

משרד החינוך  
המינהל למדע ולטכנולוגיה  
הפיקוח על מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים  
ומגמת מערכות בקרה ואנרגיה

## מגמת הנדסת חשמל בקרה ואנרגיה

תכנית לימודים במקצוע

# המרת אנרגיה והינע ב'

סמל מקצוע 33.9112

כיתה י"ד

אדר תשס"ז (פברואר 2007)

מהדורה להערות

## תכנית הלימודים במקצוע

### המרת אנרגיה והינע ב' – 180 שעות

#### כיתה י"ד

מספר השעות	ראשי פרקים
32	1. מכונה סינכרונית
30	2. שיקולים ושיטות לבחירה של מנועים חשמליים.
32	3. בלימה של מנועים חשמליים.
32	4. וויסות ובקרת מהירות של מתקני הינע.
30	5. תופעות מעבר במערכות הינע חשמליות.
12	6. הפסדי אנרגיה במערכות הינע חשמליות.
6	7. מנוע קולקטור הפועל בזרם חילופין
6	8. מנוע צעד
<hr/> 180	סה"כ

- 1.1 מבנה ועקרונות הפעולה של מכונה סינכרונית
- 1.1.1 מבנה עקרוני של מכונה סינכרונית. מכונה עם רוטור גלילי (cylindrical rotor) ומכונה עם רוטור קטבים בולטים (salient pole). תפקידם של ליפוף הרוטור (סליל העירור) וליפוף הסטטור (סלילי המופעים).
- 1.1.2 אספקת מתח למכונה: חיבור של מתח ישר לסליל העירור וחיבור של מתח חילופין לסלילי המופעים.
- 1.1.3 עקרון הפעולה של מכונה סינכרונית: מכונה הפועלת כמנוע ומכונה הפועלת כמחולל.
- 1.2 סרטוט של מעגל התמורה החשמלי של מכונה סינכרונית
- 1.2.1 תיאור וסרטוט של השדה המגנטי המסתובב המתקבל ברוטור. הכוח-המגנטו-מניע (כמ"מ) הנוצר ברוטור עגול והכמ"מ הנוצר ברוטור בעל קטבים בולטים.
- 1.2.2 תיאור של השדה המגנטי המסתובב של הסטטור. תיאור של הכמ"מ הנוצר בסטטור כאשר זורם בו זרם. תיאור של השדה המגנטי השקול הנוצר במכונה (חיבור וקטורי של הכמ"מ הנוצר ברוטור עם הכמ"מ הסטטור).
- 1.2.3 חישוב, מקורב, של הכח-אלקטרו-מניע (כא"מ) הנוצר במכונה סינכרונית. תיאור של התלות בין מהירות הסיבוב של הרוטור לתדירות של המתח הנוצר בסטטור.
- 1.2.4 סרטוט של מעגל תמורה של מכונה סינכרונית, בעלת רוטור גלילי, במצב יציב. הגדרת ההיגב הסינכרוני של המכונה כסכום של ההיגב המייצג את המגנט במכונה וההיגב המייצג את שטף הפיזור.
- 1.2.5 סרטוט של דיאגרמת המחוגים של מכונה סינכרונית בעלת רוטור עגול. הגדרת הזווית  $\delta$ , הזווית בין הכא"מ לבין מתח ההדקים - זווית ההספק במחולל, או זווית העומס במנוע. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.2.6 הגדרת מצבי העבודה השונים של מכונה סינכרונית. הגדרת המושגים "תת עירור" ו-"עירור יתר". ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.3 חישוב של הפרמטרים השונים של מכונה סינכרונית על-פי תוצאות מדידה.
- 1.3.1 חישוב של ההיגב הסינכרוני באמצעות מדידת תלות הכא"מ בזרם העירור בריקם, ובאמצעות מדידת תלות זרם הסטטור, במצב, קצר בזרם העירור.
- 1.3.2 חישוב של ההפסדים המכאניים במכונה על-פי תוצאות מדידת הפסדי המכונה בריקם, כאשר קיים מגנט במכונה וכאשר לא קיים מגנט במכונה.
- 1.4 הספקים במכונה סינכרונית.
- 1.4.1 פיתוח של משוואות ההספקים במכונה: משוואת ההספק הפעיל ומשוואת ההספק ההיגבי. פיתוח של משוואות תלות ההספקים ב: מתח ההדקים, בהיגב הסינכרוני ובזווית  $\delta$ .

- 1.4.2 תיאור גרפי של ההספקים במכונה בתלות בזווית  $\delta$ . הגדרת גבולות ערכי הזווית  $\delta$  בהם המכונה יציבה והגדרת גבולות ערכי הזווית  $\delta$  בהם המכונה בלתי יציבה. הגדרת גבולות ערכי הזווית בהם פועלת המכונה כמנוע ו גבולות ערכי הזווית  $\delta$  בהם פועלת המכונה כמחולל. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.4.3 מאזן ההספקים במכונה, אפיון ההפסדים והגדרת הנצילות. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.4.4 תיאור של תלות הזרם בסטטור בזרם העירור עבור הספק קבוע (גורם ההספק משתנה). תיאור של עקומי  $V$  של המכונה. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.5 מחולל סינכרוני
- 1.5.1 תחומי שימוש אופייניים. תיאור של סדרי גודל של הספקים מקובלים.
- 1.5.2 שיטות לבקרת מתח ההדקים של המחולל. תיאור, באמצעות דיאגרמת מחוגים, של תלות מתח ההדקים בעומס. חישוב, באמצעות אופיין הריקים של המכונה (תלות הכא"מ בזרם העירור), של זרם העירור הנדרש לשם קבלת מתח הדקים רצוי. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.5.3 שיטות לבקרת ההספק ההיגבי של המחולל.
- 1.5.4 חישוב ההספקים וזווית ההספק  $\delta$  כאשר המחולל מחובר במקביל לרשת קשיחה (מתח הדקים קבוע). ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.5.5 סנכרון של המחולל לרשת. תיאור של התנאים הדרושים לחיבור של מחולל סינכרוני לרשת (חיבור מקורות תלת מופעיים במקביל). שיטות סנכרון: סנכרון בחושך, סנכרון באור, סנכרון בעזרת סינכרוסקופ.
- 1.5.6 אלטרנאטור (Alternator) תלת מופעי וחד מופעי: מחולל סינכרוני שברוטור שלו מותקן מגנט קבוע. תיאור של המבנה, עקרון פעולה ותחומי השימוש - סקירה בלבד.
- 1.6 מנוע סינכרוני
- 1.6.1 תחומי שימוש של מנוע סינכרוני. הספקים של מנועים סינכרוניים בשימושים השונים.
- 1.6.2 חישוב של ההספקים וזווית העומס  $\delta$  של מנוע המחובר במקביל לרשת קשיחה (בעלת מתח הדקים קבוע). חישוב של מאזן ההספקים במנוע וחישוב נצילות המנוע.
- 1.6.3 בקרת ההספק ההיגבי של מנוע סינכרוני – שימוש במנוע סינכרוני לבקרת גורם ההספק של המערכת החשמלית בה הוא מותקן. סרטוט דיאגרמת המחוגים של מנוע סינכרוני. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 1.6.4 עבור מנוע סינכרוני המחובר במקביל לרשת חשמלית כקבל סינכרוני, חישוב הזרם המרבי וההספק ההיגבי המרבי של מנוע.
- 1.6.5 שיטות להתנעת מנוע סינכרוני: התנעה של המנוע הסינכרוני בדומה להתנעת מנוע השראתי על-ידי הוספת נגד למעגל הרוטור. התנעה של המנוע סינכרוני באמצעות מנוע עזר, וביצוע סנכרון לרשת. התנעה אסנכרונית, התנעה באמצעות משנה תדירות. ביצוע של חישובים מתאימים.

## 30 שעות

## 2. שיקולים ושיטות לבחירה של מנועים חשמליים

- 2.1 תיאור של סוג הבידוד של המוליכים במנוע והשפעתו על הטמפרטורה המרבית המותרת במנוע.
- 2.2 תיאור של תהליך החימום ותהליך הקירור של מנוע חשמלי.
- 2.3 הגדרות של: טמפרטורת הסביבה, טמפרטורת עבודה, קצב קירור, קצב חימום וקבוע זמן חימום של המכונה. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 2.4 סרטוט והסבר של דיאגרמות העמסה של מנוע חשמלי – תלות המומנט המכאני, ההספק וזרם המנוע בזמן. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 2.5 תיאור ומיון של מצבי השרות שונים של מנוע בהתאם לתקן ובהתאם לזמן העבודה היחסי. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 2.6 תיאור של סוגי פעולה של מנועים חשמליים – עבודה רצופה, עבודה מקוטעת ועבודה קצרה.
- 2.7 הצגת השיקולים בבחירת ההספק הנומינלי של מנוע חשמלי – קבוע זמן החימום של מנוע חשמלי והשפעת טמפרטורת הסביבה. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 2.8 חישוב ההספק של מנוע הפועל: בעומס רצוף, בעומס קצר ובעומס מקוטע.
- 2.9 חישוב ההספק של מנוע הפועל בעומס משתנה על-פי: שיטת ההפסדים הממוצעים, שיטת הזרם השקול, שיטת המומנט השקול ושיטת ההפסק השקול.

## 32 שעות

## 3. בלימה של מנועים חשמליים

- 3.1 תיאור של האופינים המכאניים של מכונות עבודה שונות.
- 3.2 תיאור של האופינים המכאניים של מנועים חשמליים: מנוע לזרם ישר בעירור טורי, מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי, מנוע לזרם ישר בעירור ניפרד (זר), מנוע לזרם ישר בעירור מעורב ומכונת השראה תלת-מופעית.
- 3.3 תיאור של האופינים המכאניים של מנועים חשמליים ומכונות עבודה, הפועלים יחד, בתנאים יציבים.
- 3.4 עבור מעגלי הבלימה המתוארים בתת הסעיפים הבאים יש ללמד את: תיאור של המעגלים השונים, פירוט של היתרונות והחסרונות של כל מעגל, חישוב של ערכי הרכיבים השונים במעגלי הבלימה וחישוב של זמן הבלימה בכל מעגל. ביצוע של חישובים הנדרשים בשיטות אנליטיות ובשיטות וגרפואנליטיות.
  - 3.4.1 בלימה של מנוע לזרם ישר על-ידי הפיכת המנוע למחולל (בלימה גנרטורית- תוך החזרת אנרגיה לרשת) עבור: מנוע לזרם ישר הפועל בעירור מקבילי, מנוע לזרם ישר הפועל בעירור ניפרד (זר), מנוע לזרם ישר הפועל בעירור מעורב ועבור מכונת השראה תלת-מופעית.
  - 3.4.2 בלימה דינאמית של מנוע לזרם ישר הפועל: בעירור מקבילי, בעירור נפרד(זר), בערור מעורב ועבור מכונת השראה תלת-מופעית.
  - 3.4.3 בלימה באמצעות חיבור נגדי של המכונה עבור מנועים לזרם ישר הפועלים: בעירור מקבילי ניפרד (זר), בעירור מעורב ועבור מכונת השראה תלת-מופעית.

- 4. וויסות ובקרת מהירות של מתקני הינע 32 שעות**
- 4.1 תיאור, באמצעות תרשימי מלבנים, של שיטות שונות לוויסות מהירות במערכות הינע.
- 4.2 הגדרת המושגים הבאים הקשורים בוויסות מהירות במתקני הינע: טווח הוויסות, רציפות הוויסות, כלכליות הוויסות, יציבות פעולת המכונה, כיוון הוויסות, העמסה מותרת בזמן וויסות מהירות המכונה.
- 4.3 וויסות מהירות בשיטות אלקטרו-מכאניות של מנוע לזרם ישר הפועל: בעירור מקבילי ניפרד (זר), בעירור טורי, או בעירור מעורב.
- 4.3.1 וויסות של מהירות המכונה באמצעות שינוי ההתנגדות במעגל העוגן, או על-ידי שינוי מתח ההזנה לעוגן. חישוב של נצילות המערכת, וביצוע של חישובים מתאימים אחרים.
- 4.3.2 וויסות המהירות של המכונה באמצעות שינוי זרם העירור, או שינוי מתח האספקה לסטטור. חישוב של נצילות המערכת, וביצוע של חישובים מתאימים אחרים.
- 4.3.3 וויסות המהירות של מנוע לזרם ישר באמצעות מעגלים אלקטרוניים: באמצעות יישור מבוקר של זרם החילופין, באמצעות ממיר AC\DC ממותג, על-ידי בקרת מחזור הפעולה (duty cycle) ובאמצעות אפנון רחב הדופק (PWM).
- 4.4 וויסות המהירות של מנוע השראה באמצעות אלקטרו-מכאניים:
- 4.4.1 על-ידי שינוי החליקה (על-ידי חיבור בטור של נגדים למעגל הרוטור (רוטר מלופף). ביצוע של חישובים מתאימים.
- 4.4.2 על-ידי שינוי מספר זוגות הקטבים בסטטור. ביצוע של חישובים רלוונטיים.
- 4.5 וויסות המהירות של מנוע השראה באמצעות מעגלים אלקטרוניים: על-ידי שינוי המתח ההזנה ועל-ידי שינוי תדירות מתח הזנה. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 4.6 תיאור של מערכת לוויסות המהירות של מנוע השראה באמצעות מצמד החלקה אסינכרוני.
- 5. תופעות מעבר במערכות הינע חשמלי 30 שעות**
- 5.1 תיאור של תופעות מעבר במערכות הינע והגדרת המצבים בהם מתקיימות תופעות מעבר.
- 5.2 תופעת מעבר המופיעות, במערכת אלקטרומכנית, בזמן התנעה של עם מנוע לזרם ישר, בעת בלימה דינאמית, בעת בלימה על-ידי בחיבור נגדי ובזמן היפוך כיוון הסיבוב של המנוע. הערכת משך הזמן של תופעות המעבר השונות.
- 5.3 תופעות מעבר במערכת עם מנוע השראתי בהתנעה, בבלימה דינאמית, בבלימה בחיבור נגדי ובהפיכת כיוון סיבוב. הערכת משך הזמן של תופעות המעבר השונות. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 6. הפסדי אנרגיה במערכות הינע חשמליות 12 שעות**
- 6.1 ניתוח איכותי של הפסדי האנרגיה בעת התנעת מערכת הינע. ביצוע של חישובים מתאימים.
- 6.2 הפסדי אנרגיה הנוצרים בעת עצירת מערכות הינע:
- 6.2.1 בעת עצירה דינאמית, ביצוע של חישובים מתאימים.
- 6.2.2 בעת עצירה על-ידי חיבור נגדי. ביצוע של חישובים מתאימים.

6 שעות

**7. מנוע קולקטור לזרם חילופין**

- 7.1 עקרון הפעולה של מנוע עם קולקטור לזרם חילופין.
- 7.2 תיאור של תהליך הקומוטציה במכונה לזרם חילופין בעלת קולקטור (קומוטטור).

6 שעות

**8. מנוע צעד**

- 8.1 תיאור של מבנה עקרוני של מנוע צעד.
- 8.2 עקרון הפעולה של מנוע צעד
- 8.3 תיאור של מערכות הינע חשמליות המונעות באמצעות מנוע צעד.
- 8.4 מבנה ועקרון הפעולה של מערכות תמסורת- מהירות- מומנט למנועי צעד.
- 8.5 התאמת מנוע צעד ומערכת תמסורת להפעלת עומס מכני נתון. חישוב של המומנט בהתנעה, חישוב של מומנט ההחזקה ושל מומנט ההסטה בצעד.

## ספרות מומלצת

1. **יסודות ההנע החשמלי**, ב. אוסטר, אורט ישראל, מהדורה שלישית, 1989.
2. **הנע חשמלי**, ד"ר א. אלכסנדרוביץ', מכלול - ההוצאה לאור של סטודנטים בטכניון, 1972.
3. **המרת אנרגיה**, ד"ר ד. אלמקיס, מטח - המרכז לטכנולוגיה חינוכית, 1989.
4. **מכונות חשמל חלקים א' ו-ב'**, מ. קוסטנקו ו-ל. פיוטרובסקי, אורט ישראל, 1975.
5. **Electric Machinery and Transformers**, I. L. Kosow, Prentice Hall, 2nd edition, 1991
6. **Electric Machinery**, F. Ryff, Prentice Hall, 2nd edition, 1994
7. **The Performance and Design of Alternating Current Machines**, Say M.G. Pitman & Sons, 1961
8. **Electrical Machines, Drives And Power Systems**, Wildi T International Edition, Sixth Edition, Prentice Hall. 2006
9. **Electrical Power And Controls**, L.T. Skvarenina, D. E. William, Second Edition, Prentice Hall, 2004
10. **Electric Machines – Theory, Operation, Applications, Adjustment And Control**, I. C. Hubert, Second Edition, Prentice Hall, 2002