



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ ШТИП
В О Е Н А А К А Д Е М И Ј А
„Генерал Михаило Апостолски“ - Скопје
придружна членка



Проф. д-р Стојче Десковски
Проф. д-р Југослав Ачкоски
Асистент м-р Бобан Темелковски

ТЕОРИЈА НА СИСТЕМИ И УПРАВУВАЊЕ СО ПРИМЕНА НА MATLAB/SIMULINK

Скопје, 2021

Автори: Проф д-р Стојче Десковски
Проф. д-р Југослав Ачкоски
Асистент м-р Бобан Темелковски
Воена академија „Генерал Михаило Апостолски“,
Скопје

Рецензија: Проф. д-р Зоран Гацовски
Универзитет „Мајка Тереза“,
Скопје
Проф. д-р Невена Серафимова
Воена академија „Генерал Михаило Апостолски“,
Скопје

Компјутерска подготовка: Даниел Десковски

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

004.942:517.938(075.8)
004.942:517.71/.72(075.8)
004.942:681.51(075.8)

ДЕСКОВСКИ, Стојче
Теорија на системи и управување со примена на MATLAB/SIMULINK /
Стојче Десковски, Југослав Ачкоски, Бобан Темелковски. - Скопје : Воена
академија "Генерал Михаило Апостолски", 2021

Начин на пристапување (URL): <https://eprints.ugd.edu.mk/>. - Текст во PDF
формат, содржи 605 стр., илустр. - Наслов преземен од екранот. - Опис на
изворот на ден 04.10.2021

ISBN 978-9989-134-12-8

1. Гл. ств. насл. 2. Ачкоски, Југослав [автор] 3. Темелковски, Бобан
[автор]
а) MATLAB -- Примена -- Динамички системи -- Теорија на сигнали
(информации) -- Системи на автоматско управување -- Симулација --
Високошколски учебници

COBISS.MK-ID 55108357

Фотокопирање или умножување на кој било начин или повторно објавување на оваа книга (во целина или во делови) не е дозволено без претходна писмена согласност на авторите.

ПРЕДГОВОР

Овој учебник со наслов: **Теорија на системи и управување со примена на MATLAB и SIMULINK** настана како резултат на реализацијата на предавањата и вежбите по предметите: теорија на системи, системи на автоматско управување, системско моделирање, механика на летање, динамика и управување на летала и системи на водење и управување. Наведените предмети во подолг период се реализирани на неколку високообразовни институции: Воената академија „Генерал Михаило Апостолски“ – Скопје, Техничкиот факултет – Битола, Факултетот за електротехника и информатски технологии при Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје и Факултетот за информатика при Европскиот универзитет – Скопје.

Програмскиот пакет MATLAB и SIMULINK е користен во сите наведени предмети како основна алатка за реализација на вежбите при што се реализирани голем број примери кои се содржани во овој учебник. Меѓутоа основата на учебникот ја чинат содржини кои се содржани во програмите за предметите теорија на системи и системи на автоматско управување.

Изучувањето на предметите теорија на системи и системи на автоматско управување се од суштинско значење за студентите кои следат настава од областите на електротехничкото, машинското, аеронаутичкото, биомедицинското, хемиското, како и военото инженерство. Системите на управување имаат широк спектар на апликации во рамките на наведените области, од управување на авиони, ракети, беспилотни летала и возила до управување на работи и процеси. Од друга страна, како релативно нови наставно-научни дисциплини, особено во нашата земја, не се соодветно застапени во високото образование и не се поддржани со соодветна литература на македонски јазик. Ова и беше мотивот да се изработи овој учебник кој на прикладен начин на студентите ќе им ја приближи оваа материја и ќе им го олесни изучувањето на овие и на други сродни дисциплини.

Учебникот содржи голем број решени примери во сите поглавја чии решенија се добиени и со користење на MATLAB и SIMULINK. Студентите кои го користат овој текст треба да имаат доволно знаења од математика и физика кои се стекнуваат во првите две години на додипломските студии, да се запознаени со диференцијалните равенки вклучувајќи ја Лапасовата трансформација како и основите од линеарна алгебра. Теоријата на системи како и системите на автоматско управување главно се занимаваат со математичките модели на реалните физички системи користејќи методи за анализа и синтеза на системите преку нивните модели. Затоа проблемот на моделирање на реалните системи има суштинско значење, но претставува посебен проблем на конкретната област која ја изучуваат студентите. Така, моделирањето на реални електрични и електромеханички системи бара покрај физиката добро понавање на електротехниката и други дисциплини кои се изучуваат на електротехничките факултети. Моделирањето на машини, возила, работи..., бара добро познавање на механиката, и други дисциплини кои се студират на машинските факултети. Аеронаутичкото инженерство преку дисциплините како аеродинамика, механика на летање, системи на управување со летот и други, дава основи за моделирање на летала (авиони, хеликоптери, ракети, беспилоти летала), итн. Меѓутоа, методите и техниките кои ги користи теоријата на системи и управување се единствени и применливи за сите системи без оглед на природата на реалните системите кои се презентирани со нивните математички модели во форма на диференцијални равенки и системи на диференцијални равенки во временското подрачје, или со преносни функции во комплексното подрачје. Оттука произлегува

и потребата теоријата на системи и управување која се бави со математичките модели еднакво да се изучува на разнородни факултети.

Материјалот во учебникот е поделен на девет поглавја, не сметајќи ги прилозите. Секое поглавје, покрај воведот и основните поднаслови содржи прашања и одговори од соодветната тема и завршува со список на користената литература. Подолу во кратки црти се опишува содржината на секое поглавје.

Поглавјето 1 носи наслов **ОСНОВИ НА MATLAB И SIMULINK**. Програмскиот пакет MATLAB претставува софтвер за нумерички пресметки кои се користат во инженерството и научно-истражувачката дејност. Името MATLAB е добиено како кратенка од зборовите **MATRIX LABORATORY** (матрична лабораторија). MATLAB примарно е алатка за матрични пресметки. Во ова поглавје се опфатени основните елементи на MATLAB/SIMULINK кои користат математички модели и симулции. Во поглавјето се обработува користењето на MATLAB како калкулатор за обични математички пресмети, работа со вектори и матрици, цртање (графика) во MATLAB, програмирање и математика во MATLAB (лимеси, решавање на равенки, изводи и интегрални). Дадени се основите на SIMULINK на задоволително ниво кое овозможува моделирање и симулација на динамичките системи и системите на управување со затворена контура. Освен наведеното во сите останати поглавја постои по еден поднаслов за примената на MATLAB каде се обработени други прашања како решавање на диференцијални равенки, конверзија на математички модели, манипулација со блок дијаграми, симулации на системи и тн.

Поглавјето 2 носи наслов **МАТЕМАТИЧКИ ОСНОВИ**. Овде е презентираан основниот математички апарат којшто се користи во теоријата на системи и управување. Кусо се обработени диференцијалните равенки, дефинирана е Лапласовата трансформација инверзната Лапласова трансформација и примените. Дадена е дефиниција на преносна функција на систем, како и решени примери со примена на MATLAB. Изложената материја не е доволна ако студентот претходно не е подетално запознат со темите во предметот математика.

Поглавјето 3 носи наслов **МОДЕЛИРАЊЕ НА ДИНАМИЧКИ СИСТЕМИ**. Претходно беше спомнато значењето на математичките модели со кои оперира теоријата на системи и управување. Во ова поглавје е обработен процесот на формирање на математички модели којшто е ограничен само на механички, електрични и електро механички системи. Процесот на моделирање е поткрепен со примери кои се решени со примена на MATLAB.

Поглавјето 4 носи наслов **БЛОК ДИЈАГРАМИ И ГРАФОВИ НА ТЕКОТ НА СИГНАЛИ**. Сложените системи се компонирани од повеќе меѓусебно поврзани потсистеми. Такви се системите на автоматско управување во чиј состав влегува објектот на управување, сензори, извршни елементи (актуатори), управувач (електроника, компјутер). За формирање модел на такви системи ако се познати моделите на потсистемите се користат две техники кои се овде обработени. Тоа се алгебрата на блок шеми и граф на текот на сигнали со примена на Мејсоновото правило. Исто така покажано е како се користи MATLAB моделирање, симулација и манипулација со блок дијаграми.

Поглавјето 5 носи наслов **ВРЕМЕНСКИ ОДСИВ НА ДИНАМИЧКИТЕ СИСТЕМИ**. Во поглавјето е објаснета врската на половите и нулите на системот со неговиот одсив. Обработени се одсивите на системи од прв и од втор ред при што се дефинирани нивните перформанси. Исто така обработена е точноста на системите на автоматско управување во стационарната состојба при што се дефинирани константите на грешка за типични влезни сигнали.

Поглавјето 6 под наслов **СТАБИЛНОСТ** ја обработува стабилноста на динамичките системи. Дадени се дефинициите на стабилноста на линеарни динамички системи, обработени се алгебарските критериуми за стабилност (Рутов и Хурвицов критериум), одредување на стабилноста во просторот на состојба и користењето на MATLAB за оценка на стабилноста.

Поглавјето 7 носи наслов **АНАЛИЗА НА ДИНАМИЧКИТЕ СИСТЕМИ ВО ПРОСТОРОТ НА СОСТОЈБА**. Методот на просторот на состојба припаѓа на модерната теорија на системи и управување којшто се бави со анализа и проектирање на системите користејќи модели во временското подрачје. Обработени се постапките за добивање модели во просторот на состојба од диференцијални равенки и од преносни функции, како и користењето на графови на текот на сигнали за добивање модели во просторот на состојба. Покажано е како се добива решението на равенките на состојба на непобуден и на побуден систем, извод на матричната преносна функција и користењето на MATLAB за анализа на динамичките системи во просторот на состојба.

Поглавјето 8 носи наслов **СИНТЕЗА НА СИСТЕМИТЕ НА АВТОМАТСКО УПРАВУВАЊЕ ВО ПРОСТОРОТ НА СОСТОЈБА**. Во ова поглавје се дефинирани поимите управливост и набљудливост на динамичките системи и обработена е постапката за синтеза на управувањето со повратна врска по комплетниот вектор на состојба. Исто така покажано е проектирањето на системите на управување со примена на MATLAB.

Поглавјето 9 носи наслов **ПИД УПРАВУВАЧИ**. ПИД управувачите и денес се едни од најчесто применувани управувачи особено во индустриските постројки. Но присутни се и во системите на управување кај возилата, леталата, роботите итн. Во ова поглавје се презентирани системите на управување со P, PI, PD и PID управувачи. Преку примери објаснети се нивните предности и недостатоци. Даден е еден метод за нагудување на параметрите на ПИД управувач – методот на Циглер и Николс. На крајот е обработен еден пример на систем на управување на антена по азимут со примена на ПИД управувач при што е покажано користењето на MATLAB за нагудување на параметрите на управувачот.

Како што беше наведено, секое поглавје завршува со прашања и одговори и со список на користената литература. Од списоците на литературата во сите поглавја може да се види дека поголемиот дел наслови се однесуваат на најдобрите учебници од областа на теоријата на системи и системите на автоматско управување кои се користат на голем број универзитети во развиените земји. Од овие извори е земен дел од изложената материја како и одредени решени примери. Исто така во наведената литература има наслови од областа на математиката, моделирањето и симулциите и користењето на софтверскиот пакет MATLAB/SIMULINK. Поголемиот дел од насловите читателот може да ги најде на ИНТЕРНЕТ на сајтовите кои се отворени за преземање научна и стручна литература. Поголемиот дел од содржината на учебникот е преземен од наставните материјали по предметите Теорија на системи, Системи на автоматско управување и Моделирање и симулации кои ги предавал проф. Десковски во период од десетина години.

Учебникот е наменет за студентите на Воената академија како наставен материјал по предметите Теорија на системи, Системи на автоматско управување и други сродни предмети. Може да го користат и студентите на цивилните инженерски факултети.

2021, Скопје

Автори

СОДРЖИНА

ПРЕДГОВОР	5
1. ОСНОВИ НА MATLAB И SIMULINK	11
1.1 Што е MATLAB?	11
1.2 Почеток со работа во MATLAB	12
1.2.1 Користење на MATLAB како едноставен калкулатор	12
1.2.2 Броеви и формати во MATLAB	13
1.3 Променливи	15
1.4 Вградени функции	16
1.5 Вектори	19
1.5.1 Генерирање вектори со ознаката (:)	20
1.5.2 Издвојување на елементите на векторот	21
1.5.3 Вектор колона	21
1.5.4 Транспонирање	22
1.5.5 Скаларен производ на вектори (*)	23
1.5.6 Точкаст производ (.*)	25
1.5.7 Точкаст количник (делење) (./)	27
1.5.8 Точкасто степенување (.^)	29
1.6 Елементарни матрични операции	29
1.6.1 Димензија на матрица	31
1.6.2 Собирање и одземање на матрици	31
1.6.3 Транспонирање на матрица	32
1.6.4 Специјални матрици	32
1.6.5 Единечна матрица	34
1.6.6 Дијагонална матрица	35
1.6.7 Конструкција на матрици	35
1.6.8 Издвојување на елементи на матрица	37
1.6.9 Точкаст производ на матрици (.*)	39
1.6.10 Множење на матрица со вектор	39
1.6.11 Множење на матрици	40
1.6.12 Матрично „делење“ - решавање на матрични равенки	40
1.6.13 Својствени вредности (Eigenvalues)	42
1.6.14 Примери и задачи	43
1.7 Графика – цртање во MATLAB	45
1.7.1 Претставување на графикон на функција со една променлива	45
1.7.2 Избор на вид и облик на линија	49
1.7.3 Цртање график на функција	50
1.7.4 Ставање наслов (име) и текст на графикот и означување на оските	50
1.7.5 Додаток: Наредби за цртање и примери за користење	52
1.8 Програмирање во MATLAB	70
1.8.1 М фајлови – скрипти и функции	70
1.8.2 Контрола при извршувањето на м-фајлот	70
1.8.3 Функции за работа со стрингови	72
1.8.4 Зачувување и читање на податоци од датотека	72
1.8.5 Оператори – аритметички и релациски	76
1.8.6 Основни функции	77

1.8.7	Командни или script (скрипти) фајлови	77
1.8.8	Функциски фајлови	80
1.8.9	Управување во текот на извршување на програмата	82
1.9	Математика во MATLAB, лимеси, равенки, изводи и интегрални ...	87
1.9.1	Гранична вредност на функција	87
1.9.2	Извод на функција	87
1.9.3	Примена на изводите	87
1.9.4	Работа со полиноми	90
1.9.5	Решавање на равенки со една променлива - fzero	92
1.9.6	Решавање равенки со една и повеќе променливи – Solve	93
1.9.7	Решавање систем на равенки	93
1.9.8	Решавање системи линеарни равенки	94
1.9.9	Задачи за вежби	98
1.9.10	Интегрални - неодреден интеграл	98
1.10	Основи на SIMULINK	100
1.10.1	Што е SIMULINK?	100
1.10.2	Стартување на SIMULINK	100
1.10.3	Фајлови на моделот	102
1.10.4	Основни елементи – блокови и линии	103
1.10.5	Едноставен пример	105
1.10.6	Модифицирање на блоковите	106
1.10.7	Старт на симулацијата	109
1.10.8	Градење на системи	115
1.10.9	Земање параметри од MATLAB	125
1.10.10	Други можности на SIMULINK	127
1.11	Литература	133
2.	МАТЕМАТИЧКИ ОСНОВИ	134
2.1	Вовед	134
2.2	Диференцијални равенки	134
2.2.1	Обична диференцијална равенка	134
2.2.2	Линеарна диференцијална равенка од прв ред	136
2.2.3	Линеарна диференцијална равенка од втор ред	140
2.2.4	Линеарни диференцијални равенки со константни коефициенти	140
2.3	Лапласова трансформација	146
2.3.1	Дефиниција на Лапласовата трансформација	146
2.3.2	Лапласови трансформации од основни функции	147
2.3.3	Својства (теореме) на Лапласовата трансформација	151
2.4	Инверзна Лапласова трансформација и примени	157
2.5	Решавање на диференцијални равенки со помош на Лапласовата трансформација	161
2.6	Преносни функции – дефиниција и примени	167
2.6.1	Дефиниција	167
2.6.2	Интерпретација на преносната функција	168
2.6.3	Остварливост и својства на преносната функција	169
2.6.4	Преносна функција со мртво време (dead time)	170
2.6.5	Полови и нули на преносната функција	170
2.7	Решени задачи за примена на Лапласовата трансформација	171
2.7.1	Решени задачи за примена на Лапласовата трансформација	171
2.7.2	Решавање на линеарни, временски инваријантни,	

диференцијални равенки	176
2.7.3 Приказ на половите и нулите на преносна функција во комплексната рамни	178
2.8 Примена на MATLAB за решавање задачи	179
2.8.1 Работа со полиноми во MATLAB	179
2.8.2 Функции за одредување на Лапласовата трансформација и за дефинирање на LTI системи	186
2.9 Прашања и одговори	191
2.10 Литература	192
3. МОДЕЛИРАЊЕ НА ДИНАМИЧКИ СИСТЕМИ	193
3.1 Вовед	193
3.2. Моделирање на механички системи	194
3.2.1 Основни поими и закони на класичната механика	194
3.2.2 Моделирање на транслаторни механички системи	205
3.2.3 Моделирање на ротациски механички системи	235
3.2.4 Преносни функции за системи со запчаници	239
3.3. Моделирање на електрични системи	244
3.3.1 Моделирање на пасивни електрични кола	244
3.3.2 Активни електрични кола со операциски засилувачи	261
3.4 Моделирање на електромеханички системи	265
3.5 Примена на MATLAB за моделирање и симулација на динамички системи	272
3.5.1 Одсиви на линеарни динамички системи со помош на MATLAB	272
3.5.2 Симулација на динамички системи со решавање на диференцијални равенки во MATLAB	281
3.6 Конверзија на математичките модели со примена на MATLAB	290
3.7 Прашања и одговори	292
3.8 Литература	293
4. БЛОК ДИЈАГРАМИ И ГРАФОВИ НА ТЕКОТ НА СИГНАЛИ	294
4.1 Вовед	294
4.2 Алгебра на блок шеми	295
4.2.1 Презентација на САУ со блок шеми – основни споеви	295
4.2.2 Правила на алгебрата на блок шеми	298
4.2.3 Решени примери од алгебра на блок шеми	301
4.3 Граф на текот на сигнали. Мејсоново правило	308
4.3.1. Граф на текот на сигнали (Signal Flow Graph)	308
4.3.2 Мејсоново правило (Mason's Formula)	313
4.4 Примена на MATLAB за моделирање, симулација и манипулација со блок дијаграми	323
4.5 Прашања и задачи	338
4.6 Литература	340
5. ВРЕМЕНСКИ ОДСИВ НА ДИНАМИЧКИТЕ СИСТЕМИ	341
5.1 Вовед	341
5.2 Полови и нули на преносна функција и одсив на систем	341
5.2.1 Полови на преносна функција	342
5.2.2 Нули на преносна функција	342
5.2.3 Полови и нули на систем од прв-ред: Пример	342

5.3	Временски одзив на системи од прв ред	345
5.4	Временски одзив на системи од втор ред	351
5.4.1	Системи од втор ред	351
5.4.2	Општ систем од втор ред	357
5.4.3	Придушени осцилаторни системи од втор ред	361
5.5	Точност на САУ во стационарната состојба – константи на грешка	367
5.6	Прашања и одговори	376
5.7	Литература	378
6.	СТАБИЛНОСТ	379
6.1.	Вовед	379
6.1.1	Стабилни и нестабилни системи	379
6.1.2	Дефинирање на стабилноста и услови за стабилност	384
6.2.	Алгебарски критериуми за стабилност	387
6.2.1	Хурвицов критериум на стабилност	387
6.2.2	Рутов Критериум	390
6.3	Стабилност во просторот на состојба	397
6.4	Стабилност на системите со помош на MATLAB	400
6.5	Прашања и одговори	407
6.6	Литература	408
7.	АНАЛИЗА НА ДИНАМИЧКИТЕ СИСТЕМИ ВО ПРОСТОРОТ НА СОСТОЈБА	409
7.1	Вовед	409
7.2	Диференцијални равенки и модели во просторот на состојба	421
7.2.1	Модел во просторот на состојба во управлива канонска форма ..	421
7.2.2	Модел во просторот на состојба во набљудлива канонска форма	426
7.3	Добивање на равенки на состојба од преносни функции	432
7.3.1	Метод на директно програмирање	432
7.3.2	Метода на паралелно програмирање	437
7.3.3	Метод на сериско програмирање	442
7.4	Графови на текот на сигнали и модели во просторот на состојба ...	450
7.4.1	Добивање преносна функција со помош на граф на текот на сигнали	450
7.4.2	Добивање на равенки на состојба од преносната функција на системот со помош на граф на текот на сигнали	452
7.4.3	Алтернативни графови на текот на сигнали	460
7.5	Линеарна трансформација на векторот на состојба	462
7.6	Решение на равенките на состојба на непобуден систем	465
7.6.1	Слободен одзив	465
7.6.2	Фундаментална матрица и нејзините својства	468
7.6.3	Слободен одзив со помош на Лапласовата трансформација	469
7.7	Решение на равенките на состојба на побуден систем	473
7.7.1	Одзив на побуден систем	473
7.7.2	Одзив на побуден систем со помош на Лапласовата трансформација	475
7.8	Матрична преносна функција	476
7.9	Анализа на динамичките системи во просторот на состојба со применан на MATLAB	481
7.10	Решени примери	493
7.11	Прашања и одговори	500
7.12	Литература	502

8. СИНТЕЗА НА СИСТЕМИТЕ НА АВТОМАТСКО УПРАВУВАЊЕ ВО ПРОСТОРОТ НА СОСТОЈБА	503
8.1 Вовед	503
8.2 Управливост и набљудливост на линеарните динамички системи ..	505
8.2.1 Управливост	505
8.2.2 Набљудливост	508
8.2.3 Врска помеѓу управливоста, набљудливоста и преносните функции	510
8.3 Синтеза на управување со повратна врска по комплетниот вектор на состојба	512
8.3.1 Метод на подесување на половите (pole_placement)	514
8.3.2 Примена на Акермановата формула	517
8.4 Проектирање на САУ во просторот на состојба со примена на MATLAB	520
8.5 Решени задачи	525
8.6 Прашања и одговори	533
8.7 Литература	535
9. ПИД УПРАВУВАЧИ	536
9.1 Вовед	536
9.1.1 Дејство на ПИД управувачите	536
9.1.2 ПИД управувач со деривативен член во повратната врска	541
9.2 Системи на управување со P, PI, PD и PID управувачи	543
9.2.1 Систем со пропорционален управувач (P)	543
9.2.2 Систем со пропорционално-интегрален управувач (PI).....	547
9.2.3 Систем со пропорционално-деривативен управувач (PD).....	553
9.2.4 Систем со пропорционално интегрално деривативен управувач (PID)....	561
9.3 Нагодување на PID управувачи по методот на Циглер и Николс	570
9.4 Систем на управување со антена по азимут со примена на PID управувач	577
9.5 Прашања и одговори	586
9.6 Литература	588
10. ПРИЛОЗИ	589
Прилог А: Табели со Лапласови трансформации	589
Прилог В: Речник на термини и кратенки	593
Прилог С: HELP алатка на MATLAB	602