



משרד החינוך  
המינהל למדע ולטכנולוגיה

# תכנית לימודים

מכטרוניקה      התמחות:

בקרת תהליכים      מקצוע:

י"ג      כיתה:

תשס"ז 2007

# בקרת תהליכים

## א. מבוא

מערכות אוטומטיות מהוות מרכיב חיוני בייעול המתמיד של מכונות ותהליכים פיסיקליים המשפיעים על שגרת החיים של בני האדם.

המקצוע בקרת תהלים מציג לסטודנט בעיות בסיסיות הקשורות לוויסות ובקרה של תהליכים פיסיקליים המוכרים לו מסביבתו הקרובה, ודרך מובנית לחקירתן ופתרוןן.

## ב. מטרות

- הכרת מושגי היסוד הקשורים למערכות בקרת תהליכים.
- הבנת העקרונות הבסיסיים שעל פיהם פועלות מערכות לבקרת תהליכים.
- הכרה ויישום של שיטות מתמטיות הנדרשות במערכות בקרת תהליכים.
- הכרה ויישום של שיטות לניתוח ביצועים של מערכות בקרת תהליכים.
- הכרת מושגי הייסוד של מערכות ספרתיות לבקרת תהליכים.
- הכרה ושימוש בתכנת הדמיה (MATLAB).

## ג. פירוט הנושאים

### ■ לימודים עיוניים

שעות	נושאי הלימוד
	<b>כיתה י"ג – 6 שעות שבועיות – טרימסטר א-ב</b>
12	1 מבוא למערכות בקרה
30	2 רקע מתמטי למערכות בקרה
36	3 אלגברה של דיאגראמות מלבנים
36	4 ביצועים של מערכות בקרה
30	5 דוגמאות לתהליכים מסדר I וסדר II
<b>144</b>	<b>סה"כ שעות בכיתה י"ג</b>

שעות	נושאי הלימוד
	<b>כיתה י"ד – 5 שעות שבועיות – טרימסטר ג</b>
15	1 שגיאות במערכות בקרה
10	2 יציבות של מערכות בקרה עם משוב
35	3 שיטת המג"ש לניתוח יציבות של מערכת בקרה עם משוב
<b>60</b>	<b>סה"כ שעות בטרימסטר ג</b>

שעות	נושאי הלימוד
	<b>כיתה י"ד – 4 שעות שבועיות – טרימסטר ד-ה</b>
8	1 יציבות של מערכות בקרה עם משוב ושיטת המג"ש - רענון
28	2 שימוש בעקומי בודה לניתוח יציבות של מערכת בקרה עם משוב
8	3 רשתות קיזוז
24	4 מבוא לבקרה ספרתית
28	5 הכרה ושימוש בתכנת MATLAB לניתוח תגובה ויציבות של מערכות בקרה
96	<b>סה"כ שעות בטרימסטרים ד-ה</b>
<b>156</b>	<b>סה"כ שעות בכיתה י"ד</b>

■ לימודים עיוניים – פירוט תכנית הלימודים (כיתה י"ג)

שעות	נושאי הלימוד
12	<p><b>1 מבוא למערכות בקרה</b></p> <p>1.1 מערכת בקרה כללית, מערכת בקרה בחוג פתוח ומערכת בקרה בחוג סגור</p> <p>1.2 דוגמאות למערכת בקרה</p> <p>1.3 מודל מתמטי של תהליך – באמצעות משוואה דיפרנציאלית</p>
30	<p><b>2 רקע מתמטי למערכות בקרה</b></p> <p>2.1 הגדרה של פונקציה. פונקציות בסיסיות: הלם, מדרגה, מהירות, תאוצה, <math>e^x</math>, <math>e^{-x}</math>, וסינוס. הזזת פונקציה בציר האופקי ושינוי קנה מידה. הגדרה של פונקציית הנגזרת והנגזרות של הפונקציות הבסיסיות</p> <p>2.2 הגדרה של מספר מרוכב. כתיבת מספר מרוכב בשיטה הקרטזית ובשיטה הפולרית. פעולות אלגבריות במספרים מרוכבים</p> <p>2.3 ההגדרות של התמרת לפלס והתמרת לפלס ההפוכה, טבלת התמרות לפלס. משפטי הערך הסופי והערך ההתחלתי</p>
36	<p><b>3 אלגברה של דיאגרמות מלבנים</b></p> <p>3.1 הגדרת פונקציית התמסורת של מערכת במישור לפלס ופונקציית התמסורת השקולה. סימונים מוסכמים: מלבן, נקודת צומת, נקודת סיכום</p> <p>3.2 כללי הצמצום היסודיים: חיבור מלבנים בטור ובמקביל, הזזת נקודת צומת לפני מלבן, הזזת נקודת צומת אחרי מלבן, וביטול משוב</p> <p>3.3 שיטת ההצבה (רשות)</p> <p>3.4 עקרון הסופרפוזיציה למערכת מרובת כניסות</p>
36	<p><b>4 ביצועים של מערכות בקרה</b></p> <p>4.1 הגדרות: תגובת מעבר ותגובה במצב המתמיד של תהליך פיסיקלי</p> <p>4.2 פונקציית התמסורת של תהליך עם פיגור מסדר I</p> <p>4.3 תגובת תהליך עם פיגור מסדר I לאילוף מדרגה, במצב היציב ובמצב המעבר מתוך ידיעת פונקציית התמסורת – המושגים קבוע זמן והגבר סטטי. תיאור מתמטי וגרפי של תגובת תהליך עם פיגור מסדר I לאילוף מדרגה</p> <p>4.4 תגובת מערכת עם פיגור מסדר II לאילוף מדרגה, במצב היציב ובמצב המעבר מתוך ידיעת פונקציית התמסורת – המושגים תדירות טבעית, תדירות התנודות המרוסנות, ומקדם הריסון. תיאור מתמטי וגרפי של תגובת תהליך עם פיגור מסדר II לאילוף מדרגה – הבחנה בין הערכים האפשריים של מקדם הריסון</p>

שעות	נושאי הלימוד
30	<p>5 דוגמאות לתהליכים מסדר I וסדר II</p> <p>5.1 תהליך מילוי מכל ותהליך טעינת קבל והשוואה ביניהם</p> <p>5.2 תיאור מערכת מכנית הכוללת קפיץ ומרסן ומעגל חשמלי הכולל קבל וסליל והשוואה ביניהם</p>
144	סה"כ שעות בכיתה י"ג

## ד. ספרות עזר – ביבליוגרפיה

הספר שעליו מתבססת התכנית:

R.C.Dorf, *Modern Control Systems*, Prentice-Hall, 9/e 2001

אפשר להשתמש גם במהדורות קודמות החל ממהדורה חמישית (5/e), שראו אור בהוצאת Addison Wesley משנת 1989, או במהדורה האחרונה (10/e), בהוצאת Prentice-Hall.

## ספרות עזר נוספת

1. בהיר זאב ולוי אבי, **בקרת תהליכים**, הוצאת אורט.
2. בהיר זאב, **מבוא לבקרה**, הוצאת "מערכות הספק".
3. פויאר אריה, **בקרה ליניארית**, הוצאת האוניברסיטה הפתוחה.
4. פסן דוד, **מבוא לבקרה ואוטומציה**, הוצאת מכלול.

## ה. הערות

1. נושא בקרים תעשייתיים הוצא מן התכנית – אפשר לשלבו בתוכנית טרימסטרים ד-ה.
2. שיטות ניתוח נוספות כמו נייקוויסט וראוט – הורביץ – אינם בתכנית המוצעת ובמקומן הורחב נושא השימוש בתוכנת סימולציה.
3. נושא בקרה ספרתית – הוא נושא חדש המעדכן את תכנית הלימודים.

## ■ לימודים עיוניים – פירוט המטרות הלימודיות

### 1 מבוא למערכות בקרה

- **לדעת** להגדיר מהי מערכת בקרה כללית, מערכת בקרה בחוג פתוח ומערכת בקרה בחוג סגור.
- **להבין** את משמעות המשוב, **לדעת** מהם מרכיבי הבסיס של מערכת בקרה: התהליך המבוקר, בקר התהליך, יחידת גילוי השגיאה, וחיישן המשוב.
- **להכיר** דוגמאות למערכת בקרה.
- **לדעת לזהות** בדוגמאות את מרכיבי הבסיס שתוארו בסעיף הקודם.
- **להבין** כי על מנת לבקר תהליך כל שהוא יש לחקור אותו ולבנות עבורו מודל מתמטי כמותי.
- **להבין** כי הדינאמיות של התהליך גוררת תיאור מתמטי באמצעות משוואה דיפרנציאלית.
- **להבין** כי פתרון של משוואה דיפרנציאלית יהיה בצורת פונקציה מתמטית המתארת בדרך כלל קשר בין הזמן לגודל פיסיקלי מסוים.

### 2 רקע מתמטי למערכות בקרה

#### 2.1 פונקציה ופונקציה נגזרת

- **לדעת** להגדיר פונקציה ובפרט פונקציה של הזמן
- **הכרת** פונקציות בסיסיות המקובלות בבקרה: הלם, מדרגה, מהירות, תאוצה,  $e^x$ ,  $e^{-x}$ , וסינוס.
- **להבין** כי הזזת פונקציה בציר האופקי נעשית על ידי הוספה או חיסור מן הארגומנט, בפרט הסחת פאזה בפונקציית סינוס.
- **להבין** כי שינוי קנה מידה מבוצע על ידי הכפלה או חילוק של הארגומנט.
- **לדעת** להגדיר את פונקציית הנגזרת **ולהבין** את משמעותה.
- **להכיר** את הנגזרות של הפונקציות שהוזכרו בסעיף 2.1.2.

#### 2.2 מספרים מרוכבים

- **להבין** את הצורך בהגדרת מערכת המספרים המרוכבים.
- **ליישם** כתיבת מספר בשיטה הקרטזית ובשיטה הפולרית ומעבר בין הצורות השונות.
- **ליישם** פעולות אלגבריות במספרים מרוכבים: חיבור, חיסור, כפל וחילוק.

#### 2.3 התמרות לפלס

- **להבין** את הצורך בשימוש בהתמרות לפלס לפתרון משוואות דיפרנציאליות ליניאריות.

- **להכיר** את העובדה כי ההתמרה מעבירה פונקציה ממישור הזמן למישור S (המישור – המרוכב) וההתמרה הפוכה מחזירה למישור הזמן.
- **להכיר** את ההגדרות של התמרת לפלס והתמרת לפלס ההפוכה.
- **ליישם** התמרה והתמרה הפוכה באמצעות טבלת התמרות לפלס.
- **להכיר** את משפטי הערך הסופי והערך ההתחלתי **ולהבין** הצורך של השימוש בהם.

### 3 אלגברה של דיאגראמות סלבנים

- **לדעת** את הגדרת פונקציית התמסורת של מערכת במישור לפלס כחס בין מוצא המערכת לכניסתה.
- **להכיר** דוגמה למערכת בסיסית כלשהי.
- **להבין** כי מערכת מעשית מורכבת פעמים רבות מאוסף של תת מערכות המחוברות ביניהן והצורך בהחלפתן במערכת יחידה בעלת פונקציית תמסורת שקולה.
- **להכיר** סימונים מוסכמים: מלבן, נקודת צומת, נקודת סיכום.
- **יישום** הכרת הסימונים (מהסעיף הקודם) להוכחת כללי הצמצום היסודיים:
- חיבור מלבנים בטור ובמקביל, הזזת נקודת צומת לפני מלבן, הזזת נקודת צומת אחרי מלבן, וביטול משוב.
- **יישום** כללי הצמצום על ידי פתרון תרגילים שונים.
- **הכרה ויישום** של שיטת ההצבה למציאת פונקציית התמסורת השקולה (רשות).
- הכרה ויישום עקרון הסופר פוזיציה לפתרון תרגילים במערכת מרובת כניסות.

### 4 ביצועים של מערכות בקרה

- **הבנת** ההגדרות של תגובת מעבר ותגובה במצב המתמיד של תהליך פיסיקלי.
- **הבנת** הפיתוח של פונקציית התמסורת של תהליך עם פיגור מסדר I.
- **יישום** משפט הערך הסופי לקבלת התגובה במצב היציב.
- **הבנת** תגובת תהליך עם פיגור מסדר I לאילוץ מדרגה, במצב היציב ובמצב המעבר מתוך ידיעת פונקציית התמסורת.
- **הבנת** המושגים קבוע זמן והגבר סטטי.
- **הבנת** התיאור הגרפי של תגובת תהליך עם פיגור מסדר I לאילוץ מדרגה.
- **יישום** סרטוט גרף של תגובת מערכת מסדר I לאילוץ מדרגה כשידועים הפרמטרים של התהליך.
- **יישום** של מציאת הפרמטרים של התהליך מתוך סרטוט התגובה.
- **הבנת** הפיתוח של פונקציית התמסורת של תהליך עם פיגור מסדר II.
- **הבנת** תגובת מערכת עם פיגור מסדר II לאילוץ מדרגה, במצב היציב ובמצב המעבר מתוך ידיעת פונקציית התמסורת.
- **הבנת** המושגים תדירות טבעית, תדירות התנדודות המרוסנות, מקדם הריסון, זמן הגעה לשיא ראשון ותגובת יתר.

- **הבנת** התיאור הגרפי של תגובת תהליך עם פיגור מסדר II לאילוץ מדרגה – הבחנה בין הערכים האפשריים של מקדם הריסון.
- **יישום** סרטוט גרף של תגובת מערכת מסדר II לאילוץ מדרגה כשידועים הפרמטרים של התהליך.
- **יישום** של מציאת הפרמטרים של התהליך מתוך סרטוט התגובה.

## 5 דוגמאות לתהליכים מסדר I וסדר II

- **הבנת** התהליך של מילוי מכל ותהליך טעינת קבל והאנלוגיה ביניהם.
- **הבנת** תהליך העברת אנרגיה קינטית בין קפיץ ומרסן ותהליך העברת אנרגיה חשמלית בין סליל וקבל והעברת אנרגיה ביניהם.

## 1. רשימת מושגים ומילות מפתח

1. מערכת בקרה
2. חוג פתוח
3. חוג סגור
4. מודל מתמטי של מערכת
5. אילוץ
6. תגובה בזמן
7. מספר מרוכב
8. התמרות לפלס
9. ערך סופי, ערך התחלתי
10. דיאגרמת מלבנים
11. הגבר
12. כללי צמצום
13. פיגור מסדר ראשון
14. קבוע זמן
15. פיגור מסדר שני
16. מקדם ריסון
17. תדר תנודות