталната променлива (REIVu) имат най-големи пикове и отклонения в изчислителната процедура. Забелязва се, че те се установяват значително бързо, но с големи отклонения спрямо другите методи. Това се дължи на факта, че при тези методи е нужна по-голяма честота

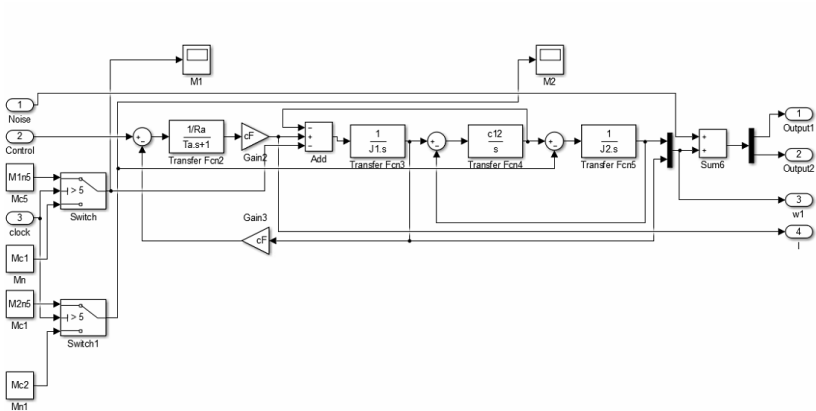
на дискретизация заради по-дългата изчислителна процедура. За тях са нужни допълнителни настройки също от страна на фактора на забравяне. В тези изследвания той е зададен идентично за всички системи, като единствено в непретегления вариант на рекурсивния метод на най-малките квадрати е единица. При рекурсивния метод на най-малките квадрати с адаптивно насочен фактор на забравяне (RLSapff), рекурсивния метод на най-малките квадрати с експоненциален алгоритъм за забравяне и нулиране (RLSexpF0), рекурсивния метод на най-малките квадрати с инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop) и рекурсивния метод за предвиждане на грешката (RLSerpred) това може да се коригира с използване на прозореца за настройка на текущия алгоритъм като се зададат различни граници на фактора на забравяне според алгоритъма, времетраенето на процеса и външните смущения. С така изработената библиотека за рекурсивно оценяване чрез прозорците за настройка тези промени могат да бъдат лесно направени от потребителя според изискванията на алгоритъма и изследвания обект, като не е нужно той да има дори начални познания в програмирането и идентификацията. При използването на методите в различни адаптивни системи тези настройки също трябва да бъдат съобразени с изискванията на адаптивния алгоритъм.

#### 4.1.3. Двумасова електромеханична система



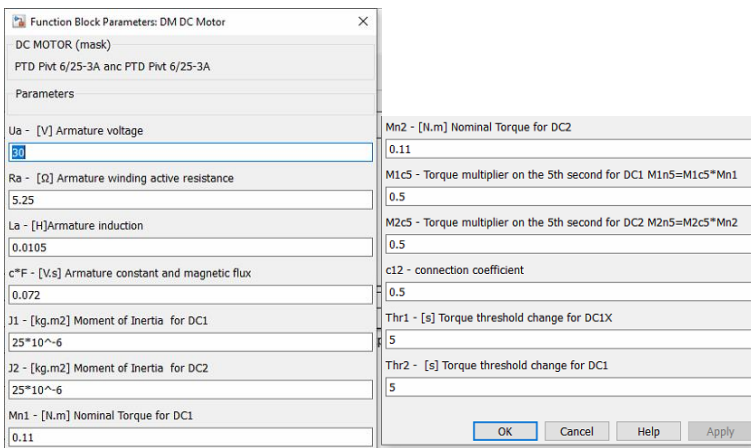
Фиг.4.46.Блок схема на система Dual-Mass DC Machine

За база на модела на двумасовата електромеханична система са използвани два броя ПТД Pivt 6/25-3A.



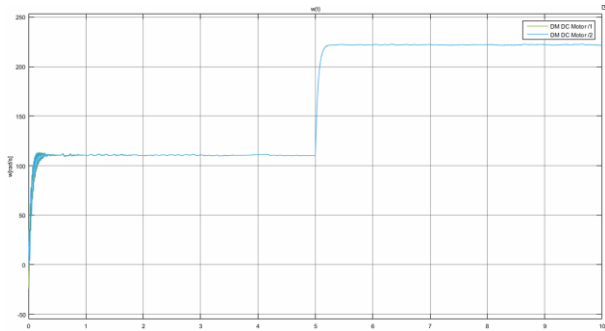
Фиг.4.47.Блок схема на двумасова електромеханична система

Параметрите на двумасовата електромеханична система са изобразени на фиг. 4.48. Всеки един от параметрите и на двата двигателя, както коефициента на връзката между тях може да бъде променен по желание на оператора.



Фиг.4.48.Прозорец за промяна на параметрите на двумасовата електромеханична система



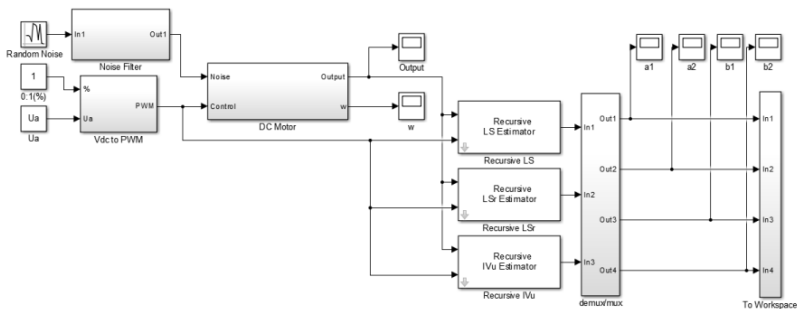


Фиг.4.49.Време характеристика на двумасовата електромеханична система

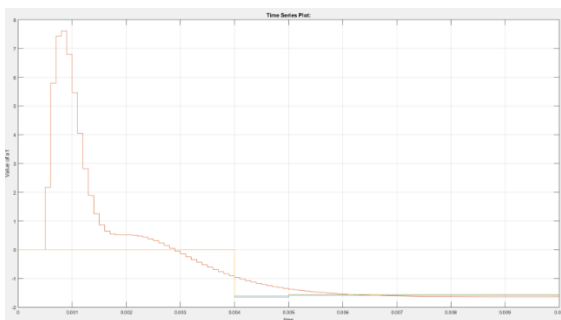
От резултатите в тази част се забелязва, че при рекурсивния метод на най-малките квадрати с алгоритъм за постоянно проследяване (RLStrace), рекурсивния метод на най-малките квадрати с инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop), адаптивно оценяване със селективна памет (RLSSM), рекурсивния разширен метод на инструменталната променлива (REIVu) имат най-големи пикове в изчислителната процедура. Забелязва се, че те се установяват значително бързо, но с големи отклонения спрямо другите методи. Това се дължи на факта, че при тези методи е нужна по-голяма честота на дискретизация в случая заради по-дългата изчислителна процедура. За тях са нужни допълнителни настройки също от страна на фактора на забравяне. В тези изследвания той е зададен идентично за всички системи, като единствено в непретегления вариант на рекурсивния метод на най-малките квадрати е единица. При рекурсивния метод на най-малките квадрати с инкрементална оценка на пропускливостта (RLSincprop) и адаптивно оценяване със селективна памет (RLSSM) това може лесно да се коригира с използване на прозорца за настройка на текущия алгоритъм като се зададат различни граници на фактора на забравяне според алгоритъма, времетраенето на процеса и външните смущения. С така изработената библиотека за рекурсивно оценяване чрез прозорците за настройка тези промени могат да бъдат направени от потребителя според изискванията на алгоритъма и изследвания обект. При използването на методите в различни

адаптивни системи тези настройки също трябва да бъдат съобразени с изискванията на адаптивния алгоритъм.

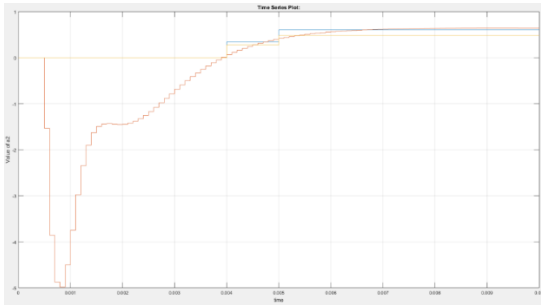
За сравнение между RLS, RLSr I RIVu е използвана системата показана на фиг.4.68.



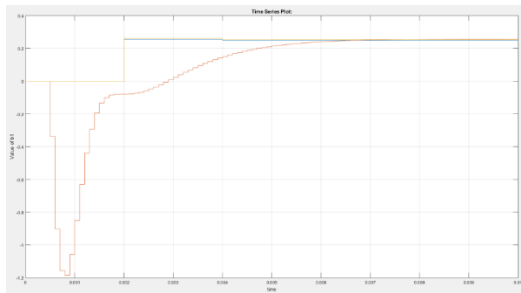
Фиг.4.68.Блок схема на управление на ПТД с ШИП с рекурсивно оценяване в реално време в Simulink



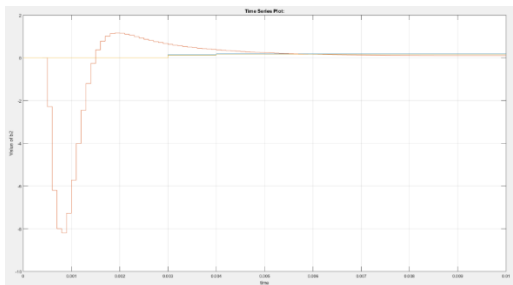
Фиг.4.69. Оценка на параметъра a1- RLS(c),RLSr(ч),IIVu(ж)



Фиг.4.70. Оценяване на параметъра  $a_2$ - RLS(c),RLSг(ч),IVu(ж)



Фиг.4.71. Оценяване на параметъра  $b_1$ - RLS(c),RLSг(ч),IVu(ж)



Фиг.4.72. Оценяване на параметъра  $b_2$ - RLS(c),RLSг(ч),IVu(ж)

На таблица 1 са представени реалните и оценените стойности на обекта след като е сведен до ARX модел. С дискретна предавателна функция:

$$W(z) = \frac{0,2405z^{-1} + 0,1748z^{-2}}{1 - 1,591z^{-1} + 0,6065z^{-2}}$$

Реални	a1	a2	b1	b2
стойности на параметрите	-1.591	0.6065	0.2405	-0.1748
Оценени стойности с RLS	-1.591	0.6066	0.2413	-0.1744
Оценени стойности с RLSr	-1.592	0.6064	0.2401	-0.1745
Оценени стойности с RIVu	-1.590	0.6066	0.2415	-0.1750

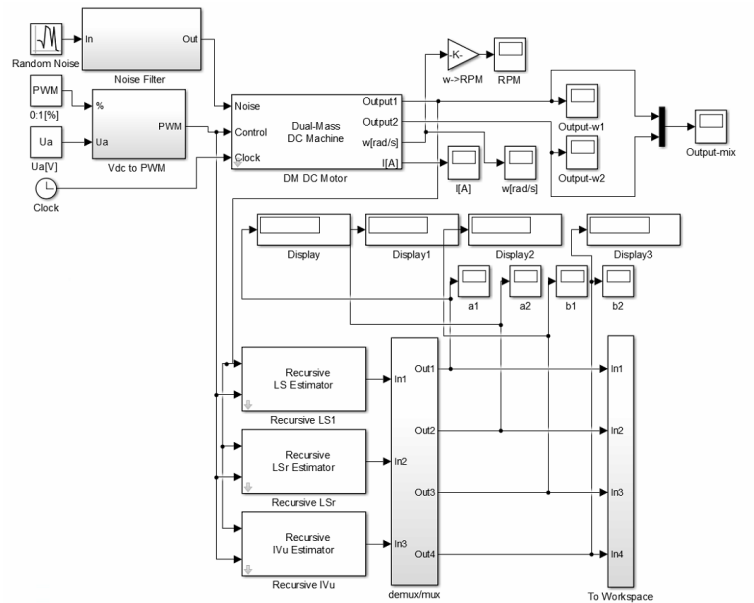
Таблица.1- сравнение между реални и оценени стойности на параметрите

При различен избор на теглата могат да се получат различни робастни оценки, които могат да бъдат нечувствителни към зашумяването.

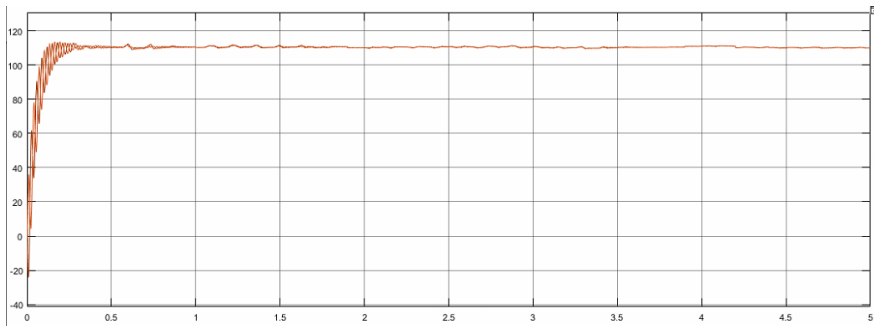
Рекурсивните методи за оценяване на параметри разгледани в тук могат да бъдат използвани в областта за надеждност и диагностика за откриване на неизправности и тяхната корекция.

Анализираните рекурсивни методи за оценяване на параметри са едни от най-надеждните методи за оценяване в реално време, като те могат да бъдат модифицирани за по-добро бързодействие и използвани в по-сложни адаптивни системи за управление.

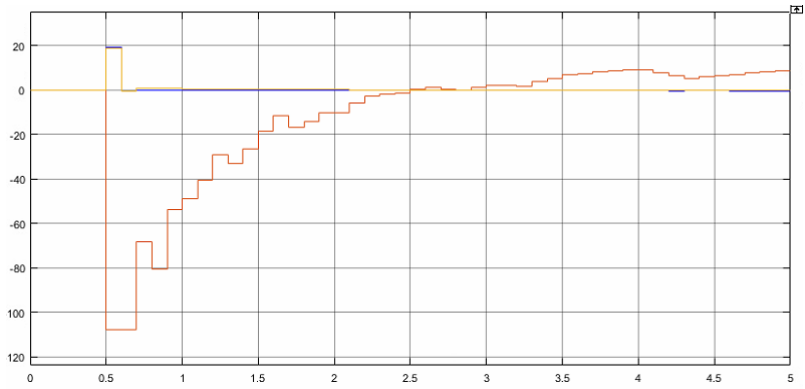
За сравнение между RLS, RLSr I RIVu е използвана системата показана на фиг.4.73.



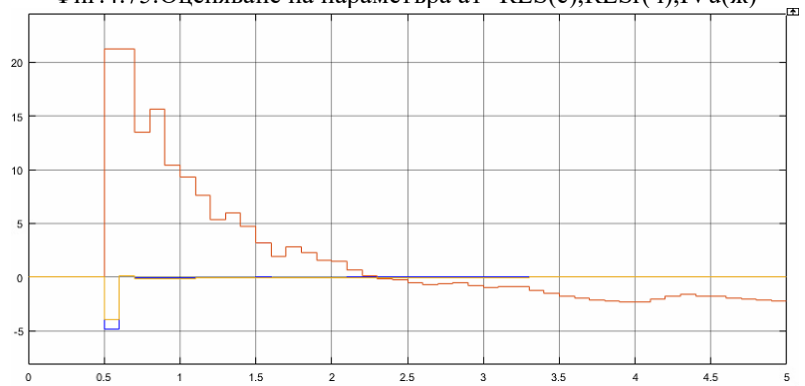
Фиг.4.73.Блок схема на управление на двумасова електромеханична система с ШИП с рекурсивно оценяване в реално време в Simulink



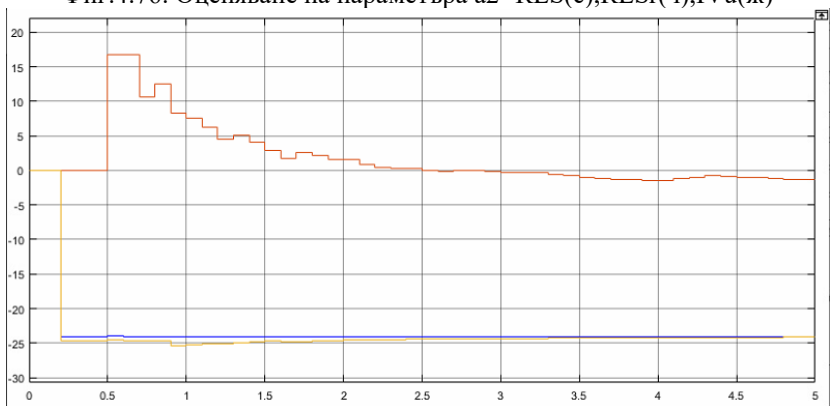
Фиг.4.74.Време характеристика на двумасовата електромеханична система



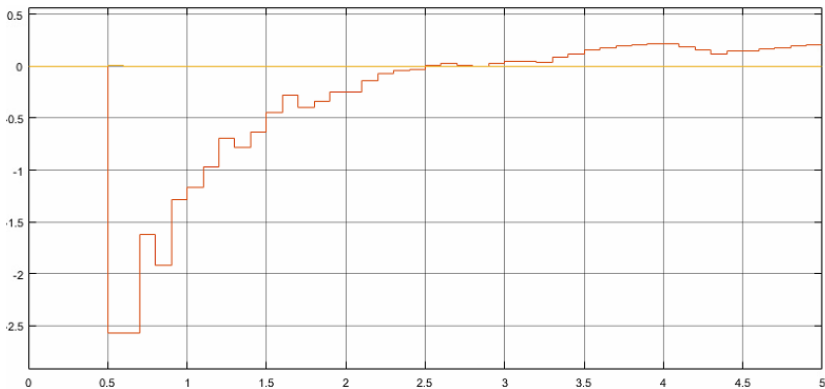
Фиг.4.75. Оценяване на параметъра  $a_1$  - RLS(c), RLSr(ч), IVu(ж)



Фиг.4.76. Оценяване на параметъра  $a_2$  - RLS(c), RLSr(ч), IVu(ж)



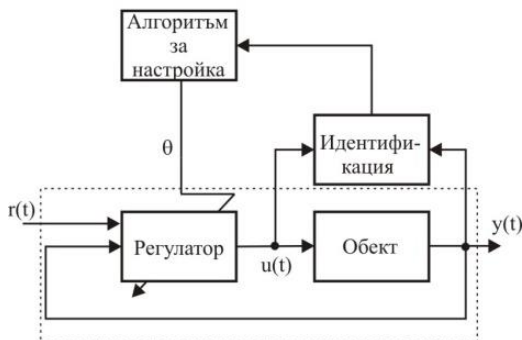
Фиг.4.77. Оценяване на параметъра  $b_1$  - RLS(c), RLSr(ч), IVu(ж)



Фиг.4.78. Оценяване на параметъра  $b_2$ - RLS(c),RLSr(ч),IVu(ж)

## 4.2. Експериментални изследвания в системи за адаптивно управление

До тук се разгледаха основните методи за оценяване на параметри в адаптивни системи. Те представляват частта за идентификация в адаптивния контур на самонастройващия се регулатор. Другата част в този контур е за синтез на алгоритъма за управление както се вижда на Фиг.4.79. Отделните самонастройващи се регулатори се различават по модела, използван за представяне на обекта, по метода за оценяване на параметрите на модела и по критериите за синтез на управлението. Ще бъде разгледан синтеза на управление на базата на зададен критерий, който определя и името на самонастройващия се регулатор(СНР) [10,51,92,95,105,113,157].



Фиг. 4.79. Основни елементи на СНР

### 4.2.1. Самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия

Комбинацията от метод на оценяване и закон за регулиране с минимална дисперсия води до следния алгоритъм.

#### 4.2.1.1. Алгоритъм-1. Явен самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия

1) На базата на информация за входа и изхода на обекта към  $k$ -тия момент, чрез един от описаните методи за оценка на параметри, се определят оценките на параметрите  $\hat{a}_i(k), \hat{b}_i(k), \hat{c}_i(k)$ .

2) Съгласно принципа на несъмнената еквивалентност, оценките се приемат за действителните стойности на параметрите. Определят се полиномите  $E(z^{-1})$  и  $F(z^{-1})$  чрез решаването на Диофантовото уравнение.

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}) \quad (4.2.1)$$

3) Определят се коефициентите на полинома  $G(z^{-1}) = E(z^{-1})B(z^{-1})$ .

4) По формула (4.2.2)



$$u(k) = -\frac{1}{g_0} [f_0 y(k) + f_1 y(k-1) + \dots + f_{n-1} y(k-n+1) + g_1 u(k-1) + g_2 u(k-2) + \dots + g_{m+d-1} u(k-m-d+1)] \quad (4.2.2)$$

се определя управлението  $u(k)$ , след което  $k$  се увеличава и алгоритъма се повтаря от т.1[10,143,157].

Към недостатъците на този алгоритъм, типичен за всички непреки методи, се отнася необходимостта от оценяване на параметрите на шума. Те сходят сравнително бавно, при което принципа на несъмнената еквивалентност ще води до изчисляване на неоптимално управление. Друг недостатък е необходимостта от решаване на Диофантовото уравнение на всяка стъпка, което увеличава изчислителната сложност на алгоритъма. Предимство на явните методи е възможността да се следят измененията в свойствата на обекта чрез допълнителен мониторинг.

В оригиналния алгоритъм на Astrom&Wittenmark е използван пряк метод, който се основава на уравнение (4.2.3)

$$z^d C(z^{-1})y(z) = F(z^{-1})y(z) + G(z^{-1})u(z) + z^d E(z^{-1})C(z^{-1})\varepsilon(z) \quad (4.2.3)$$

при предположение, че  $C(z^{-1}) \equiv 1$  и базовото време се взема към момента

$(k-d)$  вместо  $k$

$$y(z) = F(z^{-1})z^{-d}y(z) + G(z^{-1})z^{-d}u(z) + E(z^{-1})\varepsilon(z)$$

или във времето

$$y(k) = f_0 y(k-d) + \dots + f_{n-1} y(k-d-n+1) + \dots + g_0 u(k-d) + \dots + g_{m+d-1} u(k-m-2d+1) + \eta(k) \quad (4.2.4)$$

където:

$$\eta(k) = \varepsilon(k) + e_1 \varepsilon(k-1) + \dots + e_{d-1} \varepsilon(k-d+1)$$

е процес от вида пълзящо средно, който е некорелиран с останалите членове в (4.2.4). Във всеки случай означенията

$$\theta = [f_0, \dots, f_n, g_0, \dots, g_{m+d-1}]^T$$

$$\varphi(k) = [y(k-d), \dots, y(k-d-n+1), u(k-d), \dots, u(k-2d-m+1)]^T$$

може да се използва RLS, който да даде неизместени, макар и статистически неоптимални, оценки на параметрите  $\theta$ . Така се стига до следния алгоритъм

#### **4.2.1.1. Алгоритъм-2. Неявен самонастройващ се регулатор минимална дисперсия**

1) На базата на информация за входа и изхода на обекта към  $k$ -тия момент, чрез RLS, се определят оценките на  $f_i(k)$  и  $g_i(k)$  на полиномите  $F(z^{-1})$  и  $G(z^{-1})$ .

2) Получените оценки се заместват в (4.2.2)

$$u(k) = -\frac{1}{g_0} [f_0 y(k) + f_1 y(k-1) + \dots + f_{n-1} y(k-n+1) + g_1 u(k-1) + g_2 u(k-2) + \dots + g_{m+d-1} u(k-m-d+1)] \quad (4.2.2)$$

и се определя управлението  $u(k)$

3) След получаване на нова информация  $k$  се увеличава и алгоритъма се повтаря от т.1.

Вижда се, че директния метод за определяне на  $F(z^{-1})$  и  $G(z^{-1})$  спестява решението на Диофантовото уравнение, както и използването на по-сложен алгоритъм за оценяване на параметрите [10,76,91,92,95].

Практическото прилагане на втория алгоритъм е свързано с факта, че вследствие изчисляването на  $u(k)$  според (4.2.2) във вектора  $\Phi(k)$  се появяват стълбове, които са почти линейно зависими. Те са линейно зависими, ако оценките на  $f_i(k)$  и  $g_i(k)$  са постоянни. Това може да доведе на даден етап от оценяването до загуба на устойчивост.

Един от вариантите, които често се използват, за да се преодолее този факт, се състои в това, че управлението  $u(k)$  няма да се измени, ако вместо параметрите  $\hat{f}_i(k)$  и  $\hat{g}_i(k)$  в (4.2.5)

$$u(z) = -\frac{F(z^{-1})}{G(z^{-1})}y(z) = -\frac{F(z^{-1})}{E(z^{-1})B(z^{-1})}y(z) \quad (4.2.5)$$

се използват параметрите  $\bar{f}_i = \beta f_i$  и  $\bar{g}_i = \beta g_i$ , където  $\beta$  е произволно число. Тогава може да се фиксира един от параметрите (най-често това е  $\bar{g}_0 = \bar{b}_0$ ) и да се оценят останалите параметри  $\bar{f}_i$  и  $\bar{g}_i$ , като се използва регресионното уравнение

$$y(k) - \bar{b}_0(k-d) = \sum_{i=0}^{n-1} \bar{f}_i y(k-d-i) + \sum_{i=1}^{m+d-1} \bar{g}_i u(k-d-i) + \eta(k) \quad (4.2.6)$$

в дясната страна на което вече няма линейно зависими членове. След това за определяне на управлението  $u(k)$  се използва (4.2.2) с  $\bar{b}_0$  и оценените параметри на (4.2.6).

Стойността на  $\bar{b}_0$  не трябва да се избира много малка, защото това може да доведе при първите итерации, когато оценките се различават значително от действителните стойности на оценяваните параметри, до големи стойности на  $u(k)$  [10,51,91,92].

#### 4.2.2. Самонастройващ се регулатор с обобщена минимална дисперсия

За да стане регулаторът СНР трябва да се въведе блок за оценяване на параметри за оценяване на параметрите на модела, след което да се реши Диофантовото уравнение  $CP_N = EAP_D + z^{-d}F$  и да се синтезира управлението по

$$u(z) = \frac{CSr(z) - (F/P_D)y(z)}{CQ + EB} \quad (4.2.7)$$

Това води до явен алгоритъм за самонастройка.

Напрактика явният алгоритъм не се използва, защото неявният се явява много по-прост в изчислително отношение. Това се основава на факта, че изходът на разширения обект

$$\phi(k) = y_p(k) + u_q(k-d) - r_s(k-d)$$

може да се изрази по следния начин

$$\phi(z) = P(z^{-1})y(z) + z^{-d}Q(z^{-1})u(z) - z^{-d}S(z^{-1})r(z) \quad (4.2.8)$$

Използвайки зависимостта (4.2.9)

$$\begin{aligned} y_p(k+d) &= Z^{-1} \left\{ \frac{F}{P_D C} y(z) + \frac{G}{C} u(z) \right\} + \sum_{i=0}^{d-1} e_i \varepsilon(k+d-1z) = \\ &= y_p^*(k+d|k) + \tilde{y}_p(k+d|k) \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

може да се запише

$$\begin{aligned} \phi(z) &= \frac{z^{-d}}{C} \left[ \frac{F}{P_D} y(z) + (BE + QC)u(z) - CSr(z) \right] + E\varepsilon(z) = \\ &= \frac{z^{-d}}{C} \left[ F_1 y(z) + G_1 u(z) + H_1 r(z) \right] + E\varepsilon(z) \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

като оптималното управляващо въздействие нулира израза в квадратните скоби

$$F_1 y(z) + G_1 u(z) + H_1 r(z) = 0 \quad (4.2.11)$$

и

$$\phi(z) = E(z^{-1}) \varepsilon(z) \quad (4.2.12)$$

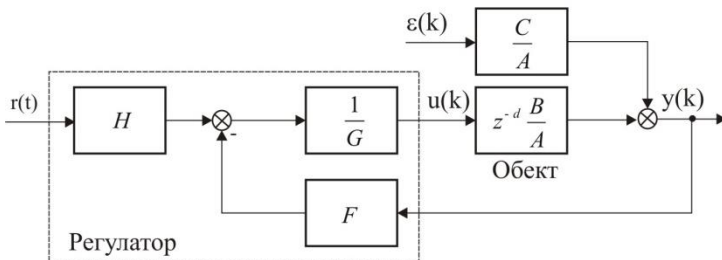
#### **4.2.2.1. Алгоритъм на неявен самонастройващ се регулатор с обобщена минимална дисперсия**

- 1) Формира се изхода на разширения обект съгласно (4.2.8)
- 2) Оценяват се параметрите на  $F_1, G_1, H_1$  в регресионния модел (4.2.10) приемайки  $C(z^{-1}) \equiv 1$   $E(z^{-1}) \varepsilon(z) = \eta(z)$ . Тъй като шумът  $\eta(z)$  е некорелиран с регресорите, може да се използва RLS.
- 3) Определя се управлението по (4.2.11).
- 4) След постъпване на нова информация се полага  $k = k + 1$  и се пристъпва към т.1[10,95,105,113,157].

#### **4.2.2.2. Самонастройващи се регулатори със зададени полюси**

В редица случаи проектантът има за задача да осигури задени свойства на динамичното поведение на ЗС както по отношение на заданието, така и по отношение на на мушценцията. В качеството на показатели на динамиката на ЗС могат да се използват и преходните и честотните характеристики на системата.

Разглежда се следната стандартна конфигурация на ЗС, която трябва да осигури изискванията за синтеза (Фиг.4.80).



Фиг.4.80. Стандартна конфигурация на ЗС

Уравнението на обекта се задава с ARMAX-модела

$$A(z^{-1})y(z) = z^{-d}B(z^{-1})u(z) + C(z^{-1})\varepsilon(z) \quad (4.2.12)$$

където:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n}$$

Уравнението на регулатора е

$$G(z^{-1})u(z) = H(z^{-1})r(z) - F(z^{-1})y(z) \quad (4.2.13)$$

където:

$$G(z^{-1}) = 1 + g_1 z^{-1} + \dots + a_{ng} z^{-ng}$$

$$H(z^{-1}) = h_0 + h_1 z^{-1} + \dots + h_{nh} z^{-nh}$$

$$F(z^{-1}) = f + f_1 z^{-1} + \dots + f_{nf} z^{-nf}$$

Предназначението на регулатора е да проследява изменението на заданието и да намали влиянието на случайните смущения на изхода на обекта.

От (4.2.12) и (4.2.13) се получават съответно уравнението на ЗС и ПФ по отношение на заданието и смущението

$$(AG + z^{-d}BF)y(z) = z^{-d}BHR(z) + CG\varepsilon(z) \quad (4.2.14)$$

$$W_{y,r}(z^{-1}) = \frac{z^{-d}BH}{AG + z^{-d}BF}; W_{y,\varepsilon}(z^{-1}) = \frac{CG}{AG + z^{-d}BF}. \quad (4.2.15)$$

Чрез подходящ подбор на полиномите  $F, G, H$  може да се осигури желаното качество на работата на системата както по отношение на следене на заданието, така и по отношение на намаляването на дисперсията на смущенията. Двата проблема се разглеждат поотделно [10, 73, 95, 105].

### **4.2.3. Синтез на самонастройващ се регулатор със зададени полюси**

За да се направи регулаторът със зададени полюси РЗП самонастройващ се, трябва да се комбинира метод за оценка с линиякой от методите за синтез на регулатор. Избора на методи зависи от решавания проблем – регулиране, управление, и двете едновременно. Обикновено този тип СНР се изграждат като явни, като не се оценяват пряко параметрите на регулатора, а тези на модела на обекта, след което се изпълнява процедура на синтез за определяне на параметрите на регулатора. При всички случаи е необходима предварително начална информация за:

- желаната динамика на ЗС (полюси или полюси и нули);
- предвижда ли се или не задължително интегриращо действие на регулатора;
- степените на полиномите  $A$  и  $B$ ;
- стойността на чистото закъснение (ако то е неизвестно се задава  $d = 1$ , но се повишава степента на полинома  $B$ , за да покрие евентуалното реално чисто закъснение);
- параметрите на процедурата за оценяване  $\hat{\theta}(0)$ ,  $P(0)$ , фактор на забравяне  $\rho$  и др.

След това, за конкретния решаван проблем, може да се използва един от следните алгоритми за настройка

#### **4.2.3.1. Алгоритъм-1. Явен СНР със зададени полюси**

1) Въз основа на информация за входа и изхода на обекта към  $k$ -тия момент се оценяват параметрите на полиномите  $A, B, C$  чрез един от описаните методи за оценка на параметри.

2. Получените оценки се заместват в  $AG + z^{-d}BF = CA_C$  и се определят полиномите  $F$  и  $G$ . Не се предвижда съкращаване на нулите на обекта, тъй като при неточни оценки в началния етап от работа на регулатора, лоши нули могат да бъдат взети за добри и да се получи разходящ алгоритъм за управление.

3) Изчислява се управляващия сигнал на базата на:

$$G(z^{-1})u(z) = H(z^{-1})r(z) - F(z^{-1})y(z)$$

при  $r(k) = 0$

$$\hat{G}(z^{-1})u(z) = -\hat{F}(z^{-1})y(z)$$

4) След постъпване на нова информация се полага  $k = k + 1$  и се преминава към стъпка 1 [10,51,95,105].

#### **4.2.3.2. Алгоритъм-2. Явен самонастройващ се серворегулатор със зададени полюси**

1) Въз основа на информация за входа и изхода на обекта към  $k$ -тия момент се оценяват параметрите на полиномите  $A, B, C$  чрез един от описаните методи за оценка на параметри при  $\varepsilon = 0$ .



2) Получените оценки се заместват в

$$AG + z^{-d}BF = A_M A_0$$
$$H = KA_0$$

и се определят полиномите  $F$  и  $G$ .

3) При  $K = \frac{A_M(1)}{B(1)}$  сеопределя и оценката на  $H$ .

4) Изчислява се управляващия сигнал на базата на

$$G(z^{-1})u(z) = H(z^{-1})r(z) - F(z^{-1})y(z)$$

5) След постъпване на нова информация се полага  $k = k + 1$  и се преминава към стъпка 1[10,73,75,157].

#### **4.2.3.3. Алгоритъм-3. Явен самонастройващ се регулатор-серворегулатор със зададени полюси**

1) Въз основа на информация за входа и изхода на обекта към  $k$ -тия момент се оценяват параметрите на полиномите  $A, B, C$  чрез един от описаните методи за оценка на параметри.

2) Решава се Диофантовото уравнение

$$AG + z^{-d}BF = CA_C$$

и се определят полиномите  $F$  и  $G$ . Отново се избягва съкръщаването на нулите на обекта

3) Оценките на полинома  $H$  се получават от  $H = \frac{B_{M_1} CA_C}{A_M}$  като се

положи  $B_{M_1} = \frac{A_M(1)}{\hat{B}(1)}$ , т.е. нулите на обекта са и нули на ЗС.

4) Изчислява се управляващия сигнал на базата на

$$G(z^{-1})u(z) = H(z^{-1})r(z) - F(z^{-1})y(z)$$

5) След постъпване на нова информация се полага  $k = k + 1$  и се преминава към стъпка 1 [10,125,133,157].

#### **4.2.4. Адаптивно предсказващо управление**

Разгледаните дотук самонастройващи се регулатори могат да бъдат разделени на две основни групи:

- регулатори, минимизиращи предварително формулиран функционал;
- регулатори, задаващи полюсите (и нулите) на системата.

Основните недостатъци на първите са необходимостта от познаване на чистото закъснение на обекта и фактът, че те не могат да работят с обекти с променливо закъснение. Втората група регулатори са чувствителни към препараметризирането на обекта - задаване на по-висок ред на модела от необходимия. И двете групи регулатори срещат трудности при работа с неминималнофазови обекти.

За да се преодолеят недостатъците на гореспоменатите СНР, са предложени методи, които се основават на минимизацията на квадратичен функционал, образуван от грешката между заданието и предсказаната стойност на изходната величина, включващ евентуално и наказателен член за стойностите на управляващия сигнал. За разлика от регулаторите с минимална дисперсия и при регулаторите с обобщена минимална дисперсия, предсказването при тях се извършва за хоризонт  $N$ , надвишаващ чистото закъснение  $d$  на обекта ( $N > d$ ). Оттам и наименованието им - регулатори с удължен хоризонт на предсказване. Тази им особеност дава възможност да се справят с неизвестно или променливо времезакъснение, а също и да осигурят устойчива работа при използване на неминималнофазови дискретни модели.

Друга съществена особеност на управлението с удължен хоризонт на предсказване е възможността му да се справи успешно със синтеза на оптимални управляващи въздействия при предварително програмирано изменение на заданието. Такива случаи се срещат често при управлението на роботи и манипулатори, а също при химични и топлинни процеси с периодично действие, когато траекторията на изменение на заданието  $r(k)$  е предварително известна. Чрез използване на удължен хоризонт на предсказване могат да се генерират изпреварващи управляващи сигнали, които да осигуряват значително по-плавни изменения на изходния сигнал в преходните режими и които апроксимират добре желаното му поведение.

Предложени са различни видове СНР, основаващи се на удължен хоризонт на предсказване на изходната величина. Общо взето за всички регулатори от този тип са характерни следните особености:

1) Дефинира се някаква желана траектория  $y_M(k+i), i=d, d=1, \dots, NP$ , до която трябва максимално да се приближава изходът на системата  $y(k+i)$ .

Променливата  $k$  съответства на текущия момент, в който трябва да се генерира управляващия сигнал, а  $NP$  се нарича хоризонт на предсказване на изхода. Желаната траектория се получава чрез филтриране на заданието  $r(k)$  с помощта на нискочестотен филтър  $W_R(z^{-1})$ . Това се прави с цел да се ограничи амплитудата на управляващите сигнали. Поради факта, че съществуват и други начини за ограничаване на амплитудата на  $u(k)$ , редица от предложените предсказващи алгоритми използват  $W_R(z^{-1})=1$ . Най-често в качеството на филтър на заданието се използва звено от първи ред с единичен коефициент на усилване

$$W_R(z^{-1}) = \frac{(1-\alpha)z^{-1}}{1-\alpha z^{-1}}$$

на който съответства диференчното уравнение

$$y_M(k+i) = \alpha y_M(k+i-1) + (1-\alpha)r(k+i-1), \quad i=1, 2, \dots, NP \quad (4.2.16)$$

Обикновено се приема  $y_M(k) = y(k)$ .

2) Формира се критерий за определяне на оптималното управление на обекта, който в най-общ вид може да изглежда по следния начин

$$J(NP, NC, Q) = E \left\{ \sum_{i=N_1}^{NP} [y(k+i) - y_M(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{NC} [Qu(k+i-1)]^2 \right\} \quad (4.2.17)$$

където  $Q$  е оператор, осъществяващ преобразуване на  $u(k)$ . В

последната зависимост  $NC$  се нарича хоризонт на управлението, като се

предполага, че  $\Delta u(k+i) = 0 \Leftrightarrow i \geq NC$ . Освен това е в сила неравенството

$NC \leq NP$ . Чрез оператора  $Q$  се осъществява компромис между стойността на

управлението и точността на следене на желаната траектория.

3) Прилага се т.нар. стратегия на измествания се хоризонт. Тя се състои в следното. На базата на минимизиране на критерия (4.2.17)

$$J = \min_{u(k+i)} E \left\{ \sum_{i=N_1}^{NP} [y(k+i) - y_M(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{NC} [Qu(k+i-1)]^2 \right\}$$

се определят стойностите  $u(k), u(k+1), \dots, u(k+NC-1)$ . Прилага се

управлението  $u(k)$ , след което се възобновява цялата процедура от

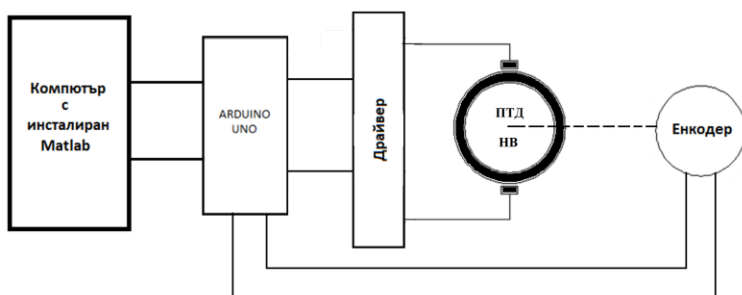
следващия такт. С други думи, изчислените

$u(k+1), u(k+2), \dots, u(k+NC-1)$  не се прилагат в действителност.

Основните различия между отделните СНР с предсказващо управление се състоят в избора на модела на обекта, в ширините на ивиците от предсказани стойности на изходната величина ( $N_i \leq i \leq NP$ ) и на управлението ( $1 \leq NC \leq NP$ ) както и в алгоритмичната реализация[10, 57,58,157]..

#### 4.3. Адаптивно управление на постоянно токов двигател посредством самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия

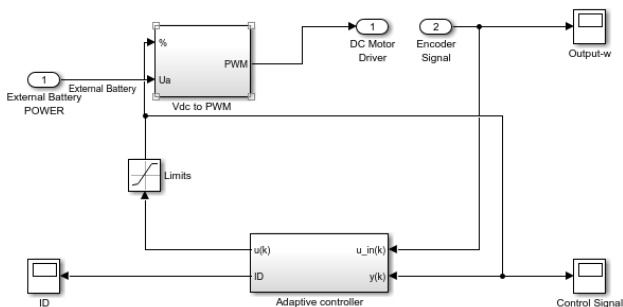
За целта на изследванията за приложението на рекурсивни методи за оценяване на реалните параметри на постоянно токов двигател в адаптивна система за управление е разработена следната блок схема като в нея е добавена микроконтролерната развойна платка Arduino Uno с чиято помощ ще се извършва комуникацията между рекурсивните методи за оценяване на параметри разработени в Matlab/Simulink и ПТД с НВ



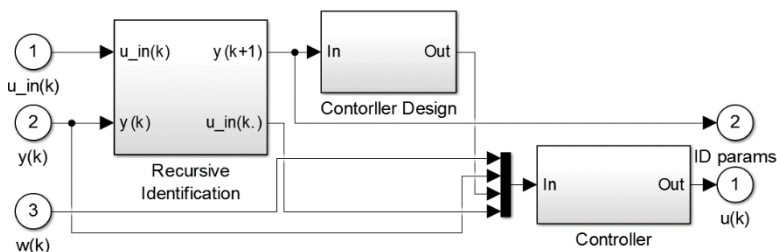
Фиг.4.81. Блок схема на постановката

Изследванията са направени с използването на System Identification Toolbox в Matlab\Simulink и Arduino Support Package за Matlab\Simulink. За тази цел са направени блокове за адаптивно управление на скоростта на ПТД посредством явен самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия

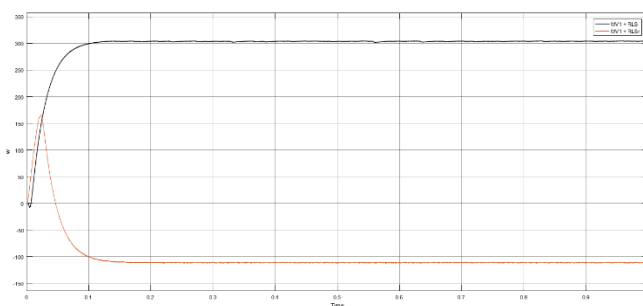
(MV); и блокове за рекурсивно оценяване на параметри в реално време както следва: рекурсивен метод най-малките квадрати (RLS), рекурсивни най-малките квадрати с отчитане на остатъците вместо грешката на оценяване (RLSr).



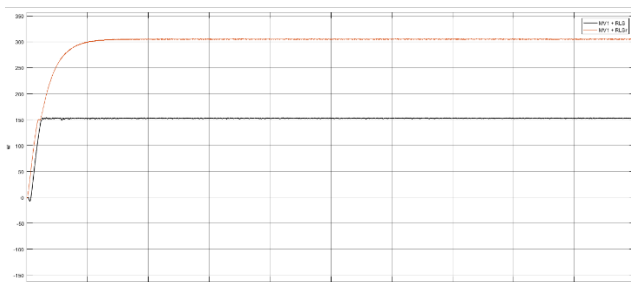
Фиг.4.82. Блок схема в Simulink за връзка с Arduino Uno Rev.3 за управление на ПТД с НВ



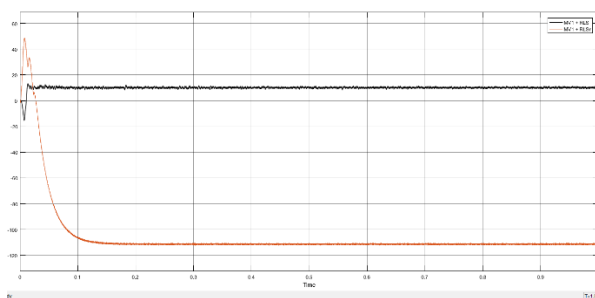
Фиг.4.83. Блок схема в Simulink на система със самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия представяща подсистемата “Adaptive controller”



Фиг.4.84. Скорост на ПТД с MV +RLS и RLSr за  $\omega = 304,7rad / s$



Фиг.4.85. Скорост на ПТД с MV + RLS и RLSr за  $\omega = 152,35rad / s$



Фиг.4.86. Скорост на ПТД с MV + RLS и RLSr за  $\omega = 10,1567rad / s$

На Фиг.4.84., Фиг.4.85. и Фиг.4.86. са представени скоростта на ПТД, при система за адаптивно оценяване и управление на реалните параметри на ПТД посредством явен самонастройващ се регулатор със минимална дисперсия като са използвани по-горе описаните методи RLS и RLSr при зададена скорост  $\omega = 304,7rad / s$ ,  $\omega = 152,35rad / s$  и  $\omega = 10,1567rad / s$ .

### Анализ и изводи

Проведените експерименти доказват възможността за приложение на рекурсивни методи за оценяване на реалните параметри на ПТД в адаптивна система за управление. Те дават възможност за оценяване параметрите на двигателя в реално време и адекватно регулиране на неговата скорост. Необходими са по-нататъшни изследвания за настройка за работата на схемата и на комуникацията между Matlab/Simulink и Arduino Uno, заради

наличието на забавяне при изчисленията и изработването на управляващ сигнал при рекурсивни най-малките квадрати с отчитане на остатъците вместо грешката на оценяване (RLSr), идващо от ограниченията на развойната платка. Описаните методи за оценка на параметрите могат да бъдат модифицирани за по-добра производителност и качество на процесите в други адаптивни системи за управление в реално време. При избиране на различни тегла могат да се получат различни робастни оценки, които могат да бъдат нечувствителни на шум. Това ще бъде обект на по-нататъшно проучване.



## **Обобщения и заключения**

Дисертационният труд е разработен по време на докторантурата в ТУ - Варна. Като основен инструмент е използвана програмната среда MATLAB. Работата е мотивирана от желанието да се приложат и да се изследват възможностите на рекурсивните методи за оценяване на параметри при идентификация на обекти.

Разработеният дисертационен труд демонстрира високата ефективност на рекурсивните методи за оценяване на параметри при извършването на идентификация в реално време в адаптивни системи за управление. Основната част на дисертационната работа се състои от пет глави, като при решаване на поставените задачи е изпълнено следното:

**В ГЛАВА I** - Разгледана е актуалността на проблема и е описана същността на системите за адаптивно управление. Извършен критичен анализ на това къде е нужна тяхната употреба. Описани са видовете системи за адаптивно управление и техните особености. Разгледани са начините за проектиране на адаптивен регулатор.

**В ГЛАВА II** - Разгледани са особеностите на идентификацията в реално време и някои от най-често използваните класически методи за оценка на параметри. Изведени са основните изискванията към алгоритмите за идентификация в реално време, използвани в адаптивни системи за управление.

**В ГЛАВА III** – Изведени са алгоритми използващи рекурсивни версии на метода на най-малките квадрати и метода на инструменталната променлива за оценяване на параметри в реално време. Определени са критериите, по които се извършва оценяването. Въз основа на създадените алгоритми са разработени функции в средата на Matlab. Тези функции са с изграден потребителски интерфейс с вградена защита от некоректно въведени данни. С помощта на разработените m-функции са проведени редица експериментални изследвания с цел да се провери надеждността и точността им при рекурсивно оценяване на параметри в адаптивни системи. Разгледани са алгоритми за рекурсивно робастно оценяване на параметри в адаптивни системи за управление. Разгледано е бързодействието и точността на различните рекурсивни методи за оценяване на параметри в адаптивни системи за управление. Въз основа на направените анализи са направени съответните изводи и заключения.

**В ГЛАВА IV** - Изведени са алгоритми за адаптивно управление посредством самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия, самонастройващ се регулатор с обобщена минимална дисперсия, самонастройващ се регулатор със зададени полюси и адаптивно предсказващо управление в линейни и нелинейни стационарни типови модели, както и на линейни нестационарни типови модели с използване рекурсивните методи за оценяване на параметри описани в Глава III. Извършено е оценяване на параметрите на: нелинеен стационарен модел от втори ред, линеен нестационарен модел от втори ред и на линейни стационарни модели от

първи, втори и трети ред, посредством различни рекурсивни методи за оценяване на параметри в адаптивни системи за управление. Изследвано е влиянието на нивото на шума върху точността на оценяване на параметрите. Създадени са m-файловете: *rarxm\_sl.m*, *rarxm\_sl.m*, *rarxm\_slnmkost.m*, *rarxm\_slsls.m*, *rarxm\_slglsls.m*, *rarxm\_slxppff.m*, *rarxm\_slvppff.m*, *rarxm\_slfixppff.m*, *rarxm\_slapff.m*, *rarxm\_slxppFM.m*, *rarxm\_sltrace.m*, *rarxm\_slxppF0.m*, *rarxm\_slincprop.m*, *rarxm\_sldls.m*, *rarxm\_slselemem.m*, *rarxm\_slrppred.m*, *rarxm\_slivu.m*, *rarxm\_sleivu.m*, *rarxm\_slrob.m* и *rarxm\_slrivu.m*, посредством които са осъществени експерименталните изследвания. Извършена е параметрична идентификация на постоянно токов двигател с независимо възбуждане, като са използвани различни рекурсивни методи за оценяване на параметри. За осъществяване на идентификационната процедура е създаден файл в програмна среда Matlab/Simulink - *PTDNV.slx*. Оценени са параметрите на системата. Изследването е разширено, като е извършено проучване за влиянието на стъпката на дискретизация върху точността на оценяване на параметрите.

Изведен е алгоритъм и е разработен *slx*-файл *DualmassPTD.slx* за идентификация на двумасова електромеханична система. Разгледано е и влиянието на различните рекурсивни методи за оценяване на параметри при параметричната идентификация на разглеждания обект.

Извършена е идентификация на динамиката на свободните колебания на физически модел на постоянно токов двигател в система за адаптивно управление посредством самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия. Създаден е файл в Matlab/Simulink - *PTDMV.slx*, който се базира на адаптивно управление посредством самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия. В конкретното изследване е използвана и различна стъпка на дискретизация. Получените резултати още веднъж потвърждават значимостта и при определяне на оценките на търсените параметри.

Всички разработени методи за оценяване на параметри, както и системите в които са били приложени са обединени в обща библиотека *gelb.slx*, която е разработена така, че да позволява на потребителя според неговите нужди да променя настройващите параметри както на методите за оценяване, така и на системите които биват оценявани.

Резултатите от параметричната идентификация на разглежданите обекти са оценени и анализирани.

## **НАСОКИ ЗА БЪДЕЩА РАБОТА**

Получените при разработването на дисертационния труд резултати могат да бъдат разширени в няколко насоки:

- Извеждане на алгоритми за параметрична идентификация на нелинейни нестационарни типови модели посредством използване на рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри в

адаптивни системи за управление;

- Прилагане на рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри при идентификация на многомерни обекти;
- Прилагане на рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри при идентификация на други физични обекти за управление.
- Разработване на лабораторни упражнения по дисциплината „Адаптивно и робастно управление” за студентите от специалност „Автоматика, информационни и управляващи компютърни системи” и „Роботика и Мехатроника“ в ТУ - Варна, въз основа на предложените в дисертационния труд алгоритми и m-файлове.

На база на изложението може да се заключи, че поставените цел и задачи на дисертационния труд са изпълнени. Формулирани са следните приноси:

### **НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ**

1. Разработени са алгоритми с използване на рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри на:
  - линейни и нелинейни стационарни типови модели;
  - линейни нестационарни типови модели.
2. Разработени са алгоритми на базата на рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри, въз основа на които е извършена параметрична идентификация на конкретни обекти:
  - Модел на система за управление
  - постояннотоков двигател с независимо възбуждане;
  - двумасова електромеханична система;
  - Реален постоянно токов двигател с независимо възбуждане
3. Изследвано е влиянието на различните рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри при:
  - филтриране на зашумени с различно ниво на шума сигнали;
  - въвеждане на нестационарност при стационарни модели.
  - рекурсивна идентификация в реално време в системи за адаптивно управление
4. Дадена е възможност за пълна промяна на конфигурационните параметри на разработените методи за оценяване, включително стъпката на дискретизация, с цел предоставяне на възможност на потребителя за изследване на тяхното влияние при рекурсивно оценяване на параметрите на разглежданите обекти, както и на други.
5. Анализирано е влиянието на различните рекурсивни и рекурсивно робастни методи за оценяване на параметри при параметрична идентификация на реалните параметри на постоянно токов двигател с независимо възбуждане и са определени най-подходящите алгоритми.

### **ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ**

1. Разработени са и са тествани m-функции в средата на Matlab за идентификация в реално време посредством рекурсивни методи за оценяване

на параметри.

2. Създадена е библиотека на база slx и m-файлове за оценяване на параметрите както следва:

- рекурсивен метод най-малките квадрати(rarxm\_sl.m)
- рекурсивен претеглен метод най-малките квадрати(rarxm\_sl.m)
- рекурсивни най-малките квадрати с отчитане на остатъците вместо грешката(rarxm\_slmnmkost.m)
- рекурсивни разширени най-малки квадрати(rarxm\_slsls.m)
- рекурсивни обобщени най-малки квадрати(rarxm\_slgls.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с експоненциален фактор на забравяне(rarxm\_slxppff.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с променливо-експоненциален фактор на забравяне (rarxm\_slvppff.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с фиксиран насочен фактор на забравяне (rarxm\_slfixppff.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с адаптивно насочен фактор на забравяне (rarxm\_slapff.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с експоненциално забравяща матрица (rarxm\_slxpfm.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с алгоритъм за постоянно проследяване (rarxm\_sltrace.m)
- рекурсивен метод на най-малките квадрати с експоненциален алгоритъм за забравяне и нулиране (rarxm\_slxpf0.m)
- рекурсивната инкрементална оценка на пропускливостта (rarxm\_slincprop.m)
- рекурсивен метод на заглушените най-малки квадрати (rarxm\_sllds.m)
- адаптивен оценяване със селективна памет (rarxm\_slselmem.m)
- рекурсивен метод за предвиждане на грешката (rarxm\_slerpred.m)
- рекурсивен метод на инструменталната променлива(rarxm\_slivu.m)
- рекурсивен разширен метод на инструменталната променлива (rarxm\_slleivu.m)
- рекурсивни робастни най-малки квадрати(rarxm\_slrob.m)
- рекурсивен робастен метод на инструменталната променлива (rarxm\_slrivu.m).

3. Разработени са slx-файлове в средата на Matlab/Simulink за параметрична идентификация на:

- Опростен ARX обект от втори ред(Plant.slx)
- постояннотоков двигател с независимо възбуждане (PTDnV.slx)
- двумасова елекромеханична система (DualmassPTD.slx).
- адаптивна система за управление на реален постоянно токов двигател посредством самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия(PTDMV.slx).

### **Научни публикации, свързани с дисертационния труд**

A1. Ivan V. Grigorov, Mariela Alexandrova, Nasko R. Atanasov, Сравнителен анализ на рекурсивни методи за оценяване на параметри в адаптивни системи за управление, Годишник на Технически Университет-Варна, Варна, 2015 г., Том-1, стр.84:89, ISSN:1311-896X

A2. Ivan V. Grigorov, Nasko R. Atanasov, Comparative analysis of more commonly used recursive methods for parameter estimation in adaptive systems, 51st International scientific conference on information, communication and energy systems and technologies, 2016, p.385:387 ISBN10:978-9989-78-X, ISBN13:978-9989-786-78-5, EAN:9789989786785

A3. Ivan V. Grigorov, Nasko R. Atanasov, Comparative analysis of more commonly used recursive methods for parameter estimation in DC motor control system, Computer Science and Technologies, 2016, стр.39:46, ISSN:1312:3335

A4. Ivan V. Grigorov, Приложение на рекурсивни методи за оценяване на параметри в система за адаптивно управление на постоянно токов двигател посредством самонастройващ се регулатор с минимална дисперсия, Computer Science and Technologies, 2017, стр.127:135, ISSN:1312:3335

A5. Grigorov, I.V., Atanasov, N.R., Zhekov, Z., Alexandrova, M., Application of recursive methods for parameter estimation in adaptive control of DC motor, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, 680, pp. 420–427, DOI: 10.1007/978-3-319-68324-9\_46, EID: 2-s2.0-85031304631Abstract

### **Recursive methods for parameter estimation in adaptive systems**

Adaptive systems and their applications have been one of the fastest growing research areas in recent years. Their role is growing strongly with the development of microprocessor computing. This is due to a more flexible signal processing technique, the development of new technologies, and the increasing productivity of computing and control devices. Recursive methods for parameter estimation meet the requirements of real-time identification algorithms because they have high performance and low memory volume. as they produce the new parameter estimates by adjusting the old ones defined at the previous stages. With the help of recursive identification methods, mathematical models of stationary and nonstationary processes can be obtained, which are widely used in modern adaptive control systems. This determines the topicality of the problem.