

אוניברסיטת תל - אביב
הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן
בית ספר לתארים מתקדמים ע"ש זנדמן-סליינר

תכן קונספטואלי בין תחומי

חיבור זה הוגש כעבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה" בהנדסה מכאנית

על - ידי

רומן ד.ר. גורודצקי

סיון תשס"ה

אוניברסיטת תל - אביב
הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן
בית ספר לתארים מתקדמים ע"ש זנדמן-סליינר

תכנ קונספטואלי בין תחומי

חיבור זה הוגש כעבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה" בהנדסה מכאנית
על - ידי

רומן ד. ר. גורודצקי

העבודה נעשתה במחלקה למכניקה, חומרים ומערכות
בהנחיית ד"ר עופר שי

סיון תשס"ה

ברצוני לומר תודה ל:

ה'.

אמי.

דודתי.

אוניברסיטת ת"א.

ד"ר עופר שי – מנחה העבודה.

במהלך כתיבת העבודה פקדו אותי צרות בתחומים שונים של החיים אשר גרמו לעיקוב ניקר במועד הגשת העבודה. הדבר גבה ממני מחיר רגשי וכלכלי כבד. ככלות הכול, אני מאמין בעבודה שעשיתי, היא די חדשנית מסוגה ומכילה תכנים בעלי אופי תיאורטי ויישומי כאחד.

(אני מתנצל על שגיות הכתיב, למרות הבדיקה הקפדנית שנעשתה, הן עלולות להופיע פה ושם.)

בכבוד רב.



- תקציר -

מטרת המחקר הייתה פתוח שיטות תכן קונספטואלי של מערכות הנדסיות באמצעות העברת רעיונות קונספטואליים הקיימים בתחומים הנדסיים שונים. העברת המידע הקונספטואלי בין התחומים ההנדסיים השונים נעשית באמצעות ייצוגים מתמטיים.

השיטות שפותחו בתזה מבוססות על מודלים קומבינטוריים מוכללים, המבוססים בעיקר על תורת הגרפים. בשיטות הללו הטופולוגיה והחוקים הפיזיקאליים של המערכות ההנדסיות ממופים על ידי המודל הקומבינאטורי המתאים, דבר המאפשר העברת ידע בין התחומים ההנדסיים באמצעות ה-"מרחב העל המתמטי" (mathematical meta level) שהינו בעל יחידות הנדסיות גלובליות.

בתיזה נחקרו ופותחו מספר שיטות פורמאליות לתכן קונספטואלי והן :
תכן בעזרת ייצוג משותף; תכן בעזרת ייצוג דואלי; שיפור תכן בעזרת ייצוג משותף; תכן בעזרת ייצוג משולב; תכן בעזרת מודולים גרפיים. שתי השיטות הראשונות דווחו כבר, אולם במחקר הם הורחבו והופעלו ליישומים חדשים. שלושת השיטות הנוספות פותחו במחקר ומדווחות בתיזה לראשונה.

בתיזה מובאות מספר מערכות הנדסיות שהתקבלו לאחר הפעלת השיטות שפורטו להלן, כאשר התחומים הנדסיים עליהם נבדקו השיטות הם : הידראוליקה, אלקטרוניקה ומכאניקה.

ממעבר קונספטים מאלקטרוניקה התקבלו :
מגבר מומנט מכאני אקטיבי, מגבר זרימה הידראולי אקטיבי, מגבר מהירות מכאני אקטיבי, מגבר לחץ הידראולי אקטיבי, מצמד מכאני אקטיבי, מיישר מהירות מכאני, גלאי שיאי מהירות מכאני, מייצב מהירות מכאני ועוד.

ממעבר קונספטים ממכאניקה התקבלו :
דיפרנציאל הידראולי וחשמלי, בורר מתח מרבי חשמלי, בורר זרם מרבי חשמלי, בורר לחץ מרבי הידראולי, בורר ספיקה מרבית הידראולי, מחבר/מחסר זרמים חשמלי בעל שתי כניסות זרם בלתי תלויות, מחבר/מחסר ספיקות הידראולי ועוד.

במסגרת המחקר פותחו מספר מערכות הנדסיות, שיש להן חשיבות כרכיבים יסודיים העומדים בבסיס מערכות מורכבות בתחום האלקטרוניקה והמכאניקה. רכיבים אלו הם טרנזיסטור בי-פולארי ומגבר שרת אלקטרוניים, והדיפרנציאל המכאני. פתוח הרכיבים הללו נעשה בתחום המכאני האלקטרוני וההידראולי ומדווח בתיזה לראשונה. מערכות אלו נותנות אפשרויות רבות להרחיב את השימוש בשיטות התכן הקונספטואלי המדווחות בתיזה, במיוחד בשיטות תכן מבוססת גרף משותף.

בתיזה, לאחר הפעלת שיטות התכן על בעיות תכן, התקבלו מערכות הנדסיות אשר להן יש עניין הן מהצד התיאורטי והן מהצד המעשי, תוצאה המצביעה על אפשרות הרחבת הגישה גם ליצירתיות הנדסית שיטתית. יתר על כן, התברר שבהעברת תכן קונספטואלי מתחום הנדסי אחד לשני ישנה חשיבות רבה לבחירת ייצוג מתמטי המתאים. ייצוג טוב של מערכת הנדסית מאפשר להעביר מתחום הנדסי אחד לשני לא רק את מבנה המערכת אלא גם את התנהגותה ואת הפונקציונאליות שלה בהתאמה מלאה.

תוכן העניינים

IV	רשימת איורים וטבלאות
XIV	רשימת סימנים מוסכמים

1	פרק 1. מבוא
1	1.1. רקע כללי
3	1.1.1. מטרת המחקר וחשיבותו
4	1.2. סקר ספרות - שיטות תכן
4	1.2.1. שיטות תכן מסורתיות Cognitive Methods
7	1.2.2. שיטות תכן הניתנות למחשוב Computational Methods
10	1.2.3. תכן בעזרת אנאלוגיה
10	1.3. רקע תיאורטי בתורת הגרפים ובייצוג מערכות הנדסיות בעזרת ייצוג גרפי
10	1.3.1. הגדרות בסיסיות
13	1.3.2. ייצוג מערכות פיזיקאליות בעזרת גרפים
22	פרק-2. שיטת תכן קונספטואלי בעזרת ייצוג משותף (Common Graph)
22	2.1. מבוא
23	2.2. שימוש בשיטת "גרף משותף" לפתרון בעיות תכן הנדסי
28	2.3. דוגמאות של תכן בעזרת שיטת "גרף משותף"
28	2.3.1. בורר מהירות מרבית
32	2.3.2. שומר מהירות חיובית מרבית
39	פרק-3. תכן קונספטואלי בעזרת גרף דואלי (Dual Graph)
39	3.1. מבוא
40	3.2. שלבי פתרון בעיית תכן בעזרת שימוש בגרף דואלי

42	3.3. דוגמאות של תכן בעזרת גרף דואלי
42	3.3.1. מפעיל כוח לחיצה מרבי
45	3.3.2. ממצע כוחות
48	פרק 4- שיפור תכן בעזרת ייצוג משותף (פיתוח מערכת דיפרנציאל בתחומים הנדסיים שונים)
48	4.1. מבוא
49	4.2. תיאור שלבי התכן
	4.3. תכן מערכת דיפרנציאל בתחומים הנדסיים של מכאניקה, הידראוליקה ואלקטרוניקה בשיטת תכן בתחום עזר במקביל
50	4.3.1. מבוא כללי על מערכת הדיפרנציאל
50	4.3.2. תכן מערכת דיפרנציאל בתחומים הידראולי וחשמלי/אלקטרוני
52	4.3.3. ניסוח כללים לבניית דיפרנציאל במערכת פיזיקאלית חד-ממדיות
55	4.3.4. הפיכת פוטנציאל מוחלט להבדל פוטנציאליים של אלמנט בעזרת דיפרנציאל
58	4.3.8. מערכת דואלית לדיפרנציאל
60	
62	פרק 5- תכן בעזרת ייצוג משולב (Integrated Representation)
62	5.1. מבוא
63	5.2. שלבי התכן
65	5.3. פתוח מקור זרימה תלוי זרימה במערכת מכאנית קווית חד-ממדית
69	5.4. תכן מערכת מקור זרימה תלוי זרימה במערכת מכאנית סיבובית
71	פרק 6 - תכן מערכת בעלת ייצוג ידוע ע"י הרכבתה ממודולים ידועים
71	6.1. מבוא
72	6.2. שלבי התכן
74	6.3. פיתוח מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית סיבובית
77	6.4. פיתוח מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית קווית
78	6.5. פיתוח מקור זרימה תלוי זרימה של מערכת הידראולית.

פרק 7 - פיתוח בין תחומי של רכיבים אלקטרוניים יסודיים ודוגמאות

82	ויישומם בתכן	
82	7.1	הקדמה
82	7.2	טרנזיסטור צומת דו-נושאי (BJT)
83	7.2.1	פיתוח טרנזיסטור במערכת מכאנית קווית
84	7.2.2	פיתוח טרנזיסטור במערכת מכאנית סיבובית
87	7.3	מגבר-שרת (Operational Amplifier)
87	7.3.1	מגבר שרת במערכת מכאנית סיבובית
88	7.3.2	מגבר שרת במערכת מכאנית קווית
90	7.4	מיישר מבוקר (SCR – Silicon Controlled Rectifier)
90	7.4.1	פיתוח ה-SCR במערכת מכאנית סיבובית
92	7.5	דוגמאות שימוש בתכן בעזרת שיטת "ייצוג משותף" (Common Graph)
92	7.5.1	מישר חצי-גל פעיל (Active half-wave rectifier)
93	7.5.2	גלאי שיאים חיוביים פעיל
94	7.5.3	אינטגרטור וגזור
96	פרק 8 - סיכום	
96	8.1	היעדים שהוצבו
96	8.2	תוצאות
97	8.3	מסקנות
98	מקורות	
101	נספח	
101	A.1	רכיבים אלקטרוניים
101	A.1.1	דיודה
102	A.1.2	טרנזיסטור BJT
106	A.1.3	מגבר שרת
107	A.1.4	מיישר סיליקון מבוקר-SCR

109	רכיבים הידראוליים	A.2
109	שסתום חד-כיווני	A.2.1
109	ווסת לחץ	A.2.2
110	ווסת ספיקה	A.2.3
111	טרנזיסטור במערכת הידראולית	A.2.4
115	וולוויסטור	A.2.5

רשימת איורים וטבלאות

<u>עמוד</u>	<u>מס' האיור</u>
1	איור-1.1: תיאור תהליך התכן.
1	איור-1.2: תיאור הקשר בין מבנה לפונקציונאליות דרך התנהגות.
2	איור-1.3: התפתחות תהליך התכן של המוצר באופן הרחב ביותר [31] הכוללת תנועה ספיראלית של פיתוח ובדיקה בשני מעגלים.
5	איור-1.4: אלגוריתם בן 9 שלבים של שיטת "חשיבה המצאתית" אשר מסייע להחליף את האינטואיציה בתהליך מחושב ומכוון המקל על מציאת פתרון.
6	איור-1.5: פונקצית מיפוי (בדידה) של תת מרחב של דרישות פונקציונאליות FR למרחב הפיזיקאלי של פרמטרים תכנוניים DP.
7	איור-1.6: דיאגרמת מלבנים של מערכת וייצוג SFG שקול.
8	איור-1.7: מערכת פיזיקאלית פשוטה והגרף הקווי שלה (להתרשמות).
10	איור-1.8: גרף.
13	איור-1.9: דוגמא לייצוג מערכת ע"י גרף.
13	איור-1.10: תיאור סכמאטי של משתנה דרך משתנה מעבר.
17	איור-1.11: ייצוג של גיראטור ע"י גרף קווי.
18	איור-1.12: מקורות תלויים.
18	איור-1.13: ייצוג RGR של מערכת מכאנית סטטית

- 19 איור-1.14: ייצוג RGR של מערכת הידראולית
- 19 איור-1.15: ייצוג RGR של מערכת מכאנית סיבובית
- 19 איור-1.16: ייצוג RGR של מערכת אלקטרונית
- 20 איור-1.17: תיאור חתך בגרף.
- 20 איור-1.18: מעגל בגרף.
- 20 איור-1.19: צמצום צומת בגרף. לצומת C ולצומת E יש אותו פוטנציאל ולכן ניתן לצמצם לצומת אחת CE. כתוצאה מכך נמחקת הקשת 8.
- 20 איור-1.20: דוגמא למערכות חד-ממדיות אנאלוגיות.
- 21 איור-1.21: גרף מקורי וגרף דואלי.
- 21 איור-1.22: דוגמאות למערכות דואליות זו לזו.
- 21 איור-1.23: סוגי קשרים בין מערכות פיזיקאליות.
- 22 איור-2.1: ייצוג גרפי אחד G_R משותף למספר מערכות הנדסיות מתחומים שונים D_1, D_2, D_3 .
- 23 איור-2.2: תיאור טרנספורמציה מעבר בין תחום הנדסי לייצוג בעזרת גרפים.
- 24 איור-2.3: תיאור בעיית התכן. הפונקציה - F^D המקשרת בין פוטנציאל/זרימה מהכניסה לבין פוטנציאל זרימה במוצא ידוע.
- 24 איור-2.4: תיאור כללי של מערכת עם n כניסות ו m מוצאות.
- 25 איור-2.5: העברת בעיית תכן לייצוג מופשט של פוטנציאלים וזרימות.
- 25 איור-2.6: העברת הגדרת בעיית מתחום הנדסי - D_h לתחום - D_k דרך ייצוג הבעיה באופן מופשט ע"י פוטנציאלים וזרימות.
- 26 איור-2.7: מציאת פתרון בתחום הנדסי אחר והעברת הפתרון לייצוג גרפי משותף.
- 27 איור-2.8: מתאר דוגמת ייצוג גרפי של מערכת מכאנית קינמטית דו-ממדית פשוטה.
- 28 איור-2.9: תרשים פונקציונאלי של בורר מהירות.
- 29 איור-2.10: שינוי הגדרת הבעיה בורר מהירות לבעיה במערכת קינמטית מכאנית קווית.
- 29 איור-2.11: "בורר מהירות מרבית" במערכת מכאנית קווית.
- 29 איור-2.12: מצמד חד-כיווני קווי.
- איור-3.1: תיאור מעבר מהגדרת בעיית תכן במונחי "דרישות פונקציונאליות" להגדרה

- 40 במונחי זרימות/פוטנציאלים בתחום הנדסי מקורי.
- 41 איור-3.2: חיפוש פתרון בתחומים הנדסיים הדואליים לתחום המקורי.
- 42 איור-3.3: בניית ייצוג גרפי של הפתרון לבעיה הדואלית בעזרת טרנספורמציה.
- 42 איור-3.4: בניית ייצוג דואלי לייצוג של הפתרון לבעיה הדואלית ע"י טרנספורמציה.
- 42 איור-3.5: מימוש הייצוג של הפתרון לבעיה המקורית ע"י טרנספורמציה.
- 43 איור-3.6: מערכת הנדסית המקיימת פתרון לבעיה הדואלית.
- 44 איור-3.7: פירוק מערכת הנדסית, המהווה פתרון לבעיה הדואלית, לאלמנטים ובניית ייצוג גרפי מסוג PGR על פי הטופולוגיה של המערכת ההנדסית.
- 45 איור-3.8: מימוש הייצוג הגרפי המתאר פתרון לבעיה המקורית למערכת הנדסית בתחום המקורי.
- 45 איור-3.9: שינוי הפתרון למערכת מעשית יותר מבחינת שימוש
- 46 איור-4.1: ביצוע טרנספורמציה הפוכה מייצוג גרפי של פתרון בתחום עזר לתחום המקורי.
- 46 איור-4.2: שלב ראשוני בתכן משולב בו בתחום המקורי ובתחום העזר קיימות מערכות ראשוניות ולהן ייצוג משותף.
- 47 איור-4.3: ביצוע שיפור במערכת בתחום העזר והעברתו לתחום המקורי.
- 47 איור-4.4: תיאור בעיית תכן בעזרת פוטנציאלים וזרימות.
- 47 איור-4.5: מערכות ראשוניות בתחום המקורי ובתחום העזר ולהן ייצוג משותף.
- 48 איור-4.8: מערכת פלנטארית כללית ומימדיה האופייניים.
- 49 איור-4.9: מערכת גלגלי שיניים פלנטארית רגילה (א) ודיפרנציאל (ב).
- 49 איור-4.10: דיפרנציאל פשוט עם גלגלי שיניים קוניות.
- 49 איור-4.11: דיאגרמת שיווי משקל של גלגל שיניים נושא הלוויין (בהיטל צד) בדיפרנציאל.
- 50 איור-4.12: מערכות דיפרנציאל גלגלי שיניים מורכבות ומערכות דיפרנציאל של מנגנוני חוליות.
- 50 איור-4.13: ייצוג PLGR של דיפרנציאל במערכת מכאנית סיבובית.
- 51 איור-4.14: מערכת ראשונית-טרנספורמטור והייצוג הגרפי שלה מסוג PLGR המשותף לשלושת התחומים הנדסיים מכאני הידראולי ואלקטרוני
- 51 איור-4.15: שינוי מערכת ראשונית לזוג טרנספורמטורים וייצוגו הגרפי

51	איור-4.16: העברת השינוי הנעשה במערכת העוזר למערכת המקורית (במקרה זה שתי מערכות).
52	איור-4.17: שלב מעבר ממערכת טרנספורמטור הופך סימן בודד למערכת של שני טרנספורמטורים שוני סימן.
52	איור-4.18: הוספת דרגת חופש למערכת של שני טרנספורמטורים במערכות הידראולית ואלקטרונית.
53	איור-4.19: שינוי החוליה הניטראלית של המערכת המכאנית
53	איור-4.20א: פישוט המערכות המתקבלות כל אחד בתחומה.
53	איור-4.20: משמעות הנדסית של שינוי הצומת הניטראלית במערכות הידראולית ואלקטרונית.
55	איור-4.21: טרנספורמטור של מערכת גלגלות מכאנית קווית
56	איור-4.22: ביצוע החלפת החוליה הניטראלית.
56	איור-4.23: חיבור מערכת בעלת שתי מוצאות למערכת בעלת מוצא אחד בעזרת מערכת ביניים.
56	איור-4.24: התמרה אנלוגית של מערכת חשמלית למערכת מכאנית קווית ולמערכת הידראולית כאשר הרכיב הקיבולי מותמר בעזרת מערכת עזר.
57	איור-4.25: חיבור קשת דרך צומת אחת למערכת עם שני צמתים
57	איור-4.26: חיבור קשת דרך צומת אחת למערכת עם שני צמתים בעזרת דיפרנציאל.
57	איור-4.27: מערכת חשמלית.
57	איור-4.28: מערכות מכאנית והידראולית אנלוגיות.
58	איור-4.30: דיפרנציאל גלגלי שיניים כללי וגרף <i>PLGR</i> שלו.
58	איור-4.31: ביצוע גרף דואלי לגרף הדיפרנציאל.
58	איור-4.32: מימוש מערכת אנלוגית לדיפרנציאל.
59	איור-4.33: מערכת הידראולית של הדואלי לדיפרנציאל.
59	איור-4.34: מערכת חשמלית של הדואלי לדיפרנציאל.
60	איור-5.1: מערכת מדחס אוויר שהיא שילוב של מספר מערכות הנדסיות מתחומים שונים למערכת אחת.
60	איור-5.2: מערכת קינמטית ומערכת סטטית בייצוג אחד והגרף שלה.
60	איור-5.3: שתי סוגי פוטנציאל בצומת אחת.

- 61 איור-5.4: פיצול אפשרי של קשת בה זורמים זרימות מסוגים שונים.
- 61 איור-5.5: פיצול קשתות תוך שימוש במקורות תלויים.
- 61 איור-5.6: דוגמא למערכת הנדסית משולבת בה קיים אותו סוג זרימה אך בכיוונים שונים.
- 61 איור-5.7: הגדרת בעיית התכן.
- 62 איור-5.8: פיצול בעיית התכן המקורית.
- 62 איור-5.9: פיצול נוסף של בעיית הכניסה.
- 62 איור-5.10: תיאור שיטת התכן בצורת עץ תת-פתרונות.
- 63 איור-5.11: מקור זרימה תלוי זרימה.
- 63 איור-5.12: תיאור בעיית התכן של מקור זרימה תלוי זרימה במערכת מכאנית קווית.
- 63 איור-5.13: פיצול בעיית התכן לבעיית מוצא ובעיית מבוא.
- 64 איור-5.14: פיצול בעיית התכן לשתיים אל פי הייצוג.
- 64 איור-5.15: חיכוך החלקה במערכת מכאנית קווית וייצוג גרפי שלו (FGR).
- 64 איור-5.16א: מערכת מקור כוח בכיוון ציר-X התלוי בכוח לחיצה בציר-Y.
- 65 איור-5.16א: תרשים עקרוני של מערכת המוצא.
- 65 איור-5.16ב: תרשים עקרוני של מערכת המבוא.
- 65 איור-5.17: מערכת קינמטית דו-ממדית שהכניסה והמוצא שלה הם חד-ממדיים.
- 66 איור-5.18: מימוש מערכת מקור זרימה תלוי זרימה בתחום מכאני קווי.
- 66 איור-5.19: מערכת מקור זרימה תלוי זרימה כללית והייצוג שלה.
- 67 איור-5.20: מנגנון חיכוך החלקה במערכת מכאנית סיבובית.
- 67 איור-5.21: מערכת מוצא משופרת בתחום מכאני סיבובי.
- 68 איור-5.22: מערכת מבוא למערכת מקור זרימה תלוי זרימה בתחום מכאני סיבובי.
- 68 איור-5.23: מערכת מקור זרימה תלוי זרימה ממומשת בתחום מכאני סיבובי.
- 70 איור-6.1: בידוד תת-גרף מתוך גרף אחר.
- 72 איור-6.2: תרשים פונקציונאלי של מקור תלוי וייצוג גרפי שלו.
- 72 איור-6.3: טרנספורמטור לא הופך סימן של פוטנציאל.
- 72 איור-6.4: גרפים של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל (מימין) ושל טרנספורמטור (משמאל).

- 73 איור-6.5: הפיכת גרף טרנספורמטור לגרף מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל ע"י הוספת מקור זרימה תלוי זרימה מקוז.
- 73 איור-6.6: חיבור גרף הטרנספורמטור עם גרף מקור זרימה תלוי זרימה.
- 74 איור-6.7: מערכות מכאניות סיבוביות של מקור זרימה תלוי זרימה וטרנספורמטור (משמאל).
- 74 איור-6.8: מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית סיבובית.
- 75 איור-6.9: מימין מקור זרימה תלוי זרימה ומשמאל טרנספורמטור שאינו הופך סימן.
- 75 איור-6.10: מערכת מכאנית קווית של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל.
- 76 איור-6.11: טרנספורמטור מחליף סימן הידראולי וייצוגו הגרפי.
- 76 איור-6.12: גרפים של מקור זרימה תלוי זרימה וגרף של טרנספורמטור.
- 76 איור-6.13: תיאור שילוב גרף הטרנספורמטור וגרף מקור הפרש פוטנציאלים תלוי פוטנציאל לקבלת גרף מקור זרימה תלוי זרימה.
- 76 איור-6.14: גרפים שקולים.
- 76 איור-6.15: מערכות הידראוליות של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל וטרנספורמטור.
- 77 איור-6.16: אופן קבלת גרף מקור הפרש פוטנציאלים תלוי פוטנציאל מגרף מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל ומגרף דיפרנציאל
- 77 איור-6.17: דיפרנציאל הידראולי ומקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל הידראולי.
- 77 איור-6.18: מערכת משולבת של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל ודיפרנציאל.
- 78 איור-6.19: מערכת הידראולית מקור זרימה תלוי זרימה.
- 79 איור-7.1: רכיבים אלקטרוניים יסודיים.
- 79 איור-7.2: תרשים טרנזיסטור BJT אלקטרוני וייצוגו הגרפי.
- 79 איור-7.3: השוואה בין גרף המייצג מקור זרימה תלוי זרימה וטרנזיסטור.
- 80 איור-7.4: מקור זרימה תלוי זרימה עם קשת חד-כיווני.
- 80 איור-7.5: מקור זרימה תלוי זרימה עם הוספת קשת חד-כיווני ואיחוד הפוטנציאל בצמתים C ו-D.
- 80 איור-7.6: מערכת מכאנית קווית המתפקדת כמקור זרימה תלוי זרימה עם אלמנט חד-כיווני והגרף שלו.
- 81 איור-7.7: מימוש איחוד צמתים B ו-D במערכת מכאנית קווית בעזרת חיבור קשיח.

- 81 איור-7.8: מערכת מכאנית קווית התואמת טרנזיסטור BJT אלקטרונית.
- 81 איור-7.9: מערכת מכאנית סיבובית של מקור זרימה תלוי זרימה וייצוגה הגרפי.
- 82 איור-7.11: אלמנט מכאני סיבובי המיוצג ע"י קשת חד-כיוונית.
- 82 איור-7.12: חיבור קשת חד-כיוונית.
- 82 איור-7.13: חיבור פוטנציאלים של צמתים B ו-D.
- 82 איור-7.14: השוואה בין טרנזיסטור אלקטרוני לטרנזיסטור של מערכת מכאנית סיבובית.
- 82 איור-7.15: טרנזיסטור של מערכת מכאנית סיבובית בו מנגנון "מישור משופע" מיושם באמצעות תבריג, דבר המקטין מימדים באופן משמעותי, מנגנון העברת המומנט ע"י חיכוך החלקה נשאר ללא שינוי.
- 83 איור-7.16: השוואה בין טרנזיסטורים אידיאליים מכאני סיבובי ואלקטרוני.
- 83 איור-7.17: מגבר שרת אלקטרוני והגרף שלו.
- 84 איור-7.18: שתי דרכים שקולות לייצג מגבר שרת.
- 84 איור-7.19: מקור זרימה תלוי זרימה של מערכת מכאנית סיבובית והגרף שלו.
- 84 איור-7.20: תמסורת גלגלי שיניים מדורגת פשוטה המתאימה ביותר כתמסורת הגברת מהירות סיבוב.
- 85 איור-7.21: מערכת מכאנית סיבובית המייצגת מגבר שרת אלקטרוני.
- 85 איור-7.22: מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית קווית.
- 86 איור-7.23: דיפרנציאל של מערכת מכאנית קווית.
- 86 איור-7.24: מגבר שרת במערכת מכאנית קווית.
- 87 איור-7.25: תיאור ה-SCR.
- 87 איור-7.26: סכמה מבנית של SCR בצורת צימוד בין שני טרנזיסטורים אידיאליים PNP ו-NPN.
- 87 איור-7.27: טרנזיסטור PNP ו-NPN והייצוגים הגרפיים שלהם.
- 88 איור-7.28: מבנה ה-SCR המתואר על ידי שני טרנזיסטורים אידיאליים וייצוגו הגרפי.
- 88 איור-7.29: מימוש ה-SCR במערכת מכאנית סיבובית.
- 89 איור-7.30: מעבר ממערכות בתחום האלקטרוניקה לתחום המכאניקה בעזרת שימוש בייצוג גרפי משותף.
- 89 איור-7.31: מערכת מגבר שרת- תיאורים הנדסיים וייצוגים גרפיים מפושטים.
- 90 איור-7.32: מישר חצי-גל פעיל אלקטרוני והאופן שלו.

90	איור-7.33: מערכת מכאנית סיבובית אנלוגית למערכת אלקטרונית של "מישר חצי-גל פעיל".
90	איור-7.34: "מישר אקטיבי של גל שלם" מערכת אלקטרונית.
91	איור-7.35: מערכת אלקטרונית של גלאי שיאים חיוביים.
91	איור-7.36: מערכת מכאנית אנלוגית למערכת גלאי שיאים אלקטרונית.
92	איור-7.37: מעגל גזירה(מימין) ומעגל אינטגרטור (משמאל).
92	איור-7.38: מערכת מכאנית סיבובית למעגל האינטגרטור.
95	איור-7.39: מעגל מתנד גל ריבועי.
95	איור-7.40: מערכת מתנד גל ריבועי אלקטרונית וייצוגה הגרפי.
95	איור-7.40א: מערכת גל ריבועי מכאנית סיבובית.
101	איור-A.1: אופיין דיודה אידיאלית.
101	איור-A.2: אופיין דיודה ממשית.
101	איור-A.3: קירוב לדיודה מעשית בעזרת דיודה אידיאלית ונגד קטן וייצוגו הגרפי.
102	איור-A.4: טרנזיסטור BJT.
102	איור-A.5: טרנזיסטור PNP וטרנזיסטור NPN.
102	איור-A.6: זרמים בטרנזיסטור.
103	איור-A.7: קשר בין מתח קולט-פולט, זרם בסיס וזרם הקולט.
103	איור-A.8: חיבור קולט/פולט בקוטביות הפוכה.
104	איור-A.9: תיאור טרנזיסטור ממשי.
105	איור-A.10: אופיין העבודה של טרנזיסטור ממשי.
105	איור-A.11: טרנזיסטור NPN אידיאלי.
106	איור-A.12: טרנזיסטור PNP אידיאלי.
106	איור-A.13: ייצוג טרנזיסטור NPN ממשי.
106	איור-A.14: מודל Fberts-Moll לטרנזיסטור NPN ממשי.
107	איור-A.15: דגם טרנזיסטור של מערכת מכאנית סיבובית, אשר נבנה במעבדה, המשולב במתקן הרמה.

- 107 איור-16.A: תיאור יישום טרנזיסטור מכאני כמערכת להגברת כוח וייצוגו הגרפי.
- 108 איור-17.A: סמל מגבר שרת.
- 108 איור-18.A: תרשים אלקטרוני של מגבר שרת LM348.
- 109 איור-19.A: מגבר שרת מהפך.
- 109 איור-20.A: מיישר סיליקון מבוקר.
- 110 איור-21.A: תיאור המס"מ בעזרת שני טרנזיסטורים.
- 110 איור-22.A: אופייני המס"מ. א-מתח שער קתודה. ב-מתח פריצה.
- 110 איור-23.A: אופייני המס"מ כאשר הפרמטר הנו זרם-השער.
- 111 איור-24.A: סמלים הידראוליים של שסתום חד-כיווני.
- 111 איור-25.A: מבנה שסתום חד-כיווני פשוט.
- 111 איור-26.A: מבנה שסתום חד-כיווני עם קפיץ.
- 111 איור-27.A: תרשים מערכת הידראולית עם שסתום פריקה והגרף שלה.
- 113 איור-28.A: מבנה שסתום בקרת לחץ מסוג "Direct Acting Pressure Reducing Valve".
- 113 איור-29.A: שסתום בקרת לחץ וייצוג גרפי שלו כמקור פוטנציאל תלוי.
- 113 איור-30.A: שסתום בקרת ספיקה הידראולי עם מנגנון קיזוז השפעת מפל חלץ (Pressure Compensated Restrictor Type Flow Control Valve), והסמל שלו.
- 113 איור-31.A: מקור זרימה תלוי זרימה הידראולי.
- 114 איור-32.A: ייצוג מקור זרימה תלוי זרימה.
- 114 איור-34.A: ייצוג הטרנזיסטור.
- 114 איור-35.A: מערכת הידראולית של לחצים וספיקות האנלוגית בעיקרון פעולתה לטרנזיסטור בי-פולארי BJT והגרף הקווי שלה.
- 115 איור-36.A: תיאור כללי של הוולוויסטור.
- 115 איור-37.A: מצבי עבודה של הוולוויסטור.

מס' טבלה

עמוד

3	טבלה-1.1: מערכות הנדסיות להן נעשה פיתוח בין-תחומי במסגרת העבודה הזאת.
14	טבלה-1.2: משתני פוטנציאל/זרימה במערכות פיזיקאליות שונות.
14	טבלה-1.3: סוגי גרפים.
14	טבלה-1.4: אלמנטי ייחוס של מערכות.
15	טבלה-1.5: מערכות התנגדות בסיסיות.
16	טבלה-1.6: אלמנטים חד-כיווניים במערכות פיזיקאליות שונות.
16	טבלה-1.7: דוגמאות למקורות הפרש פוטנציאלים במערכות פיזיקאליות שונות.
16	טבלה-1.8: דוגמאות למקורות זרימה במערכות פיזיקאליות שונות.
17	טבלה-1.9: טרנספורמטורים במערכות פיזיקאליות שונות.
26	טבלה-2.1: סוגי גרפים.
31	טבלה-2.2: טרנספורמציה של אלמנטים מייצוג גרפי של מערכת מכאנית קווית למערכת מכאנית סיבובית.
32	טבלה-2.3: טרנספורמציה של בעיית התכן ממערכת מכאנית קווית למערכת אלקטרונית והידראולית.
35	טבלה-2.4: טרנספורמציה של אלמנטים מתוך הייצוג הגרפי של מערכת אלקטרונית למערכת מכאנית סיבובית.
39	טבלה-2.5: סוגי מערכות שנעשה להם מימוש בתחומים הנדסיים נוספים במסגרת העבודה הזאת.
39	טבלה-3.1: סוגי ייצוגים גרפיים למערכות הנדסיות הדואליים זה לזה.
41	טבלה-3.2: סוגי מערכות הנדסיות הדואליות זו לזו
44	טבלה-3.3: תהליך הפקת גרף דואלי למערכת הדואלית
54	טבלה-4.1: פירוש קבועים פיזיקאליים במערכות פיזיקאליות השונות.
55	טבלה-4.2: שלבים ליצירת מערכת דיפרנציאל בכל מערכת פיזיקאלית בהתאם למערכת דיפרנציאל של גלגלי שיניים.
101	טבלה-A.1: תיאור הדיודה. כיוון הזרימה האפשרי של הזרם החשמלי הוא בכיוון החץ.

הגדרות, קיצורים וסימנים מוסכמים:

אותיות:

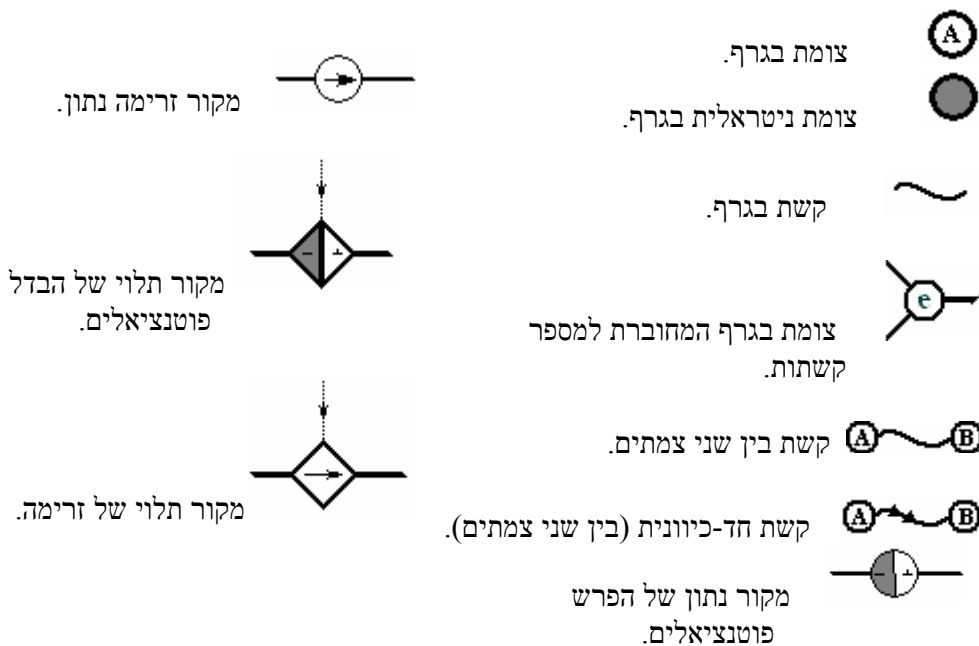
a - יחס תמסורת מכאני.	A - מטריצת פגישות.
g - גרף.	B - מטריצת מעגלים.
g^* - גרף דואלי.	D - תחום הנדסי.
s - מערכת הנדסית.	D^* - תחום הנדסי דואלי.
i - זרם חשמלי.	F - כוח.
v - מהירות קווית.	G - תחום ייצוגים גרפיים.
q - ספיקה הידראולית.	G^* - תחום ייצוגים גרפיים דואלי.
θ - זווית.	M - מומנט מכאני.
ω - מהירות זוויתית.	P - לחץ הידראולי.
π - פוטנציאל.	Q - מטריצתהתכים.
Δ - הפרש פוטנציאלים.	T - טרנספורמציה.
f - זרימה.	V - מתח חשמלי.

קיצורים:

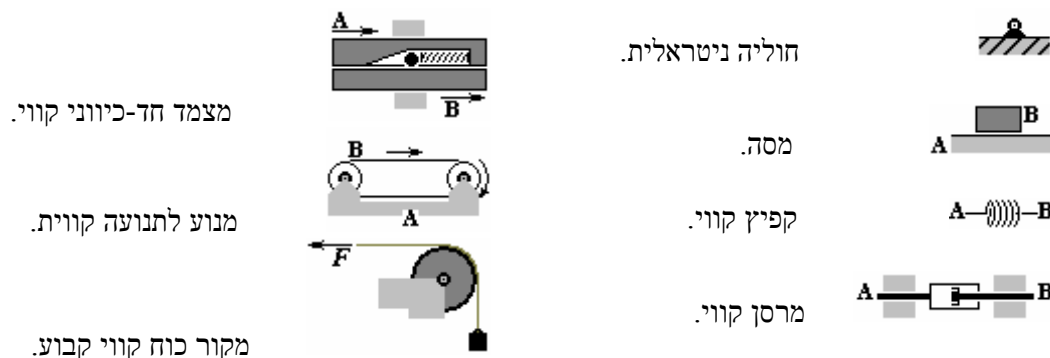
- Line Graph Representation -**LGR**
גרף קווי.
- Potential Line Graph Representation -**PLGR**
גרף פוטנציאלים קווי.
- Floe Line Graph Representation -**FLGR**
גרף זרימות קווי.

- Potential Graph Representation -**PGR**
גרף פוטנציאלים.
- Flow Graph Representation -**FGR**
גרף זרימות.
- Resistance Graph Representation -**RGR**
גרף התנגדות.

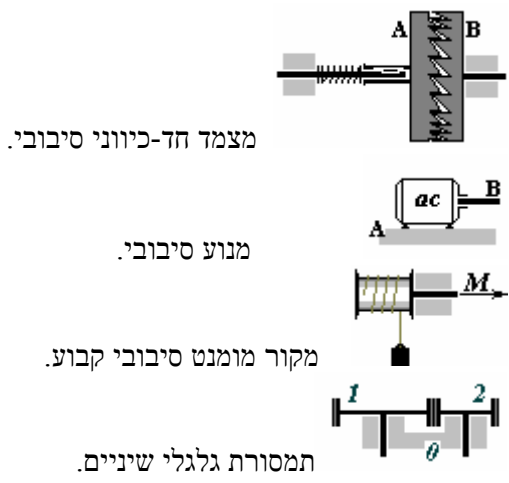
סימנים מוסכמים מתורת הגרפים:



סימנים של מערכות מכאניות קוויות:



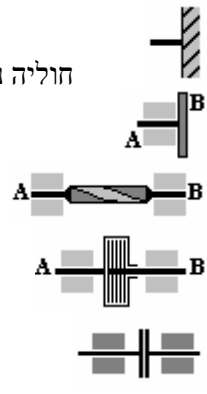
סימנים של מערכות מכאניות קוויות:



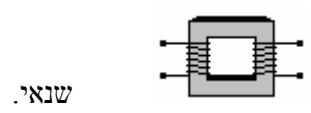
מצמד חד-כיווני סיבובי.
 מנוע סיבובי.
 מקור מומנט סיבובי קבוע.
 תמסורת גלגלי שיניים.

חוליה ניטראלית של מערכת סיבובית.

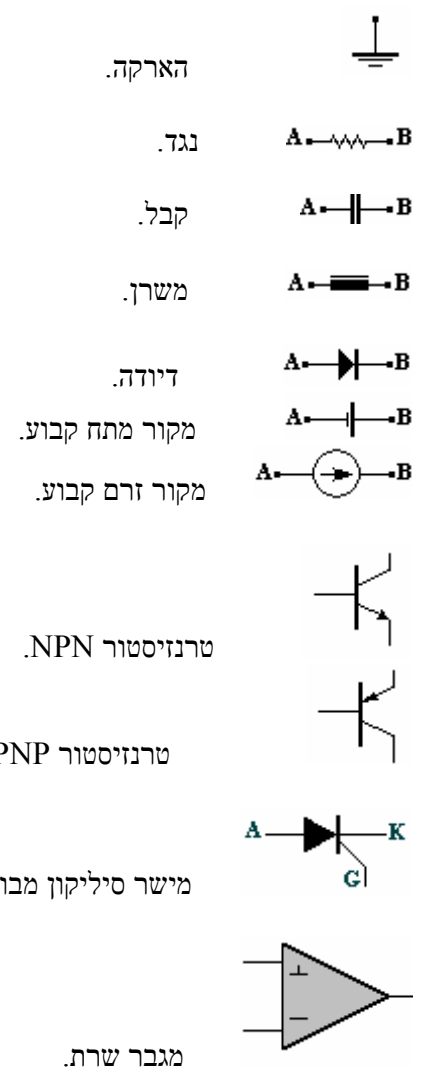
אינרציה.
 קפיץ פיתול.
 מרסן סיבובי.
 מצמד.



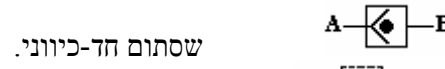
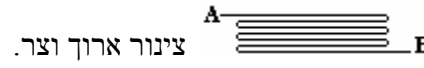
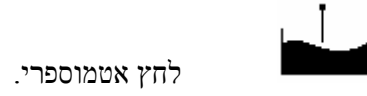
סימנים מוסכמים ממערכות אלקטרוניות:



שנאי.



סימנים מוסכמים ממערכות הידראוליות:



”והינה כל עולם ועולם יש בו יוד ספירות פרטיות, וכל ספירה פרטית שבכל עולם ועולם, כלול מיוד ספירות פרטי פרטיות, וכולם הם בצורת עיגולים, זה תוך זה, וזה לפניו מזה עד אין קץ ומספר.”

(מתוך ”עץ חיים” חלק שני פרק א)

פרק-1: מבוא.

1.1. רקע כללי:

תהליך התכן מתחיל בהגדרת ”דרישות תכן” (Requirements/Design Requirements) וניגמר במוצר סופי (Artifact) (Functional) לתכן מפורט (Detailed Design) אינו מייצר מידע המביא את המוצר לכלל ההגשמה הסופית (Embodiment) אלא מסתיים ברמה מופשטת יותר של יצירת כל הפרמטרים התיכוניים (Design Parameters) הדרושים לקיום הפונקציונאליות של המוצר [31].

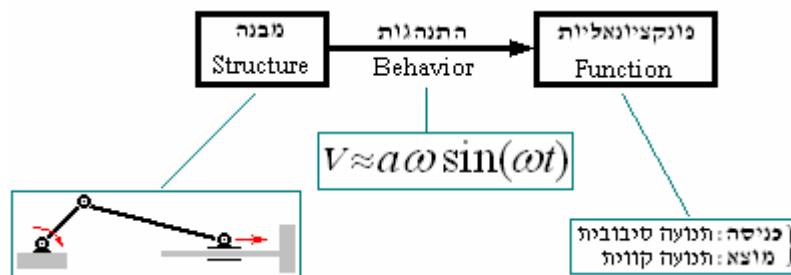


איור-1.1: תיאור תהליך התכן.

תהליך התכן עצמו הוא תהליך יצירתי היכול להיעשות ע"י שיטות חשיבה מסורתיות רציונאליות/השראתיות (Cognitive Methods) של המתכנן או הצוות, או שיטות הנעזרות במחשב (Computational Processes). נכון להיום קיימות מספר תוכנות מסחריות כגון KEKADA ו-BACON המיועדות ליישומים מדעיים ותוכנת A-DESIGN (General Problem Solver) [11] אשר ביסודה היתה תוכנת סימולציה האמורה לתת פתרון לכלל הבעיות האנושיות ואשר בסופו של דבר התמודדה בהצלחה רק עם בעיות מוגדרות היטב כגון משחק שח-מט, בעיות הגיון לוגיות וכ"ו. במאמרם (Cagan et al., 2000) מגיעים למסקנה לאחר השוואה בין אופן פעולה של תוכנות אלו לבין ניתוח של מספר תהליכי המצאה אנושיים כי בסופו של דבר ברמה העמוקה שני התהליכים זהים. בעקבות המגמה ההולכת ונמשכת של מחשוב תהליך ההמצאה בכלל ותהליך התכן בפרט נוצרת סטנדרטיזציה של תהליך התכן ומקובל לראות את מוצר תהליך התכן משלושה היבטים [12]:

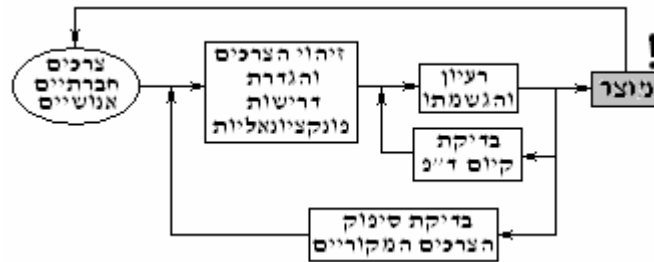
- (1) פונקציונאליות (function): מה שהמוצר הסופי אמור לבצע (מה הפונקציה שלו).
- (2) התנהגות (behavior): ע"פ אלו עקרונות הנדסיים פיזיקאליים יפעל המוצר ויבצע את ייעודו.
- (3) מבנה (structure/form): המאפיינים הפיזיקאליים גיאומטריים של המוצר כגון – מבנה עקרוני, חומרים, ממדים וכ"ו.

המוצר הסופי של תהליך התכן הוא תמיד המבנה (form) האמור לבצעה את הפונקציונאליות (function) שלתכליתה נוצר והוא עושה זאת דרך ההתנהגות (behavior) שנובעת ממאפייני המבנה עצמו.



איור-1.2: תיאור הקשר בין מבנה לפונקציונאליות דרך התנהגות במערכת קינמטית.

הפונקציונליות של המוצר נובעת ישירות ממרחב "דרישות התכן" (Design Requirements) שלו שהיא רשימת דרישות אשר לא תמיד ברורות ולא תמיד מוגדרות היטב [31]. מבנה המוצר הוא למעשה תוצר ה"פרמטרים תכנוניים" (Design Parameters) הכולל את מרחב האלמנטים שמהם יורכב המוצר ואת הקשרים הפיזיקאליים הגיאומטריים והטופולוגיים ביניהם. תהליך התכן הוא ביצוע טרנספורמציה ממרחב דרישות התכן (דרישות פונקציונאליות) למרחב הפרמטרים התכנוניים. ברוב המקרים לא רק שאין אנו יודעים כיצד לבצע טרנספורמציה זאת, אלא אפילו עצם היתכנות קיומה אינו וודאי. לכן תהליכי תכן, בין המסורתיים ובין הממוחשבים, הנם בעלי אופי מחזורי הכוללים גם את תהליך התכן היצירתי וגם את תהליך הבחינה של מה שנתקבל לאור ההתנהגות והפונקציונאליות.



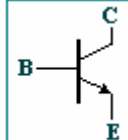
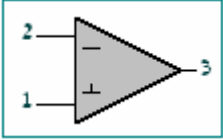
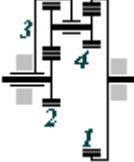
איור-1.3: התפתחות תהליך התכן של המוצר באופן הרחב ביותר [31] הכוללת תנועה ספיראלית של פיתוח ובדיקה בשני מעגלים.

שיטות התכן השונות הקיימות מתמקדות למעשה באחד מהיבטי מוצר תהליך התכן: פונקציונאליות, התנהגות, מבנה.

1.1.1. מטרת המחקר וחשיבותו:

מטרות המחקר הן:

1. לפתח שיטה לתכן שתאפשר התמקדות בפונקציונליות של בעיית תכן הנדסית, כאשר המבנה הכולל גם את הטופולוגיה וגם את הגיאומטריה יתקבל מקונספטים הקיימים בתחומים הנדסיים אחרים ויועבר באמצעות מודלים מתמטיים.
2. פיתוח בין תחומי של מספר רכיבים בסיסיים מתחומי המכאניקה והאלקטרוניקה בהם ניתן יהיה להשתמש כאבני בניין לתכן מערכות מורכבות על בסיס העברת ידע בין תחומי. הרכיבים שנבחרו מתוארים בטבלה הבאה:

1. טרנזיסטור BJT:	2. מגבר שרת OA:	3. דיפרנציאל:
		

טבלה-1.1: מערכות הנדסיות להן נעשה פיתוח בין-תחומי במסגרת העבודה הזאת.

בסיס השיטה, כאמור, הוא ייצוג מערכות הנדסיות מתחומים הנדסיים שונים בעזרת מודל מתמטי משותף הנקרא ייצוג גרפי אשר מצטיין ביכולת ביטוי טובה לטופולוגיה של מבנה הנדסי. באופן זה מערכות מתחומים הנדסיים שונים שלא היה ביניהן שום קשר הופכות לישויות מתמטיות מאותו סוג ובהתאם לכך ניתן להעביר תכן קונספטואלי מתחום הנדסי אחד לתחום הנדסי אחר ואף לשנות ולשכלל באופן מבוקר ייצוג של תכן קונספטואלי קיים שיתבטא בשכלול של המערכת ההנדסית.



איור-1.3: מעבר בין תחומים הנדסיים שונים דרך ייצוג גרפי לצורך מציאת פתרון הנדסי.

הושם דגש על המאפיינים הבאים:

1. גישה שיטתית.
2. המבנה מועבר ללא כל התייחסות להתנהגותו (בחינת ההתנהגות נעשית רק בשלב הסופי).
3. בפיתוח השיטות הושם דגש רב על הייצוגים המתמטיים.
4. חשיבות גדולה על ראייה מוכללת על תחומים הנדסיים אחרים.

חשיבות המחקר היא בשני נושאים עיקריים:

1. במציאת דרך נוספת לפתרון קונספטואלי של בעיות תכן הנדסיות. דרך זאת ייחודית בכך שמנצלת ידע קיים ובעזרתו מאפשרת לתהליך מציאת הפתרון להיות שיטתי.
2. במתן אפשרות למהנדסים מתחום הנדסי אחד להבין את אופן ועיקרון הפעולה של מערכות הנדסיות מתחום שני, ולחקור את אותן המערכות בעזרת הכלים והידע ההנדסי מהתחום הראשון.

1.2. סקר ספרות - שיטות תכן:

נחלק את שיטות התכן הקיימות לשתי קבוצות. הראשונה – שיטות המבוססות על התפישה האנושית (Cognitive Methods) והשנייה – שיטות הנעזרות במחשב (Computational Methods). נכון להיום בעבודת התכן הממשית המחשב ברוב רובם של המקרים משמש לאנאליזה ולתיעוד או לעזרה בארגון אינפורמציה תכנונית ופחות בשלב התכן הקונספטואלי.

1.2.1. שיטות תכן מסורתיות Cognitive Methods:

במקרים שמדובר ביצירת פתרון לבעיית תכן חדשה לגמרי בכל שיטות פתרון המסורתיות בסופו של דבר בבסיס כל השיטות הללו האדם הוא זה הממציא ויוצר הרעיון והשיטה בסך הכל מהווה סביבה תומכת ויוצרת השראה [8]. במקרים בהם לא מדובר בבעיה חדשה אלא במה שנראה מראש כגרסה אפשרית של פתרון קיים ניתן ליישם את הסינתזה הקינמטית (כפי שיתואר בהמשך).

1.2.1.1. סינתזה קינמטית:

הסינתזה הקינמטית היא שיטת תכן אנאליטית בסיסית ביותר שמטרתה לפתח שיטות לתכנון מנגנונים חדשים ומכונות חדשות [1][21]. בעוד שהאנליזה מצאה את פתרונה לגבי רוב המנגנונים במגוון שיטות חישוביות וגרפיות, הסינתזה מצאה את פתרונה רק לגבי מספר מאד מצומצם של קבוצות מנגנונים, ומציאת שיטה כוללת ליצירת מנגנונים נשאר אחד מן האתגרים של העתיד. כמו כן בניגוד לאנליזה אשר בד"כ מתיימרת לתת פתרון באופן הכוללני ביותר לבעיות מכאניות, הסינתזה היא בעלת אופי בדיד וניתן לומר שמתייחסת לכל בעיית תכן פרטית כתחום בפני עצמו. ניתן לסווג את הטיפול בבעיות התכנוניות במסגרת הסינתזה הקינמטית לשלושה נושאים:

- א. תכן עבור דרישות מיקום.
- ב. תכן עבור דרישות מסלול/מהירות.
- ג. תכן עבור דרישות משולבות של מהירויות/עומסים.

התקדמות הגדולה ביותר של הסינתזה הנה בסוגי המנגנונים הבאים:

- א. מנגנוני חוליות.
- ב. מנגנוני גלגלי שיניים ומנגנונים בורגיים.
- ג. מנגנוני פיקה ועוקב.

בהתחשב במגבלות הידועות מראש של חלק מן המנגנונים הללו ניתן לומר כי בכל הקשור לתנועה רציפה הקבוצות "ב" ו- "ג" נחשבות לבעיות פתורות שיש עליהן מידע רב. במקרה של מנגנוני חוליות עבור מנגנונים מסוימים (כגון מנגנון 4 חוליות) ישנם שיטות "מקומיות" להפיק תנועה רצויה בגבולות מסוימים ולהפך עבור פעולות מסוימות (כגון תנועות מרחביות פשוטות, פעולות מתמטיות/לוגיות, פעולות מניה...) ידועים מנגנונים מסוימים המבצעים אותן בדיוק או בקירוב. ביתר המקרים אין למעשה שיטות ומה שקיים הוא אוסף גדול של פטנטים ומכניזמים ידועים המצויים באטלסים של מכניזמים למיניהם, כגון: [4]. כך שהמתכנן צריך לבצע עבודת חיפוש או שילוב של הקיים והידוע לו או להמציא מחדש.

הסינתזה הקינמטית, כפי שצוין לעיל, אינה שיטה אחת אלא אוסף של מספר שיטות אשר בדרך כלל מקשרות את המבנה אותו אנו רוצים ליצור לפונקציונאליות מוגדרת דרך התנהגות גיאומטרית/פיזיקאלית. השיטה המתוארת בעבודה זאת, למרות שאינה מתייחסת להתנהגות של מיבנה באופן ישיר, ניתן לומר כי היא הרחבתה של הסינתזה הקינמטית בעזרת ידע מתחומים הנדסיים אחרים. כלומר, במסגרתה הרחבה של הסינתזה הקינמטית הנה עוד שיטה לאוסף השיטות שתועיל למספר לא קטן של בעיות תכן.

1.2.1.1.2. סיעור מוחות (Brain Storming):

סיעור מוחות הוא אחת השיטות המפורסמות ביותר בשל יעילותה הגבוהה. השיטה הוצעה על ידי אלכס אוסבורן ב-1937 [8]. השיטה היא פסיכולוגית ומורכבת משני שלבים:

- א. יצירת רעיונות.
- ב. בחינת הרעיונות ובחינת הפתרון.

בשלב א מקדישים תשומת לב רבה לבניית הקבוצה המיועדת לייצור רעיונות. בחירה נכונה של מנהיג הקבוצה חשובה ביותר. מכניסים כעשרה אנשים בעלי פתיחות מחשבתית ידע כללי ודמיון.

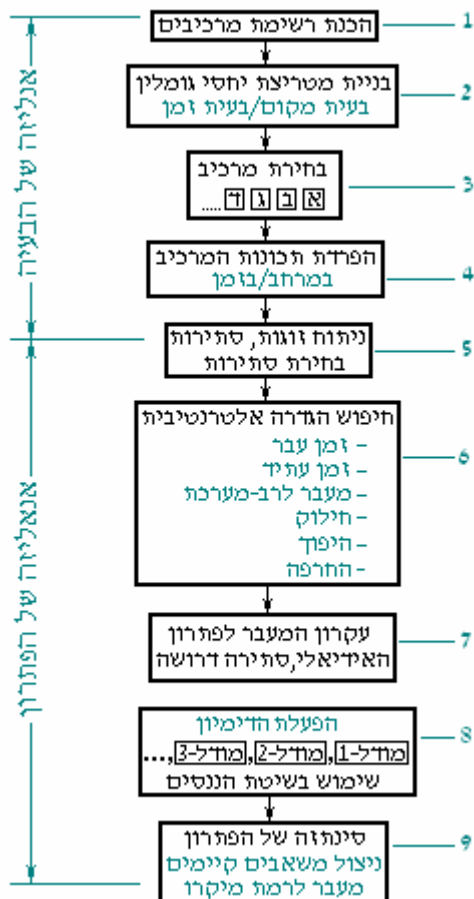
מנהיג הקבוצה אוסר ביקורת כלשהי ומעודד יוזמה ופיתוח רעיונות מכל סוג, גם רעיונות הנראים מלכתחילה כמטורפים. איש אינו חייב להוכיח את נכונותו של רעיון כלשהו ומטרתו של המנהיג היא להביא את הקבוצה למצב של התלהבות בו ישכחו המשתתפים את כל האיסורים ויסירו את כל המחסומים. במצב זה יכולים תוך זמן קצר להיווצר רעיונות רבים, וכל המתרחש בחדר מוקלט ע"י רשמקול.

לאחר מכן, בשלב השני, מועברת הקלטת בצירוף חומר כתוב לקבוצה השנייה המתכנסת על פי קריטריונים שונים לחלוטין מאלה שעל פיהם הורכבה הקבוצה הראשונה. לקבוצה השנייה נדרשים אנשים ביקורתיים וקפדניים. יחד עם זאת עליהם להיות בעלי ידע בתחום ומטרת הקבוצה השנייה היא לבחור בגרעין הפתרון מתוך תוהו ובוהו של רעיונות שהופיעו בעת עבודתה של הקבוצה הראשונה. סיעור מוחות מוצלח כאשר רעיון אחד או שניים נבחרים ע"י הקבוצה השנייה.

לשיטת ה"סיעור מוחות" בהשוואה לשיטה המתוארת בפרק זה אין בסיס מתמטי וכולה מבוססת על היצירתיות של הפרט אשר מואצת בעזרת דינאמיקה קבוצתית ואינה מסתמכת על חיפוש ידע קיים.

1.2.1.3. חשיבה המצאתית ופתרון בעיות טכנולוגיות (TRIZ):

שיטה זו [2] במקום שיטת הניסוי והטעייה (Trail and Error) מציעה פעולות חשיבה המבוססות על הבנת כללי התפתחות של מערכת טכנולוגית. היצירה הופכת לתהליך הניתן לשליטה ויש אפשרות להרחיב ללא גבולות את עולם היצירה. החלק הנוגע במיוחד לתכן הקונספטואלי בו אנו עוסקים מתואר כ-"חוקים, כלים, תכסיסים" אשר בעיקרו הוא תרשים זרימה המלווה באופן מאד מפורט את כל שלבי ההתפתחות של פתרון בעיית התכן הקונספטואלי. החל מניסוח נכון ומועיל של הבעיה דרך זיהוי התחומים בהם יכולה להיווצר סתירה או בעיה, טיפול בבעיות אלו ובסתירות בעזרת מגוון תכסיסים מוכנים מראש ובהמשך יצירת דרכי השראה ושילוב של פתרונות מעניינים. התרשים הבא מתאר את האלגוריתם של השיטה. החלק ההמצאתי של השיטה מבוסס על בחינה מחודשת של הבעיה לאור סדרה מתוכננת ומכוונת של מצבים דמיוניים מוגדרים. כגון הקצנת הבעיה, בחינת חלקי תפקוד שונים בגוף הבעיה, בחינת משאבים קיימים שמהם אנו מתכוונים לייצור את הפתרון וכ"ו. יש לציין כי השיטה נפוצה מאד גם בימים אלו [8].

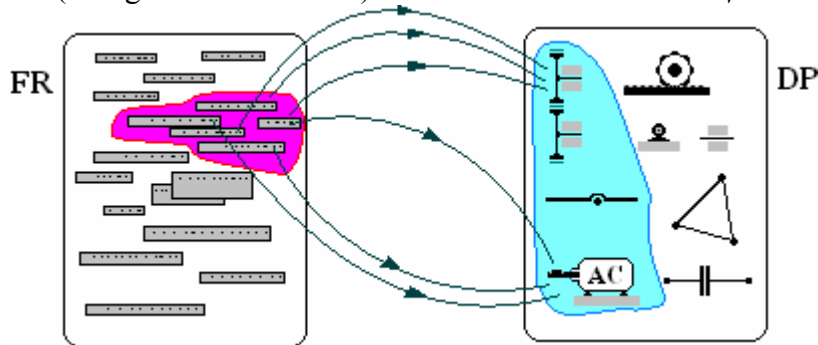


איור-1.4: אלגוריתם בן 9 שלבים של שיטת "חשיבה המצאתית" אשר מסייע להחליף את האינטואיציה בתהליך שיטתי המקל על מציאת פתרון.

בהשוואה לשיטה המתוארת בעבודה זאת TRIZ מתמקדת במידה שווה בכל היבטי התכן – פונקציה, מבנה והתנהגות ומנסה דרך כל אחד מהם להגיע לפתרון הבעיה. הבסיס המתמטי של ה-TRIZ אינו משמעותי ומבחינה זאת היא קרובה יותר לשיטת סיעור המוחות מאשר לסינתזה קינמטית. ה-TRIZ הינה יותר שיטת חשיבה המצאתית מאשר שיטת תכן ולכן גם מתמקדת ביצירת הרעיונות ולא בחיפוש ידע קיים.

1.2.1.4. שיטת - תכן אקסיומתי (Axiomatic Design):

השיטה [31] מתמקדת בפונקציונאליות בהתנהגות ובמבנה גם יחד ונותנת בסיס מתמטי לניתוח איכותי וכמותי של התכן. השיטה רואה את תהליך התכן כתהליך מיפוי מהמרחב הפונקציונאלי שהוא מרחב מופשט בו מועברות הדרישות הפונקציונאליות (FR - Functional Requirements) למרחב פיזיקאלי שבו קיימים אלמנטים ממשיים (אם כי גם ברמת הפשטה מסוימת) שהם חלקי המבנה של המכונה הסופית. בגישה זאת מתקבל שהתכן הוא פונקציה/אופרטור מתמטיים שהפרמטר שלה הוא וקטור דרישות פונקציונאליות (FR) (כל שורה – דרישה פונקציונאלית) והמוצא שלו הוא ווקטור של הפרמטרים התכנוניים (Design Parameters-DP).



איור-1.5: פונקציה מיפוי (בדידה) של תת מרחב של דרישות פונקציונאליות FR למרחב הפיזיקאלי של פרמטרים תכנוניים DP. המיפוי הוא למעשה פעולת התכן ומבוצע ע"י האדם.

מעיקרי השיטה הם - שימור על מספר מינימאלי של דרישות פונקציונאליות. שימור על אי-תלות בין הדרישות הפונקציונאליות באופן כזה שבמידה וישנם שני FR תלויים יש לאחדם לדרישה אחת או לחילופין לנסח מחדש את רשימת (וקטור) הדרישות הפונקציונאליות FR- למספר רב יותר של דרישות ובלבד שיהיו בלתי תלויות. יסוד השיטה הוא שתי אקסיומות:

- (1) אקסיומת האי-תלות.
- (2) אקסיומת האינפורמציה.

אקסיומת האי-תלות דורשת מהמתכנן כי פונקציה המיפוי-התכן ממרחב ה-FR (דרישות פונקציונאליות) למרחב ה-DP (פרמטרים תכנוניים) צריכה להיות כמה שיותר "חד-חד" - ערכית ועל"י מה שאומר שלכל FR קיים DP אחד ויחיד שמבצע אותה, ולכן כל שיפור או גריעה בו יתבטאו רק באותה FR ולא ישפיעו על יתר התכן. אקסיומת האינפורמציה טוענת כי מבין כל המיפויים-התכנוניים המקיימים את אקסיומת האי-תלות, התכנון הטוב ביותר הוא זה המכיל מינימום אינפורמציה. האינפורמציה מוגדרת כ"כמות המידע החיונית ביותר הדרושה לסיפוק ה-FR" היא נמדדת ב"ביטים" [bit] ונוסחתה בתחום הטכני:

$$(1.1) \quad \text{Information} = \log_2 \left| \frac{L}{\pm \Delta L} \right|$$

L - מידה רלוונטית.
 $\pm \Delta L$ - הסבולת של המידה L המאפשרת עדיין את קיום ה-FR.

בהמשך, השיטה מפתחת מאקסיומות אלו למשפטים ולמשפטי משנה. על פי טענת השיטה, בסיכומו של דבר, שמירה על הכללים האלו מצידו של המתכנן תניב את התכן האופטימאלי. יש לציין כי שיטה זו לא מציעה דרכים להגיע לעצם המיפוי עצמו אלא משאירה זאת מפורשות בידי המתכנן כמו גם שאלת יחידות התכן נשארת פתוחה.

בהשוואה לשיטה המתוארת בעבודה זאת לשיטת התכן האקסיומאטי הצד המשותף הוא שניהן באופן עקרוני מחפשות מיפוי מהתחום הפונקציונאלי של דרישות התכן לתחום הממשי של המבנה הפיזי. כלומר, אופן החשיבה העקרוני לפתרון בעיית התכן הוא בכיוונית מהפונקציה למבנה ולא להפך, דהיינו, ע"י שיכלול המבנה השגת פונקציה מבוקשת (כפי שנעשה בסינתזה קינמטית). השונה ביניהן הוא הדרך בה הדבר נעשה. הבסיס המתמטי של שיטת התכן האקסיומאטי נותן יותר כלי אנליזה לתכן קיים מאשר דרך המצאת רעיונות ולכן התכן שנעשה בשיטה זאת יהיה בעל אופי איטרטיבי. לעומת זאת בשיטת חיפוש ידע קיים והעברתו המוצעת בתיזה קיים יותר דגש על חיפוש ממוקד של הפתרון. שוני עקרוני נוסף הוא ששיטת התכן המתוארת בעבודה זאת אינה רואה באקסיומות המתוארות בשיטת התכן האקסיומאטי עיקרון מחייב ואינה מתמקדת בהן כלל כי אם בהשגת המבנה המייצר פונקציונאליות נדרשת.

1.2.2. שיטות תכן הניתנות למחשוב Computational Methods:

שיטות ממוחשבות פועלות על בסיס ייצוגים של מערכות הנדסיות המובנים למחשב והניתנים לתכנות. שלושת סוגי הייצוגים העיקריים למערכות הנדסיות הן:

1. דיאגרמת מלבנים או דיאגרמת SFG (Signal Flow Graph).
2. גרף קווי LG (Line Graph).
3. BG (Bond Graph).

דיאגרמת מלבנים היא תרשים זרימה של תהליך לוגי/הנדסי והיא שימושית במדעי המחשב [28]. דיאגרמה זו משמשת כמודל לייצוג אלמנטים בודדים ומערכות שלמות ברמות הפשטה שונות. הייצוג הוא מאד גמיש מהבחינה שפרט לתאימות יחידות פיזיקאליות אינו כפוף לשום חוקיות מוגדרת (טופולוגית או גיאומטרית). יחד עם זאת הוא נוח מאד להבנה ושקף היטיב התנהגות של המערכת.

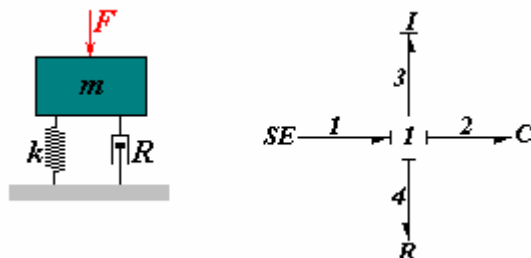
האלמנטים מהם מורכב הייצוג הם מלבנים, חצים ונקודות סיכום. כל אלמנט או תת מערכת מיוצגים ע"י מלבן שהוא למעשה קופסה שחורה שמבואה ומוצאה הם מהסוג שמעניין אותנו בלבד. המקשר בין הכניסה למוצא מבוטא כפונקציה תמסורת אופיינית למלבן המסוים. הקשר בין המלבנים הוא בעזרת חצים המסמלים מאיפה יוצא האות ולאן הוא מגיע.

Mason ב-1953 ייצר מדיאגרמת המלבנים גרף הנקרא SFG (Signal Flow Graph). מבנה זה אומנם פחות ברור לעין אנושית אך נוח יותר ליישומי מחשב ופעולות מתמטיות.



איור-1.6: דיאגרמת מלבנים של מערכת וייצוג SFG שקול.

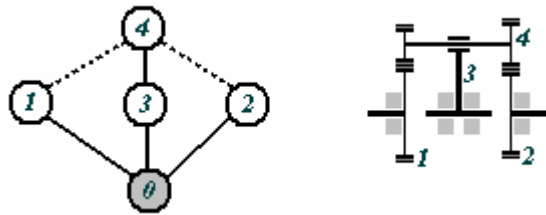
שיטת ייצוג הדומה לדיאגרמת מלבנים אך מקיימת שימור אנרגיה והספק נקראת דיאגרמת Bond Graph [20]. בייצוג זה המערכת מורכבת מאלמנטים סטנדרטיים (כגון התנגדות, קיבוליות, טרנספורנטורים וכ"ו) המצוינים בעזרת סמלים, מצמתים ומחצים המציינים את כיוון זרימת ההספק בין האלמנטים. ההספק הזורם דרך החצים מתואר בעזרת שני משתנים שהם משתנה הכוח (Effort) ומשתנה הזרימה (Flow) אשר הכפלתם זה בזה הוא ההספק העובר בחץ הנתון. כיוון החצים מתאר את כיוון זרימת ההספק בין האלמנטים השונים.



איור-1.6: מערכת פיזיקאלית פשוטה ודיאגרמת ה-Bond Graph שלה (להתרשמות).

למעשה הדגש בייצוג זה הוא שישנה התאמה בין ייצוג המערכת לבין המשוואות הדיפרנציאליות הדינאמיות שלה. זהו מהות השוני העיקרי בין הגישה המוצעת לשיטה זו, שבגישה המוצעת יש התאמה בין הייצוג לטופולוגיה של המערכת ואין התייחסות מפורשת למשוואות.

ייצוג מערכות בעזרת גרף קווי Line Graph יתואר ויפורט בהרחבה בהמשך פרק זה היות והוא אחד הייצוגים המתמטיים שנעשה בו שימוש בתזה. בייצוג זה האלמנטים הפיזיקאליים יכולים להיות מיוצגים על ידי צמתים או/ו על ידי קשתות כאשר הדגש בייצוג זה הוא על טופולוגיה של מערכת והמידע הפיזיקאלי/גיאומטרי יכול להיות נספח.



איור-1.7: מערכת פיזיקאלית פשוטה של גלגלי שיניים (מימין) והגרף הקווי המתאים שלה (משמאל).

1.2.2.1. תכן ממוקד מבנה בעזרת יצירה ומיון גרפים (Graphs Enumeration):

השיטה מבוססת על ייצוג מערכות הנדסיות בעזרת גרף קווי ונקראת באופן כללי Enumeration. מתודולוגית התכן מבוססת על תורת הגרפים ואנאליזה קומבינאטורית. התהליך מתבצע באופן איטרטיבי מספר פעמים עד שמושגת צורת המבנה הרצויה. את המתודולוגיה ניתן לסכם באופן הבא [32]:

- שלב-1: זיהוי דרישות פונקציונאליות, על פי דרישות הלקוח וסוג המכניזם הרצוי.
- שלב-2: קביעת אופן תנועת המנגנון (מישורי, מרחבי או מיוחד). קביעת מספר דרגות החופש של המנגנון ומורכבותו הכללית.
- שלב-3: זיהוי מאפיינים מבניים על פי על פי הדרישות הפונקציונאליות.
- שלב-4: ייצוג מבנה קינמטי אופייני מסוים של המנגנון בעזרת גרף קווי. מתוך המבנה הקינמטי הזה יצירת כל המבנים הקינמטיים האפשריים בעזרת שימוש בתורת הגרפים ואנאליזה קומבינאטורית (כלומר מספר כללים בעזרתם כל שינוי במבנה קיים ייצור מבנה אחר שגם הוא יהיה תקין).
- שלב-5: לכל ייצוג גרפי תקין שנתקבל בשלב-4 עושים תרשים מבני המאפשר להתרשם איכותית מן המבנה שנתקבל ולראות באיזו מידה יש לו היכולת לקיים את הדרישות הפונקציונאליות שהוגדרו בשלב-1. בהתאם לזאת לעשות מיון ראשוני של המנגנונים ולברור לנו את המנגנונים הנראים לנו כטובים ביותר.
- שלב-6: בשלב זה מתבצע מיון קפדני יותר הכולל את כל בחינות המוצר הסופי. בתום מיון זה ניבחר המנגנון שיוצר.

כפי שניתן לראות המתודולוגיה בנויה משני מרכיבים עיקריים והם: ייצור מבניים גרפיים ומיונם. החלק היצירתי העיקרי הוא ייצור המבנים הגרפיים המתבצע באופן ממוחשב ונעשה באופן מנותק מן הדרישות הפונקציונאליות תוך התמקדות בתקינות המבנה בלבד, לכן השיטה היא ממוקדת מבנה. המיון של המבנים על פי הפונקציונאליות וכן גם הצרנת הדרישות הפונקציונאליות למבנה ראשוני נעשים על ידי אדם. שיטת התכן הבין תחומי המוצגת בעבודה זאת דומה לשיטת ה- Enumeration – בכך שבה גם קיימת התייחסות נפרדת וטיפול נפרד לדרישות הפונקציונאליות ולמבנה מערכת, שימלא אותן בסופו של דבר. השוני הוא בכך שבאופן מיוחד על ידי שמירת ה"תאימות" (Compatibility) של הייצוג מתקיים בין הפונקציונאליות למבנה קשר חד-חד ערכי כך שאחד מייצג את השני ולהפך.

פרט לשימוש במודל זהה לייצוג בעיית התכן אין שום עיקרון משותף בין ה- Enumeration לבין השיטה המתוארת בעבודה זאת. בחירת הקונספט ב- Enumeration נעשית על ידי גורם אנושי בעוד שעיקר השיטה הנה מבוססת וסובבת סביב המבנה ללא התייחסות לפונקציונאליות.

1.2.2.2. תכן בעזרת אלגוריתם גנטי (Genetic Algorithm Programming):

שימוש באלגוריתם גנטי בשיטת תכן יוצר שיטה ממוקדת התנהגות. האלגוריתם הגנטי הוא למעשה שיטת חיפוש הסתברותית המאפשרת קבלת פתרונות שונים מנקודת התחלה כלשהי. השיטה אינה מוגבלת לשום צורת ייצוג ובלבד שיהיה ייצוג מלא ומקיף לבעיית התכן. הרעיון הראשוני לאלגוריתם הוצג ב-1960 על ידי Rechenberg ופותח ב-1992 על ידי Koza [15].

על פי המתודולוגיה של האלגוריתם הגנטי, אנו יוצאים מתוך מספר פתרונות הקיימים בידינו ואשר אינם מספקים אותנו ועל ידי פעולות לוגיות של "שכפול" ו"הכלאה" של פתרונות אלו אנו מקבלים פתרונות משופרים. בנוסף לכך מדי פעם מבצעים מוטציות בחלק מן הפתרונות על מנת לזרז ולגוון את אוכלוסיית הפתרונות המתקבלת בכל דור חדש. הפתרונות המתקבלים בכל דור לאחר פעולות המוטציה שכפול והכלאה נבחנים מול פונקציית הערכה (Fitness function) הבוחנת את התנהגותם מול התנהגות נדרשת לקיום הפונקציונאליות. התהליך הוא איטרטיבי ואנו מחליטים שרירותית מתי הפיתרון הוא מספיק טוב וניתן להפסיק את התכן. השיטה הוזכרה להתרשמות בלבד כיוון שכאמור שיטת האלגוריתם הגנטי היא למעשה שיטת אופטימיזציה של קונספט קיים ואילו השיטה המוצגת בעבודה זאת היא שיטה למציאת הקונספט.

1.2.2.3. תכן ממוקד פונקציה (Function Based Design):

שיטות אלו מבוססות על בניית מודל מתמטי לבעיית התכן על פי הדרישות הפונקציונאליות (F.R). בהמשך התהליך הפיכת המודל למערכת הנדסית ממשית.

1.2.2.3.1. סינתזה של מערכות דינאמיות בעזרת Bond-Graph:

בשיטה זאת עושים הפשטה למערכת הנדסית על ידי ייצוג בעזרת B.G. כאמור, ייצוג זה הנו מופשט ואינו מתייחס לתחום הנדסי מסוים ועם זאת מייצג את המשוואות הדיפרנציאליות של המערכת הדינאמית.

ישנם שתי שיטות מרכזיות של תכן בעזרת B.G, הראשונה נקראת "B.G Chunks Method" כלומר שיטת הפזל [33]. בשיטה זאת משתמשים בתתי מערכות מיוצגות ע"י B.G שהפונקציונאליות שלהן ידוע המשמשות אותנו כאבני בניין בסיסיות. בתהליך התכן מגדירים פורטים שהם מבואות המערכת המתוכננת ופורטים שהם מוצאותיה. הגוף של המערכת האמור לבצע את הפונקציונאליות הנדרשת אינו ידוע בשלב זה וניקרא "Black Box" אותו אנו יוצרים בהמשך תהליך התכן. בניין גוף המערכת נעשה מאותן אבני הבניין – "Chunks" המצויות באיזשהו מאגר דינאמי שהוא גם יוצר אותן וגם מקטלג אותן. עיקר תהליך התכן הוא תהליך חיפוש כאשר מתוך מספר הפתרונות המתקבלים בסופו של דבר מועדפים הפתרונות בעלי מספר מינימאלי של אבני בניין.

שיטה דומה בגישה הכוללת אך שונה בדרך הרכבת ה-"Black Box" נקראת "Impedance Method" [3] בשיטה זאת לא מוגדרות אבני הבניין תחילה שמהן נבנית המערכת אלא ניבנה איזשהו מבנה מופשט ראשוני המקיים את הדרישות הפונקציונאליות. בהמשך התהליך מנסים לחלק ולזהות בתוכו אלמנטים הנדסיים מוכרים.

בשיטות התכן בעזרת ייצוג המערכת ההנדסית על ידי B.G ניתן לומר כי העיקרון עצמו של הייצוג והפשטה של בעיית התכן לשני סוגי משתנים ללא יחידות היא זהה למה שנעשה בעבודה זאת. השוני בין שתי השיטות נובע בחלקו מכך שתכן בעזרת ייצוג ה-B.G מיועד למערכות רב תחומיות כגון מערכות אלקטרו-מכאניות, בעוד שהשיטה המוצגת בעבודה זאת מתמקדת בתכן בתחום הנדסי מסוים כגון תחום "מכאני קווים". התמקדות בתחום המסוים מאפשר ליבא ידע מתחום אחר על בסיס אנאלוגיה בין ייצוגים. שיטת תכן בעזרת ייצוג ה-B.G לעומת זאת מנסה לייצר את הפתרון לבעיית התכן על ידי צירופים שונים של אלמנטים מתוך בסיס נתונים תוך בחינת התנהגות המבנה המתהווה בכל שלב ושלב. ייצוג ה-B.G, כיוון שבכפיפה אחת יכול לכלול אלמנטים מתחומים הנדסיים שונים, הנו ייצוג המבטא יותר את זרימת האנרגיה/הספק בין האלמנטים במערכת ומתאר את ההתנהגות המתמטית שלה ולכן הנו ייצוג התנהגותי. ואילו הייצוג הגרפי המתייחס למערכת בה האלמנטים מתחום הנדסי אחד, מתאר טוב יותר את הטופולוגיה של מבנה המערכת ולכן מתאים יותר לייצוג מבני.

1.2.2.3.2. שיטות המשתמשות בסוכנים "Agent Based Method":

מערכות המשתמשות בסוכנים כוללים ישויות מלאכותיות הבנויות לבצע משימות מוגדרות החוזרות על עצמן. כאשר משלבים ישויות אלו בעזרת אסטרטגיה מבוקרת, אזי בעזרת שילובים אלו ניתן לייצור התנהגות מורכבת [3]. סוכנים מסוימים מופקדים על יצירת אלמנטים הנדסיים, סוכנים אחרים מופקדים על יצירת קונספטים ואחרים על אופטימיזציה של התכן. אחת המתודולוגיות המשתמשות בסוכנים ושעובדה לתוכנת מחשב נקראת "A-Design theory".

ה-ABM (Agent Based Method) הנה למעשה סוג מסוים של בינה מלאכותית ומטבע הדברים חותרת להשגת הפונקציונאליות הרצויה על ידי בחינה התנהגותית של המבנה המתהווה. שיטה זאת שונה מן השיטה המוצגת בעבודה זאת באשר גם היא מנסה לייצר פתרון במקום להשתמש בידע קיים.

1.2.2.3.3. שיטות קטלוג ("Catalog Design Method"):

בשיטה זאת עושים ספריה גדולה מכל האלמנטים הבסיסיים (מנועים, צירים, תמסורות,...). כל רכיב בסיסי מוגדר כ-Input/Output Element. השיטה עצמה היא שיטת חיפוש בה נוצרת שרשרת אלמנטים המבצעת את הפונקציונאליות. ניתן למעשה להכליל באופן זה או אחר את כל השיטות הממוחשבות כשיטות קטלוג.

לסיכום, ניתן לומר כי בהשוואה לשלושת השיטות שתוארו לעיל שהן שיטות ליצירת פתרון לבעיית התכן, השיטה המוצגת בעבודה זאת מאפשרת העברת קונספטים מתחומים הנדסיים אחרים.

1.2.3. תכן בעזרת אנאלוגיה:

האנאלוגיה מקובלת מאד כאמצעי להשוואה התנהגותית על בסיס ייצוג מבני מפורט של מערכות הנדסיות מתחומים שונים [28]. בעשורים האחרונים חל שימוש באנאלוגיה כאחד המקורות להשראה עבור תכן יצירתי. אנאלוגיה ברמה נמוכה היא אנאלוגיה בין מבנה למבנה [22], ורמה גבוה יותר של אנאלוגיה היא בין התנהגויות של מערכות. רוב האנאלוגיות ההתנהגותיות שנעשות, נעשות באותו התחום ההנדסי כגון בניית מערכת חדשה על בסיס שיפור מערכת קיימת. אנאלוגיה התנהגותית בין תחומים יכולה להפיק לעיתים תכן מעניין יותר.

Gero [22] יצר מודל תומך תכן ממוחשב המשתמש גם באנאלוגיה בין מבנה למבנה וגם בין מבנה להתנהגות. מודל זה בנוי כתרשים זרימה שבתהליך די מורכב המאגד בתוכו משתני התנהגות, משתני מבנה פונקציונאליות וצורת שונות של מידע. נושא האנאלוגיה ההתנהגותית אינו מטופל ישירות בעבודה זאת אלא אנאלוגיה פונקציונאלית ומבנית בלבד כפי שיתואר בשיטת הייצוג המשותף.

הגישה המוצגת בעבודה זאת למעשה תומכת בשיטת התכן בעזרת אנאלוגיה ומבססת אותו על ייצוג טופולוגיה מבני אחיד פשוט ומשותף להרבה תחומים הנדסיים.

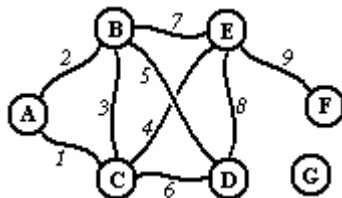
1.3. רקע תיאורטי בתורת הגרפים ובייצוג מערכות הנדסיות בעזרת גרף קווי:

סעיף זה בה לתת רקע כללי על תורת הגרפים המהווה תשתית לעבודה זאת.

1.3.1. הגדרות בסיסיות:

גרף (graph):

אוסף קשתות (edges) וצמתים (vertices), כאשר לכל קשת מתאים זוג של צמתים, שיקראו צמתי הקצה של הקשת.



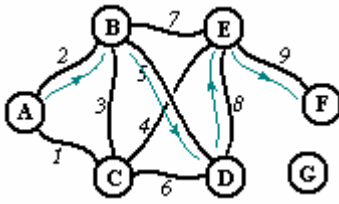
איור-1.8: גרף.

דרגת הצומת (degree):

מספר קשתות שהצומת פוגשת.



איור-1.8א: צומת בגרף וענפים הפוגשים בה.

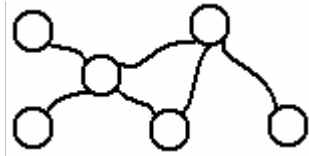


מסלול (path):
 סדרה מהצורה $P = (V_0, e_1, V_1, e_2, V_2, \dots, e_k, V_k)$ כאשר V_0, V_1, \dots, V_k ו- e_0, e_1, \dots, e_k אלו הם צמתים וקשתות הגרף בהתאמה ואילו V_i ו- V_{i+1} הם צמתי הקצה של הקשת e_i . הצמתים V_k ו- V_1 נקראים צמתי הקצה של המסלול.

איור-1.8.ב: מסלול בגרף.

גרף קשיר (connected graph):

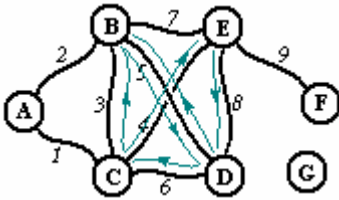
הגרף הוא גרף קשיר אם ורק אם בין כל שני צמתים בגרף קיים לפחות מסלול אחד, דהיינו, כל צומת נגיש (reachable) מכל צומת אחר של הגרף.



איור-1.8.ג: גרף קשיר.

מעגל (cycle):

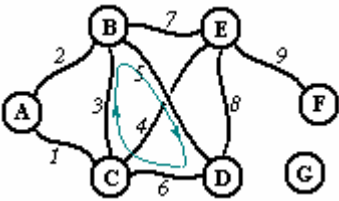
זהו מסלול בגרף ששני צמתי הקצה של המסלול הם אותו צומת. במילים אחרות, מעגל – זהו מסלול שחוזר לאותה נקודה ממנו הוא התחיל.



איור-1.8.ד: מסלול מעגל בגרף.

מסלול (מעגל) פשוט:

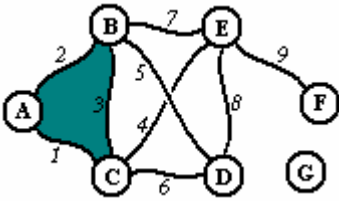
מסלול (מעגל) בו כל צומת מופיעה פעם אחת בדיוק (למעט צומת הקצה).



איור-1.8.ה: מעגל פשוט.

פאה (Face):

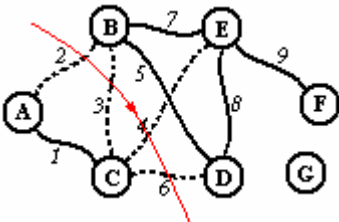
מעגל ללא קשתות פנימיות.



איור-1.8.ו: פאה בגרף. המעגל $\{A, B, C\}$ אין בו קשתות פנימיות ולכן הוא פאה.

חיתך (cut):

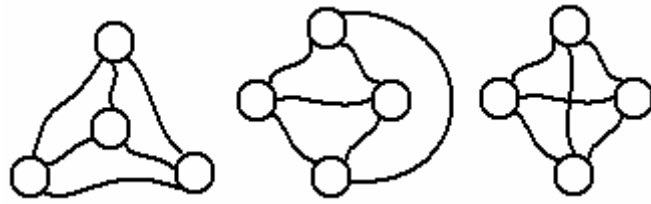
- זוהי קבוצת קשתות בגרף המקיימת את התכונות הבאות:
1. הורדת קבוצת קשתות זו מן הגרף תהפוך אותו לגרף לא קשיר.
 2. כל תת קבוצה של החתך לא מקיימת את התכונה הראשונה.



איור-1.8.ז: חתך בגרף.

גרפים איזומורפיים (isomorphic graphs):

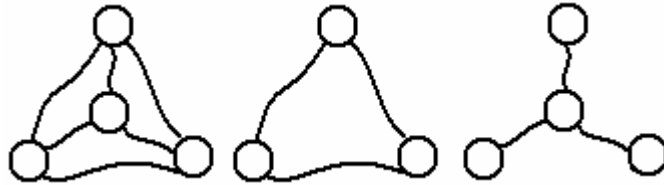
שני גרפים נקראים איזומורפיים כאשר מטריצות הפגישות (תתואר בהמשך) שלהם שוות או כאשר מטריצת הפגישות של אחד יכולה להתקבל כתוצאה של מספר החלפות בין השורות והעמודות של מטריצת הפגישות של הגרף השני.



איור-1.8ח: גרפים איזומורפיים.

תת גרף (subgraph):

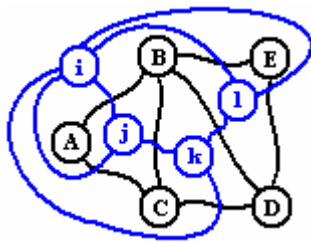
גרף H הוא תת-גרף של גרף G אם כל הצמתים וקשתות של גרף H שייכות לגרף G. תת-גרף של G מתקבל ע"י מחיקת מספר צמתים וקשתות.



איור-1.8ט: שני הגרפים מימין הנם תת-גרפים של הגרף משמאל.

גרף דואלי (dual graph):

G ו-G* הם גרפים דואליים זה לזה עם לכל פאה ב-G קיים קודקוד ב-G* ושני צמתים בדואלי שכנים אם שתי הפאות המתאימות סמוכות זו לזו.



איור-1.8י: גרף וגרף דואלי.

1.3.2. ייצוג מערכות פיזיקאליות בעזרת גרפים:

הגדרות יסוד:

מערכת: קבוצת אלמנטים.

אלמנט: רכיב אטומי של מערכת.

ייצוג מערכת פיזיקאלית בעזרת מודל גרפי בפרט צריך להיות מושתת על:

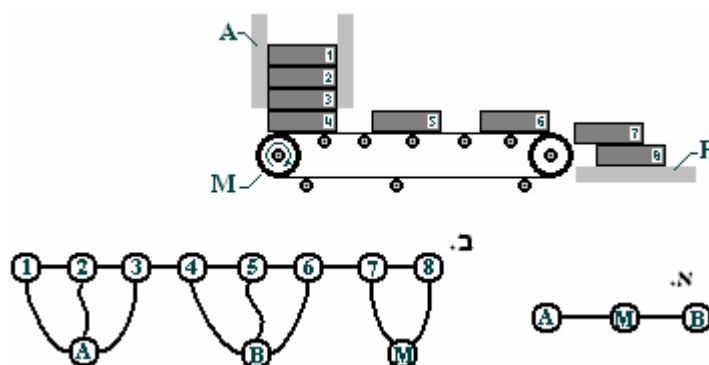
(1) **טופולוגיה של המערכת:**

קשרים הדדיים בין האלמנטים השונים של המערכת.

(2) **תכונות פיזיקאליות/גיאומטריות:**

תכונות התנהגות רלוונטיות של אלמנטים כגון גודל פיזי, משקל, אינרציה, התנגדות,.....

הרעיון המרכזי של ייצוג מערכות פיזיקאליות בעזרת גרפים הוא לדעת איך להגדיר כאלמנטים ישויות במערכת בצורה כזאת שהטופולוגיה של ייצוג המערכת תמיד תישאר קבוע והתכונות הגיאומטריות/פיזיקאליות יהיו תיאור משלים. אם הצלחנו למצוא אלמנטים בצורה כזאת אזי ניתנת המערכת לתיאור גרפי.



איור-1.9: דוגמה לייצוג מערכת ע"י גרף. נתונה מערכת של מסוע M, מחסנית A ומשטח B. קופסאות נטענות למחסנית ומועברות בעזרת המסוע למשטח שממנו הן נאספות. המטרה, לבנות ייצוג גרפי שבעזרתו נוכל לווסת את מהירות התנועה של המסוע מאחר וקצב טעינה במחסנית A וקצב הפריקה במשטח B משתנים. בייצוג משמאל כל האלמנטים מיוצגים כצמתים והקשרים ביניהם כקשתות בייצוג זה היתרון הוא שמידית ניתן לדעת את העומס המחסנית, מסוע, משטח ע"י ידיעה של הדרגה של הצומת הרלוואנטית אולם הדבר יצריך שינויים תמידיים במבנה הגרף של הוספה/החיסור של צמתים וכן גם שינויי חיבור בין צמתים שונים דבר שהופך את הייצוג הזה ללא רלוואנטי. בייצוג - א לעומת זאת המחסנית, המסוע והמשטח כל אחד מיוצג כצומת ומספר הקופסאות שהוא מכיל מיוצג כערך אותה הצומת. מבנה טופולוגי זה לא משתנה עם הזמן ולכן יעיל יותר לייצוג.

אולם תנאי זה כשלעצמו אינו מספיק על מנת שהייצוג יחשב כטוב כיוון שגם ייצוג משמר טופולוגיה יכול להיות מסורבל ויגרום לסיבוכיות חישובית גבוהה או פשוט לא ניתן לשילוב של תכונות פיזיקאליות.

כאמור בייצוג גרפי קיימים שני סוגי ישויות – צמתים וקשתות. העיקרון הנוסף אותו צריך ליישם בייצוג גרפי הוא צמצום התכונות גיאומטריות/פיזיקאליות הרלבאנטיות של האלמנטים לשתים משתנים בלתי תלויים בלבד.

משתנה דרך (Through variable):

משתנה שהתקן למדידתו מחובר בטור לאלמנט או למערכת. כגון כוח, ספיקת זורם, מעבר כספים/סחורות וכ"ו.

משתנה מעבר (Across variable):

משתנה שהתקן למדידתו מחובר במקביל לאלמנט או מערכת. כגון הזזות, טמפרטורה, לחץ וכ"ו.

איור-1.10: תיאור סכמטי של משתנה דרך משתנה מעבר.



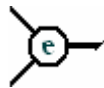
כל מידע גיאומטרי/פיזיקאלי הקשור למשתנה הדרך יוצמד לקשתות וכל מידע גיאומטרי/פיזיקאלי הקשור למשתנה מעבר יוצמד לצמתים. שיטת ייצוג זאת מקורה בחוקי קירכהוף של תורת החשמל לכן מקובל לקרוא למשתנה דרך – **זרימה (flow)** ולמשתנה המעבר – **הפרש פוטנציאלים (Potential Difference)**. בנוסף לכך בעבודה זאת ישנה התייחסות נפרדת לפוטנציאל של צומת בודדת כיישות המייצגת ערך פיזיקאלי של מערכת הנדסית.

עקרונית קיימת בייצוג שאלת "הביצה והתרנגולת" (מי קודם למי). האם בבואנו לתת ייצוג גרפי למערכת, האם קודם נגדיר את משתני הפוטנציאל/זרימה של המערכת הפיזיקאלית ורק לאחר מכן על פי זה נגדיר את האלמנטים שלה או שלהפך. קודם נגדיר מי הם האלמנטים של המערכת ורק לאחר מכן על פי זה נגדיר את משתני הפוטנציאל/זרימה שלה. בעבודה זאת נבחרה הדרך הסטנדרטית של ייצוג מערכות הנדסיות [28] בה קובעים את משתני הפוטנציאל/זרימה לפני האלמנטים כמתואר בטבלה-1.2.

משתנה מעבר - פוטנציאל	משתנה דרך - זרימה	
מהירות קווית v [m/sec]	כוח F [N]	מכאנית קווית:
מהירות זוויתית ω [rad/sec]	מומנט M [m·N]	מכאנית סיבובית:
פוטנציאל V [Volt]	זרם חשמלי i [Amp]	חשמלית:
לחץ P [N/m ²]	ספיקה נפחית של זורם q [m ³ /sec]	הידראולית:

טבלה-1.2: משתני פוטנציאל/זרימה במערכות פיזיקאליות שונות.

ייצוג אלמנט כצומת:



כאשר הפוטנציאל בכל הנקודות השונות באלמנט תמיד קבוע והזרימה כן יכולה להשתנות בנקודות שונות.

ייצוג אלמנט כקשת:



כאשר הפוטנציאל בנקודות השונות באלמנט יכול להשתנות או כאשר הזרימה באלמנט קבוע.

לפי אופן ייצוג האלמנטים ולפי התכונות הפרטיות של המערכת מקבלים סוגי ייצוג פרטיים המתוארים בטבלה-1.3:

ייצוג אלמנט כקשת:	ייצוג אלמנט כצומת:	
FGR Flow Graph Representation "גרף זרימות"	FLGR Flow Line Graph Representation "גרף זרימות קווית"	הזרימה במערכת לא תלויה בהבדלי פוטנציאלים:
PGR Potential Graph Representation "גרף פוטנציאלים"	PLGR Potential Line Graph Representation "גרף פוטנציאלים קווים"	הבדלי הפוטנציאלים במערכת לא תלויים בזרימות:
RGR Resistance Graph Representation "גרף התנגדות"		ישנה תלות ליניארית בין הבדלי פוטנציאלים במערכת לבין הזרימות.

טבלה-1.3: סוגי גרפים.

צומת יחוס או צומת ניטראלית:

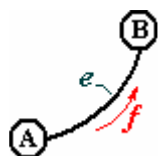
בכל מערכת פיזיקאלית שלמה הדבר הבסיסי ביותר הוא שצריך לקבוע אלמנט אשר פוטנציאל שלו יחשב כ - "אפס". אלמנט זה יוצג בגרף כצומת הייחוס של הגרף. במקרה המנגנונים המכאניים אלמנט זה היא החוליה הניטראלית, במקרה של מערכות הידראוליות זהו הלחץ האטמוספרי ובמקרה של מערכת חשמלית זהו מתח הארקה. ללא ידיעת צומת הייחוס של הגרף לא ניתן בשום אופן לקבוע את הפוטנציאל של יתר הצמתים. מקובל לסמן בגרף את צומת הייחוס באופן שונה מיתר צמתי הגרף. טבלה-1.4 מתארת את האלמנטים הממשיים המתפקדים כצומת ייחוס (צומת ניטראלית) במערכות הנדסיות שונות.

מערכת מכאנית:	מערכת הידראולית:	מערכת אלקטרונית:

טבלה-1.4: אלמנטי ייחוס של מערכות.

גרף התנגדות (Resistance Graph Representation) RGR :

ייצוג זה הנו הייצוג המוביל במחקר זה. ייצוג מערכת פיזיקאלית בעזרת גרף התנגדות הוא ייצוג כולל המתאים לכל מערכת שהיא הבנויה מאלמנטים בעלי כניסה אחת ומוצא אחד הנקראים-Two-terminal element (איור-1.10). מכיוון שלעיתים ייצוג זה יוצר סרבול לא הכרחי אזי, במידה והדבר ניתן, עדיף במקרים פרטיים להשתמש בייצוגים פשוטים יותר כמו גרף פוטנציאלים-PGR. המאפיין ייצוג זה הוא שכל אלמנט המיוצג כקשת מקבל גם ערך הנקרא התנגדות והמתאר את היחס בין הזרימה באלמנט להפרשי הפוטנציאלים שעליו.



(1.1a)

$$\bar{\pi}_A - \bar{\pi}_B = \bar{\Delta}_{A/B} = [R] \bar{f}$$

π_A - פוטנציאל צומת A.

π_B - פוטנציאל צומת B.

$\Delta_{A/B}$ - הפרש פוטנציאלים בין הצמתים B ו-A.

$[R]$ - פוטנציאל צומת A.

f - זרימה בקשת B-A.

הנוסחה (1.1) היא וקטורית במקרה הכללי ורב ממדי ($[R]$ -טנזור) וסקלארית במקרה פרטי חד-ממדי. כמו כן ערך ההתנגדות של אלמנט יכול להיות קבוע לפי זמן ויכול להשתנות. להלן אלמנטים בסיסיים המקובלים כאלמנטי התנגדות במערכות פיזיקאליות חד-ממדיות שונות.

מערכת מכאנית : קווית :	מערכת מכאנית : סיבובית :	מערכת מכאנית : הידראולית :	מערכת מכאנית : חשמלית :	
<p>כוח חיכוך וויסקוזי :</p> <p>$v_{B/A} = \frac{1}{B} \cdot F$</p>	<p>מומנט חיכוך וויסקוזי :</p> <p>$\omega_{B/A} = \frac{1}{B} \cdot M$</p>	<p>התנגדות הדראולית :</p> <p>$P_{B/A} = R \cdot q$</p>	<p>התנגדות חשמלית :</p> <p>$V_{B/A} = R \cdot i$</p>	<p>רכיב התנגדות טהור :</p> <p>$\Delta_{B/A} = R \cdot f$</p>
<p>מסה :</p> <p>$\dot{v}_{B/A} = \frac{1}{m} F$</p>	<p>אינרציה :</p> <p>$\dot{\omega}_{B/A} = \frac{1}{J} M$</p>	<p>קיבול נפחי :</p> <p>$P_{B/A} = \frac{\gamma}{A} \int q dt$</p>	<p>קיבול חשמלי :</p> <p>$V_{B/A} = \frac{1}{C} \int i dt$</p>	<p>רכיב קיבולי :</p> <p>$\Delta_{B/A} = \frac{1}{C} \int f dt$</p>
<p>קפיץ קווי :</p> <p>$v_{B/A} = \frac{1}{k} \dot{F}$</p>	<p>קפיץ פיתול :</p> <p>$\omega_{B/A} = \frac{1}{k} \dot{M}$</p>	<p>צינור אידיאלי ארוך וצר :</p> <p>$P_{B/A} = L_H \dot{q}$</p>	<p>סליל :</p> <p>$V_{B/A} = L \frac{d}{dt} i$</p>	<p>רכיב השראי :</p> <p>$\Delta_{B/A} = k \frac{d}{dt} f$</p>

טבלה-1.5 : מערכות התנגדות בסיסיות. האלמנטים הקיבוליים וההשראיים ניתנים לביטוי כאלמנטים של התנגדות במישור - לפלס. יש לשים לב שהצומת A באלמנטים קיבוליים מכאניים והידראוליים היא צומת ייחוס.

פרט לקשתות התנגדות המפורטות לעיל קיימות מערכות מיוחדות שבייצוג גרפי מתייחסים אליהם כאלמנטים מיוחדים :

קשת חד-כיוונית:

אלמנט שמעביר זרימה רק בכיוון אחד (בכיוון החץ) וגם יוצר תלות בין הפוטנציאלים של שני הצמתים שלו באופן הבא:



$$\pi_A \leq \pi_B$$

(1.2)

מערכת אלקטרונית:	מערכת הידראולית:	מערכת מכאנית סיבובית:	מערכת מכאנית קווית:
 $V_A \leq V_B$	 $P_A \leq P_B$	 $\omega_A \leq \omega_B$	 $v_A \leq v_B$

טבלה-1.6: אלמנטים חד-כיווניים במערכות פיזיקאליות שונות.

מקור קבוע של הפרש פוטנציאלים:

מערכת/אלמנט אשר מייצר תמיד בין המבוא לכניסה שלו הפרש פוטנציאלים נתון בלתי תלוי בזרימה העוברת דרכו.



$$\pi_A - \pi_B = \Delta_{\Delta S} = const$$

מערכת חשמלית:	מערכת הידראולית:	מערכת מכאנית סיבובית:	מערכת מכאנית קווית:

טבלה-1.7: דוגמאות למקורות הפרש פוטנציאלים במערכות פיזיקאליות שונות.

מקור קבוע של זרימה:

מערכת/אלמנט אשר מייצר דרכו זרימה קבוע ללא תלות בהפרשי פוטנציאלים שעל פניו.



$$f_{AB} = f_{\Delta S} = const$$

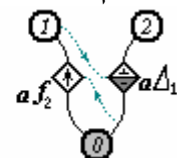
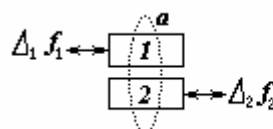
מערכת חשמלית:	מערכת הידראולית:	מערכת מכאנית סיבובית:	מערכת מכאנית קווית:

טבלה-1.8: דוגמאות למקורות זרימה במערכות פיזיקאליות שונות.

טרנספורמטורים:

טרנספורמטור או "צימוד טרנספורמטורי" היא מערכת פיזיקאלית מאד נפוצה המהווה צימוד משמר הספק בין שתי מערכות/אלמנטים מסוג Two-terminal element ובאותו התחום הפיזיקאלי.

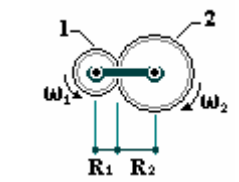
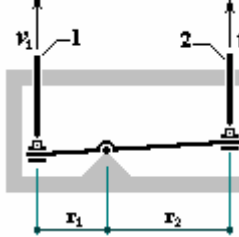
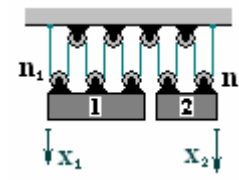
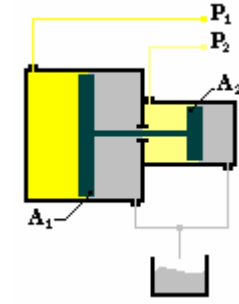
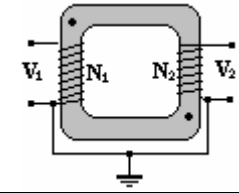
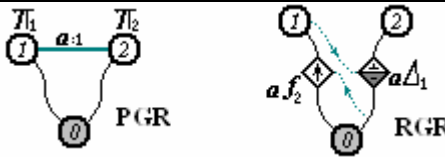
$$(1.3) \quad \begin{cases} \Delta_2 = a\Delta_1 \\ f_2 = \frac{1}{a}f_1 \end{cases}$$



איור-1.16: ייצוג של טרנספורמטור ע"י גרף קווי.

המערכת משנה את ערכי משתנה הדרך במוצא באופן פרופורציונאלי ובלתי משתנה עם הזמן כתלות במשתנה הדרך של הכניסה ומשתנה מעבר במוצא כתלות משתנה מעבר בכניסה. הקבוע a נקרא יחס תמסורת. חלק מן הטרנספורמטורים במערכות פיזיקאליות שונות מתוארות בטבלה-

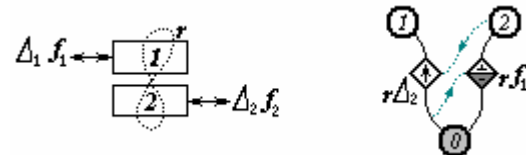
1.9:

מערכת	סכמה	יחס תמסורת פוטנציאליים	יחס תמסורת זרימה	קבוע התמסורת
מכאני סיבובית:		$\frac{\omega_2}{\omega_1} = a$	$\frac{M_2}{M_1} = \frac{1}{a}$	$a = -\frac{R_1}{R_2}$
מכאני קווית סוג חיליות:		$\frac{v_2}{v_1} = a$	$\frac{F_2}{F_1} = \frac{1}{a}$	$a = -\frac{r_2}{r_1}$
מכאני קווית סוג גלגות:		$\frac{x_2}{x_1} = a$	$\frac{F_2}{F_1} = \frac{1}{a}$	$a = -\frac{n_1}{n_2}$
הידראולית:		$\frac{P_2}{P_1} = a$	$\frac{q_2}{q_1} = \frac{1}{a}$	$a = -\frac{A_1}{A_2}$
מגנטית-אלקטרו-		$\frac{V_2}{V_1} = a$	$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{a}$	$a = -\frac{N_2}{N_1}$
				

טבלה-1.9: טרנספורמטורים במערכות פיזיקאליות שונות וייצוגם הגרפי.

גיראטורים:

(או צימוד גיראטורי) בניגוד לטרנספורמטור היא מערכת יחסית נדירה המהווה צימוד משמר הספק בין שתי מערכות/אלמנטים מסוג Two-terminal element - ובד"כ בשני התחומים הפיזיקאליים שונים.

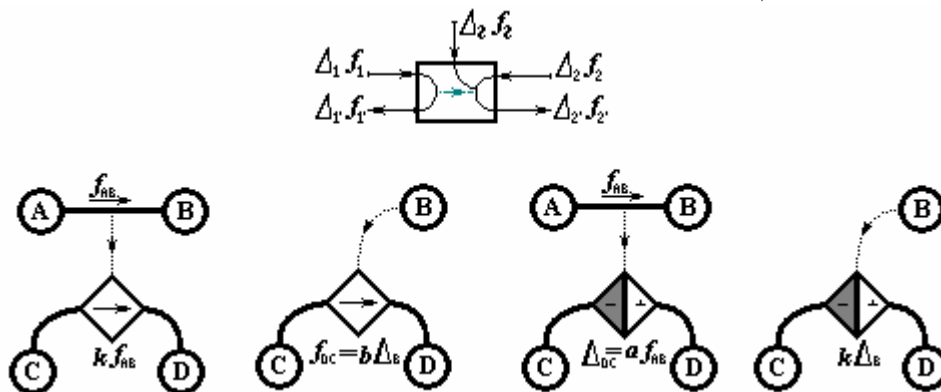
$$(1.4) \quad \begin{cases} \Delta_2 = r f_1 \\ f_2 = \frac{1}{r} \Delta_1 \end{cases}$$


איור-1.11: ייצוג של גיראטור ע"י גרף קווי.

המערכת משנה את ערכי משתנה הדרך במוצא ביחס פרופורציונאלי ובלתי משתנה עם הזמן כתלות במשתנה המעבר של הכניסה ואת משתנה המעבר של המוצא כתלות במשתנה הדרך של הכניסה ביחס הפוך. הקבוע r נקרא יחס גיראציה. במערכת מכאנית, לדוגמה, הגיראטור יתן במוצא מהירות סיבובית קבועה אם בכניסה ניתן מומנט קבוע.

מקורות תלויים:

בדומה למקורות הפרש פוטנציאלים או זרימה קבועים, מקורות אלו גם הם מייצרים על פניהם הפרש פוטנציאלים בלתי תלוי בזרימה דרכם או זרימה דרכם שאינה תלויה בהפרש פוטנציאלים שעל פניהם. אולם ההפרש פוטנציאלים או הזרימה שלהם כן תלויים בפוטנציאל של צומת כל שהיא אחרת או בהפרש פוטנציאלים על פני קשת אחרת או בזרימה דרך קשת אחרת ביחס פרופורציונאלי ובלתי משתנה. מקורות תלויים הם מערכות שאינן משמרות הספק בין הכניס למוצא וההספק העודף מקורו במקור אנרגיה נוסף אשר לא בה לידי ביטוי באופן ישיר בייצוג גרפי. קיימים 4 סוגי מקורות תלויים כמתואר באיור-1.12.



איור-1.12: מקורות תלויים. למעלה תיאור סיכמתי בו מתוארת מערכת בעלת 4 כניסות/יציאות כל שהכניסות/מוצאים 1/1 קובעים את 2/2 (תלות ליניארית) כאשר ישנו עוד מבווא/מוצא נוסף המשמש כ"ברז" הספק. מתחת מופיעים הייצוגים של המקורות התלויים מימין לשמאל: מקור זרימה תלוי זרימה, מקור זרימה תלוי פוטנציאל, מקור הפרש פוטנציאלים תלוי זרימה, מקור הפרש פוטנציאלים תלוי פוטנציאל.

בעוד שלמקורות קבועים, אלמנטי התנגדות למיניהם, טרנספורמטורים וגיראטורים יש מימוש ידוע ברמת האלמנט במערכות הידראוליות מכאנית ואלקטרונית, הרי שמימוש מקורות תלויים קיים רק במערכת אלקטרונית. כיוון שמקורות תלויים משתתפים בייצוג הרבה מערכות ישנה חשיבות לנסות ולפתחם גם במערכות פיזיקאליות אחרות.

דוגמאות ייצוג מקובל של מערכות חד ממדיות שונות:

1. מערכת מכאנית סטטית (מבנה):
באיור-1.19 מתוארת מערכת מכאנית יתר סטטית של מבנה מוטות הנתון ללחיצה על כוח חיצוני והייצוג הגרפי שלה ע"י RGR.

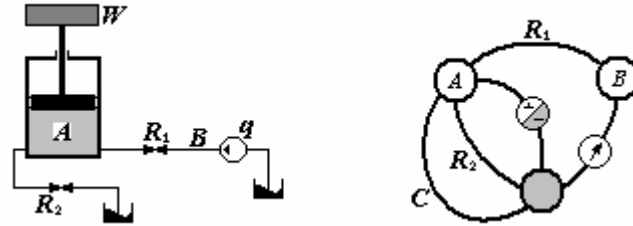
איור-1.13: ייצוג RGR של מערכת מכאנית סטטית.



המאפיין ייצוג זה שמוטות – האלמנטים המבניים האלסטיים מיוצגים כקשתות והחיבורים הקשיחים ביניהם מיוצגים כצמתים. פירוש הזרימות שבייצוג הגרפי הוא הכוחות הפועלים באלמנטים ופירוש הפוטנציאלים שבצמתים הוא ההזזות של כל חיבור וחיבור בין האלמנטים. המידע הגיאומטרי/פיזיקאלי הנמצא בכל צומת i – הוא הקשיחות של האלמנט $E_i A_i / L_i$.

2. מערכת זרימה הידראולית:
באיור-1.20 מתוארת מערכת הידראולית המכילה משאבה הידראולית, בוכנה המפעילה עומס חיצוני והתנגדות הידראולית של הצנרת מיוצגת ע"י נגדים שווי ערך. כמו כן מתואר ייצוג RGR של המערכת.

איור-1.14: ייצוג RGR של מערכת הידראולית.

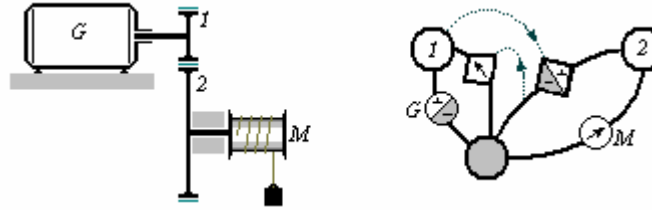


המשאבה ההידראולית מיוצגת כמקור זרימה אידיאלי והבוכנה מיוצגת כמקור פוטנציאל בגודל W/A כמו כן כיוון ששטח חתך הבוכנה גדול בהרבה מזה של הצינור, היא מתפקדת גם כאלמנט קיבולי.

3. תמסורת גלגלי שיניים מכאנית:

באיור-1.21 מתוארת מערכת בה מנוע חשמלי מרים עומס דרך תמסורת הפחתה של גלגלי שיניים וגרף RGR של המערכת.

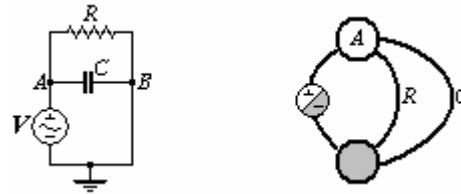
איור-1.15: ייצוג RGR של מערכת מכאני סיבובית.



תמסורת גלגלי השיניים מתוארת ע"י מקורות תלויים כטרנספורמטור. מערכת אלקטרונית:

באיור-1.9 מתוארת מערכת אלקטרונית וגרף RGR שלה.

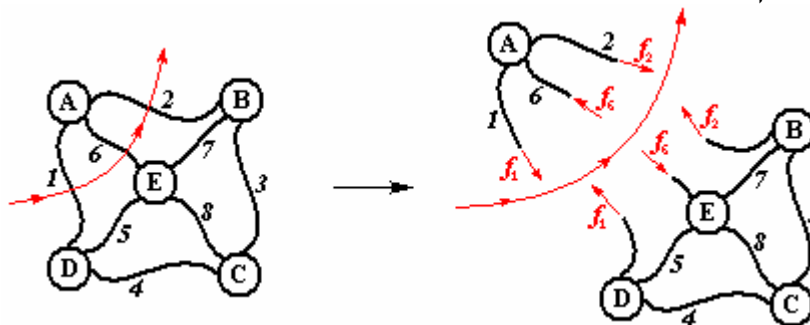
איור-1.16: ייצוג RGR של מערכת אלקטרונית.



בכל הייצוגים הגרפיים השונים צריכים להתקיים החוקים הבאים שהם ביטוי מורכב של חוקי קירקהוף במעגלים חשמליים:

חוק הזרימות:

חוק זה מתקיים בכל ייצוג בו יש התייחסות לזרימות (כגון FGR, RGR) ואומר שסכום הזרימות בכל חתך בגרף צריך להיות שווה לאפס.



איור-1.17: תיאור חתך בגרף.

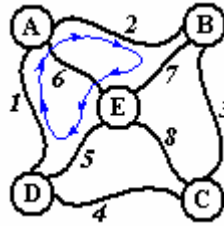
$$\vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \vec{f}_6 = \vec{0} \quad \text{ע"פ המתואר באיור-1.23 צ"ל:}$$

או באופן כללי יותר ניתן להציג את חוק הזרימות כאשר מתייחסים למטריצה אופיינית של הגרף הנקראת מטריצת החתכים - $[Q]$. באופן כללי ניתן לומר כי מטריצה זאת תלויה בתת-גרף הנקרא עץ פורש ומתארת את כיווני הזרימות בקשתות השונות על פי החתכים האפשריים השונים המוגדרים על ידי העץ הפורש. בעזרת מטריצה זאת ניתן לכתוב את חוק הזרימות באופן הבא:

$$[Q] \cdot \vec{f} = \vec{0} \quad (1.6)$$

חוק הפוטנציאלים:

חוק זה מתקיים בייצוג בו יש התייחסות לפוטנציאלים (כגון PGR, RGR) ואומר שסכום הפרשי פוטנציאלים בכל מעגל בגרף צריך להיות שווה לאפס.



איור-1.18: מעגל בגרף.

$$(\pi_B - \pi_A) + (\pi_E - \pi_B) + (\pi_D - \pi_E) + (\pi_A - \pi_D) = 0$$

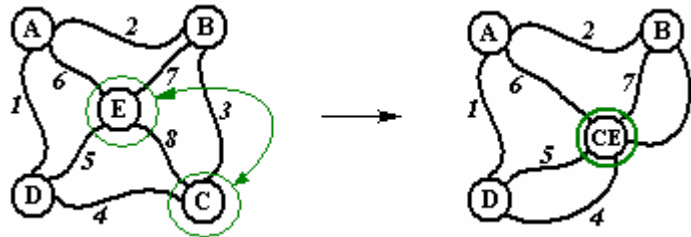
$$\Delta_{B/A} + \Delta_{E/B} + \Delta_{D/E} + \Delta_{A/D} = 0$$

או באופן כללי יותר ניתן להציג את חוק הזרימות כאשר מתייחסים למטריצה אופיינית של הגרף הנקראת מטריצת המעגלים - [B]. בדומה למטריצת החתכים מטריצה זאת תלויה גם היא בתת-גרף הנקרא עץ מתייחסת למעגלים בסיסיים בגרף המוגדרים על ידי העץ הפורש. בעזרת מטריצה זאת ניתן לכתוב את חוק הזרימות באופן הבא:

$$(1.7) \quad [B] \cdot \bar{\Delta} = \bar{0}$$

חוק הצמצום:

אם יש שני צמתים בגרף כך שתמיד אין הפרש פוטנציאלים בין שני צמתים אלו, אזי ניתן לצמצמם לצומת אחת ולמחוק את כל הקשתות המחברות ביניהם מבלי שהדבר יפגע בחוק הזרימות ובחוק הפוטנציאלים.



איור-1.19: צמצום צומת בגרף. לצומת C ולצומת E יש אותו פוטנציאל ולכן ניתן לצמצמם לצומת אחת CE. כתוצאה מכך נמחקת הקשת 8.

תכונת אורתוגונאליות:

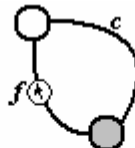
במערכות פיזיקאליות תקינות מתקיים קשר בין מטריצת החתכים למטריצת המעגלים באופן הבא:

$$(1.8) \quad [B][Q]^t = [0]$$

מהות קשר זה הוא בחוק שימור אנרגיה/הספק.

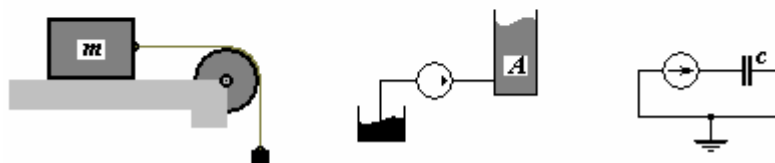
מערכות אנאלוגיות:

מערכות פיזיקאליות שהייצוג הגרפי שלהן איזומורפי הן אנאלוגיות זו לזו. מערכות פיזיקאליות אנאלוגיות יכולות להיות מאותו התחום הפיזיקאלי או מתחום פיזיקאלי שונה.



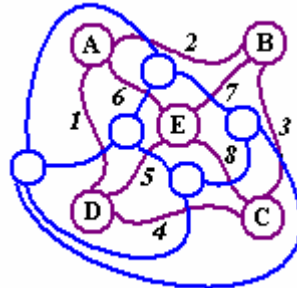
איור-1.20: דוגמא

למערכות חד-ממדיות אנאלוגיות. מערכות (מימין לשמאל) מכאנית הידראולית וחשמלית בעלות אותו ייצוג גרפי.



מערכות דואליות:

מערכות באותו התחום הפיזיקאלי אשר הייצוג הגרפי של אחת איזומורפי לייצוג הגרפי הדואלי של השניה. במערכות דואליות התפקיד אותו מבצע משתנה הדרך של המערכת האחת זהה לתפקיד אותו מבצע משתנה המעבר של השניה. תכונה זאת מתבטאת מתמטית בדואליות בין המשוואות הדינאמיות של שתי המערכות וגם בייצוגן הגרפי [28].

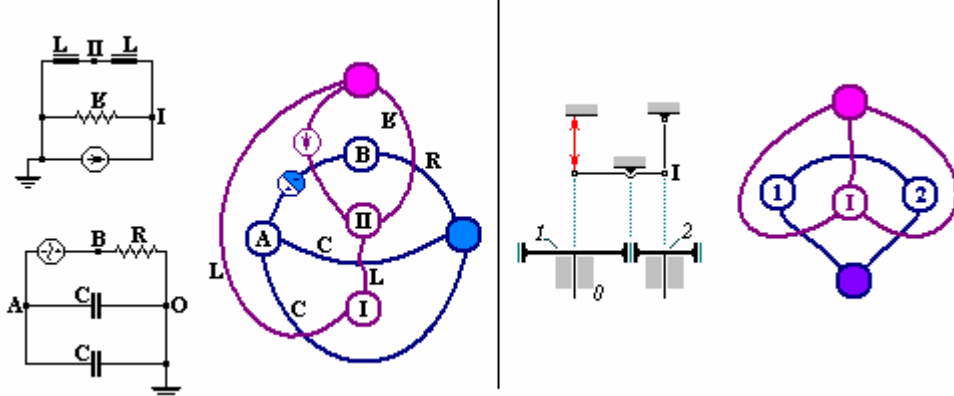


איור-1.21: גרף וגרף דואלי.

קיים קשר בין מטריצת החתכים של גרף למטריצת המעגלים של הדואלי שלו:

$$(1.9) \quad [Q_{(G)}] = [B_{(G^*)}]$$

מקשר זה נובע כי הגרף הדואלי לגרף הדואלי הוא הגרף המקורי.



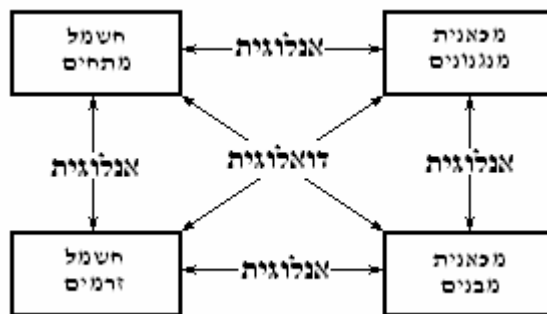
איור-1.22: דוגמאות למערכות דואליות זו לזו. מימין מערכת גלגלי שיניים (PLGR) ומערכת סטטית דואלית לה (FLGR). משמאל מערכת אלקטרונית המורכבת מגנר וקבלים ומקור מתח והמערכת הדואלית לה של מוליך סלילים מקרו זרם.

ייצוגים הידועים כדואליים זה לזה [25]:

$$\begin{aligned} PGR &\xleftrightarrow{\text{dual}} FGR \\ PLGR &\xleftrightarrow{\text{dual}} FLGR \\ RGR &\xleftrightarrow{\text{dual}} RGR \end{aligned}$$

מערכות דואלוגיות:

כאשר קיימת אנלוגיה בין מערכת מתחום פיזיקאלי אחד לבין מערכת דואלית מתחום פיזיקאלי אחר אזי אומרים כי שתי המערכות הן דואלוגיות [28]. הגדרה זאת תקפה רק עבור המערכות ההנדסיות (איור-1.23) ולא על הייצוגים הגרפיים.



איור-1.23: סוגי קשרים בין מערכות פיזיקאליות.

פרק-2: תכן קונספטואלי בעזרת ייצוג משותף (Common Graph).

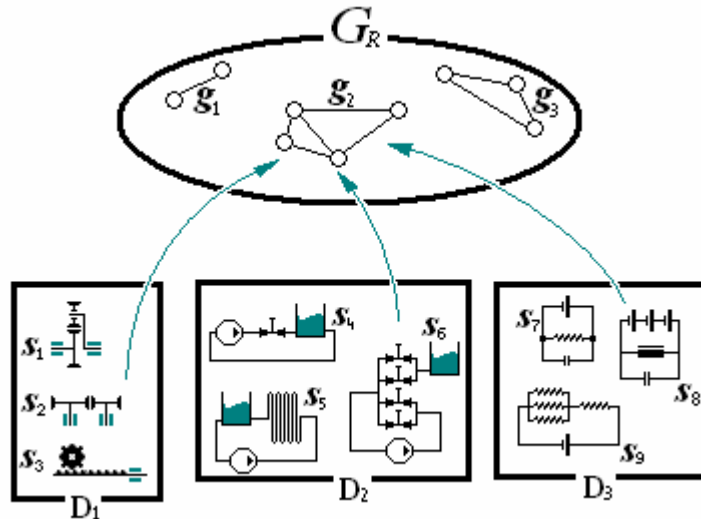
2.1 מבוא:

תכן קונספטואלי בעזרת ייצוג המשותף [25] היא שיטה אשר בעזרתה מעבירים ידע בין מערכות הנדסיות מתחומים הנדסיים שונים באמצעות מודלים מתמטיים הנקראים ייצוגים גרפיים. באופן זה ניתן להשיג ידע שחסר (לצורך ביצוע תכן קונספטואלי) במערכת הנדסית מתחום אחד אם הוא קיים במערכת הנדסית מתחום אחר. נגדיר את המושג "ידע" כמידע (Information) טכני/הנדסי מינימאלי הרלוונטי לצורך בניית מבנה הנדסי (Structure) אשר מקיים פונקציונאליות נדרשת (Function) [31].

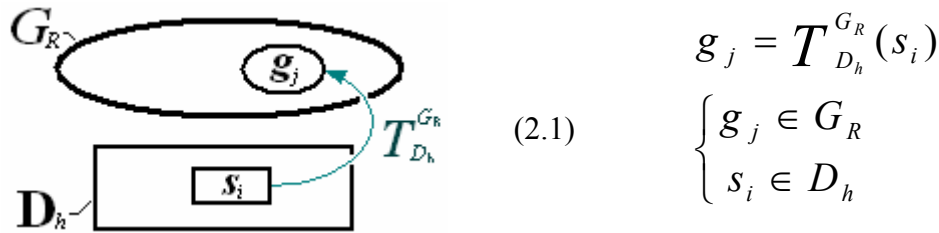
נקרא לתחום הנדסי המסוים- D_i כאשר האינדקס- i מייצג את התחום הספציפי (נניח תחום מערכות הידראוליות או תחום המערכות המכאניות קינימטיות סיבוביות). בתחום זה מתקיימות הרבה מערכות הנדסיות השייכות לתחום זה $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n \in D_i$. באופן דומה נקרא לתחום הייצוג הגרפי המסוים- G_R כאשר האינדקס- R מייצג את הסוג הספציפי של הייצוג (כגון PGR או PLGR או RGR). בתחום זה מתקיימים הרבה גרפים $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n \in G_R$.

באופן כללי העברת הידע יכולה להיעשות מכל תחום הנדסי- D_i לכל תחום הנדסי אחר- D_j (כגון מתחום מערכות מכאניות סטטיות לתחום מערכות מעבר חום או תחום מערכות פיננסיות). העברת תכן קונספטואלי שנעשה במערכת הנדסית בתחום אחד- D_i לתחום אחר- D_j ולהפך, נעשית לאחר שבכל תחום הנדסי מגדירים את המערכת הפיזיקאלית כמערכת המיוצגת ע"י משתני זרימה ופוטנציאל (הנקראים גם משתנה דרך ומשתנה מעבר) בלבד. משתנים אלו יכולים להיות חד-ממדיים או רב ממדיים בהתאם לאופי המערכת. לאחר הגדרה כזאת ניתן לקשור בין תכן מערכת הנדסית מסוימת בתחום- D_i למערכת אחרת בתחום- D_j בעזרת ייצוג גרפי- g מסוג- G_R המשותף לשניהן (כמתואר באיור-2.1).

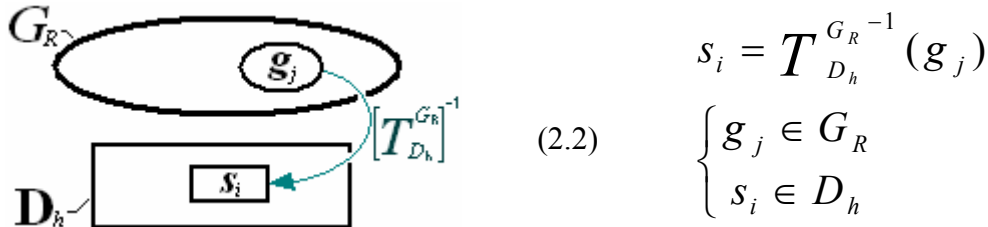
איור-2.1: ייצוג גרפי אחד- g_2 מסוג- G_R המשותף למספר מערכות הנדסיות מתחומים שונים D_1, D_2, D_3 .



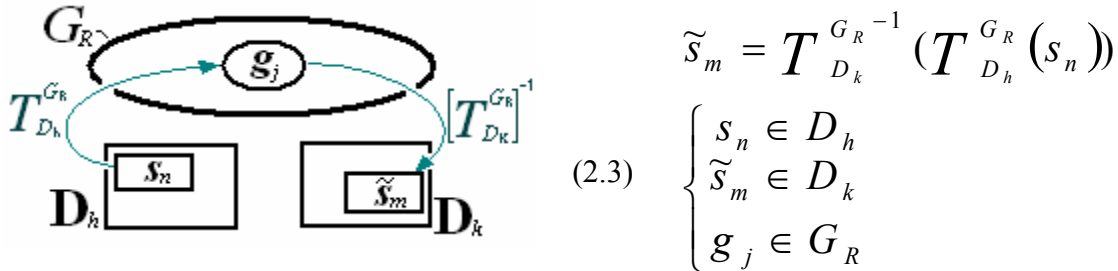
ייצוג מבנה של מערכת הנדסית פרטית s_i השייכת לתחום הנדסי D_h בעזרת גרף מסוים g_j השייך לקבוצת גרפים G_R , במידה ואפשרי, נעשה בעזרת טרנספורמציה חד-חד-ערכית $T_{D_h}^{G_R}$ המעבירה לייצוג הגרפי גם את הטופולוגיה של המערכת הנדסית וגם מידע הנדסי נוסף המאפיין את התנהגות כל אלמנט ואלמנט במערכת כמתואר בפרק-1, כך ש:



לפיכך מעבר חזרה מהייצוג הגרפי למערכת ההנדסית נעשה דרך טרנספורמציה הפוכה:

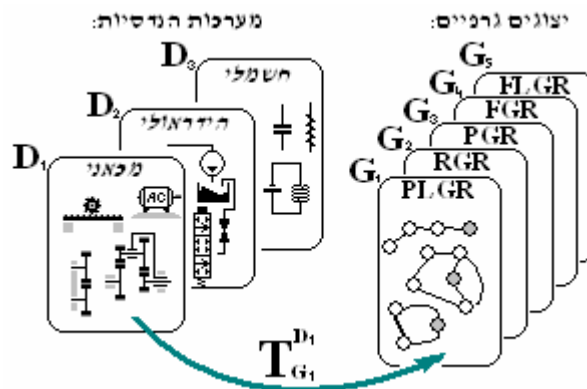


ומעבר של מערכת הנדסית - s_n מתחום - D_h למערכת הנדסית - \tilde{s}_m מתחום - D_k נעשה בעזרת שתי טרנספורמציות במידה וקיים להם ייצוג משותף- g_j ב- G_R :



בשיטת תכן זו המעבר בין המערכות ההנדסיות משני התחומים השונים נעשה דרך אותו סוג ייצוג גרפי דבר המתבטא בכך שאינדקס - R של הטרנספורמציה כל הזמן קבוע. התחומים ההנדסיים השונים והייצוגים הגרפיים השונים בהם מתרכזת עבודה זאת מתוארים באיור-2.2:

איור-2.2: תיאור טרנספורמצית מעבר בין תחום הנדסי לייצוג בעזרת גרפים. מערכות הנדסיות נחלקות למספר תחומים - מכאני, הידראולי וחשמלי/אלקטרוני כאשר כל תחום עשוי להתחלק לתת תחומים נוספים (כגון התחום המכאני המתחלק למערכות קינמטיות וסטטיות ובהמשך המערכות הקינמטיות מתחלקות לקוויות וסיבוביות). לכל תחום עשוי להיות ייצוג מועדף כגון ייצוג PLGR לתחום מערכות קינמטיות של גלגלי שיניים.



חשוב לציין כי הייצוגים והטרנספורמציות מסייעים בפיתוח גישה שיטתית אשר תהיה ברת מחשב. הגדרת מערכת הנדסית ממשית - s_i בתחום הנדסי - D_k וחלוקתה לאלמנטים, כמתואר בפרק-1, נעשית בשלב זה על ידי גורם אנושי ובאופן הפשוט אינה ניתנת למחשב. מחשוב המערכת ההנדסית מצריך מראש את הגדרתם של אלמנטים בסיסיים כלשהם - $e_1, e_2, e_3, \dots, e_m \in D_k$. ייצוגים גרפיים של אלמנטים אלו $g_1, g_2, g_3, \dots, g_m$ יוגדרו בבסיס הנתונים במחשב כאבני בניין בסיסיות והגדרת מערכת- s_i תוגדר בעזרת קשירה טופולוגית בין אלמנטים אלו.

2.2. שימוש ב"ייצוג משותף" לפתרון בעיות תכן הנדסי:

נניח את הרקע התיאורטי שבסעיף 2.1 לשיטה ממוקדת פונקציה שבעזרתה ניתן יהיה למצוא פתרונות תכן קונספטואלי לבעיות הנדסיות.

נגדיר כתחום המקורי- D_h (Original Domain) את התחום ההנדסי בו אנו מעוניינים לקבל את הפתרון בעיית התכן, כלומר לקבל את המבנה ההנדסי שיהיה בעל פונקציונאליות נדרשת. תחום זה יהיה בדרך כלל תחום מכאני קינמטי, אם כי השיטה ישימה באותה המידה לכל תחום הנדסי אחר. מטרת השיטה היא למצוא את המערכות ההנדסיות - $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n \in D_h$ אשר כל אחת מהן מממשת את הפונקציונאליות.

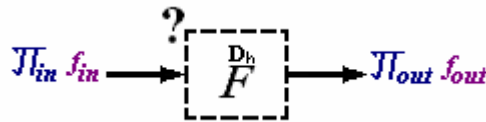
השיטה כוללת את השלבים הבאים:

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל של התחום המקורי:

מתחילים מניסוח בעיית התכן בתחום המקורי- D_h בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות. ניסוח זה צריך להתייחס למשתני זרימה/פוטנציאל - $\{\pi, f\}$ בלבד כפי שהם מוגדרים בתחום המקורי. לדרישות פונקציונאליות שאינן קשורות באחד ממשתני הזרימה/פוטנציאל בתחום המקורי (משתנים נוספים כגון - מחיר, גודל פיזי, עיצוב, ...) אין השיטה מתייחסת.

מתוך הדרישות הפונקציונאליות מגדירים מה סוג הכניסה $\{\pi_{in}, f_{in}\}$ למערכת, אותה אנו רוצים לתכנן, ומה המוצא $\{\pi_{out}, f_{out}\}$ המבוקש שלה. התלות של מוצא המערכת בכניסתה היא

הפונקציונאליות של המערכת בתחום המקורי ותיוצג כ- F^{D_h} .



איור-2.3: תיאור בעיית התכן. הפונקציונאליות המקשרת בין פוטנציאל/זרימה בכניסה לפוטנציאל/זרימה במוצא.

שלב-2 חיפוש פתרון בתחום עזר הנדסי:

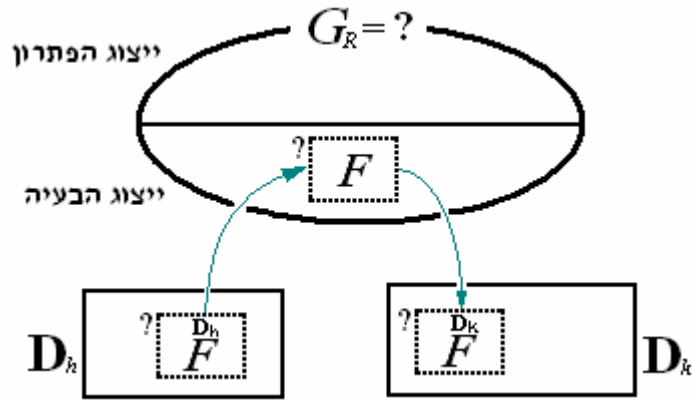
במידה ולא מצליחים בתחום המקורי- D_h למצוא מערכת s_i אשר מממשת את הפונקציונאליות הנדרשת עוברים לחיפוש הפתרון בתחומים הנדסיים אחרים.

ניגשים לתחום הנדסי אחר, שנקרא לו תחום עזר ונסמנו כ- D_k , ומנסחים מחדש עבור משתני

פוטנציאל/זרימה של תחום זה את הדרישות הפונקציונאליות- F^{D_k} . לאחר מכן מחפשים בתחום זה מערכת- \tilde{s}_i , כך ש: $\tilde{s}_i \in D_k$ שמקיים דרישות אלו.

הערה:

יש לציין כי הגדרת בעיית התכן על סמך משתני זרימה/פוטנציאל בלבד, כפי שנעשתה בשלב-1, היא זו שלמעשה מעלה את ייצוג בעיית התכן מהרמה ההנדסית בה קיימים הרבה תחומים, שלכאורה אינם קשורים זה עם זה, לרמה מתמטית מופשטת (תחום הייצוג הגרפי- G_R). ברמה זו מתלכדים ייצוגיהם של כל התחומים ההנדסיים ומתאפשר הקשר הבין-תחומי בעזרתו ניתן להשוות פונקציונאליות של מערכות שונות בתחומים שונים.

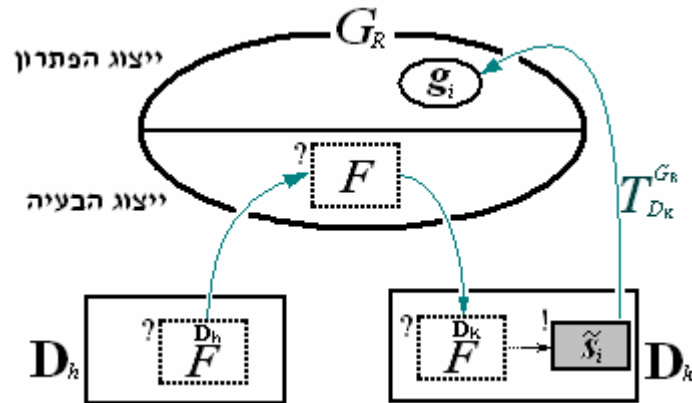


איור-2.4: העברת הגדרת בעיית מתחום הנדסי מקורי - D_h לתחום - D_k דרך שימוש במשתני פוטנציאלים וזרימות.

בתחום הנדסי - D_k , גם אם עדיין הפתרון לא נראה ברור, ניתן להיעזר במומחים של תחום זה שמבחינתם מקבלים את הבעיה מוגדרת בשלמותה בתחום שלהם ויוכלו לתת דעה נוספת על קיום/אי-קיום, פשטות/סיבוכיות של הבעיה בתחום שלהם. כמו כן ניתן לחפש את הפתרון במקביל במספר תחומים הנדסיים (כגון פתרון קונספטואלי לבעיה מכאנית ניתן לחפש בתחום התרמי, האלקטרוני וההידראולי). באופן זה גדל הסיכוי למצוא פתרון והמחיר של שינוי הגדרת הבעיה לתחום הנדסי אחר כאמור זניח.

שלב-3 בניית ייצוג גרפי לפתרון לבעיית התכן שנמצאה בתחום עזר הנדסי:

נניח שנמצאה מערכת ממשית- \tilde{s}_i בתחום הנדסי- D_k (השונה מן התחום המקורי- D_h) המקיימת את הפונקציונאליות- \bar{F}^{D_k} . בשלב זה בונים ייצוג גרפי - g_i למערכת- \tilde{s}_i בעזרת טרנספורמציה $T_{D_h}^{G_R}(\tilde{s}_i)$. כמתואר באיור-2.5:



איור-2.5: מציאת פתרון בתחום הנדסי אחר וייצוג גרפי של הפתרון.

סוג הייצוג הגרפי נבחר לפי אופן ייצוג האלמנטים ולפי התכונות הפרטיות של המערכת ההנדסית (כגון - כל האלמנטים ניתנים לייצוג כצמתים או כקשתות) מקבלים סוגי ייצוג פרטיים המתוארים בטבלה - 1.3 בפרק-1.

הטרנספורמציה $T_{D_h}^{G_R}(\tilde{s}_i)$ של המערכת \tilde{s}_i נעשית באופן הבא:

א. מחלקים את המערכת- \tilde{s}_i לאלמנטים מוכרים $\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_3, \dots, \tilde{e}_N \in D_k$, דוגמת אלו המתוארים בטבלה-1.5 בפרק-1.

- ב. לכל אלמנט הנדסי- \tilde{e}_j מתאימים אלמנט גרפי- \hat{g}_j המייצג אותו .
 ג. מחברים את האלמנטים הגרפיים זה עם זה בהתאם לטופולוגיה של המערכת ההנדסית- \tilde{s}_i .
 בסיום שלב זה מתקבל ייצוג גרפי- g_i למערכת- \tilde{s}_i שבתחום העזר.

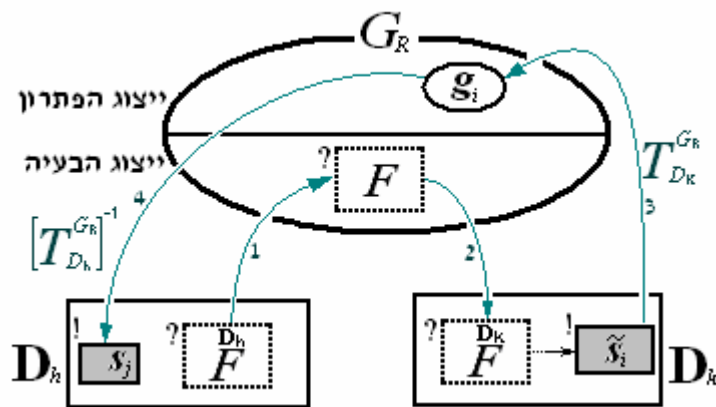
שלב-4 מימוש הייצוג הגרפי של מערכת הנדסית מתחום עזר הנדסי למערכת הנדסית בתחום המקורי:

בשלב האחרון, על מנת לממש את התכנן של המערכת ההנדסית המסוימת- \tilde{s}_i מתחום העזר- D_k למערכת s_i בתחום המקורי D_h יש לבצע את הטרנספורמציה ההפוכה $T_{G_R}^{D_k^{-1}}$ על הייצוג הגרפי של \tilde{s}_i . מבצעים את הטרנספורמציה באופן הבא:

א. טרנספורמציה של אלמנטים:
 עוברים על כל האלמנטים של \tilde{s}_i כפי שהם מבוטאים בייצוג g_i ולכל אלמנט ואלמנט- \hat{g}_j שבייצוג עושים מימוש בתחום המקורי D_h .
 יש לציין כי הטרנספורמציות בשלב זה של האלמנטים הבודדים אמורות להיות פשוטות וידועות כדוגמת אלו המצוינות בפרק-1 בטבלה 1.5. שלב זה הוא השלב הקריטי של התכנן וכל עוד לא מומשו כל האלמנטים של g_i לתחום D_h לא ניתן להמשיך.

ב. טרנספורמציה של טופולוגיה:
 לאחר סיום הטרנספורמציה של האלמנטים יש בידינו את כל האלמנטים, מהם אנו נרכיב את המערכת- s_i בתחום המקורי.

נעזרים שוב בייצוג גרפי g_i (שנעשה עבור \tilde{s}_i) ועל פי ייצוג זה "קושרים" את האלמנטים השונים אחד לשני על פי הטופולוגיה של הייצוג.
 המערכת המתקבלת s_i היא מערכת אנלוגית למערכת \tilde{s}_i ומממשת את פונקצית התכנן בתחום המקורי D_h .



- איור-2.6:** תיאור כל שלבי פתרון בעיית התכנן בשיטת הגרף המשותף.
 שלב-1: הגדרת בעיית התכנן בתחום מקורי (מוגדר) בעזרת משתני זרימה/פוטנציאל.
 שלב-2: חיפוש פתרון לבעיית התכנן בתחום הנדסי אחר.
 שלב-3: בניית ייצוג גרפי לפתרון בעיית התכנן בתחום המשני.
 שלב-4: מימוש הייצוג הנתון כ- g_i בתחום המקורי. חיפוש מערכת בתחום משני.

2.3. דוגמאות של תכן בעזרת "ייצוג משותף":

בסעיף זה יוצגו שתי דוגמאות של מערכות חדשות אשר פותחו תוך שימוש בייצוג משותף.

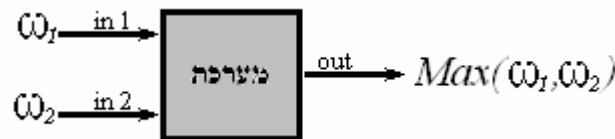
2.3.1. תכן בורר מהירות מרבית:

2.3.1.1. הגדרת דרישות פונקציונאליות לתכן:

יש לפתח מערכת מכאנית קינמטית סיבובית בהתאם לדרישות הבאות:

1. למערכת קיימות שתי כניסות חיוביות של מהירות סיבובית.
2. מוצא המערכת היא הגדולה מבין שתי המהירויות הסיבוביות של שתי כניסותיה, ω_1 ו- ω_2 .

תרשים פונקציונאלי של המערכת מתואר באיור-2.7:

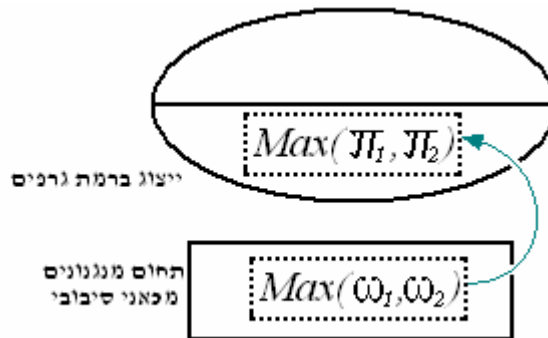


איור-2.7: תרשים פונקציונאלי של בורר מהירות.

2.3.1.2. בפתרון בעזרת שימוש בייצוג משותף:

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Requirements Functional) על פי משתני זרימה/פוטנציאל של התחום המקורי:

התחום המקורי - D_h במקרה זה הוא תחום מכאני קינמטי סיבובי. נהפוך את בעיית התכן מהתחום ההנדסי המקורי לבעיית תכן כללי במונחים של ייצוגים גרפיים. בתחום המקורי מהירות סיבובית נחשבת כפוטנציאל, לפיכך בתחום הייצוג הכללי הבעיה הופכת לבעיית מציאת מערכת אשר בהינתן שני פוטנציאלים בכניסתה תוציא את הפוטנציאל הגדול מביניהם.



איור-2.8: העברת תיאור הפונקציונאליות של בעיית בורר מהירות מרבית מהתחום ההנדסי לתחום הגרפים.

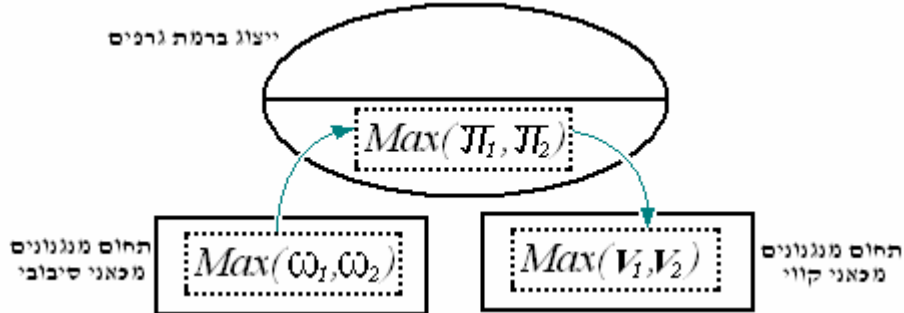
שלב-2 חיפוש פתרון בתחום הנדסי אחר:

נחפש פתרון לבעיית התכן בתחום הנדסי אחר בו יש לנו ידע ויכולת תכן טובה יותר. נבחר תחום מכאני קווי כתחום עזר- D_k וננסה לחפש בו את הפתרון. תחום זה קל יותר להבנה מהתחום הסיבובי ולכן, סביר להניח, שבו יהיה כל יותר לתכנן את המערכת הנדרשת.

בתחום עזר זה הפוטנציאל מוגדרים כמהירות קווית.

$$\begin{cases} \omega_1 \rightarrow \pi_1 \rightarrow V_1 \\ \omega_2 \rightarrow \pi_2 \rightarrow V_2 \end{cases}$$

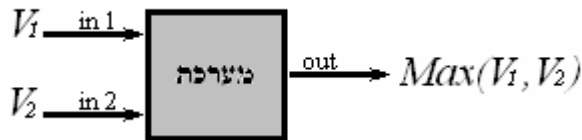
אי לכך הדרישה הפונקציונאלית של מציאת פוטנציאל מרבי (מבין שניים שנכנסים) תתואר בתחום זה כהוצאת מהירות קווית מרבית מבין שתי מהירויות קוויות שנכנסות.



איור-2.9: הגדרת בעיית התכן בתחום הנדסי אחר וחיפוש הפתרון בתחום זה.

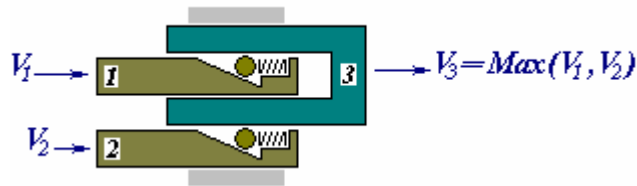
תרשים פונקציונאלי של המערכת מתואר באיור-2.10:

איור-2.10: שינוי הגדרת בעיית בורר מהירות סיבובית לבעיית בורר מהירות קווית.



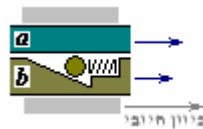
הפתרון שנמצא לבעיה בתחום זה מתואר באיור-2.11. נקרא למערכת זאת - \tilde{s} .

איור-2.11: "בורר מהירות מרבית" במערכת מכאנית קווית. מוצא המערכת הוא דרך אלמנט-3 והכניסות הם דרך אלמנטים 1 ו-2. המערכת מוציאה את הגדולה מבין מהירויות הכניסה.



המערכת המתוארת באיור-2.11 היא בעלת שלושה אלמנטים קשיחים, בין אלמנטים 1 ו-3 ובין 2 ו-3 ישנו אלמנט ידוע הנקרא מצמד חד-כיווני קווי. מצמד מסוג זה מתנהג באופן הבא:

$$V_a \geq V_b$$



איור-2.12: מצמד חד-כיווני קווי.

עבור המצמד החד-כיווני שבין האלמנטים 1 ו-3 מתקיים: $V_3 \geq V_1$

ועבור המצמד החד-כיווני שבין האלמנטים 1 ו-3 מתקיים: $V_3 \geq V_2$

מכיוון שאלמנט-3 הוא גוף קשיח, שני האי-שוויונים לעיל צריכים להתקיים בו זמנית, כלומר:

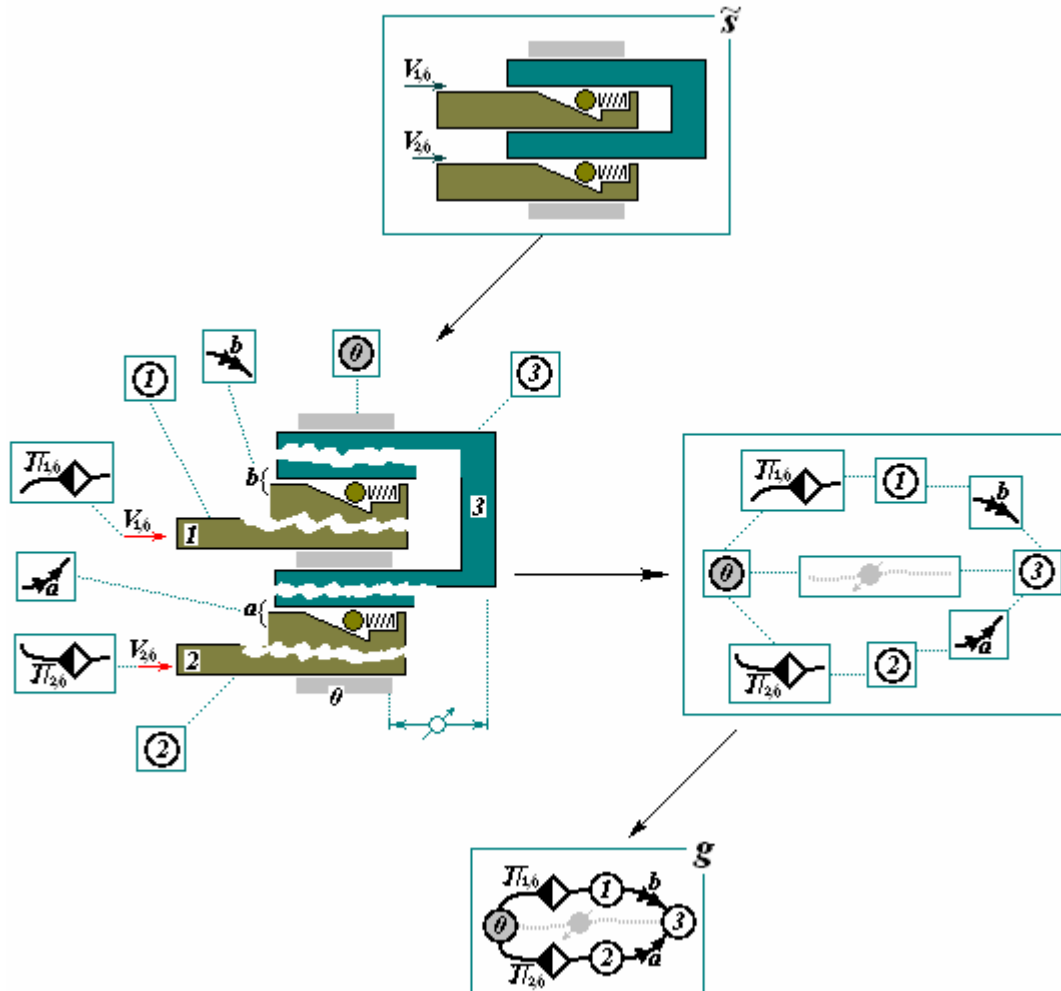
$$V_3 \geq V_1 \wedge V_3 \geq V_2 \Rightarrow V_3 \geq V_1, V_2$$

$$\Rightarrow V_3 \geq \text{Max}(V_1, V_2)$$

שלב-3 בניית ייצוג גרפי לפתרון בעיית התכן שנמצאה בתחום העזר הנדסי:

לאחר שיש בידינו פיתרון מוכח ועובד, מערכת זו נקרא - \tilde{s} , ניצור עבורו ייצוג גראפי - g . נבנה את הייצוג באופן הבא:

נחלק את המערכת- \tilde{s} לאלמנטים מוכרים כמתואר באיור-2.13. אלמנטים שעליהם יש הפרש פוטנציאליים נייצג כקשתות, ואלמנטים בעלי אותו פוטנציאל (יש להם פוטנציאל קבוע) נייצג כצומת, כמתואר באיור-2.13. מכיוון שהמערכת- \tilde{s} היא מנגנון קינמטי, סוגי הייצוג אותם יש לשקול הם PGR או PLGR המתאימים לייצוג מנגנונים קינמטיים [24].














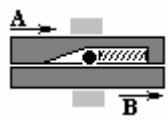
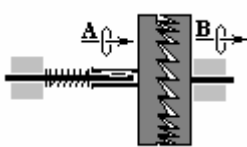

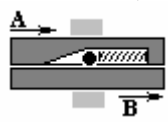
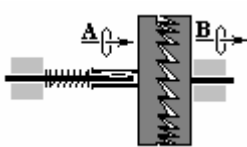




איור-2.13: ייצוג מערכת בורר מהירות מרבית מכאנית קווית ע"י גרף PGR. בגרף המתקבל הפוטנציאל בצומת-3 הוא הגדול מבין הפוטנציאליים בצמתים 1 ו-2 ולכן ניתן לקרוא לו גרף בורר פוטנציאל מרבי. ע"פ חלוקת המערכת לאלמנטים אותם אלמנטים שמהירותם קבועה מיוצגים כצמתים ואלמנטים שיש בתוכם שינויי מהירות קווית מיוצגים כקשתות. בהמשך מתחברים האלמנטים הגרפיים זה עם זה על פי הטופולוגיה של המערכת ההנדסית לייצוג גרפי של המערכת השלמה.

הערה:
במקרה זה של מערכת קינמטית חד-ממדית, מכיוון שהמסה של האלמנטים זניחה, הייצוג בעזרת PGR, RGR או PLGR הוא אותו הייצוג.

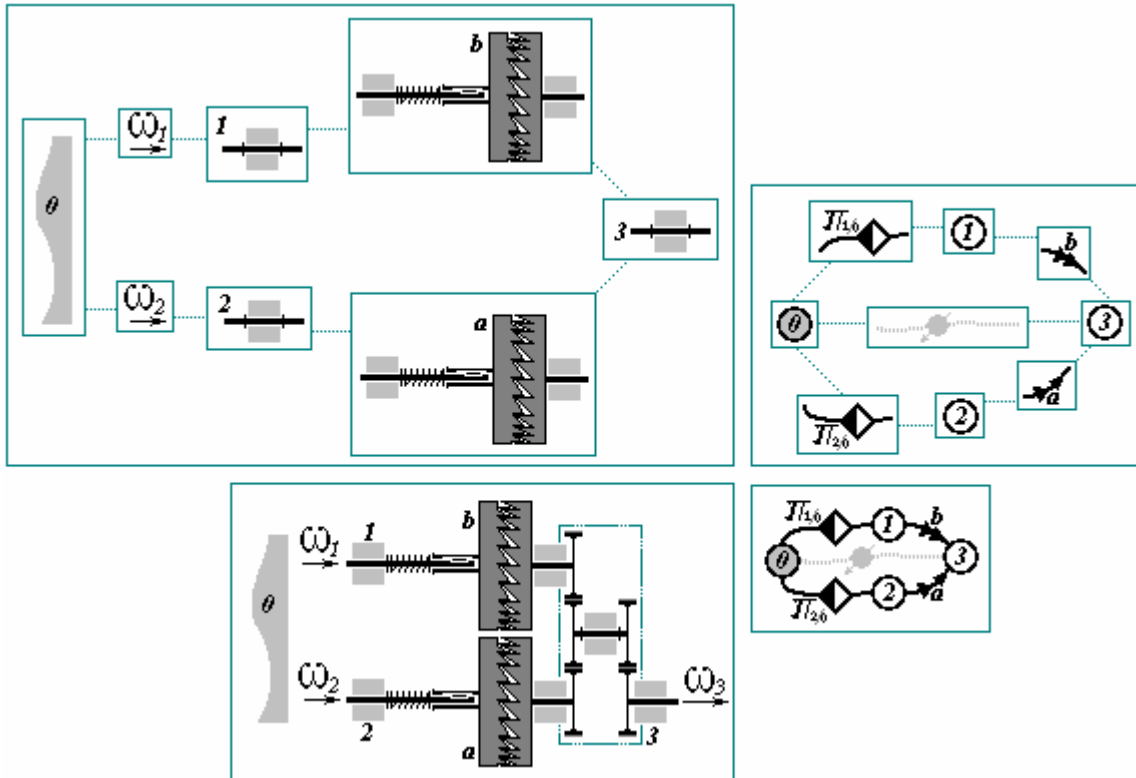
שלב-4 מימוש הייצוג הגרפי של המערכת ההנדסית מתחום העזר הנדסי למערכת ההנדסית בתחום המקורי:

לאחר מציאת המערכת המבצעת את פונקצית התכן בתחום מכאני קווי ובניית הייצוג הגרפי שלה נחזור לתחום המכאני הסיבובי ונממש שם את התכן הקונספטואלי של המערכת הזאת מתוך הייצוג הגרפי. נתחיל בהעברת כל האלמנטים של המערכת מהייצוג הגרפי של המערכת המכאנית הקווית לתחום המכאני הסיבובי. מעבר האלמנטים מסוכם בפרוט בטבלה הבאה:

אלמנט מתוך הייצוג:	אלמנט בתחום מכאני קווי:	אלמנט בתחום מכאני סיבובי:
	חולית ניטראלית: 	חוליה ניטראלית: 
	כניסה-1: חולית החלקה קווית (עם דרגת חופש אחת): 	כניסה-1: ציר סיבוב (עם דרגת חופש אחת): 
	כניסה-2: חולית החלקה קווית (עם דרגת חופש אחת): 	כניסה-2: ציר סיבוב (עם דרגת חופש אחת): 
	מוצא: חולית החלקה קווית (עם דרגת חופש אחת): 	מוצא: ציר סיבוב (עם דרגת חופש אחת): 
	מצמד חד-כיווני בין שני מחליקים באותו כיוון:  $v_A \leq v_B$	מצמד חד-כיווני בין שני צירים קונצנטריים:  $\omega_A \leq \omega_B$
	מצמד חד-כיווני בין שני מחליקים באותו כיוון:  $v_A \leq v_B$	מצמד חד-כיווני בין שני צירים קונצנטריים:  $\omega_A \leq \omega_B$
	מקור הפרש מהירות קווית: $v \rightarrow$	מקור הפרש מהירות זוויתית: $\omega \rightarrow$
	מקור הפרש מהירות קווית: $v \rightarrow$	מקור הפרש מהירות זוויתית: $\omega \rightarrow$

טבלה-2.1: טרנספורמציה של אלמנטים מייצוג גרפי של מערכת מכאנית קווית למערכת מכאנית סיבובית. האלמנטים של שתי המערכות מתוארים זה לעומת זה.

כעת בעזרת הייצוג הגרפי של המערכת הקווית ובעזרת האלמנטים של המערכת הסיבובית על פי הטבלה-2.1. נרכיב את המערכת בתחום המקורי (איור-2.14) על-ידי מימוש הטופולוגיה של הייצוג במבנה ההנדסי:



איור-2.14: מימוש מערכת קינמטית מכאנית סיבובית של בורר מהירות מרבית. חיבור טופולוגי של האלמנטים זה לזה נעשה על פי הייצוג הגרפי של המערכת הקווית. הרכבת האלמנטים נעשית תוך מציאת פתרונות טכניים מקומיים כדוגמת חיבור בו-זמני של a ושל b לאלמנט-3.

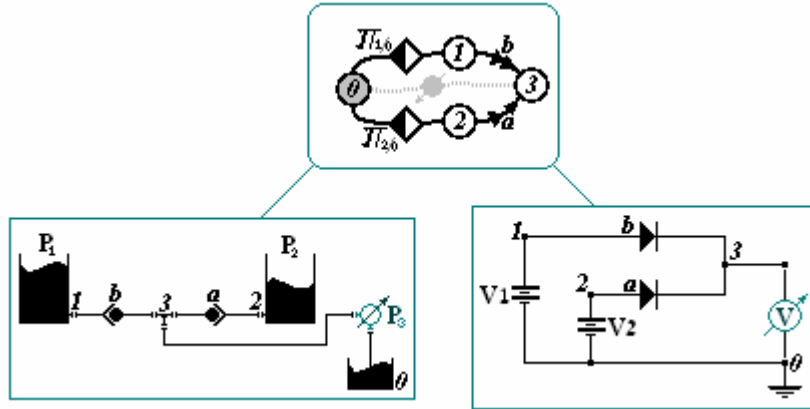
2.3.2. יישום התכן בתחומים הנדסיים נוספים:

באותו האופן כפי שתוכננה מערכת מכאנית סיבובית ניתן גם להמשיך רעיון זה ולהעביר את התכן הקונספטואלי של מערכת בורר פוטנציאל מרבי לתחומים של אלקטרוניקה והידראוליקה לקבל מערכות הנדסיות גם בתחומים אלו. בטבלה-2.2 מוצגות הדרישות הפונקציונאליות של התכן כפי שהן מתקבלות בתחומים ההידראולי והאלקטרוני.

העברת בעיית התכן לתחום ההידראוליקה:	העברת בעיית התכן לתחום האלקטרוניקה:
יש לפתח מערכת מכאנית קינמטית סיבובית בהתאם לדרישות הבאות:	יש לפתח מערכת מכאנית קינמטית סיבובית בהתאם לדרישות הבאות:
1. למערכת קיימות שתי כניסות חיוביות של לחץ.	1. למערכת קיימות שתי כניסות חיוביות של מתח.
2. מוצא המערכת היא הגדולה מבין שני ה לחצים שבכניסותיה.	2. מוצא המערכת היא הגדולה מבין שני המתחים שבכניסותיה.
$\begin{cases} v_1 \rightarrow P_1 \\ v_2 \rightarrow P_2 \\ \text{Max}(v_1, v_2) \rightarrow \text{Max}(P_1, P_2) \end{cases}$	$\begin{cases} v_1 \rightarrow V_1 \\ v_2 \rightarrow V_2 \\ \text{Max}(v_1, v_2) \rightarrow \text{Max}(V_1, V_2) \end{cases}$

טבלה-2.2: טרנספורמציה של בעיית התכן ממערכת מכאנית קווית למערכת אלקטרונית והידראולית.

בהמשך ניתן לעשות באותו התהליך העברת כל האלמנטים של המערכת המכאנית הקווית למערכת אלקטרונית והידראולית ובעזרת הגרף של המערכת המכאנית הקווית לבנות מערכות אלו כמתואר באיור-1.16.



איור-2.15: תיאור העברת תכן של בורר מהירות מרבית במערכת מכאנית קווית למערכות אלקטרונית והידראולית. מימוש המערכות נעשה באותו התהליך שנעשה עבור המערכת הסיבובית. המערכת האלקטרונית מוציאה מתח מרבי מבין שני המתחים אשר בכניסתה והמערכת ההידראולית מוציאה לחץ מרבי מבין שני הלחצים שבכניסתה.

2.3.3.2. מייצב מהירות חיובית מרבית:

הגדרת דרישות פונקציונאליות לתכן:

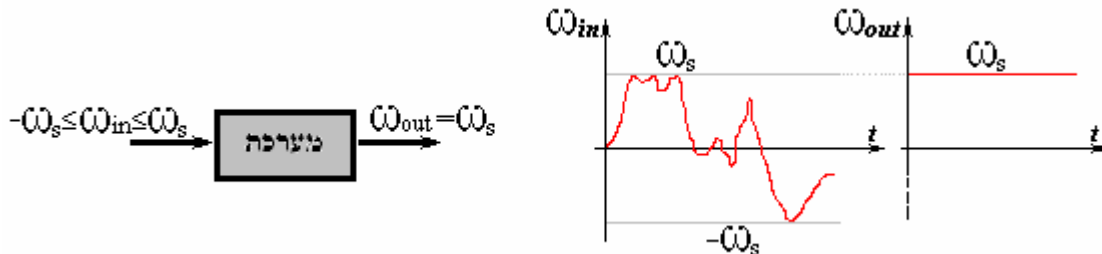
יש לפתח מערכת מכאנית קינמטית סיבובית בהתאם לדרישות הבאות:

1. למערכת קיימת כניסה של מהירות סיבובית ω_{in} המשתנה באופן אקראי בתחום

$$-\omega_s \leq \omega_{in} \leq \omega_s$$

2. מוצא המערכת היא מהירות סיבובית יציבה וקבועה שהיא הגבול העליון בו משתנה מהירות הכניסה.

תרשים פונקציונאלי של המערכת מתואר באיור-2.16:



איור-2.16: תיאור פונקציונאלי של בעיית בורר מהירות מרבית ותרשים כניסה ומוצא שלו.

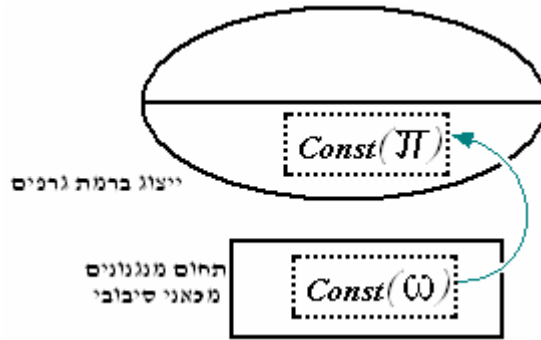
2.3.3.3. בפתרון בעזרת שימוש בייצוג משותף:

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל של התחום המקורי:

התחום ההנדסי המקורי של המערכת - D_h במקרה זה הוא תחום מכאני קינמטי סיבובי. נהפוך את בעיית התכן מהתחום ההנדסי המקורי לבעיית תכן כללי במונחים של ייצוגים גרפיים של זרימות ופוטנציאלים.

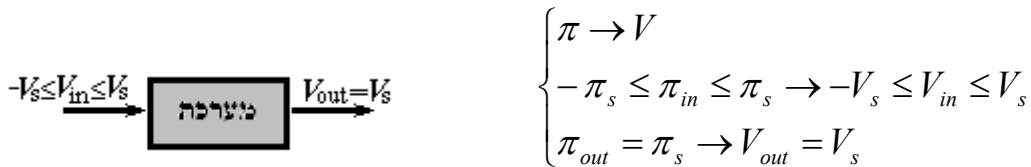
בתחום המקורי מהירות סיבובית נחשבת כפוטנציאל, לפיכך בתחום הייצוג הכללי הבעיה הופכת לבעיית מציאת מערכת אשר בהינתן פוטנציאל משתנה (באופן כלשהו) בין שני ערכים מרביים בכניסתה תוציא פוטנציאל קבוע ויציב במוצאה שהוא הגדול ביותר שהופיע בכניסה.

איור-2.17: הגדרת דרישות תכן של בעיית מייצב המהירות במונחים של זרימות ופוטנציאלים.

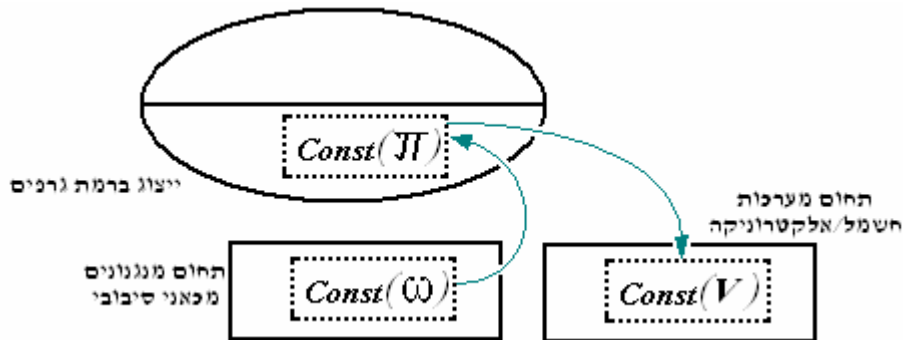


שלב-2 חיפוש פתרון בתחום הנדסי אחר:

נחפש פתרון לבעיית התכן בתחום עזר שיהיה הפעם תחום החשמל והאלקטרוניקה. בתחום זה הפוטנציאלים הם פוטנציאלים חשמליים, לפיכך הדרישות הפונקציונאליות של התכן מקבלות את הצורה הבאה:

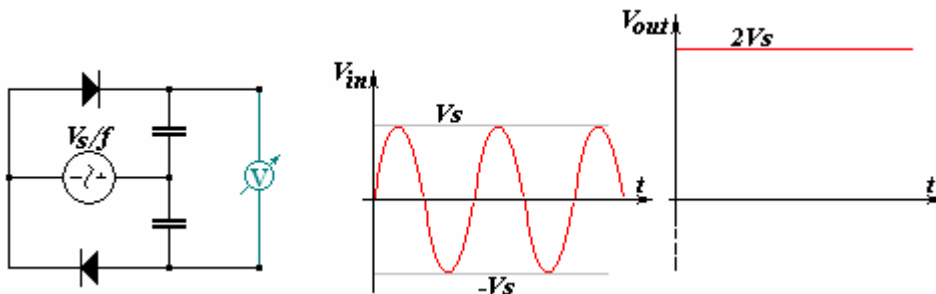


הדרישה למערכת אשר בכניסתה מתח חשמלי משתנה (בין שני ערכים נתונים) וביציאתה מתח קבוע ויציב. שלבי המעבר מתוארים באיור-2.18.



איור-2.18: העברת בעיית התכן של מייצב מהירות מהתחום המכאני לתחום האלקטרוני.

הפתרון הנמצא מתואר באיור-2.19 וניקרא מערכת "מכפיל מתח" [16]:



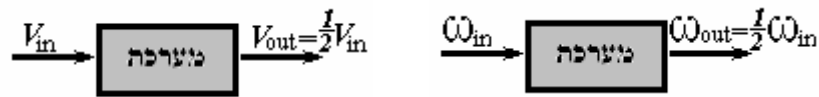
איור-2.19: תיאור מערכת "מכפיל מתח" אלקטרונית שכניסתה מתח חילופין ומוצאה מתח ישר במשרעת כפולה ממתח הכניסה. המקור VS הוא הכניסה של המערכת ומד-המתח (שיכול להיות מוחלף בכל סוג של עומס) הוא המוצא.

המערכת פועלת באופן הבא:

מתח משתנה בכניסה טוען את הקבלים המחוברים במקביל למוצא ואינו מסוגל לפרוק אותם עקב סידור כיוון הדיודות. כאשר מתח הכניסה חיובי הקבל העליון נטען וכאשר מתח הכניסה שלילי הקבל

התחתון נטען. מערכת זאת מסוגלת לספק זרמים נמוכים ויציבות מתח המוצא תלויה ביחס ישר לגודל הקבלים.

בשלב זה ניתן לראות שישנה חריגה מסוימת מדרישות הבעיה בכך שמוצא המערכת מוכפל כביכול פי שניים ממה שנידרש בהגדרת הבעיה, יש להתייחס לכך בהמשך הפתרון ולתקן את החריגה הזאת בתחום האלקטרוני או מאוחר יותר בתחום המכאני. לצורך התיקון בלבד יש למעשה לפתור בעיית תכן נוספת המתוארת באיור-2.20.

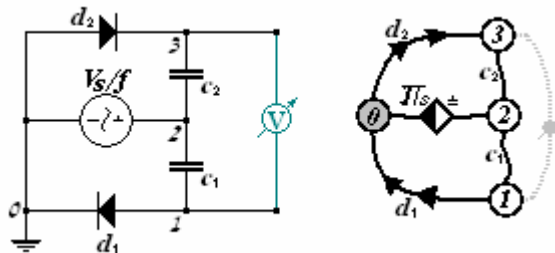


איור-2.20: הגדרת בעיית תכן משנית.

מכיוון שידוע לנו כי פתרון חלוקת מהירות היציאה בשתיים בתחום המכאני קל לאין שיעור מאשר פתרונה בתחום האלקטרוני, נשאיר את העניין לסוף הפתרון.

שלב-3 בניית ייצוג גרפי לפתרון בעיית התכן שנמצאה בתחום העזר ההנדסי:

באופן דומה לזה שנעשה בדוגמא הקודמת נייצג את האלמנטים אשר יש עליהם הפרש פוטנציאלים כקשתות ואת אלו שאין עליהם הפרשי פוטנציאלים נייצג כצמתים. תרשים מבנה המערכת האלקטרונית דומה בעצמו לייצוג הגרפי כמתואר באיור-2.21:



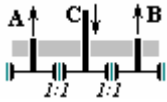


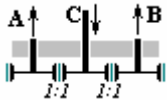


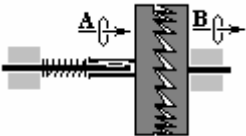

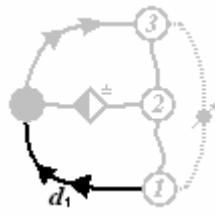
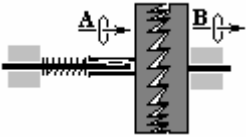
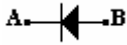
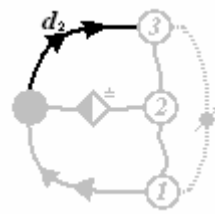
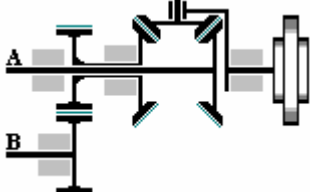
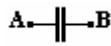
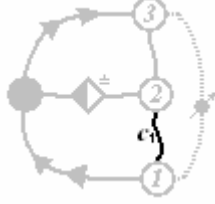
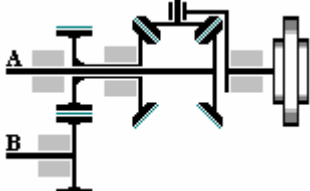
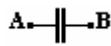
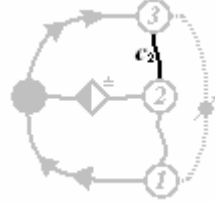


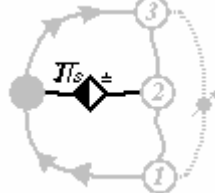
איור-2.21: חלוקת מערכת מכפיל מתח אלקטרונית לאלמנטים וייצוגה ע"י RGR.

סוג הייצוג של מערכות חשמליות ואלקטרוניות הוא בדרך כלל גרף התנגדות-RGR, מכיוון שישנה תלות בין הזרמים למתחים [23]. במקרה הפרטי שלנו, מכיוון שאין במערכת אלמנטים של התנגדות חשמלית ובמידה ונתייחס גם לעומס החיצוני כבעל התנגדות אינסופית, עזי לא תהיינה במערכת זרימות כלל ולכן ניתן לראות את ייצוג המערכת כגרף פוטנציאלים-PGR.

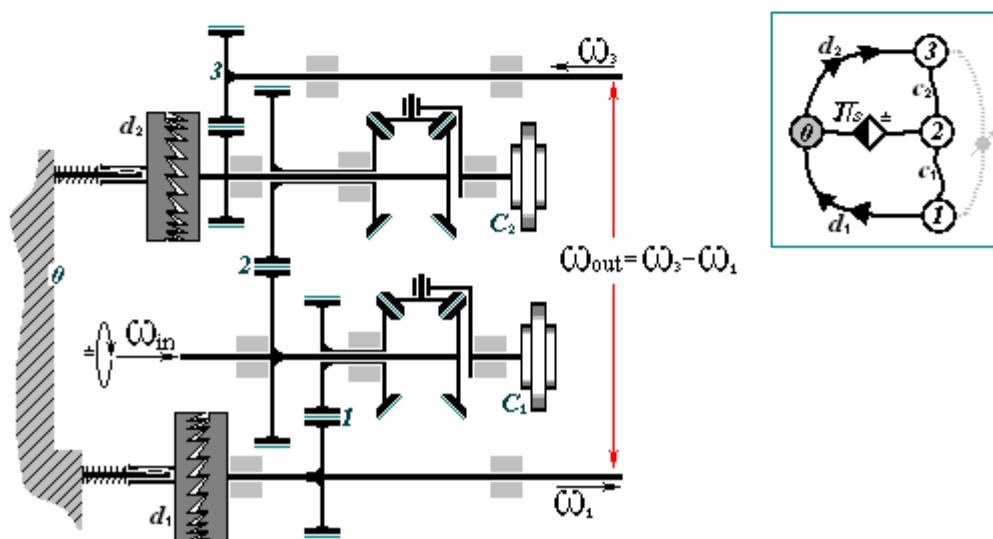
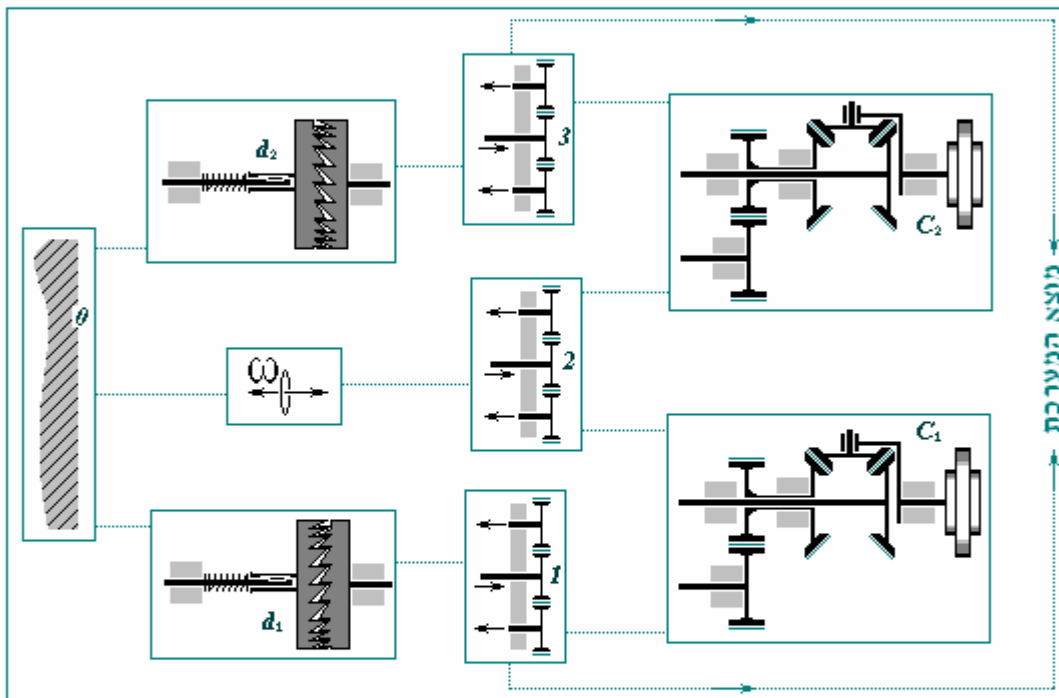
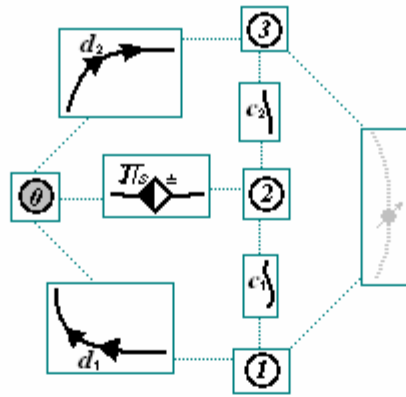
שלב-4 מימוש הייצוג הגרפי של מערכת הנדסית מתחום העזר ההנדסי למערכת הנדסית בתחום המקורי:

נתחיל בהעברת כל אלמנט ואלמנט e_j מתוך הייצוג הגרפי g_i של המערכת מתחום החשמל/אלקטרוניקה \tilde{g}_i אותה מצאנו בסעיף הקודם לתחום המכאני הסיבובי. מעבר האלמנטים מסוכם בפרוט בטבלה הבאה:

אלמנט מתוך הייצוג:	אלמנט בתחום אלקטרוני:	אלמנט בתחום מכאני סיבובי:
	פוטנציאל אפס (הארקה): 	חוליה ניטראלית:
	צומת חיבור 3 מוליכים: 	חיבור 3 צירי סיבוב: בעזרת תמסורת 1:1 של גלגלי שיניים או תמסורת רצועה.

<p>חיבור 3 צירי סיבוב: בעזרת תמסורת 1:1 של גלגלי שניים או תמסורת רצועה.</p> 	<p>צומת חיבור 3 מוליכים:</p> 	
<p>חיבור 3 צירי סיבוב: בעזרת תמסורת 1:1 של גלגלי שניים או תמסורת רצועה.</p> 	<p>צומת חיבור 3 מוליכים:</p> 	
<p>מצמד חד-כיווני בין שני צירים קונצנטריים:</p>  <p>$\omega_A \leq \omega_B$</p>	<p>דיודה:</p>  <p>$\omega_A \leq \omega_B$</p>	
<p>מצמד חד-כיווני בין שני צירים קונצנטריים:</p>  <p>$\omega_A \geq \omega_B$</p>	<p>דיודה:</p>  <p>$\omega_A \geq \omega_B$</p>	
<p>אינרציה:</p> 	<p>קבל:</p> 	 <p>כמתואר בפרק-4 בהמשך.</p>
<p>אינרציה:</p> 	<p>קבל:</p> 	 <p>כמתואר בפרק-4 בהמשך.</p>
<p>מקור הפרש מהירויות זוויתיות משתנה:</p> 	<p>מקור מתח משתנה(חילופין):</p> 	

טבלה-2.3: טרנספורמציה של אלמנטים מתוך הייצוג הגרפי של מערכת אלקטרונית למערכת מכאנית סיבובית. האלמנטים של שתי המערכות מתוארים זה לעומת זה. עתה נרכיב את המערכת בהתאם לטופולוגיה של הגרף:



איור-2.22: תיאור חיבור טופולוגי של אלמנטים של מערכת מכאנית ומאוחר יותר צמצום אלמנטים מיותרים.

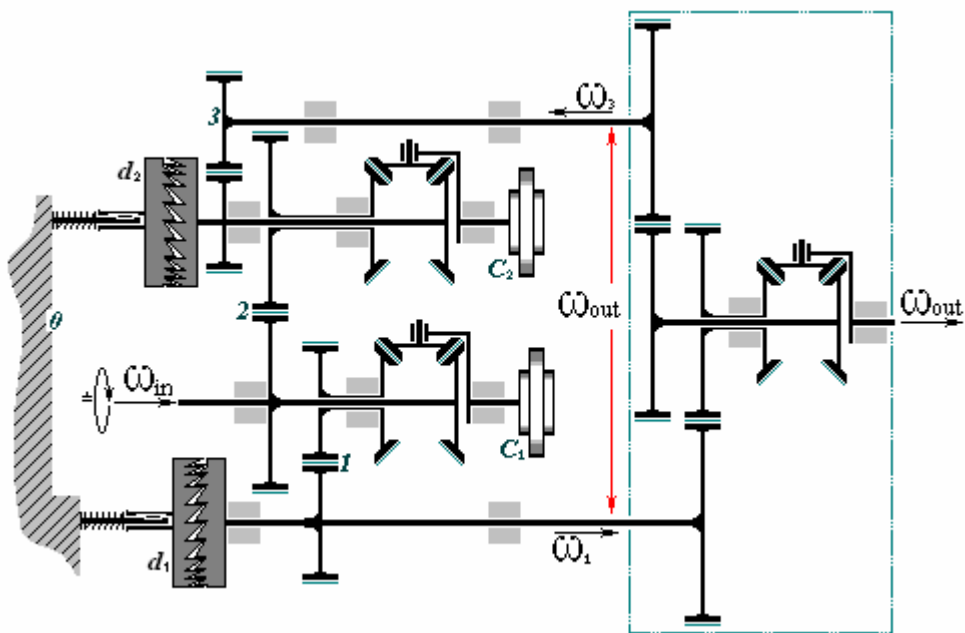
הפתרון שהתקבל עם הפעלת השיטה דורש שינוי הנדסי. מוצא המערכת כפי שמתקבל באיור-2.22 מתפצל לשני צירים בעלי מהירויות מוצא שונות. בעוד שבמערכת האלקטרונית אין הדבר מפריע,

במערכת מכאנית הדבר מצריך להוסיף שינוי הנדסי. במקרה זה המערכת המשלימה שיש לתכנן, על מנת לקבל את מהירות המוצא מציר סיבוב יחיד, פשוטה בהרבה מהבעיה המקורית. בהזדמנות זאת נצרף למערכת המשלימה גם את בעיית החלוקה ב-2 של המוצא (איור-2.20) ונקבל את בעיית התכן הבאה:



איור-2.23: הגדרת בעיית משנה לצורך השלמת הפתרון של הבעיה הראשונית מכיוון שתהליך התכן במקרה זה לא מביא את המערכת לגמרי לצורה שימושית.

כאמור בעיה זאת הנה טריוויאלית וניתנת לפתרון בסינתזה קינמטית של גלגלי שיניים והפתרון הוא תמסורת משולבת עם מנגנון דיפרנציאל. המערכת הסופית המקיימת את פונקציית התכן מתוארת באיור-1.23:



איור-2.24: מבנה קינמטי קונספטואלי של מערכת השומרת על מהירות חיובית מרבית. מערכת הדיפרנציאל בתוספת תמסורות חיבור לשני צירי המוצא מתואר בתוך מסגרת הקו המקוקד. תפקיד מערכת הדיפרנציאל במקרה זה הוא לחסר מהירויות זוויתיות ω_1 ו- ω_3 המתקבלות במוצא המערכת הקודמת ולהוציא את תוצאת החיסור דרך ציר מוצא אחד.

2.4. סיכום:

השיטה שהוצגה בפרק זה דווחה זה מכבר [25] באופן עקרוני ובפרק זה קיבלה פורמליזציה כמתודולוגיה שיטתית והופעלה לבעיות תכן מתקדמות. השיטה מתארת תהליך העברת בעיית תכן קונספטואלי מתחום הנדסי אחד לתחום שני, כאשר ייצוג מערכות הנדסיות בעזרת גרפים מתאר באופן ברור את הקשרים הטופולוגיים הפנימיים של האלמנטים בתוך המערכת ומאפשר את מחשוב האנלוגיה. בעיית התכן שהועברה לתחום השני נפתרה בתחום זה והפתרון מיוצג ע"י גרף וממומש חזרה לתחום הראשון. לעיטים אין המעבר נעשה באופן חלק לגמרי ויש לתת פתרון טכני לבעיות מקומיות או אף להיכנס לבעיות תכן משניות (שלעיתים הן מאותו סדר גודל של הבעית התכן המקורית).

ניתן לראות כי ככל שקיים מגוון רב יותר של אלמנטים בסיסיים מוכרים בתחומים הנדסיים שונים כך גדל חוזק השיטה.

פרק-3: תכן קונספטואלי בעזרת ייצוג דואלי (Dual Graph).

3.1. מבוא:

בהמשך לגישה שתוארה בפרק הקודם, המאפשרת להעביר מערכת הנדסית מתחום עזר לתחום המקורי בעזרת יצירת ייצוג ממשותף לשתי המערכות, ניתן לפתח גישה נוספת שתאפשר להעביר מערכת הנדסית לתחום המקורי בעזרת יצירת ייצוג דואלי מייצוג קיים של מערכת בתחום העזר. בשיטה זאת, שנקרא לה "תכן בעזרת ייצוג דואלי", הדרך לפתרון בעיית תכן בתחום הנדסי מקורי- D_h נמצאת בסופו של דבר בתחום הנדסי אחר- D_k ובעזרת טרנספורמציות מתמטיות/גרפיות הפתרון ממומש חזרה בתחום- D_h .

במבוא של הפרק הקודם צוין כי במידה ולשתי מערכות s_n ו- \tilde{s}_m הנמצאות בתחומים הנדסיים שונים D_h ו- D_k בהתאמה, מיוצגות בעזרת משתני זרימה/פוטנציאל בלבד וקיים ייצוג גרפי משותף- g_j מסוג- G_R אזי ניתן לקבל מערכת אחת מתוך השניה בעזרת שתי טרנספורמציות המתוארות ב (1.3):

$$(1.3) \quad \begin{cases} \tilde{s}_m = T_{D_k}^{G_R} (T_{D_h}^{G_R} (s_n)) \\ \begin{cases} s_n \in D_h \\ \tilde{s}_m \in D_k \\ g_j \in G_R \end{cases} \end{cases}$$

ידוע כי אם הייצוג הגרפי- g_j השייך לסוג- G_R הוא גרף מישורי (Planar Graph) אזי קיימת טרנספורמציה- $*T$ אשר מייצרת את הגרף הדואלי- $*g_j$ לגרף המקורי- g_j [23]. סוג הגרף הדואלי- $*G_R$ עצמו גם הוא, דואלי לסוג בגרף המקורי- G_R . סוגי הגרפים הדואליים אחד לשני המדווחים עד כה רשומים בטבלה הבאה [23]:

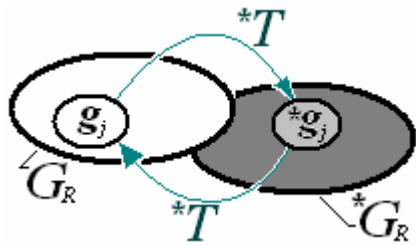
$FGR \xleftrightarrow{Dual} PGR$
$FLGR \xleftrightarrow{Dual} PLGR$
$*RGR \xleftrightarrow{Dual} RGR$

טבלה-3.1: סוגי ייצוגים גרפיים למערכות הנדסיות הדואליים זה לזה. הכוונה בסימון *RGR היא שהדואלי ל- RGR הוא עצמו גם כן RGR .

את המעבר מגרף- g_j לגרף הדואלי לו- $*g_j$ ניתן לרשום באופן הבא:

$$(3.1) \quad \begin{cases} *g_j = *T(g_j) \\ \begin{cases} g_j \in G_R \\ *g_j \in *G_R \end{cases} \end{cases}$$

אחת התכונות המיוחדות של טרנספורמציות גרף לדואלי שלו היא שהגרף הדואלי של הגרף הדואלי הוא הגרף המקורי כמתואר ב-(3.2):

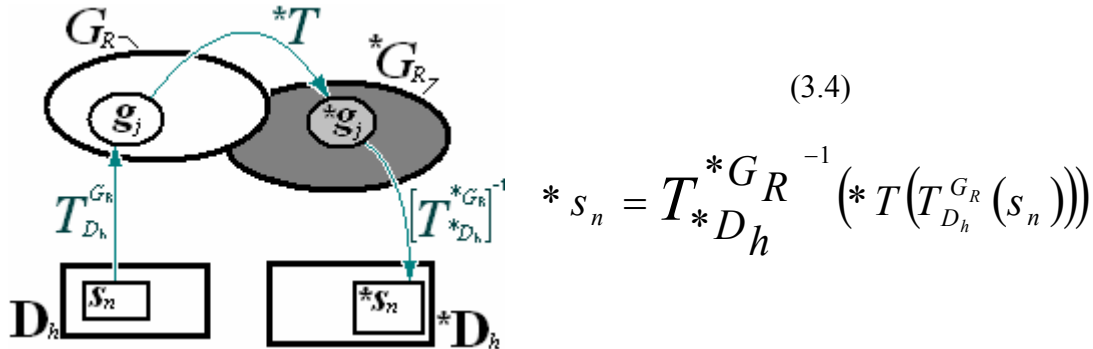


$$\begin{aligned}
 *g_j &= *T(g_j) \\
 g_j &= *T(*g_j) \\
 (3.2) \quad & \\
 \Rightarrow *T &= *T^{-1}
 \end{aligned}$$

כשם שיש קשר בין גרפים הדואליים זה לזה שכל אחד מהם שייך לסוג גרפי אחר, ישנו גם קשר של דואליות בין מערכות הנדסיות השייכות לתחומים הנדסיים שונים. כך שאם לשתי מערכות הנדסיות- s_n ו- \tilde{s}_m , השייכות לתחומים- D_h ו- $*D_h$ בהתאמה, ישנם ייצוגים- g_j ו- $*g_j$, אזי שתי המערכות גם הן דואליות זו לזו דהיינו:

$$(3.3) \quad \tilde{s}_m = *s_n, \quad s_n = *\tilde{s}_m$$

המשמעות ההנדסית לכך כי שתי מערכות הן דואליות היא שקיים קשר בין מבנה האלמנטים בין שתי המערכות הללו וקיים גם קשר בין הטופולוגיה של כל אחת משתי המערכות. ניתן להרכיב את המעבר בין שתי מערכות הנדסיות מתחומים שונים המתואר בנוסחה (1.3) לעיל (בו מעבר זה מתבסס על קיום ייצוג גרפי משותף בין שתי המערכות). למעבר בין מערכות דרך טרנספורמציה מורכבת יותר, אשר במקום שימוש בייצוג גרפי משותף משתמשת בקשר הדואליות (החד-חד-ערכי) של הייצוגים הגרפיים של שתי המערכות כמתואר:



$$(3.4)$$

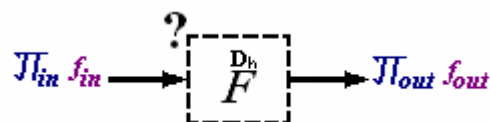
$$*s_n = T^{*G_R} (*T(T^{G_R}(s_n)))^{-1}$$

כעת נתאר את שיטת התכן המתבססת על הרקע שפורט לעיל באופן דומה לזה הנעשה בפרק-2.

3.2. שלבי פתרון בעיית תכן בעזרת שיטת שימוש בגרף דואלי:

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל של התחום המקורי:

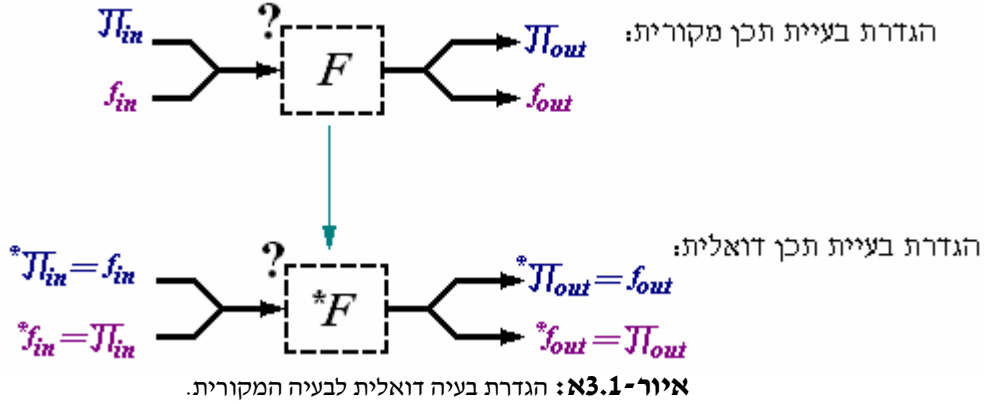
שלב זה זהה עקרונית למקביל שלו מפרק-2 של שיטת הייצוג משותף. נזכיר כי במהלך שלב זה הופכים את ניסוח הבעיית התכן מניסוח במונחי "דרישות פונקציונאליות" בתחום הנדסי מקורי- D_h , לניסוח במונחי זרימות/פוטנציאלים. בהמשך, אפיון התחום הנדסי המקורי- D_h מסייע לנו להגדיר את סוג הייצוג הגרפי- G_R למערכת בתחום זה, את סוג הייצוג הדואלי- $*G_R$ ואת התחום הנדסי הדואלי- $*D_h$.



איור-3.1: תיאור בעיית התכן. הפונקציונאליות המקשרת בין פוטנציאל/זרימה בכניסה לפוטנציאל/זרימה במוצא.

שלב-2 הגדרת בעיית תכן דואלית וחיפוש פתרונה בתחום עזר הנדסי הדואלי לתחום המקורי:

בהתייחס לדרישות הפונקציונאליות של בעיית התכן המקורית כפי שהוגדרו במונחי זרימות ופוטנציאלים בשלב-1 מגדירים בעיית תכן חדשה באופן הבא: מחליפים את התפקיד משתני הזרימה של הבעיה המקורית במשתני פוטנציאל ואת התפקיד משתני הפוטנציאל של הבעיה המקורית במשתני.

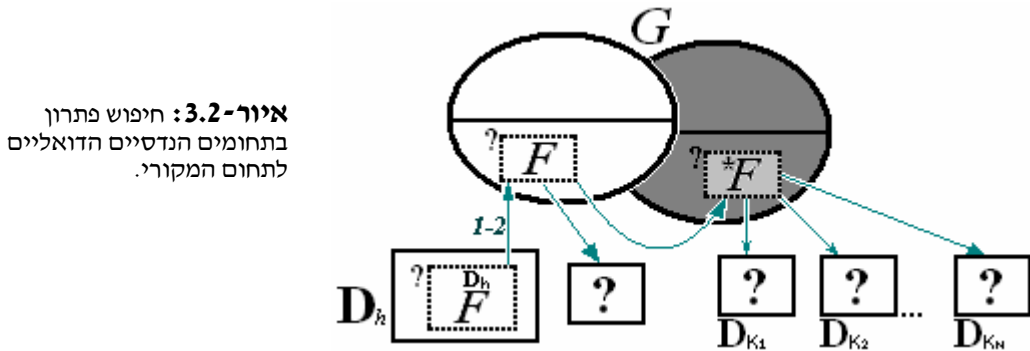


למעשה לאחר העברת בעיית התכן מבעיה מקורית לבעיה דואלית ניתן להמשיך לפתור את הבעיה הדואלית כבעיה מקורית בשיטת "ייצוג משותף" עד לקבלת הפתרון באחד מתחומי העזר ההנדסיים- D_k שהוא למעשה דואלי לתחום המקורי- D_h כמתואר באיור-3.2.

תחומים הנדסיים והתחומים הדואליים שלהם שדווחו עד כה מתוארים בטבלה הבאה [23]:

מערכות מכאניות קינמטיות של מנגנוני חוליות.	מערכות מכאניות סטטיות של מסבכים.
מערכות מכאניות סיבוביות של גלגלי שיניים.	מערכות מכאניות סטטיות של קורות.
מערכת מפרקי זרוע רובוט 3-ממדית.	מערכת סטטית 3-ממדית.

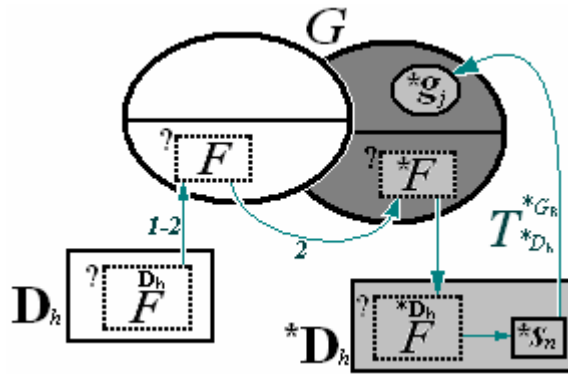
טבלה-3.2: סוגי מערכות הנדסיות הדואליות זו לזו.



שלב-3 בניית ייצוג גרפי לפתרון הבעיה הדואלית:

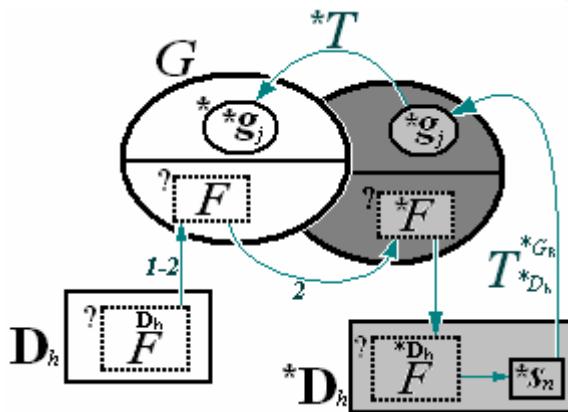
לאחר שמצאנו מערכת- s_n^* בתחום העזר- D_k שהיא פתרון לבעיה הדואלית יש לייצג מערכת זאת באמצעות גרף- g_j^* . שלב זה, טכנית, זהה למקביל שלו בשיטת "הייצוג המשותף". תחום העזר המסוים שניבחר הוא למעשה התחום- D_h^* הדואלי לתחום המקורי- D_h . הייצוג הגרפי- g_j^* של הפתרון- s_n^* בתחום העזר מכיל את המידע הנדסי והטופולוגי של- s_n^* ונעשה בעזרת הטרנספורמציה שתוארה בפרק הקודם בסעיף 2.1.

איור-3.3: בניית ייצוג גרפי של הפתרון לבעיה הדואלית בעזרת טרנספורמציה (1.1)



שלב-4 בניית גרף דואלי לגרף המייצג את פתרון הבעיה הדואלית:

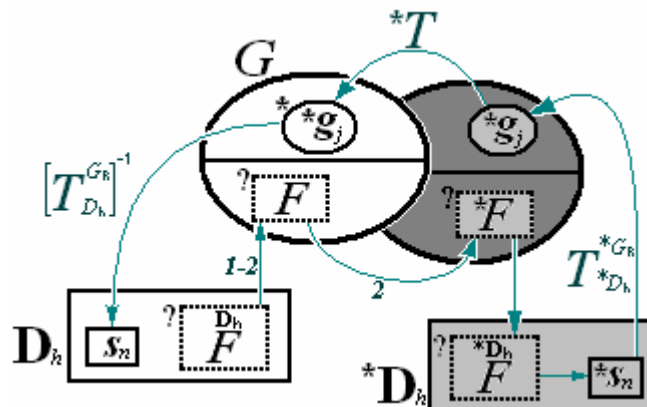
בשלב זה לייצוג הגרפי- $*g_j$ מסוג- $*G_R$ של הפתרון שנתקבל לבעיה הדואלית בתחום העזר יוצרים גרף דואלי- $(*g_j)$. לפי (3.3) יוצא שלמעשה הגרף המתקבל $g_j = (*g_j)$ הוא הגרף של המערכת בתחום המקורי דהיינו מייצג את הפתרון לבעיה המקורית. כאשר ידועים התחומים ההנדסיים D_h ו- $*D_h$ וכן גם סוגי הייצוג שלהם G_R ו- $*G_R$ בהתאמה, אזי המעבר מ- $*g_j$ ל- g_j הוא על פי המתואר בפרק-1 סעיף 1.3.2.



איור-3.4: בניית ייצוג דואלי לייצוג של הפתרון לבעיה הדואלית ע"י טרנספורמציה (3.1)

שלב-5 מימוש הייצוג הגרפי של מערכת הנדסית מתחום עזר הנדסי למערכת הנדסית בתחום המקורי:

שלב המימוש של מערכת מתוך ייצוג נתון זהה למקביל לו בשיטת "גרף משותף".



איור-3.5: מימוש הייצוג של הפתרון לבעיה המקורית ע"י טרנספורמציה (1.2).

3.3. דוגמאות של תכן בעזרת גרף דואלי:

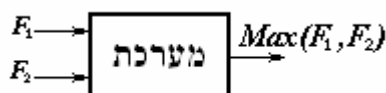
בסעיף זה יוצגו שתי דוגמאות של מערכות אשר פותחו תוך שימוש בייצוג דואלי.

3.3.1. תכן מפעיל כוח לחיצה מרבי:

3.3.1.1. הגדרת דרישות פונקציונאליות לתכן:

יש לפתח מערכת מכאנית סטטית ע"פ הדרישות הבאות:

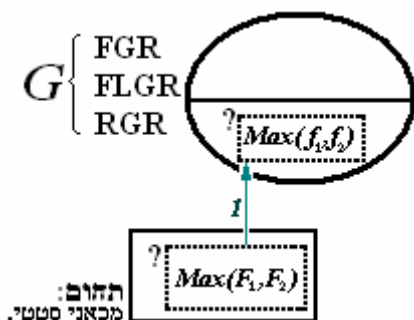
- על המערכת פועלים שני כוחות לחיצה חיצוניים.
- המערכת מוציאה כוח לחיצה על רכיב חיצוני השווה בגודלו לגדול מבין שני הכוחות הפועלים עליה בכניסה.



איור-3.6: תיאור בעיית התכן למערכת המפעילה במוצאה את הכוח הגדול מבין שני הכוחות שבכניסתה.

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל של התחום המקורי:

התחום המקורי- D_h הוא תחום מכאני סטטי בו הזרימה היא כוח והפוטנציאל הוא העתקה. תאור בעיית התכן במונחי זרימות ופוטנציאלים יראה כך:



$$Input \begin{cases} f_1 = F_1 \\ f_2 = F_2 \end{cases} \longrightarrow Output \{f_0 = Max(F_1, F_2)\}$$

איור-3.7: ייצוג בעיית התכן של מפעיל כוח לחיצה מרבי במונחים של זרימות ופוטנציאלים.

ניתן לראות ע"פ דרישות התכן כי המערכת המתבקשת היא מערכת המתייחסת לזרימות בלבד ואינה מתייחסת לפוטנציאלים.

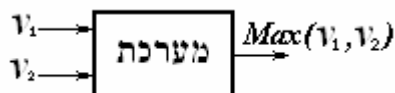
שלב-2 הגדרת בעיית תכן דואלית וחיפוש פתרונו בתחום עזר הנדסי דואלי לתחום המקורי:

התחום ההנדסי הדואלי לתחום המקורי- D_h^* הוא תחום מכאני קינמטי [23]. בתחום זה הזרימה היא כוח והפוטנציאל הוא מהירות קווית.

$$\begin{cases} f \rightarrow F \\ \pi \rightarrow v \end{cases}$$

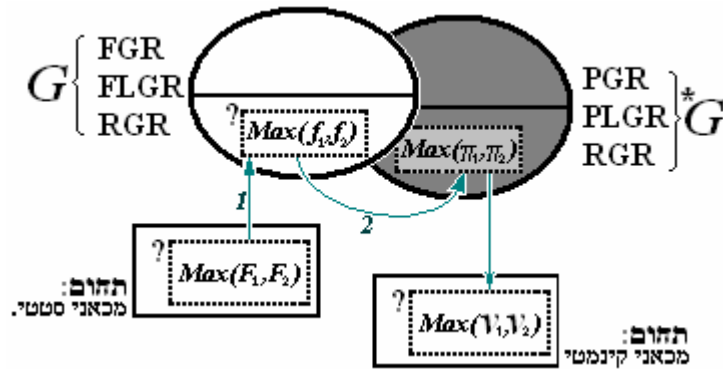
הבעיה הדואלית במערכת הדואלית תוגדר כך:
יש לפתח מערכת מכאנית סטטית ע"פ הדרישות הבאות:

- למערכת נכנסות שני מהירויות קוויות בכיוון חיובי.
- המערכת מוציאה מהירות חיובית השווה בגודלה לגדולה מבין שתי המהירויות בכניסתה.



איור-3.8: ייצוג בעיית תכן דואלית לבעיית כוח לחיצה מרבי במונחים של זרימות ופוטנציאלים.

כלומר בעיית התכן המקורית של מציאת מערכת ליצירת כוח לחיצה מרבי הופכת בתחום העזר הדואלי לבעיית יצירת מערכת המוציאה מהירות מרבית חיובית.

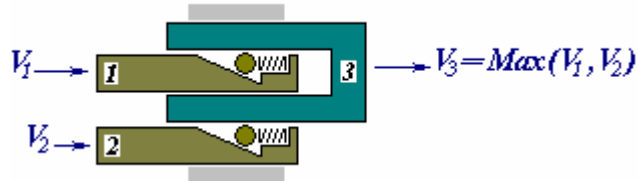


איור-3.9: תיאור תהליך התכן העברת בעיית התכן מהתחום המקורי לתחום העזר הדואלי.

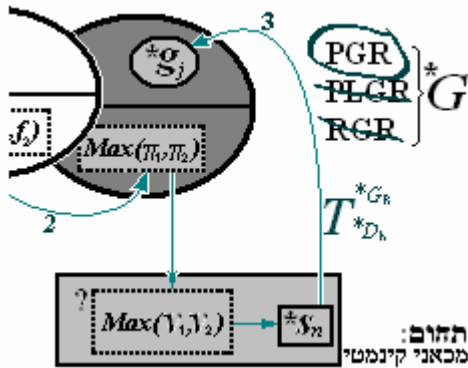
הפתרון לבעיית תכן זאת בתחום העזר ידוע ותואר בפרק-2 סעיף 2.3.1. ומתואר שוב באיור-3.10:

איור-3.10:

מערכת הנדסית המקיימת פתרון לבעיה הדואלית. במערכת זאת המוצא הוא פוטנציאל (מהירות) מרבי בעוד שהדרישה מהמערכת המקורית היתה לזרימה (כוח) מרבית.

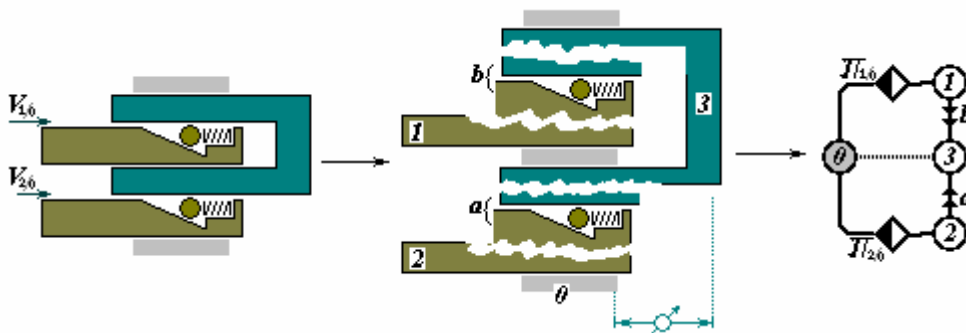


שלב-3 בניית ייצוג גרפי לפתרון הבעיה הדואלית:



הייצוג הגרפי של פתרון הבעיה הדואלית מתואר שוב באיור-3.13. הייצוג הנבחר הוא מסוג-PGR המתאים לייצוג מנגנונים קינמטיים [23] במערכות בהן אין תלות בין המהירויות לכוחות שיכולים לפעול. כמו כן ייצוג זה הוא הפשוט מבין אלו המתאימים המתוארים באיור-3.12.

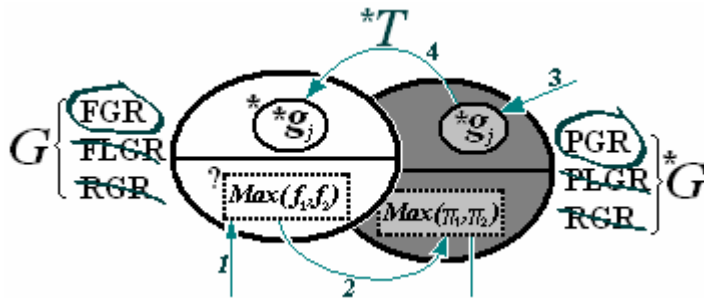
איור-3.12: תיאור בחירת ייצוג גרפי עבור המערכת בתחום העזר הדואלי.



איור-3.13: פירוק מערכת הנדסית, המהווה פתרון לבעיה הדואלית, לאלמנטים ובניית ייצוג גרפי מסוג PGR על פי הטופולוגיה של המערכת הנדסית.

שלב-4 בניית גרף דואלי לגרף המייצג את פתרון הבעיה הדואלית:

סוג הייצוג הדואלי- (g^*) המתקבל בעזרת טרנספורמציה (3.1) הוא מסוג FGR כמתואר הטבלה-3.1.



איור-3.14: תיאור המעבר מייצוג של מערכת הנדסית בתחום העזר הדואלי לייצוג בתחום המקורי אשר בעצם הוא דואלי לדואלי.

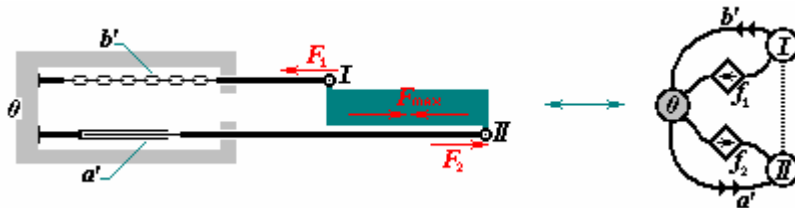
התהליך הטכני של בניית הייצוג הדואלי מתואר בטבלה הבאה:

1. גרף מערכת דואלית:	2. בניית גרף דואלי לגרף המערכת הדואלית:	3. הגרף המתקבל לבעיה המקורית:

טבלה-3.3: תהליך הפקת גרף דואלי למערכת הדואלית.

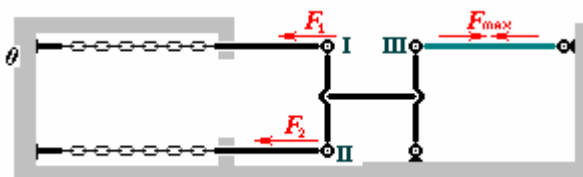
שלב-5 מימוש הייצוג הגרפי של מערכת הנדסית מתחום עזר הנדסי למערכת הנדסית בתחום המקורי:

תהליך הטכני של מימוש הייצוג הגרפי למערכת הנדסית בעזרת טרנספורמציה הפוכה זהה לזה הנעשה בדוגמאות של פרק-2 והתוצאה המתקבלת בסופו של דבר מתוארת באיור-3.15:



איור-3.15: מימוש הייצוג הגרפי המתאר פתרון לבעיה המקורית למערכת הנדסית בתחום המקורי. במערכת שהתקבלה כוח הלחיצה באלמנט חיצוני שיחובר בין הצמתים 1 ו-2 יהיה הגדול מבין הכוחות החיצוניים F_1 ו- F_2 .

במידה והפתרון שהתקבל אינו מתאים לנו מבחינה יישומית כיוון שהיינו מעוניינים כי המערכת תפיק כוח כנגד החוליה הניטראלית. במקרה כזה ניתן לתכנן מערכת שתתאים את המבנה שהתקבל בתכן הראשוני לצרכינו. תכנון מערכת משלימה מסוג זה עשוי להיות קל יותר מתכנון המערכת הראשונית.



איור-3.16: שינוי הפתרון למערכת המפעילה כוח לחיצה כנגד חוליה ניטראלית.

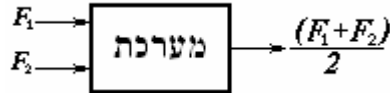
3.3.2. תכן ממצע כוחות:

נתאר בקצרה דוגמת תכן נוספת שגם בה אנו נעזרים בייצוג דואלי של מערכת בתחום עזר.

3.3.2.1. הגדרת דרישות פונקציונאליות לתכן:

יש לפתח מערכת מכאנית סטטית ע"פ הדרישות הבאות:

- א. על המערכת פועלים שני כוחות לחיצה/משיכה חיצוניים.
- ב. המערכת מוציאה כוח לחיצה/משיכה על רכיב חיצוני השווה בגודלו למומצע של שני
- ג. הכוחות הפועלים עליה בכניסה.



איור- 3.17: שינוי הפתרון למערכת המפעילה כוח לחיצה כנגד חוליה ניטראלית.

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל של התחום המקורי:

התחום המקורי הוא תחום מכאני סטטי. בתחום זה הכוחות הן זרימות וההעקות הן פוטנציאלים. דרישות התכן של הבעיה מתייחסות לזרימות בלבד לא לפוטנציאלים.

$$In\ put \left\{ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \end{matrix} \right\} \longrightarrow Output \left\{ \frac{f_1 + f_2}{2} \right\}$$

שלב-2 הגדרת בעיית תכן דואלית וחיפוש פתרונה בתחום עזר הנדסי הדואלי לתחום המקורי:

התחום הדואלי לתחום המכאני סטטי הוא תחום מכאני קינמטי [23]. בתחום זה הזרימות הן כוחות והפוטנציאלים הם מהירויות. לאחר החלפת תפקיד הזרימות בתפקיד הפוטנציאלים באופן הבא:

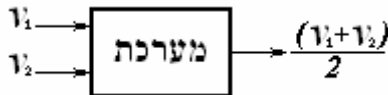
$$In\ put \left\{ \begin{matrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{matrix} \right\} \longrightarrow Output \left\{ \frac{\pi_1 + \pi_2}{2} \right\}$$

אנו מקבלים בתחום זה הגדרה לבעיה דואלית אשר מתייחסת רק לפוטנציאלים.

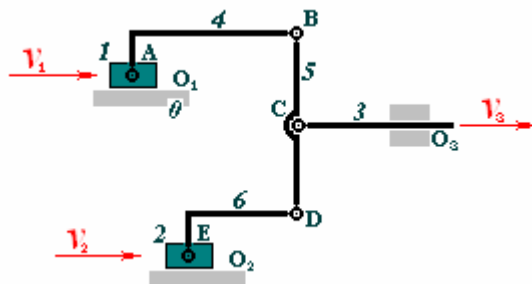
יש לפתח מערכת מכאנית סטטית על פי הדרישות הבאות:

- א. על המערכת פועלים שני כוחות לחיצה/משיכה חיצוניים.
- ד. המערכת מוציאה כוח לחיצה/משיכה על רכיב חיצוני השווה בגודלו למומצע של שני
- ה. הכוחות הפועלים עליה בכניסה.

איור- 3.17: שינוי הגדרת בעיית התכן לבעיה בתחום הדואלי.



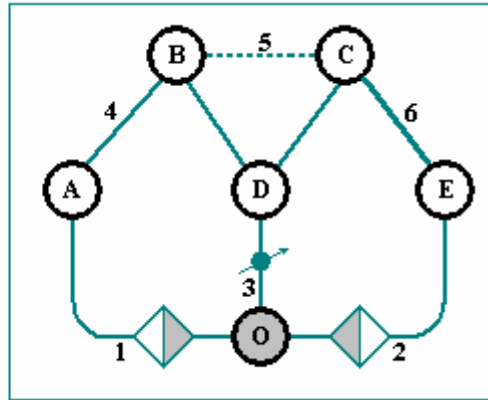
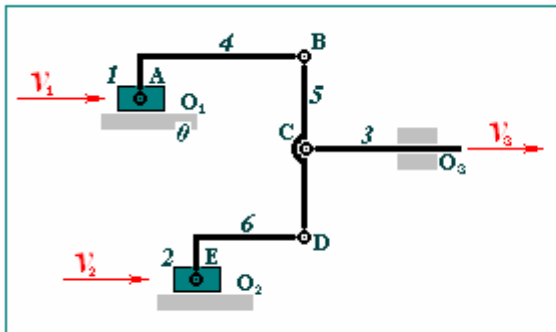
מערכת ידועה בתחום קינמטי שמבצעת את הפונקציונאליות הנתונה מתוארת באיור-3.18.



איור- 3.18: מערכת קינמטית שהיא הפתרון עבור הבעיה הדואלית.

שלב-3 בניית ייצוג גרפי לפתרון הבעיה הדואלית:

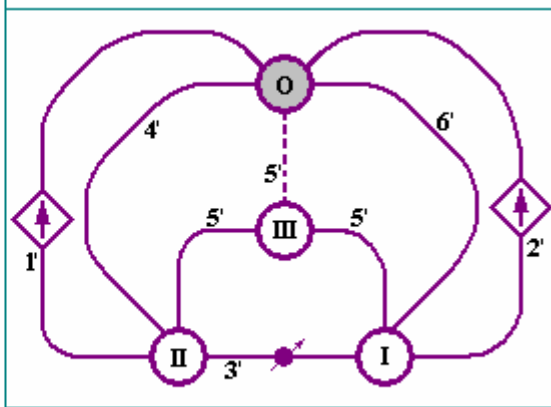
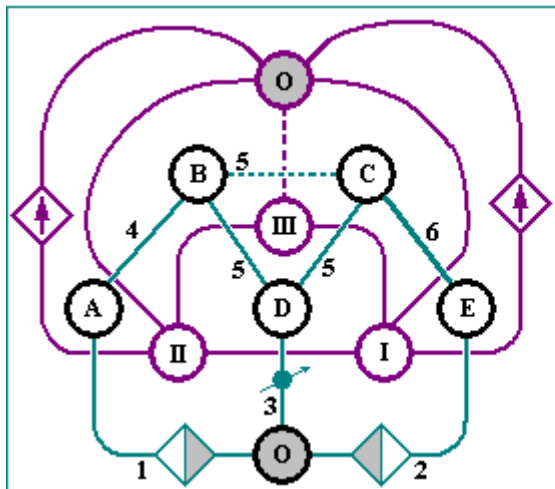
ייצוג PGR של המערכת הקינמטית מתואר באיור-3.19. במערכת זו ממדית זאת הפוטנציאלים והזרימות הם גדלים ווקטוריים. הדרך בא נעשה ייצוג למערכת מסוג זה הנה מורכבת ומתוארת בפרוטרוט ב-[23].



איור- 3.19: ייצוג PGR של מערכת מכאנית קינמטית דו-ממדית. מערכת קינמטית (משמאל) שהיא למעשה מערכת דיפרנציאל קווית. ייצוג המערכת (מימין) בעזרת גרף פוטנציאלים.

שלב-4 בניית גרף דואלי לגרף המייצג את פתרון הבעיה הדואלית:

נבנה את הייצוג הדואלי לייצוג המערכת הקינמטית המופיע באיור-3.19. לכל פאה בגרף המקורי (ירוק) נתאים צומת (כולל הפאה החיצונית) וכל שתי פאות שכנות נחבר בקשת כמתואר באיור-3.20. סוג האלמנט המיוצג על ידי כל קשת בגרף הדואלי (אדום) הוא דואלי לאלמנט המיוצג על ידי קשת מקורית בהתאמה. במקרה שלנו כל קשת בגרף המקורי מייצגת חוליה של מנגנון. בגרף הדואלי לפיכך כל קשת תייצג אלמנט מבני סטטי.

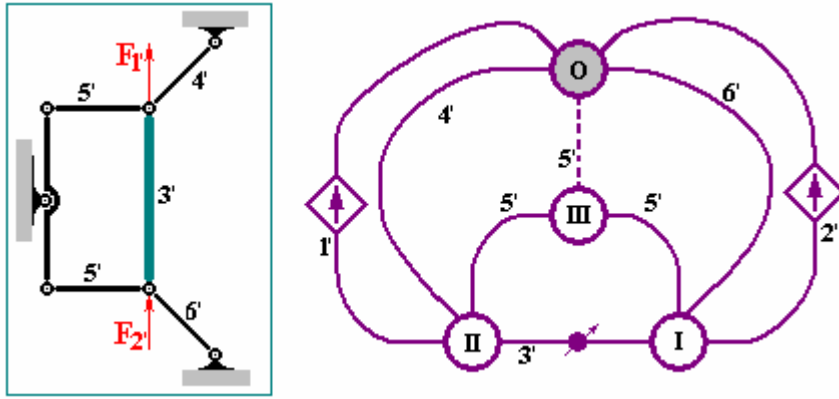


איור- 3.20: קבלת ייצוג דואלי של מערכת מכאנית סטטית מהייצוג המקורי של מערכת מכאנית קינמטית.

שלב-5 מימוש הייצוג הגרפי של מערכת הנדסית מתחום עזר הנדסי למערכת הנדסית בתחום המקורי:

מימוש הייצוג הסופי למערכת הנדסית נעשה באותו האופן בו הוא נעשה בפרק-2. היות ובדוגמא הפרטית הזאת המערכת היא דו ממדית בנוסף לטופולוגיה הייצוג מגדיר גם את הגיאומטריה של אלמנטים. אופן הייצוג והמימוש של מערכות מכאנית דו-ממדיות קינמטיות וסטטיות מתואר ב-[23].

במערכת שהתקבלה המתוארת באיור-3.21 הכוח הפועל באלמנט-3' הוא ממוצע הכוחות החיצוניים שמפעילים על המערכת F_1, F_2 .



איור- 3.21: מערכת מכאנית סטטית-פתרון לבעיית התכן המקורית של מנגנון ממצע כוחות וייצוגה הגרפי.

המערכת המתוארת היא מערכת מבנית סטטית המורכבת מ-4 מוטות וקורה אחת עם חיבור פרקי במרכז. האלמנט-3' הוא אלמנט חיצוני ההופך לחלק מן המבנה הסטטי ועליו אנו מיישמים את מיצוע הכוחות. ניתן לראות על פי נוסחת "גרובלר" או בכל שיטה אחרת כי דרגת החופש של כל המערכת שווה לאפס. זאת אומרת שהמערכת הנה מסוימת סטטית. מכיוון שהקורה בשיווי משקל, בשתי המוטות המחוברים לקורה והמסומנים כ-5' פועל אותו הכוח בגודלו ובכיוונו. מתוך משוואות שיווי משקל של כוחות על הצמתים האחרים ניתן לקבל את הכוח הפועל במוט-3' שהוא: $(F_1 + F_2)/2$.

סיכום:

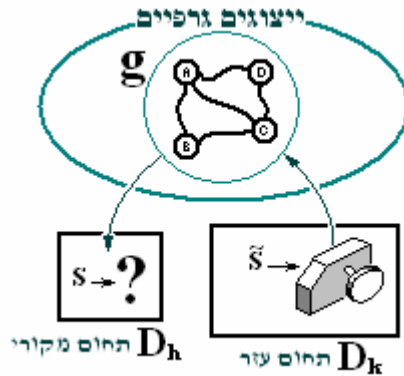
שיטת תכן בעזרת "הייצוג הדואלי" מייצרת מרחב עזר נוסף לחיפוש של פתרון לבעיית התכן. במקום בו לא מוצאים פתרון בשיטת "הייצוג המשותף" לעיתים, בתחום עזר הדואלי, הפתרון עשוי להימצא.

פרק-4: שיפור תכנ בעזרת ייצוג משותף.

4.1. מבוא:

השיטה שתואר בפרק זה היא למעשה שיפור של שיטת "הייצוג המשותף" שתוארה בפרק-2. בדומה לשיטת "הייצוג המשותף" גם שיטה זאת מתבססת על מעבר בין תחומי של מערכות הנדסיות דרך ייצוג גרפי משותף. נזכיר כי בשיטת "הייצוג המשותף" אנו מחפשים מערכת- s שהיא הפתרון לבעיית התכנ בתחום המקורי- D_h על ידי כך שהופכים את ניסוח דרישות התכנ של הבעיה ההנדסית לניסוח בעזרת זרימות ופוטנציאלים. דבר זה מאפשר לחפש פתרון לבעיית התכנ בתחום עזר הנדסי- D_k . לאחר שבתחום העזר מוצאים מערכת- \tilde{s} שהיא הפתרון לבעיית התכנ בתחום זה, מייצגים אותה באמצעות גרף- g . לאחר מכן בונים את המערכת s מהגרף לתחום המקורי באמצעות טרנספורמציה הפוכה: $s = T^{-1}(g)$.

איור-4.1: ביצוע העברת תכנ קונספטואלי מתחום עזר הנדסי לתחום המקורי.



שיטת תכנ בעזרת ייצוג משותף מבוססת על ההנחה כי בייצוג מערכות הנדסיות המשמר טופולוגיה, חוק הפוטנציאלים, חוק הזרימות ותכונת האורתוגונאליות - לכל שתי מערכות הנדסיות בעלות ייצוג איזומורפי יש אותה פונקציונאליות. הסבר מסוים להנחה זאת הוא שלמעשה הייצוג של מערכת הנדסית (שהוא המודל של המערכת) מבטא את מהות המערכת ולכן באופן שבו מתנהג הייצוג מתנהגת גם המערכת עצמה. לכן, אם לשתי מערכות יש את אותו הייצוג אזי יש להן אותה מהות פונקציונאלית שפשוט מלובשת בגוף פיזיקאלי אחר.

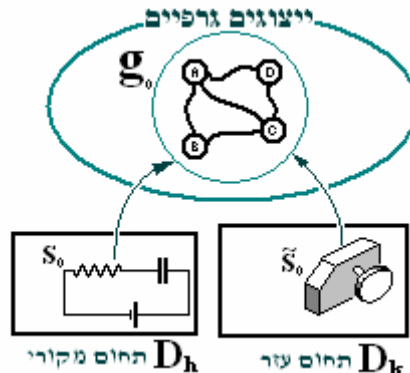
על בסיס הנחה זאת ניתן לטעון את הטענה הבאה:

בייצוג מערכות הנדסיות המשמר טופולוגיה, חוק הפוטנציאלים וחוק הזרימות ותכונת האורתוגונאליות - לכל שתי מערכות הנדסיות בעלות ייצוג איזומורפי, שינוי זהה של הייצוג יגרור שינוי זהה בפונקציונאליות בשתי המערכות.

על סמך טענה זאת ניתן לפתח כשיטת תכנ קונספטואלי באופן הבא:

יהיו s_0 ו- \tilde{s}_0 שתי מערכות ראשוניות כלשהן בתחומים D_h ו- D_k בהתאמה ולהן ייצוג גרפי משותף- g_0 . בהתאם להנחה לעיל, למערכות אלו ישנה פונקציונאליות זהה כל אחת בתחומה ההנדסי.

איור-4.2: שלב ראשוני בתכנ משולב בו בתחום המקורי ובתחום העזר קיימות מערכות ראשוניות ולהן ייצוג משותף.



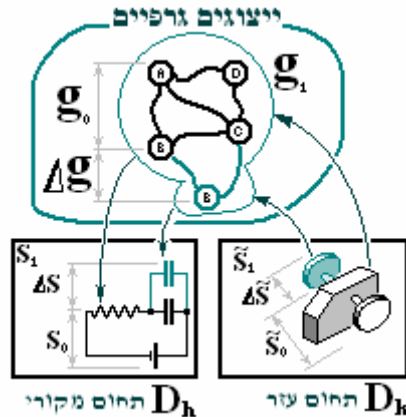
בהמשך, למערכת- \tilde{s}_0 שב- D_k עושים שינוי של הוספת תת-מערכת שתיקרא- $\Delta\tilde{s}$ וייצוגו הגרפי של השינוי (בלבד) יקרא- Δg .

בעקבות השינוי המערכת- \tilde{s}_0 משתנה והופכת ל- \tilde{s}_1 וייצוגה משתנה ל- g_1 .

לייצוג של השינוי- Δg מבצעים טרנספורמציה הפוכה ל- D_h ומקבלים בתחום המקורי תת-מערכת שתיקרא- Δs .

אם מוסיפים את המערכת Δs למערכת- s_0 ומקבלים ב- D_h מערכת חדשה שתיקרא- s_1 בעלת ייצוג- g_1 גם היא, אזי השינוי בפונקציונאליות של s_0 יהיה זהה לזה שנעשה ב- \tilde{s}_0 . כמו כן המערכות הסופיות s_1 ו- \tilde{s}_1 תהיינה בעלות פונקציונאליות זהה כל אחת בתחומה.

איור-4.3: ביצוע שיפור במערכת בתחום העזר והעברתו לתחום המקורי. בעקבות זה מתקבלת בתחום המקורי מערכת חדשה בעלת אותן התכונות של המערכת המשופרת בתחום העזר.



בהמשך פרק זה יתואר פיתוח של מערכת חדשה תוך שימוש במתודולוגיה המתוארת בפרק זה. המערכת שתהווה מושא לפיתוח היא מערכת מכאנית סיבובית קינמטית של דיפרנציאל גלגלי שיניים. התכן הקונספטואלי של מערכת ידועה זו יועבר במקביל לתחומים הנדסיים אחרים של מכאניקה קווית, הידראוליקה וחשמל/אלקטרוניקה.

4.2. תיאור שלבי התכן:

שלב-1 הגדרת בעיית התכן:

שלב זה זהה לשלב מקביל לו בשיטת "הייצוג המשותף" (פרק-2). בשלב זה בהינתן התחום המקורי ודרישות פונקציונאליות, הופכים את ניסוח בעיית התכן לניסוח בעזרת זרימות ופוטנציאלים.



שלב-2 בחירת מערכת ראשונית בתחום המקורי ובתחום העזר:

בוחרים בתחום המקורי מערכת ראשונית- s_0 שהפונקציונאליות שלה דומה איכותית לזו הנדרשת. במקביל לבחירת- s_0 בוחרים מערכת- \tilde{s}_0 אשר לה אותו ייצוג גרפי- g_0 והיא נמצאת בתחום עזר הנדסי בו יש לנו ידע ויכולת לבצע שינויים (כמתואר באיור-4.2).

שלב-3 שיפור המערכת הראשונית בתחום העזר:

בשלב זה בודקים כל מיני אפשרויות של שינוי המערכת ההנדסית- \tilde{s}_0 בתחום העזר. בודקים אלו אלמנטים (תת-מערכות) יש להוסיף לה או לגרוע ממנה עד אשר מתקבלת הפונקציונאליות

הרצויה. לשינוי שעושים במערכת הראשונית שבתחום העזר נקרא- $\Delta\tilde{s}$ ולתת-גרף המייצג אותו נקרא- Δg . המערכת המשופרת בתחום העזר תיקרא- \tilde{s}_1 , הייצוג הגרפי שלה- g_1 .

שלב-4 העברת ה"שיפור" מתחום העזר לתחום המקורי דרך ייצוג גרפי.

בשלב זה עושים טרנספורמציה הפוכה של השיפור- Δg מתחום העזר לתחום המקורי. מוסיפים ל- s_0 את כל האלמנטים החדשים וגם את טופולוגית החיבור ההדדי ביניהם כפי שמתוארת בייצוג- Δg ומקבלים את הפתרון s_1 . בתחום המקורי כמתואר באיור-4.3.

היתרון הגדול של השיטה הוא שניתן לבצע את שיפור המערכת הראשונית באופן הדרגתי במספר שיפורים ככל שהדבר מתבקש עד שמגיעים למערכת בעלת הפונקציונאליות הרצויה.

4.3. תכן מערכת דיפרנציאל בתחומים הנדסיים שונים בשיטת שיפור תכן בעזרת ייצוג משותף.

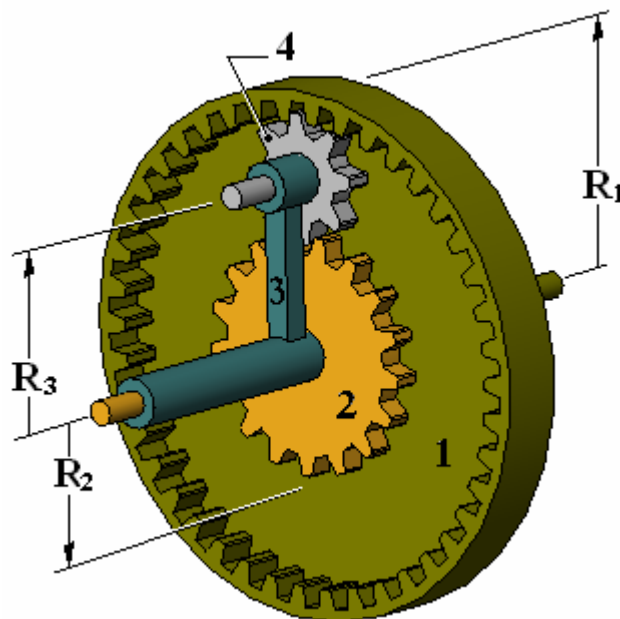
הדיפרנציאל הוא מערכת גלגלי שיניים מעניינת, בעלת תכונות מיוחדות ומאד שימושית בתחום הרכב הקל והכבד [1]. בפרק זה נשתמש בשיטה שתוארה לעיל ונעביר בעזרתה את הדיפרנציאל ותכונותיו בהתאמה ממערכות המכאניות של גלגלי שיניים או מנגנוני חוליות למערכות פיזיקאליות – הידראולית, חשמלית, ואלקטרונית. כמו כן, נחפש ביטוי לתכונותיו המעניינות ואופייניות של הדיפרנציאל בייצוג הגרפי שלו. לאחר מכן, באמצעות הייצוג, נעביר תכונות אלו וניישם אותם במערכות אחרות.

4.3.1. מבוא כללי על מערכת הדיפרנציאל:

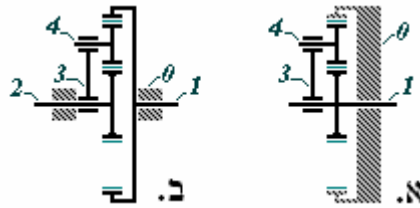
הדיפרנציאל שייך לסוג מיוחד של מערכות גלגלי שיניים הנקראות מערכות **פלנטאריות**. מערכות אלו מורכבות משני גלגלי שיניים הסובבים סביב ציר משותף ונקראים - "שמשות", ומגלגל שיניים אחד לפחות הנקרא - "לוויין" אשר מחובר לשמשות, ומחוליה פשוטה נוספת (linkage) הנקראת נושא לוויין. חוליה זו מחברת את הלוויין בעזרת צמדים קינמטיים נמוכים לציר המשותף של ה"שמשות" כמתואר באיור-4.8.

במערכת פלנטארית רגילה אחת מן השמשות חייבת להיות נייחת, ז"א, היא החוליה הניטראלית. במערכת הדיפרנציאל לעומת זאת החוליה הניטראלית היא חיצונית ושתי שמשות ניידות (איור-4.9). באופן זה המערכת הנוצרת היא בעלת 2 דרגות חופש.

איור-4.8: מערכת פלנטארית כללית ומימדיה האופייניים. האלמנטים 1,2 הן שמשות. האלמנט 4 הוא לוויין והאלמנט 3 הוא נושא הלוויין.



איור-4.9: תיאור סכמתי של מערכת גלגלי שיניים פלנטרית רגילה (א) ודיפרנציאל (ב). במערכות המתוארות חוליות 1 ו-2 הן שמשות החוליה 3 היא נושא לוויין וחוליה 4 היא לוויין.



משוואות ה"שיווי משקל" של הדיפרנציאל הן:

$$\omega_i \begin{cases} (4.6) & R_1 \omega_{1/0} + R_2 \omega_{2/0} - (R_1 + R_2) \omega_{3/0} = 0 \\ (4.7) & M_1 + M_2 + M_3 = 0 \\ (4.8) & \omega_{1/0} M_1 + \omega_{2/0} M_2 + \omega_{3/0} M_3 = 0 \end{cases}$$

מהירות זוויתית של חוליה i – ω_i
מומנט הפועל על חוליה i – M_i
רדיוסים של גלגלי שיניים השונים – R_1, R_2

המשוואה (4.6) היא משוואת המהירויות ומתקבלת למעשה מחוק הפוטנציאלים. משוואת (4.7) נקראת משוואת המומנטים ונובעת מכך שחוליות 1, 2, 3 מסתובבות סביב ציר משותף. משוואה (4.8) היא משוואת הספקים ונובעת משימור אנרגיה. מן המשוואות הללו ומשוואת שיווי משקל של כוחות על נושא הלוויין התלויה בגיאומטריה הפרטית של הדיפרנציאל ניתן להסיק מספר תכונות:

4.3.1.1 מערכת עם שתי דרגות חופש.

תכונה זו נובעת מניתוח מבני של הדיפרנציאל. משמעותה היא שעל מנת לקבל מהירות מוצא מוגדרת מאיזושהי חוליה שאותה אנו מעוניינים להגדיר כחולית מוצא, עלינו לקבוע מהירויות בשתי חוליות אחרות. דבר זה נקרא "אילוץ קינמטי קשיח". לחילופין ניתן לקבוע מהירות רק בחוליה אחרת אחת ואת החוליה השניה לקשור דינאמית לחולית המוצא. ז"א דרך יחס ידוע בין המומנט שיפעל עליה והמומנט שיפעל על חולית המוצא לבין המהירויות הזוויתיות שלהן. עבור אילוץ קינמטי תמיד קיים פתרון יציב למערכת (4.6) ולא כן הוא לגבי האילוץ דינאמי.

4.3.1.2 חיבור/חיסור מהירויות זוויתיות.

תכונה זו נובעת מהמשוואה הראשונה במערכת (4.6) הנקראת משוואת המהירויות. משוואה זאת קובעת כי באילוץ קינמטי של הדיפרנציאל תמיד יתקבל יחס ליניארי בין מהירות המוצא למהירויות הכניסה. אם מתאימים את הנתונים הגיאומטריים של הדיפרנציאל ישנו תחום רחב למשחק. אחת הגרסאות ואולי הנפוצה ביותר של הדיפרנציאל היא דיפרנציאל עם גלגלי שיניים קוניות ושתי שמשות זהות (איור-4.10), מבנה המבטיח שוויון רדיוסים $R_1 = R_2$. באופן זה משוואת המהירויות המתקבלת ממשוואה (4.6) היא:

$$(4.9) \quad \frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_2) = \omega_3$$

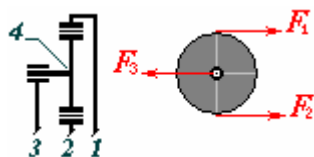


איור-4.10: דיפרנציאל פשוט עם גלגלי שיניים קוניות.

יחס זה קובע שבמידה וחוליה-3 היא חולית המוצא וחוליות 1, 2 הן הכניסות אזי מוצא המערכת הוא ממוצע המהירויות של הכניסות (דהיינו מחצית סכומן) כמתואר במשוואה (4.9).

4.3.1.3 יחס בין מומנטים.

אם מבודדים את הלוויין לחוד וכותבים עליו את משוואת שיווי משקל של הכוחות, בהנחה שגם הוא נמצא בשיווי משקל, ניתן להגיע לנוסחה נוספת אשר תקבע יחס בין המומנטים הפועלים על השמשות. במקרה הספציפי של הדיפרנציאל הפשוט היחס הוא:



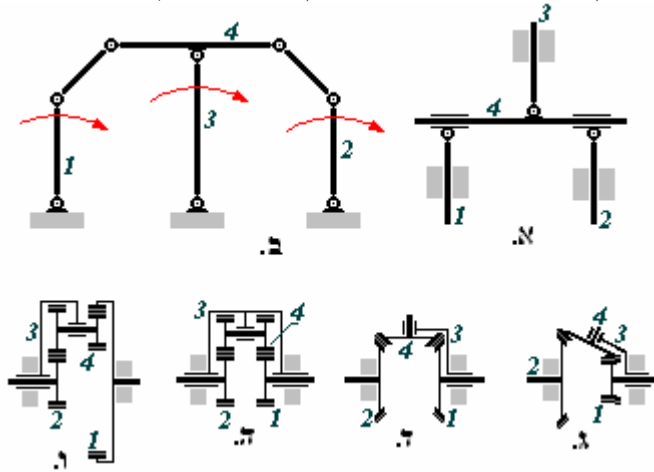
$$F_1 R_4 = F_2 R_4 \Rightarrow \frac{M_1}{R_1} = \frac{M_2}{R_2}$$

איור-4.11: תרשים שיווי משקל של מומנטים על גלגל שיניים נושא הלוויין (בהיטל צד) בדיפרנציאל סביב הציר שלו (נקודה בה פועל הכוח F_3).

4.3.1.4 מערכות דיפרנציאל נוספות :

בנוסף למערכת הדיפרנציאל של גלגלי שיניים ידועות כדיפרנציאל עוד מספר מערכות מכאניות של מנגנוני חוליות המתוארות באיור-4.12. כמו כן מערכת הדיפרנציאל של גלגלי שיניים עצמה יכולה להיות פשוטה ומורכבת רק מגלגלי שיניים ישרות ויכולה להיות גם מסובכת יותר הן בצורתה המרחבית והן מסוגי גלגלי שיניים אותן היא מכילה, כדוגמת המערכות המופיעות באיור-4.12.

איור-4.12: מערכות דיפרנציאל גלגלי שיניים מורכבות ומערכות דיפרנציאל של מנגנוני חוליות. (Jones et al., 1960)



4.3.2 תכן מערכת דיפרנציאל בתחומים הידראולי וחשמלי/אלקטרוני :

ברצוננו להעביר את התכן הקונספטואלי של מערכת הדיפרנציאל המכאני, הקיימת זה מכבר, למערכות הידראוליות ואלקטרוניות. הדבר קשה לביצוע בשיטת הייצוג המשותף מכיוון שהדיפרנציאל הנו מקרה פרטי של מערכת דו-ממדית ואילו מערכות אלקטרוניות והידראוליות בהן אנו עוסקים הן חד-ממדיות. לעומת זאת באמצעות שיטת שיפור תכן בעזרת ייצוג משותף ניתן לעקוב אחרי הפיתוח ההדרגתי של דיפרנציאל ממערכת התחלתית פשוטה וידועה וליישם את שלבי הפיתוח במערכות מתחומים אחרים.

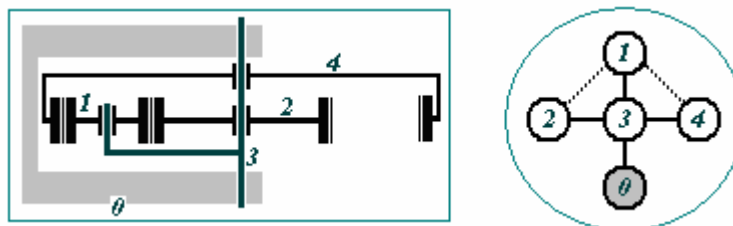
שלב-1 הגדרת בעיית התכן:

הגדרת בעיית התכן במקרה זה תהיה להעביר את הפונקציונאליות (משוואות 4.6) לתחום של הייצוג הגרפי, דהיינו, הדרישות הפונקציונאליות של בעיית התכן מתוארים במונחי זרימות ופוטנציאלים. במערכת מכאנית סיבובית המהירות הסיבובית היא הפוטנציאל והמומנט הוא זרימה באופן הבא :

$$\begin{matrix} \frac{T_1}{f_1} \\ \frac{T_2}{f_2} \end{matrix} \rightarrow \boxed{F} \rightarrow \begin{matrix} T_3 \\ f_3 \end{matrix} \quad (4.10) \quad F \rightarrow \begin{cases} \alpha_1 \pi_1 + \alpha_2 \pi_2 = \pi_3 \\ -(f_1 + f_2) = f_3 \\ -(\pi_1 f_1 + \pi_2 f_2) = \pi_3 f_3 \end{cases}$$

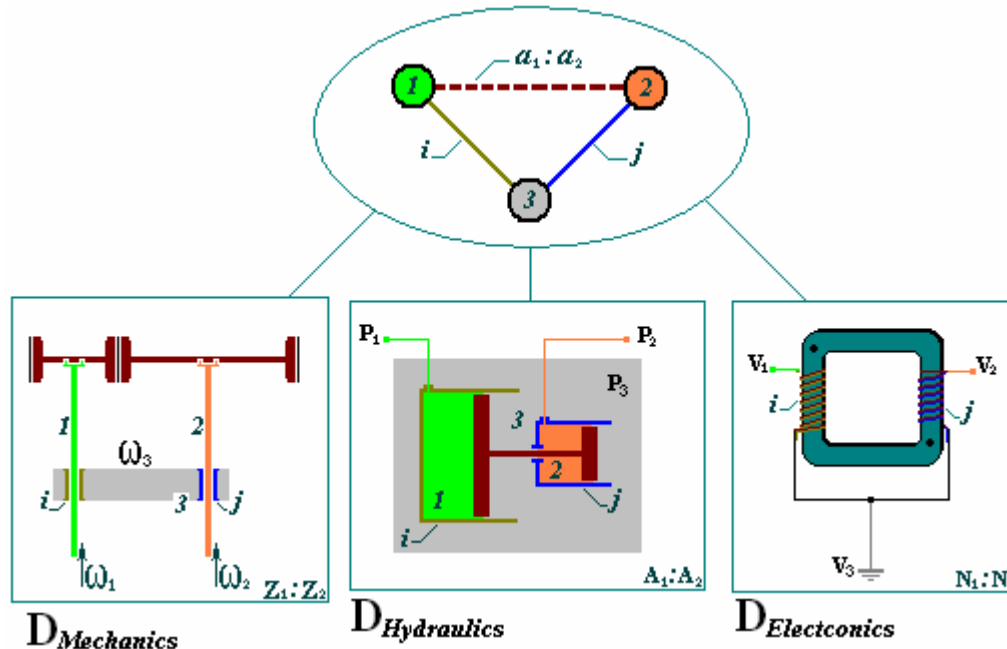
שלב-2 בחירת מערכת ראשונית בתחום המקורי ובתחום העזר:

תחום העזר במקרה זה יהיה תחום מכאני סיבובי כיוון שהפתרון בו ידוע ומתואר באיור-4.14. הייצוג הנבחר במקרה זה יהיה PLGR שהוא הייצוג המקובל עבור מערכות גלגלי שיניים בתחום המכאני הסיבובי [26].



איור-4.13: ייצוג PLGR של דיפרנציאל במערכת מכאנית סיבובית.

המערכת הראשונית שממנה נתחיל היא מערכת גלגלי שיניים פשוטה אשר אותה נפתח למערכת דיפרנציאל. מערכת גלגלי שיניים היא למעשה טרנספורמטור במערכת מכאנית סיבובית והמימוש שלה ידוע גם בהידראוליקה וגם באלקטרוניקה כמתואר ב-1 [28]. באיור-4.14 מתוארות המערכות הראשוניות עם ייצוג PLGR משותף שהוא הייצוג השכיח עבור מערכות גלגלי שיניים (Tsai, 1987). מאחר וייצוג מערכת ראשונית זה תופס תפקיד חשוב בשיטה נקדיש לו הסבר מורחב.



איור-4.14: מערכת ראשונית-טרנספורמטור והייצוג הגרפי שלה מסוג PLGR המשותף לשלושת התחומים ההנדסיים: מכאני, הידראולי ואלקטרוני.

הייצוג "PLGR" של הטרנספורמטורים מורכב מצמתים וקשתות. הצמתים מייצגים אלמנטים בסיסיים שהפוטנציאל בהם אחד בכל נקודה ונקודה. אלמנטים אלו בתחום מכאני סיבובי יהיו גופים קשיחים המסתובבים במהירויות אחידות: במקרה ההידראולי יהיו אלו תחומים בהם לחץ הזורם קבוע ובמקרה החשמלי יהיו אלו תחומים בהם פוטנציאל חשמלי קבוע.

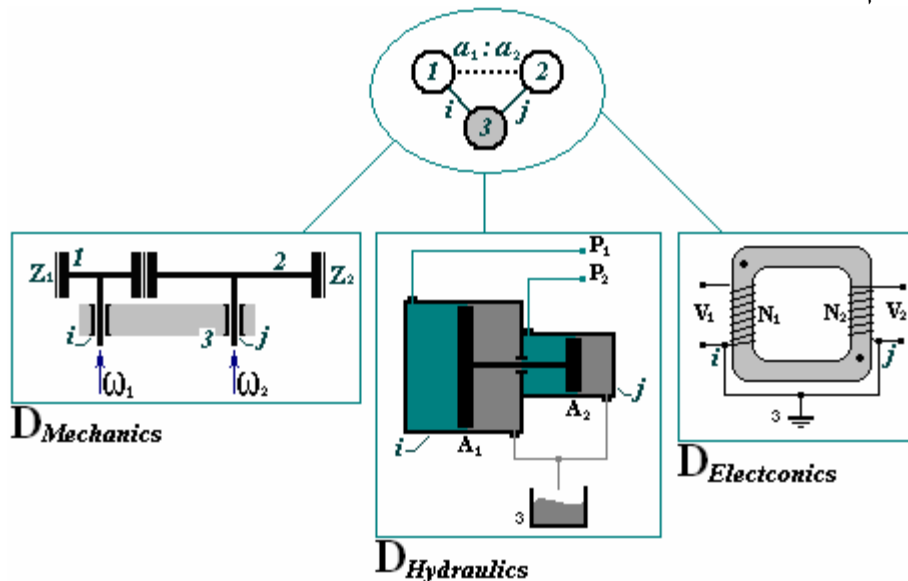
הקשתות מתחלקות לשני סוגים: סוג אחד נקרא ניקרא קשתות-רמות גובה (קווים מלאים) ולסוג השני נקרא קשתות-תמסורת (קווים מקווקווים). קשתות רמות הגובה הם אלמנטים המפרידים בין אלמנטים אשר הפוטנציאל בהם אחד בכל נקודה ונקודה (המיוצגים ע"י צמתים). כאשר שני אלמנטים בעלי פוטנציאל אחד מופרדים ע"י אלמנט המיוצג בעזרת קשת-רמת גובה אזי אין שום תלות בין הפוטנציאלים של שני האלמנטים. קשתות התמסורת בדומה לקשתות רמות הגובה גם הם אלמנטים המפרידים בין אלמנטים בעלי פוטנציאל קבוע (המיוצגים ע"י צמתים). אולם, כאשר שני אלמנטים בעלי פוטנציאל אחד מופרדים ע"י אלמנט המיוצג בעזרת קשת-תמסורת אזי ישנה תלות ליניארית בין הפוטנציאלים של שני האלמנטים. סוג התלות הליניארית הזאת תלוי במבנה המערכת ההנדסית.

באיור-4.14 ניתן לזהות את מובנם הפיזיקאלי של כל האלמנטים מן הייצוג הגרפי. הקשתות i, j הן רמות גובה הם מייצגים אלמנטים המאפשרים הפרש פוטנציאל. הקשת $a_1:a_2$ מציינת את יחס התמסורת של הטרנספורמטור ומובנם של a_1, a_2 תלוי בסוג המערכת הפיזיקאלית. הערה:

בתחום החשמלי על פי הציור הסכמאטי של הטרנספורמטור החלוקה של המערכת ההנדסית לאלמנטים בסיסיים מסובכת יותר. האלמנט הפיזיקאלי שנקרא סליל-אידיאלי מכיל בחובו שני אלמנטים בסיסיים שהם השראות ואימפדנס ולכן כלול בייצוג של קשת התמסורת וקשת רמת הגובה גם יחד.

לאחר שהוסבר כיצד מועבר המידע הפונקציונאלי של המערכות ההנדסיות לייצוג הגרפי נתבונן באיור-4.14 המתאר מערכות זהות פונקציונאלית לאלו המתוארות באיור-4.14 אולם בעלות אופי יותר הנדסי. האינפורמציה האמורה לעיל קיימת באופן חד-חד-ערכי גם במערכות אלו אם כי

בצורה פחות וויזואלית. בהמשך פיתוח התכן נתייחס לצורה זו של המערכות מכיוון שהיא הצורה הטכנית המקובלת.

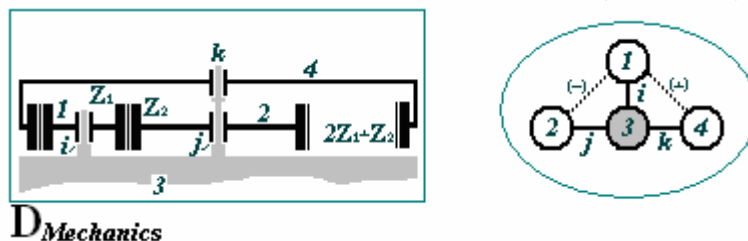


איור-4.14: מערכת ראשונית-טרנספורמטור והייצוג הגרפי שלה מסוג PLGR המשותף לשלושת התחומים ההנדסיים: מכאני, הידראולי ואלקטרוני. הייצוג מורכב מצמתים ומשני סוגי קשתות. הקשתות i, j נקראות רמות גובה והן מייצגות אלמנטים המאפשרים לקבל הפרש פוטנציאל. הקשת $a_1:a_2$ מציינת את יחס התמסורת של הטרנספורמטור ומובנם של a_1, a_2 תלוי בסוג המערכת הפיזיקאלית.

שלב-3 שיפור המערכת הראשונית בתחום העזר:

מעבר ישיר ממערכת הטרנספורמטור למערכת הדיפרנציאל בתחומים ההידראולי והחשמלי הינו מאד קשה. במקום זאת, נשכלל את המערכת הראשונית באופן הדרגתי כך שהיא תתקרב למבנה הדיפרנציאל הן מבחינת צורתה המבנית והן מבחינת ייצוגה הגרפי. השינוי אותו נעשה יהיה הוספת עוד טרנספורמטור למערכת והפעם כזה שאינו הופך סימן כמתואר באיור-4.15. ניתן לראות גם כי הייצוג הגרפי המתקבל נעשה דומה יותר לזה של המערכת הסופית.

יש לציין כי הרעיון לבצע דווקא את השינוי הספציפי נעשה על בסיס אינטואיציה הנדסית.

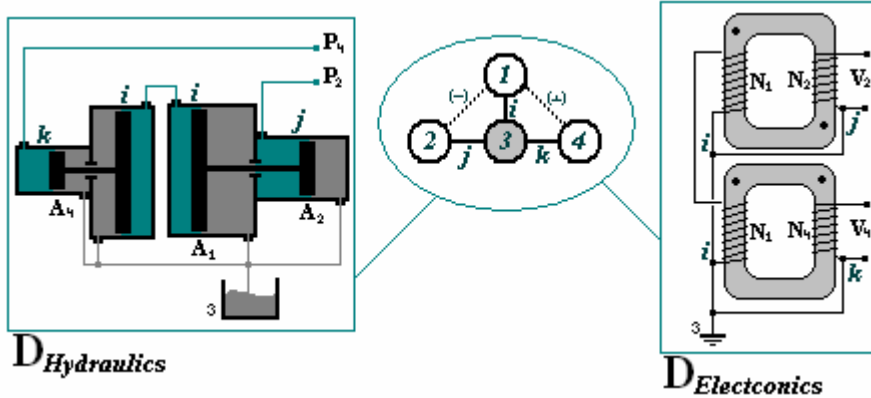


איור-4.15: שינוי מערכת טרנספורמטור מכאנית ראשונית לזוג טרנספורמטורים (אחד הופך סימן ואחד לא) וייצוגו הגרפי.

על מנת לתת למבנה המתגבש צורה הדומה לזו של הדיפרנציאל מאיור-4.13, גלגלי השיניים 2 ו-4 ממוקמים על ציר משותף. פירוש הדבר שקיים יחס תמסורת מיוחד ביניהם התלוי גם ביחס תמסורת בין 1 ל-2 ובין 1 ל-4. מכיוון שהמערכת הקינמטית שהתקבלה היא מנגנון מכאני עם דרגת חופש אחת יש לה כניסה אחת בלבד ויציאה אחת בלבד של מהירות זוויתית. באופן עקרוני אין זה משנה מה היא חולית הכניסה ומה היא חולית המוצא. לעת עתה נניח שחולית הכניסה היא האלמנט המיוצג על ידי צומת-2 וחולית המוצא מיוצגת על ידי צומת-4.

שלב-4 העברת ה"שיפור" מתחום העזר לתחום המקורי דרך ייצוג גרפי:

בשלב זה נעביר את השינוי שבוצע במערכת העזר למערכות המקוריות בהידראוליקה ואלקטרוניקה. השינוי שנעשה ניתן לביצוע במערכות אלו, כמתואר באיור-4.16 ואינו מהווה עדיין את הפתרון לבעיית התכן המקורית.

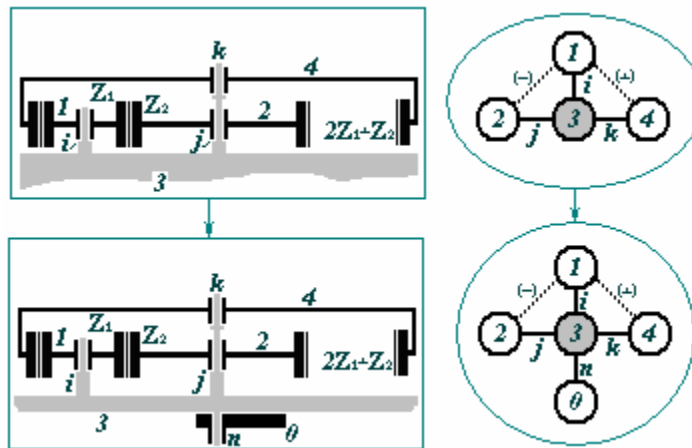


איור-4.16: העברת השינוי הנעשה במערכת העזר למערכת המקורית (במקרה זה שתי מערכות).

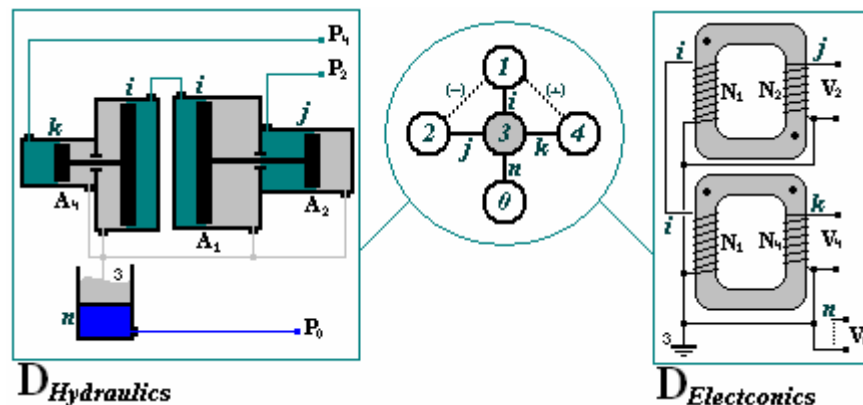
במערכת ההידראולית ובמערכת החשמלית הוספנו טרנספורמטור שאינו מחליף סימן. טרנספורמטור זה ממוקם ביחס לאלמנט צומת-1 ולאלמנט צומת-3.

נחזור ונפעיל שוב את השיטה על המערכת המשופרת בתחום העזר המכאני שבאיור-4.15. במערכת המכאנית נוסיף עוד אלמנט צומת (חוליה) עם דרגת חופש אחת לחוליה הניטראלית באופן הבא:

איור-4.17: הוספת חוליה-0 עם דרגת חופש אחת לחוליה הניטראלית-3. הערה: ציר הסיבוב של החוליה-0 מתלכד עם זה של החוליה-2. הדבר אינו הכרחי ונעשה לנוחיות ההסבר.



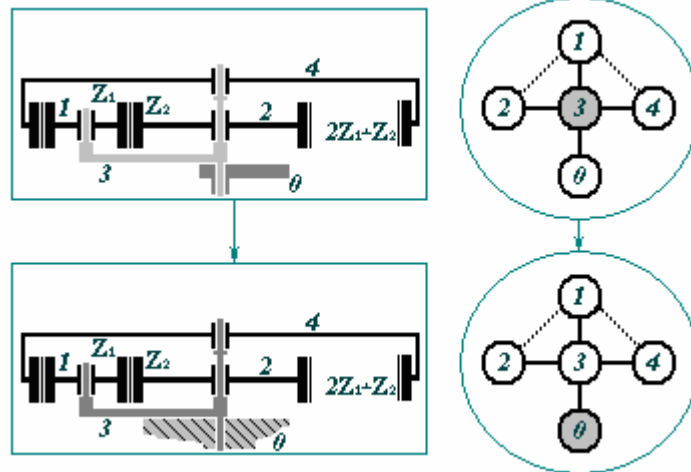
נעביר שינוי זה למערכות הידראוליות ואלקטרוניות. במערכות אלו, כל אחת בתחומה נוסף אלמנט צומת עם דרגת חופש אחת (לחץ בתחום ההידראולי ומתח בתחום החשמל). אלמנט נוסף זה יחובר לאלמנט הניטראלי של המערכת דרך אלמנט-קשת רמת גובה.



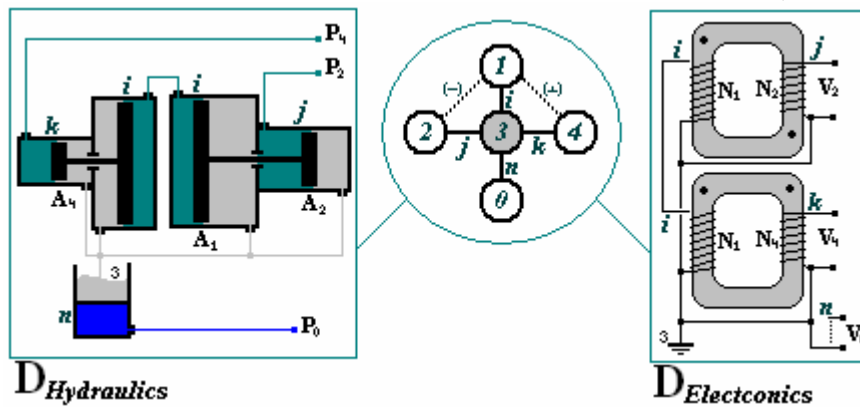
איור-4.18: הוספת דרגת חופש למערכת של שני טרנספורמטורים במערכות הידראולית ואלקטרונית.

השיפור האחרון אותו נעשה במערכת העזר יהיה לשנות חולייה הניטראלית של מערכת מחוליה-3 לחוליה-0 אותה הוספנו בשלב הקודם (איור-4.19). משמעות הנדסית של השינוי יכולה להתפרש כמתן תוספת פוטנציאל למערכת כולה הזוהה בגודלה לזה האלמנט הצומת-0 והפוך בסימנו. שינוי זה ידוע בתורת המכונות כשיטת- Willis [1].

איור-4.19: שינוי החוליה הניטראלית של המערכת המכאנית.

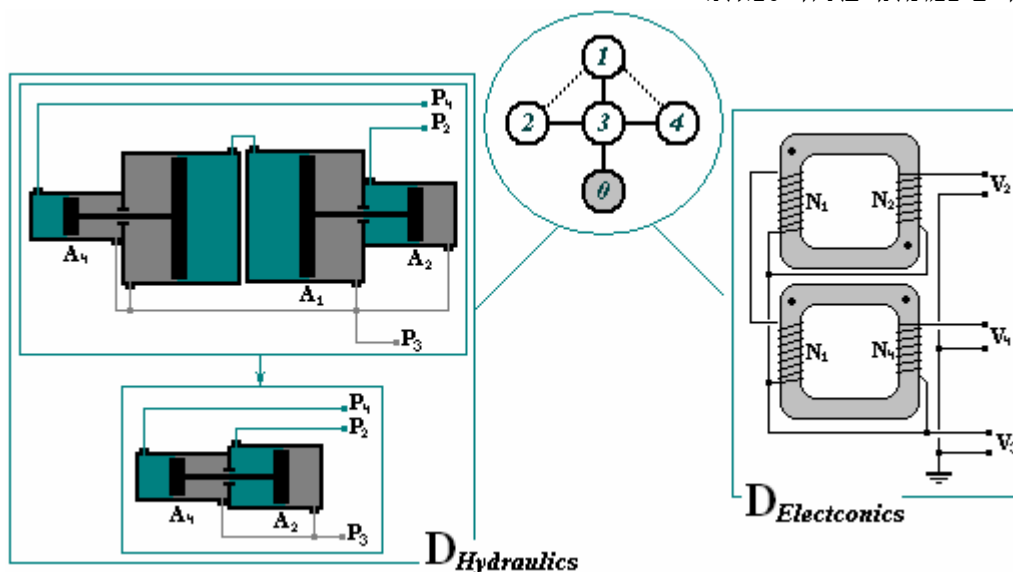


המערכת המתקבלת בעקבות "שיפור" זה מקיימת את כל הדרישות הפונקציונאליות של התכן. כעת נעביר את שינוי שבצענו במערכת המכאנית נעביר מן הייצוג הגרפי למערכות בתחומים ההידראולי והאלקטרוני בסיוע יישום שיטת Willis בתחומים אלו (כמתואר באיור-4.20).



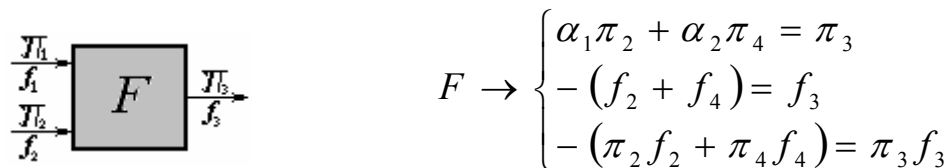
איור-4.20: משמעות הנדסית של שינוי הצומת הניטראלית, בשיטת Willis מתורת המכונות, במערכות ההידראולית ואלקטרונית.

את המערכות שיתקבלו ניתן להוסיף ולשפר על ידי יישום שיקולים הנדסיים של צמצום אלמנטים מיותרים כמתואר באיור-4.20א.



איור-4.20א: פישוט המערכות ההידראולית והאלקטרונית שהתקבלו בשלב הקודם.

המערכות המתקבלות בתחום ההידראולי והאלקטרוני הן מערכות דיפרנציאל בתחומים אלו ומקיימות כל אחת בתחומה את המשוואות (4.10). הפירוש פיזיקאלי לגדלים α_1, α_2 המצוינים בייצוג הגרפי מתואר בטבלה-4.1.



דיפרנציאל מכאני סיבובי:	דיפרנציאל הידראולי:	דיפרנציאל אלקטרוני:	
$\frac{R_2}{R_2 + R_4}$	$\frac{A_2}{A_2 + A_4}$	$\frac{\left(\frac{1}{N_2}\right)}{\left(\frac{1}{N_2}\right) + \left(\frac{1}{N_4}\right)}$	קבוע- α_1
$\frac{R_4}{R_2 + R_4}$	$\frac{A_4}{A_2 + A_4}$	$\frac{\left(\frac{1}{N_4}\right)}{\left(\frac{1}{N_2}\right) + \left(\frac{1}{N_4}\right)}$	קבוע- α_1

טבלה-4.1: פירוש קבועים פיזיקאליים במערכות פיזיקאליות השונות.

4.3.3. ניסוח כללים לבניית דיפרנציאל בתחום הנדסי חד-ממדי:

לאחר תהליך התכן שנעשה בדוגמא הקודמת ניתן לנסח כללים פשוטים לפיתוח מערכת דיפרנציאל בכל תחום הנדסי בעזרת שימוש בייצוג גרפי ללא צורך בפיתוח התכן מחדש. הטבלה הבאה מתארת שלבים בעזרתם ניתן לבנות דיפרנציאל בכל מערכת פיזיקאלית. השלבים מודגמים על מערכת מכאנית סיבובית, חד-ממדית של גלגלי שיניים.

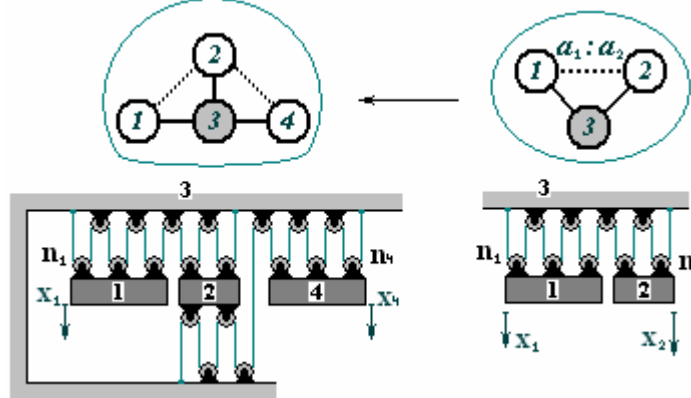
שלב	תיאור מילולי:	גרף PLGR:	סכמת גלגלי שיניים:
שלב-1:	מציאת טרנספורמטור במערכת הפיזיקאלית.		
שלב-2:	חיבור שני טרנספורמטורים שוני סימן בטור.		
שלב-3:	הוספת אלמנט נוסף לאלמנט המייצג את החוליה הניטראלית בחיבור המאפשר דרגת חופש אחת בלבד.		
שלב-4:	העברת תפקיד האלמנט הניטראלי לאלמנט החדש.		

טבלה-4.2: שלבים ליצירת מערכת דיפרנציאל מכאני מהייצוג הגרפי.

4.3.3.1. דוגמה של תכן מערכת דיפרנציאל בתחום מכאני קווי עבור מערכת גלגלות:

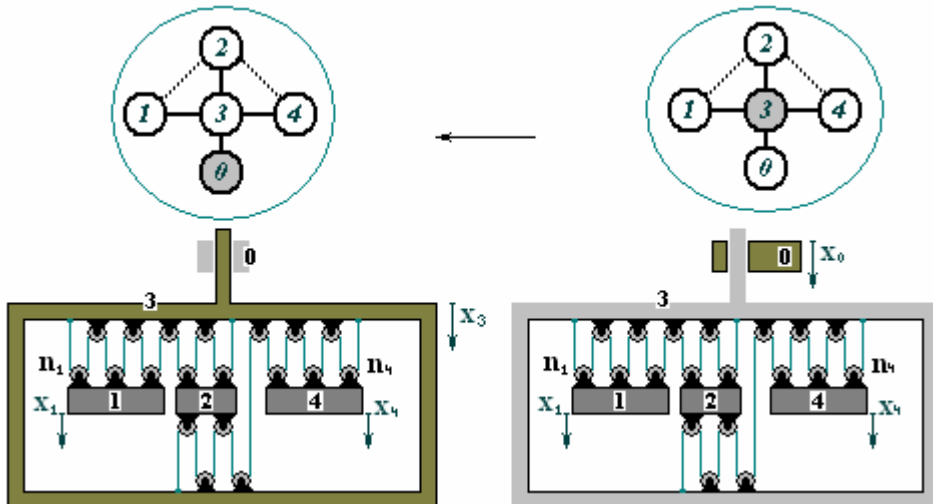
מערכת גלגלות היא אחת המערכות אשר ניתן להגדיר בה טרנספורמטור כמתואר באיור-4.21. ולכן על פי טרנספורמציה של מערכת זאת בהתאם לשלבים המצוינים בטבלה-4.1 ניתן לעשות ממנה תמסורת גלגלות דיפרנציאלית.

שלב-1: הגדרת טרנספורמטור במערכת ההנדסית הנתונה.
 שלב-2: חיבור שני טרנספורמטורים בטור. תמסורת של אחד הופכת סימן ושל שני לא.



איור-4.21: טרנספורמטור של מערכת גלגלות מכאנית קווית.

שלב-3: הוספת חוליה אחת עם דרגת חופש אחת לחוליה ניטראלית.
 שלב-4: שימוש בשיטת Willis- על מנת להחליף את החוליה הניטראלית.



איור-4.22: ביצוע החלפת החוליה הניטראלית.

4.3.4. הפיכת פוטנציאל מוחלט להפרש פוטנציאליים של אלמנט בעזרת דיפרנציאל:

לעיתים קיימת דרישה פונקציונאלית לחבר מערכת אחת דרך שני אלמנטי צומת למערכת שניה. אולם מערכת אחת היא בעלת אופי הנדסי כזה שיכולה להתחבר לאלמנט צומת אחד. במצב כזה יש ליצור מערכת ביניים שלישית אשר תתחבר לשני הצמתים של מערכת-2 ותוציא מוצא שקול ערך עבור מערכת-1 כמתואר באיור-4.23.

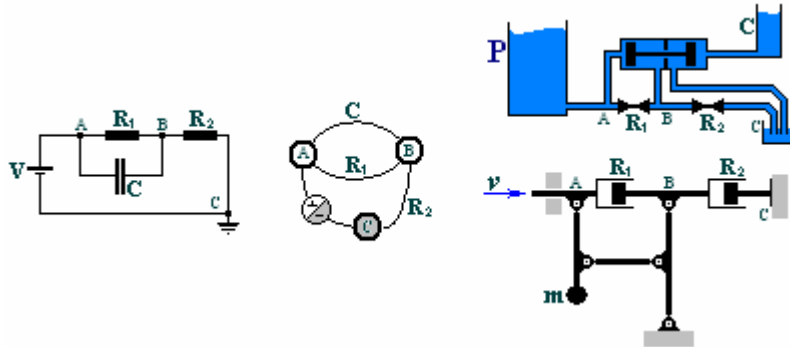


איור-4.23: חיבור מערכת בעלת שתי מוצאות למערכת בעלת מוצא אחד בעזרת מערכת ביניים.

הדבר הכרחי במיוחד כאשר מבצעים טרנספורמציה של קשתות בעלות אופי קיבולי או השראי מאלקטרוניקה למכאניקה. מכיוון שאלמנטים קיבוליים או השראיים במכאניקה או

הידראוליקה מיוצגים בייצוג גרפי כקשתות של אחד הצמתים שלהן חייב להיות צומת ניטראלית. הפתרונות של מערכות מתאמות הניתנים במקרים אלו הם טכניים וללא הסבר שיטת [28]. איור-4.24 מתאר התמרה שכזאת.

איור-4.24: התמרה אנלוגית של מערכת חשמלית למערכת מכאנית ולמערכת הידראולית כאשר הרכיב הקיבולי מותמר בעזרת מערכת עזר.



בעזרת דיפרנציאל ניתן לעשות מערכת אשר תקשר בין צומת אחד עם פוטנציאל מוחלט לבין הפרש פוטנציאלים בין שני צמתים ובאופן זה לעשות את המעבר בין פוטנציאל של צומת להפרש/חיבור פוטנציאלים בין שני צמתים לתהליך שיטתי.

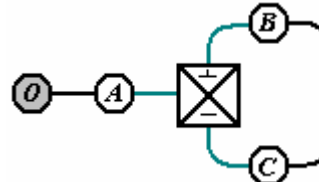
נתונה קשת OA בייצוג גרפי המחוברת לצומת ניטראלית. ואנו רוצים לחבר לשתי צמתים B ו- C כך שהפוטנציאל של צומת A יהיה שווה להפרש פוטנציאלים בין הצמתים B ו- C . כלומר $\pi_A = \Delta_{BC}$

איור-4.25: חיבור קשת דרך צומת אחת למערכת עם שני צמתים.



נרשום את הביטוי $\pi_A = \Delta_{BC}$ כדלקמן: $\pi_A = \pi_B - \pi_C$ הביטוי האחרון מראה שהמערכת המתאמה במקרה זה היא מערכת חיסור של פוטנציאלים אותה מקבלים בעזרת דיפרנציאל עם טרנספורמטורים בעלי יחס תמסורת 1:1. כמתואר באיור-4.10.

איור-4.26: חיבור קשת דרך צומת אחת למערכת עם שני צמתים בעזרת דיפרנציאל.



במקרה ובוחרים להשתמש בדיפרנציאל בלבד נקבל כי:

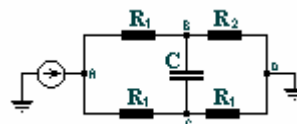
$$\frac{(\pi_B - \pi_C)}{2} = \pi_A$$

ולכן ניתן להוסיף בטור גם טרנספורמטור שאינו הופך סימן עם תמסורת 1:2, או לחילופין לקחת אלמנט קיבולי הגדול פי שתיים מן האלמנט המקורי.

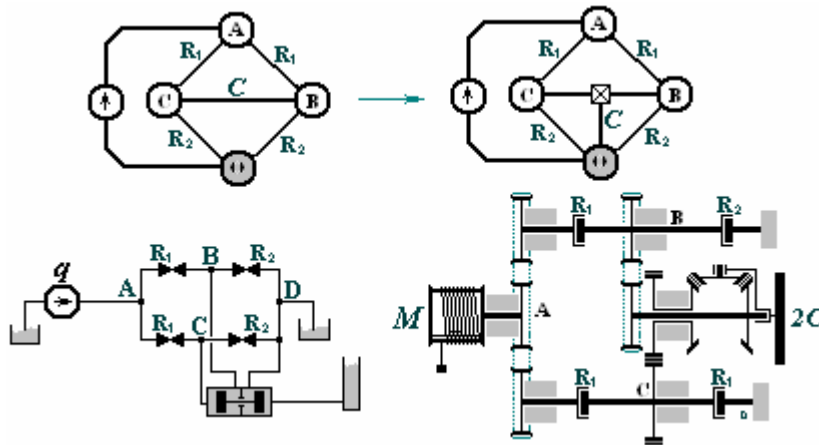
4.3.9.1 דוגמא:

נתונה מערכת חשמלית.

איור-4.27: מערכת חשמלית.



יש למצוא מערכת מכאנית ומערכת הידראולית אשר תהיינה אנלוגיות למערכת החשמלית. פתרון:



איור-4.28: מערכות מכאנית והידראולית אנלוגיות.

הערה:

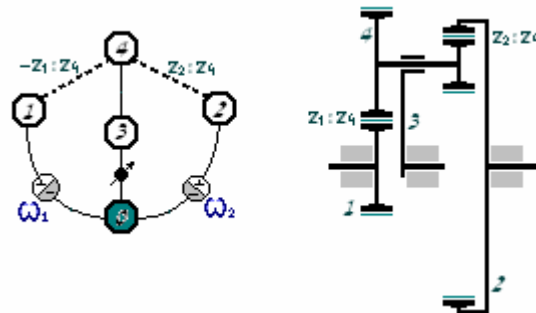
בשני המקרים בנוסף לדיפרנציאל משתמשים גם בטרנספורמטור 1:1 הופך סימן, כמו כן הצורה של קבל הידראולי כמיכל מתאימה רק למפל לחץ חיובי עליו.

4.3.5. מערכת דואלית לדיפרנציאל:

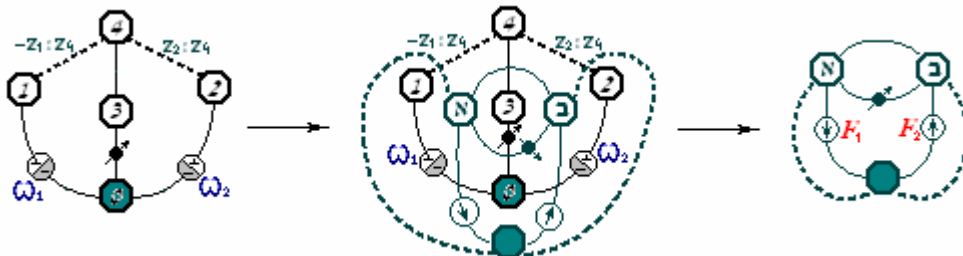
מערכת דואלית למערכת מכאנית קינמטית היא מערכת מכאנית סטטית [27] במקרה. של הדיפרנציאל המייצג על ידי ייצוג גרפי מסוג-PLGR, גרף שהפרשי הפוטנציאלים בו לא תלויים בזרימות, ייצוג המערכת הדואלית יהיה FLGR, גרף שהזרימות בו לא תלויות בהפרשי הפוטנציאלים. בדוגמא שבאיור-4.30 מופיע דיפרנציאל כללי ביותר והגרף שלו. הצורה הגיאומטרית והטופולוגית של הגרף שנבחרה במקרה זה שונה מזה המתואר באיור-4.10 הסיבה לכך היא שכל המעגלים בגרף המייצג הם סגורים ולכן גם כל הפאות של הגרף מוגדרות היטב דבר שיאפשר בהמשך להגדיר את הייצוג הדואלי.

איור-4.30: דיפרנציאל גלגלי

שיניים כללי וגרף PLGR שלו. הכניסות של המערכת בדוגמא זו הן מהירויות זוויתיות של החוליות 1 ו-2 והמוצא היא מהירות זוויתית של חוליה-3.



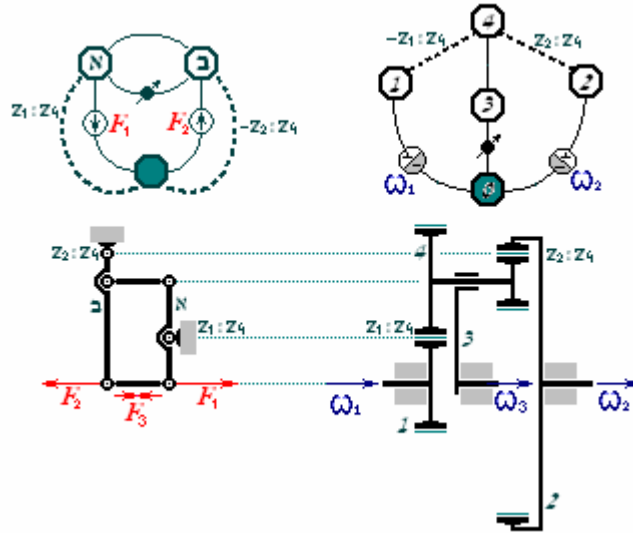
מציאת הייצוג הדואלי מתוארת באיור-4.30, כאשר כל פאה פנימית של הגרף המקורי הופכת לצומת בדואלי והפאה החיצונית של כל הגרף הופכת לחוליה ניטראלית של המבנה.



איור-4.31: ביצוע גרף דואלי לגרף הדיפרנציאל.

בבואנו לממש את המערכת הדואלית לדיפרנציאל ברמת האלמנט הצפי הוא שאותה ההתנהגות של הפוטנציאלים במנגנון הקינמטי צריכה להופיע בזרימת כוחות במערכת הסטטית הדואלית באופן חד-חד-ערכי. מכיוון שהדיפרנציאל ברמת האלמנט הוא מנגנון עם שתי דרגות חופש לכן המערכת הדואלית שלו ברמת האלמנט צריכה להיות מערכת מסוימת סטטית עם שני כניסות של כוחות. איור-4.32 מתאר את מימוש המערכת הדואלית מהייצוג הגרפי.

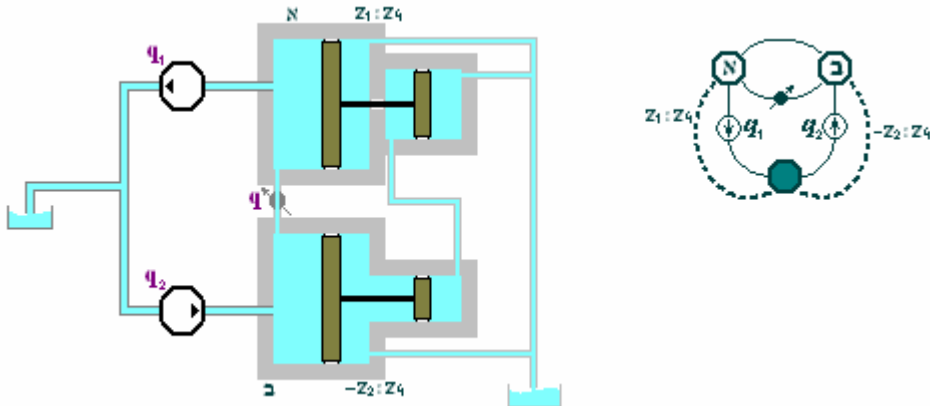
איור-4.32: מימוש מערכת אנלוגית לדיפרנציאל. מידות המבנה הסטטי נלקחות מתוך היחסים במבנה המנגנון המקורי. המערכת המכאנית הסטטית היא מערכת קורות מסוימת סטטית. כמו מהירותה שבדיפרנציאל הזוויתית של חוליה-3 היא ממוצע המהירויות של חוליות הכניסה 1 ו-2 כך גם במערכת המכאנית הכוח הפועל באלמנט הדואלי של חוליה-3 הוא ממוצע של כוחות כניסה הפועלים על כל המערכת.



ניתן לראות כי המאפיין הכללי של המבנה הדואלי במקרא של הדיפרנציאל הוא שתי הפאות הפנימיות שבגרף המקורי שהופכות לשני צמתים (המסומנים בגרף באותיות עבריות "א" ו-"ב") שני הצמתים הללו בהכרח מייצגים שני אלמנטים פיזיקאליים בעלי פוטנציאל קבוע כל אחד. במקרה של מערכת גלגלי שיניים כגון, הדיפרנציאל, בה הפוטנציאל מייצג מהירות זוויתית הופכים שני האלמנטים לטרנספורמטורים בעלי יחס תמסורת הפוך מזה שבמערכת המקורית.

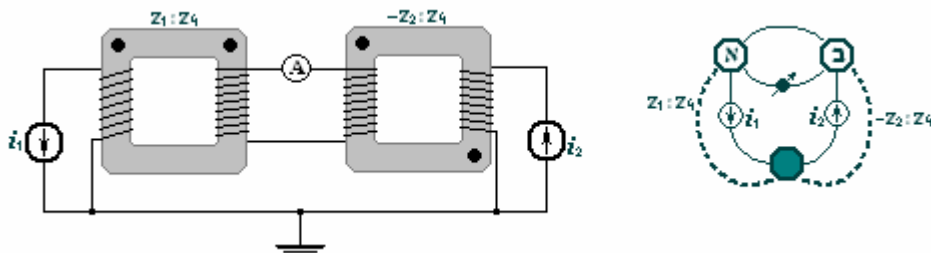
4.3.5.1. דואלי של דיפרנציאל במערכת הידראולית וחשמלית.

כפי שפותח דיפרנציאל מכאני דואלי ניתן לפתח מערכת הידראולית הדואלית לדיפרנציאל הידראולי. במערכת המתוארת באיור-4.33 שני הצמתים א' ו-ב' הופכים לטרנספורמטורים של זרימה באותו היחס תמסורת של הפוטנציאלים במערכת המקורית ובהיפוך סימן. הספיקה דרך האלמנט הדואלי לאלמנט המוצא תהיה ממוצע הספיקות בכניסה.



איור-4.33: מערכת הידראולית של הדואלי לדיפרנציאל.

באותו העיקרון ניתן גם לבנות מערכת דיפרנציאלית חשמלית דואלית אשר תזרים במקום המיועד זרם באותו היחס של הפוטנציאל במוצא במקרה של הדיפרנציאל.

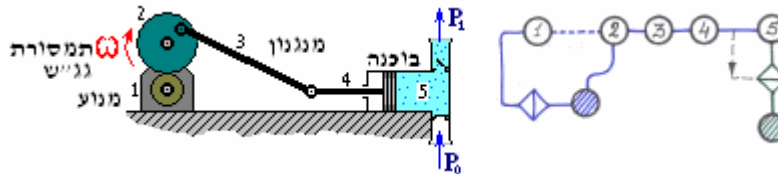


איור-4.34: מערכת חשמלית דואלית לדיפרנציאל החשמל.

פרק-5: תכן מקורות תלויים בעזרת ייצוג משולב (Integrated Representation).

5.1. מבוא:

בפרקים הקודמים התייחסנו לתכן מערכות הנדסיות השייכות לתחום הנדסי ספציפי ומוגדר. לעיתים נדרש מאיתנו לתכנן מערכת רב-תחומית המורכבת ממספר תת-מערכות אשר כל אחת מהן שייכת לתחום הנדסי אחר. ייצוג מערכות רב-תחומיות כאלה נקרא ייצוג משולב [23]. בייצוג משולב מייצגים מספר תת-מערכות הנדסיות מתחומים הנדסיים שונים המרכיבות יחד מערכת אחת עם התניה פנימית. כלומר, מערכת גדולה שהיא חיבור מספר תת-מערכות שבכל אחת ואחת מהן מוגדרים משתני זרימה/פוטנציאל פרטיים משלה ובכל המערכת הגדולה יש יותר מסוג אחד של זרימה/פוטנציאל כמתואר בדוגמא שבאיור-5.1. בין הזרימות והפוטנציאלים מתחומים השונים קיימים קשרים.

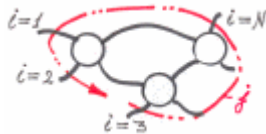


איור-5.1: מערכת מדחס אוויר שהיא שילוב של מספר מערכות הנדסיות מתחומים שונים למערכת אחת.

הייצוג הגרפי של המערכת הכוללת יכול להיות כאיחוד סך כל הייצוגים של כל תת-המערכות גם אם ייצוגים אלו שונים זה מזה כל עוד משתנה הפוטנציאל מתאים לצמתים ומשתנה הזרימה לקשתות. החוקים שצריכים להתקיים בייצוג כזה הם חוק הזרימות וחוק הפוטנציאלים עבור כל סוג של משתני זרימה/פוטנציאל בנפרד.

חוק הזרימות עבור מערכת משולבת:

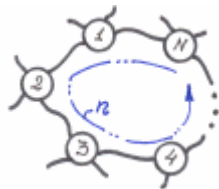
בכל חתך- j שבגרף הייצוג המשולב, עבור כל סוג זרימה- i סכום הזרימות בחתך צריך להיות אפס.



$$\forall i, j \quad \sum_{\substack{k=1 \\ \text{Cutset}-j}}^N f_k^i = 0$$

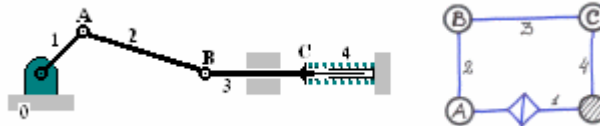
חוק הפוטנציאלים עבור מערכת משולבת:

עבור כל מעגל- n שבגרף הייצוג המשולב ועבור כל סוג פוטנציאל- p סכום הפרשי הפוטנציאלים במעגל צריך להיות אפס.



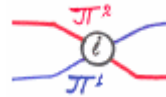
$$\forall p, n \quad \sum_{\substack{k=1 \\ \text{Circuit}-n}}^N (\pi_{k+1}^p - \pi_k^p) = 0$$

בייצוג הגרפי של המערכת הכוללת אפשרי שתת-גרף מסוים יהיה שייך למערכת הנדסית מסוג אחד ותת-גרף אחר למערכת מסוג אחר. כמו כן יתכן גם כי תת-גרף נוסף ישתייך בו זמנית לשתי המערכות גם יחד כמתואר בדוגמא שבאיור-5.2.



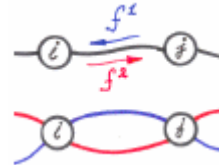
איור-5.2: מערכת קינמטית ומערכת סטטית בייצוג אחד והגרף שלה. האלמנטים השייכים למערכת הקינמטית הם: O, A, B, C, 1, 2, 3, 4, O. ואלו השייכים למערכת הסטטית הם: C, 4, O. האלמנטים C, O שייכים לשתי המערכות גם יחד.

כאשר צומת מסוימת בייצוג הכולל משותפת לשתי תת-מערכות שונות אזי היא מקבלת שני סוגי פוטנציאלים.



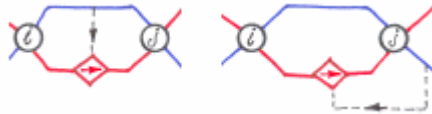
איור-5.3: שני סוגי פוטנציאלים בצומת אחת.

כאשר קשת- j בייצוג הכולל משותפת לשתי תת-מערכות שונות אזי עוברים דרכה שתי זרימות שונות f^1, f^2 . במידה ושתי זרימות העוברות דרך אותה קשת הן בלתי תלויות זו בזו (כגון זרם חשמלי וכוח מכאני), ניתן להפריד לשתי קשתות כך שבכל אחת מהן תזרום רק זרימה מסוג אחד (איור-5.4).



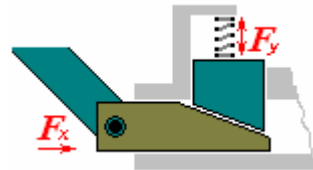
איור-5.4: פיצול אפשרי של קשת בה זורמים זרימות מסוגים שונים.

אם שתי הזרימות תלויות אחת בשנייה או בזרימה של קשת אחרת, ניתן גם במקרה זה להפריד את הקשת לשתי קשתות אולם בתוספת מקור תלוי.



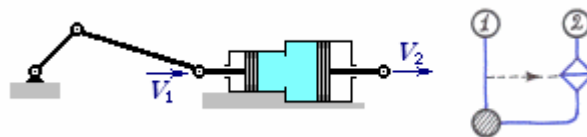
איור-5.5: פיצול קשתות תוך שימוש במקורות תלויים.

במקרים מסוימים סוגי הזרימות בשתי תת-מערכות הם מאותו סוג פיזיקאלי (כגון כוח במערכת מכאנית דינאמית וכוח במערכת מכאנית סטטית). במקרים אלו אפשרי שהזרימה בכל הקשתות של הייצוג הגרפי הכולל תהיה אחידה אך במידת הצורך נעדיף, גם במקרים אלו, להפריד קשת מסוימת לשתי קשתות ולקבוע סוג זרימה שונה בכל אחת (כגון שהכוח במערכת הדינאמית הוא בציר- x ובמערכת הסטטית הוא בציר- y).



איור-5.6: דוגמא למערכת הנדסית משולבת בה קיים אותו סוג זרימה אך בכיוונים שונים.

במערכות משולבות בהן משתני הכניסה לכל המערכת ומשתני המוצא ממנה הן מאותו הסוג של משתני זרימה/פוטנציאל ניתן לפשט את הייצוג הגרפי תוך וויתור על ייצוג מפורט של המבנה הפנימי של המערכת הכוללת. פישוט זה נעשה על ידי כך שמחליפים את הייצוג של תת-מערכות בהן משתני זרימה/פוטנציאל מסוג אחר במקורות זרימה/פוטנציאל תלויים כמתואר באיור-5.6א.



איור-5.6א: טרנספורמטור הידראולי בייצוג PGR בעל כניסה ומוצא של המערכת המכאנית. ניתן לראותו כטרנספורמטור מכאני או כמקור תלוי.

5.2. שלבי התכן:

שלבי התכן הבאים מרכיבים שיטה לתכן מערכות רב-תחומיות בהן הכניסה והמוצא ניתנות לאפיון על ידי סוג אחד של משתני זרימה/פוטנציאל.

שלב-1 הגדרת בעיית התכן בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל:

שלב זה דומה לשלב המקביל לו בפרקים הקודמים.

איור-5.7: הגדרת בעיית התכן.

$$\begin{matrix} \pi_{in} \\ f_{in} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} S_0 \\ S_0 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \pi_{out}(\pi_{in}, f_{in}, t) \\ f_{out}(\pi_{in}, f_{in}, t) \end{matrix}$$

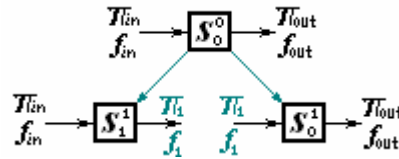
כאשר s_0^0 תוגדר כמערכת ממשית בתחום- D_h אותה אנו מחפשים.

בהמשך התהליך ניבנה את המערכת- s_0^0 תוך מספר איטרציות וממספר תת-מערכות שכל אחת מהן תיקרא- s_m^n . האינדקס העליון- n יציין את מספר האיטרציה והאינדקס התחתון- m יציין אם המערכת הינה מערכת מוצא ($m=0$) או מערכת מבוא ($m=1$) כפי שיוסבר בהמשך.

שלב-2 פיצול בעיית התכן:

במידה ולא מוצאים פתרון עבור בעיית התכן הכוללת המתוארת בשלב-1, מפצלים בעיית התכן לשתי בעיות, בעיית מוצא ובעיית כניסה כמתואר באיור-5.8 ובמקום חיפוש מערכת אחת s_0^0 מחפשים שתי מערכות s_0^1 ו- s_1^1 .

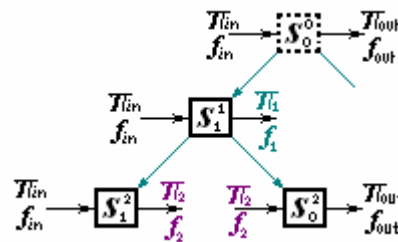
איור-5.8: פיצול בעיית התכן המקורית.



פתרון בעיית המוצא: תחילה פותרים את בעיית המוצא בכך שמוצאים מערכת- s_0^1 , בכל שיטה שהיא, שמוצאה היא פתרון בעיית התכן המקורית. מערכת זאת יכולה להיות מערכת משולבת כך שבכניסתה משתני הפוטנציאל/זרימה יהיו מסוג הנדסי אחר כמו כן מספר כניסותיה של s_0^1 יכולות להיות שונים במספרם ובאופיים מאלו של s_0^0 . במידה ויש יותר מתת-פתרון אחד עבור s_0^1 בוחרים את הפתרון המסתבר ביותר ועוברים לשלב הבא של פתרון בעיית הכניסה.

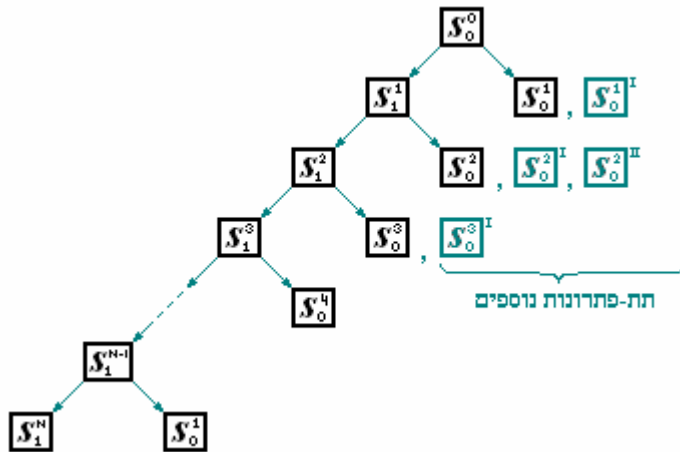
פתרון בעיית הכניסה: בשלב הבא לאחר שנפתרה בעיית המוצא עוברים לפתרון בעיית הכניסה שבו מחפשים מערכת s_1^1 שכניסותיה הן הכניסות של המערכת s_0^0 (שהיא הבעיה המקורית) ומוצאה היא כניסותיה של מערכת המוצא- s_0^1 כמתואר באיור-5.8. במידה ולא מצליחים לפתור את בעיית הכניסה אזי שוב עושים פיצול לבעיית התכן והפעם רק עבור בעיית הכניסה דהיינו עבור- s_1^1 כמתואר באיור-5.9.

איור-5.9: פיצול נוסף של בעיית הכניסה.



תחילה מחפשים את המערכת המשולבת s_0^2 (מערכת המוצא של הכניסה) שמוצאה הוא המוצא של s_1^1 וכניסתה כלשהי. לאחר מכן מחפשים את המערכת s_1^2 בהתאם למוצאה של s_0^2 ולכניסתה של s_1^1 או s_0^0 .

אם לא מוצאים את s_1^2 אזי ממשיכים בתהליך זה בצורת עץ תת-פתרונות כפי המתואר באיור-5.10 עד אשר תוך מספר סביר- N של שלבים מוצאים גם את המערכת s_1^N . בתהליך זה בו הולכים מהמוצא אל הכניסה בכל שלב- K עשויים להיות מספר פתרונות עבור מערכת s_0^K כלשהי. לפתרונות אלו ניתן יהיה לחזור (לטפס חזרה בעץ תת-הפתרונות) במידה והפתרון לא מתכנס או מגיעים למבוי סתום.



איור-5.10: תיאור שיטת התכנ בצורת עץ תת-פתרונות אשר במהלכה מחלקים את בעיית התכנ המקורית למספר גדל והולך של תת בעיות כאשר הולכים בכיוון הפוך מהמוצא של הבעיה ההתחלתית אל כניסתה.

שלב-3 ייצוג גרפי עבור תת-הפתרונות המתקבלים:

תת המערכות $s_1^N, s_0^N, s_0^{N-1}, s_0^{N-2}, \dots, s_0^2, s_0^1$ הן תת-הפתרונות של בעיית התכנ. לכל אחת מהן עושים ייצוג גרפי מהסוג המתאים לה ובהרבה מהמקרים ייצוג זה יהיה מעורב כך שבהתאמה למערכות מתקבלים תת-ייצוגים $g_{1,N}, g_{0,N}, g_{0,N-1}, \dots, g_{0,3}, g_{0,2}, g_{0,1}$.

שלב-4 סינתזה של תת-הפתרונות ותת-הייצוגים:

תחילה מאחדים את כל תת-הייצוגים הגרפיים של כל תת-הפתרונות לייצוג אחד:

$$g_{1,N} \cup g_{0,N} \cup g_{0,N-1} \cup \dots \cup g_{0,3} \cup g_{0,2} \cup g_{0,1} = g_0$$

כאשר מוצא של כל ייצוג $g_{0,k}$ הוא הכניסה של $g_{0,k-1}$. ולאחר מכן מאחדים את כל המערכות הממשיות תוך העזרות בטופולוגיה של הייצוג הכולל במידת הצורך.

$$s_0^0 = s_1^N \cup s_0^N \cup s_0^{N-1} \cup s_0^{N-2} \cup \dots \cup s_0^3 \cup s_0^2 \cup s_0^1$$

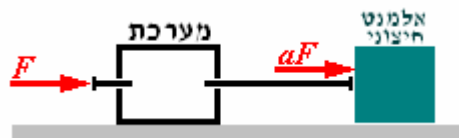
בסוף תהליך זה יש בידינו גם מערכת הנדסית s_0^0 שהיא הפתרון גם ייצוג כולל שלה g_0 .

נדגים שימוש בשיטת תכנ זאת בפיתוח המערכות הבאות.

5.3. פתוח מקור זרימה תלוי זרימה במערכת מכאנית קווית חד-ממדית:

הגדרת הדרישות הפונקציונאליות:

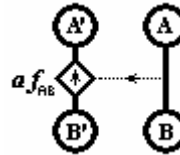
יש לתכנן מערכת קינמטית מכאנית קווית אשר בכניסתה מפעילים עליה כוח-F בכיוון האופקי והיא מוציאה כוח בגודל- aF (קבוע כלשהו) על כל אלמנט חיצוני הקיים במוצאה ללא תלות במהירותו ביחס למערכת כמתואר באיור-5.11.



איור-5.11: תיאור סכמאתי של הדרישות הפונקציונאליות ממערכת מקור כוח תלוי כוח.

שלב-1 הגדרת בעיית התכנ בעזרת רשימת דרישות פונקציונאליות (Functional Requirements) על פי משתני זרימה/פוטנציאל:

במקרה זה קיים ייצוג גרפי כללי המגדיר את מהות המערכת (איור-5.11). מייצוג זה אומנם לא ניתן לממש את המערכת בתחום הנדסי כלשהו אך ניתן להגדיר על פיו את הבעיה ההנדסית במונחים של זרימות/פוטנציאלים.



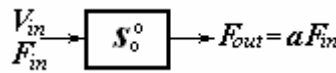
איור-5.11: ייצוג מקור זרימה תלוי זרימה.

על פי הייצוג ניתן לראות כי הזרימה בקשת A'B' תלויה ליניארית בזרימה של הקשת AB ואינה תלויה בהפרש הפוטנציאלים $\Delta_{A'B'}$. לקשת AB אין התנגדות משלה ולכן $\Delta_{AB} = 0$ או במילים אחרות $\pi_A = \pi_B$.

על פי תיאור זה ניתן להגדיר את המערכת אותה אנו רוצים לתכנן כמערכת שבכניסתה יש או יתכן פוטנציאל- π_{in} ($\pi_A = \pi_B = \pi_{in}$) וכמוכן זרימה- f_{in} , ובמוצאה יש זרימה- $f_{out} = \alpha \cdot f_{in}$ אשר אינה תלויה בשום דבר נוסף.

בתחום המקורי בבעיה זו שהוא תחום "קינמטי מכאני קווי" הזרימה היא כוח קווי והפוטנציאל הוא מהירות קווית. כיוון שהמערכת חד-ממדית הכיוון של הכוח ושל המהירות הוא באותו הציר הגיאומטרי וניקד אותו כציר-X. תיאור סכמאטי של המערכת מתואר באיור-5.12.

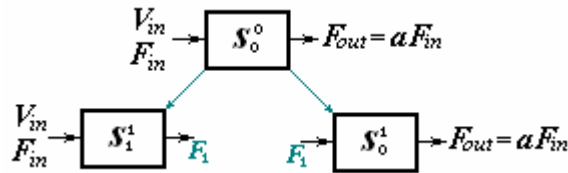
איור-5.12: תיאור בעיית התכנן של מקור זרימה תלוי זרימה במערכת מכאנית קווית.



שלב-2 פיצול בעיית התכנן + שלב-3 ייצוג גרפי של תת-הפתרונות:

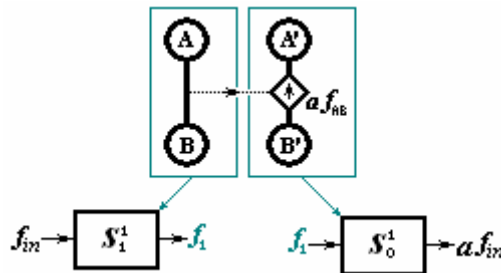
נחלק את בעיית התכנן לבעיית מוצא ובעיית כניסה כמתואר באיור-5.13:

איור-5.13: פיצול בעיית התכנן לבעיית מוצא ובעיית כניסה.



כאשר בשלב הראשון נניח לצורך הפשטות כי הכניסה במערכת- s_0^1 היא זרימה בלבד (מסוג כלשהו) אפשרות סבירה לכך ניתן להניח מהייצוג עצמו בו החלוקה לשתי מערכות די ברורה כמתואר באיור-5.14.

איור-5.14: פיצול בעיית התכנן לשתיים אל פי הייצוג.

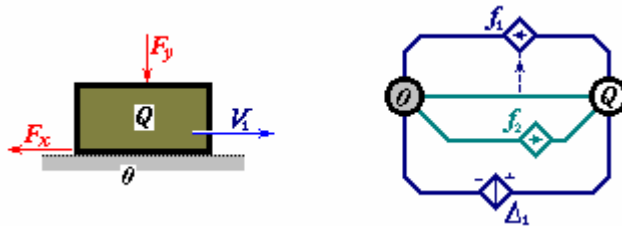


עבור המערכת s_0^1 אנו מחפשים מערכות פשוטות ככל הניתן אשר נותנות במוצאן כוח התלוי ביחס כלשהו (רצוי יחס ישר) בזרימה ופוטנציאל מסוג הנדסי כלשהו בכניסה.

$$\begin{matrix} T_1 \\ f_1 \end{matrix} \rightarrow \boxed{S_0^1} \rightarrow F_x = a f_1 + b T_1$$

איור-5.14: תרשים למערכת המבוא.

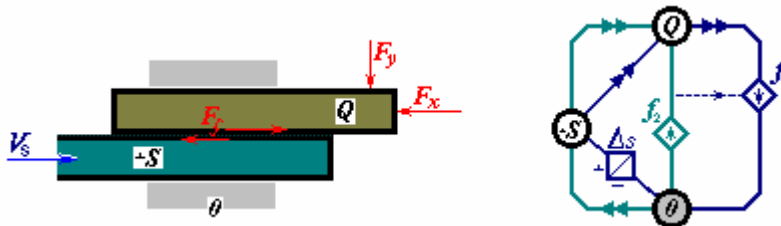
ידוע מערכת פשוטה המבצעת פונקציונאליות דומה מאד המתוארת באיור-5.15. המערכת מבוססת על חיכוך החלקה, על העובדה שגודל הכוח המועבר הוא פונקציה של כוח הלחיצה הנורמאלי ואינו פונקציה של מהירות.



$$F_x = -\mu \frac{v_1}{|v_1|} F_y \quad f_1 = -\mu \frac{\Delta_1}{|\Delta_1|} f_2$$

איור-5.15: חיכוך החלקה במערכת מכאנית קווית וייצוג גרפי שלו (FGR).

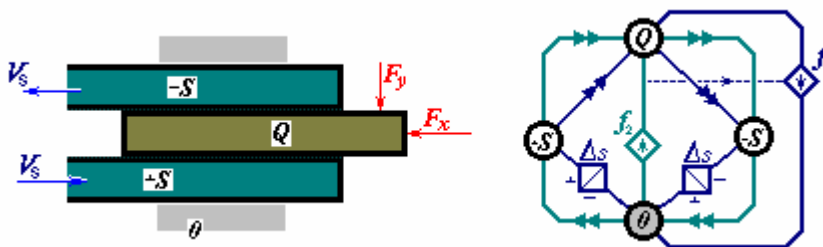
הוספת דרגת חופש בעזרת אלמנט נוסף המחובר למקור מהירות חיצוני V_s כמתואר באיור-5.16. תהפוך מערכת זו מקור כוח תלוי כוח ממש.



$$F_x = \mu \cdot F_y \quad f_1 = a \cdot f_2$$

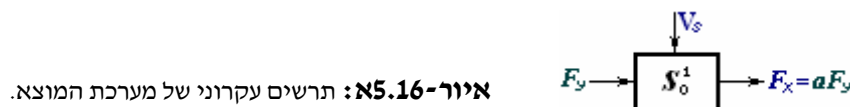
איור-5.16: מערכת מקור כוח בכיוון ציר-X התלוי בכוח לחיצה בציר-Y. בייצוג הגרפי האלמנטים אשר מעבירים שתי סוגי זרימה מפוצלים לשני קשתות. הקשתות הירקות עבור מערכת סטטית והכחולות עבור הקינמטית.

ניתן להמשיך ולשכלל מערכת פשוטה זאת באופן שתתפקד כמקור כוח בכיוון ציר-X התלוי בכוח לחיצה נורמאלי בכיוון ציר-Y עבור שני כיווני פעולת הכוח. מערכת כזאת וייצוגה הגרפי מתוארים באיור-5.16א. תנועת המערכת בציר-Y היא תמיד אפס ולכן המערכת בציר זה היא מערכת מכאנית סטטית. המערכת הכוללת הנוצרת היא מערכת משולבת.



איור-5.16א: מערכת מקור כוח בכיוון ציר-X התלוי בכוח לחיצה בציר-Y. המערכת מתפקדת כמקור תלוי עבור כוח שיכול לפעול גם בכיוון השלילי.

האלמנטים $S, -S$ שבמערכת מחוברים למקורות מהירות $v_s, -v_s$ בהתאמה המספקים מהירות גדולה בהרבה מכל מהירות אחרת הקיימת במערכת וזאת לצורך הפרשי המהירויות הנצרכים עבור חיכוך החלקה. במערכת שנתקבלה כוח המוצא תלוי רק בזרימה שבמבוא שגם היא כוח. מקורות המהירות $v_s, -v_s$ הנם אלמנטים שלא ניתנים שינוי כלשהו כלומר אינן נחשבות כחלק מן הכניסה אלא איזושהי תכונה פנימית של המערכת- s_0^1 .

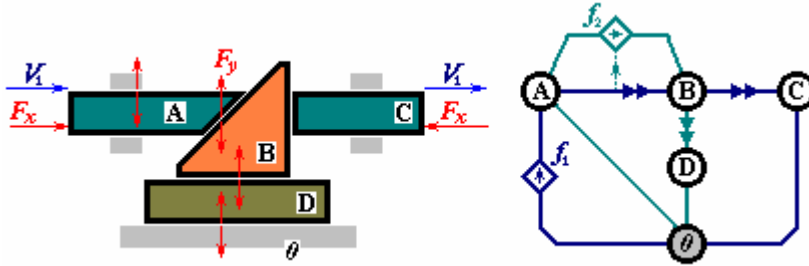


איור-5.16א: תרשים עקרוני של מערכת המוצא.

עבור המערכת s_1^1 שכניסתה היא מהירות וכוח בציר-X ומוצאה הוא כוח בציר-Y התלוי ביחס ישר בכוח שבכניסה (איור-5.16ב), ניתן למצוא מערכת דוגמת זו שבאיור-5.17.

איור-5.16ב: תרשים עקרוני של מערכת המבוא. $F_x \rightarrow [s_1^1] \rightarrow F_y = bF_x$

זוהי אפשרות אחת מן הרבות המקיימת את הדרישות הפונקציונאליות.



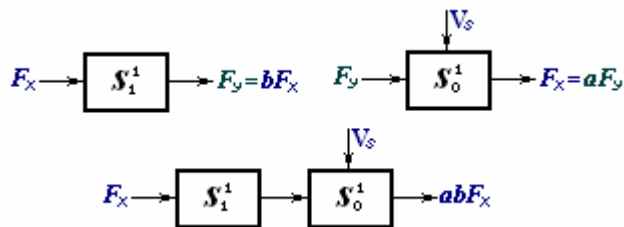
$$F_y = kF_x \quad f_y = kf_x$$

$$k = \tan(\theta)$$

איור-5.17: מערכת קינמטית דו-ממדית שהכניסה והמוצא שלה הם חד-ממדיים. מערכת זאת משולבת עם מערכת סטטית כך שכוח ניצב מועבר אליה דרך אלמנט-D.

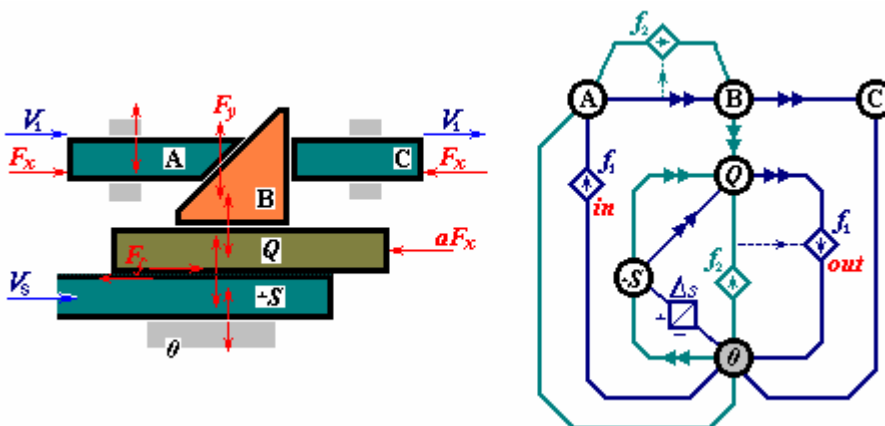
שלב-4 סינתזה של תת-הפתרונות ותת-הייצוגים:

בשילוב של שתי המערכות s_0^1 ו- s_1^1 ובייצוגים הגרפיים $g_{1,0}$ ו- $g_{1,1}$ האלמנטים של המוצא במערכת הכניסה- s_1^1 הופכים להיות האלמנטים של הכניסה. במערכת המתוארת באיור-5.17 מערכת המוצא היא- s_0^1 .



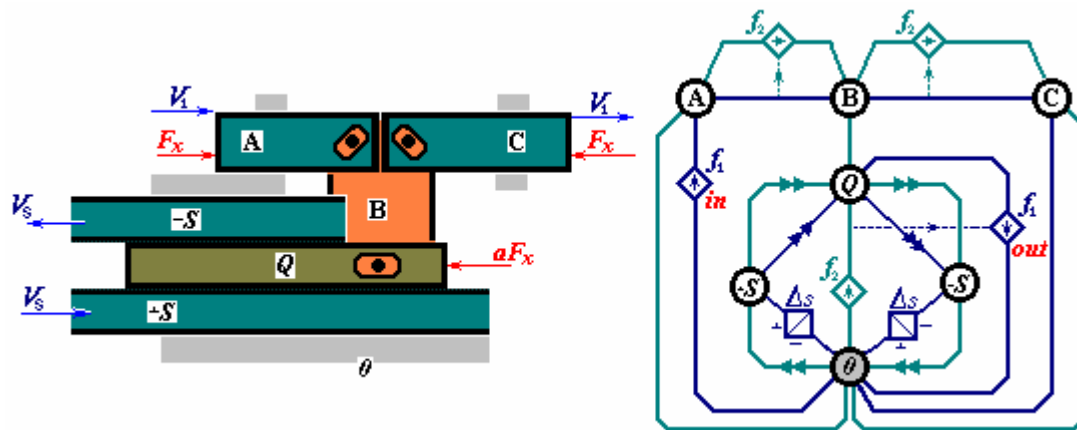
איור-5.17א: תרשים שילוב מערכת המוצא ומערכת המבוא בטור למערכת אחת.

בהתאם לשילוב זה מתקבלת המערכת שבאיור-5.18.



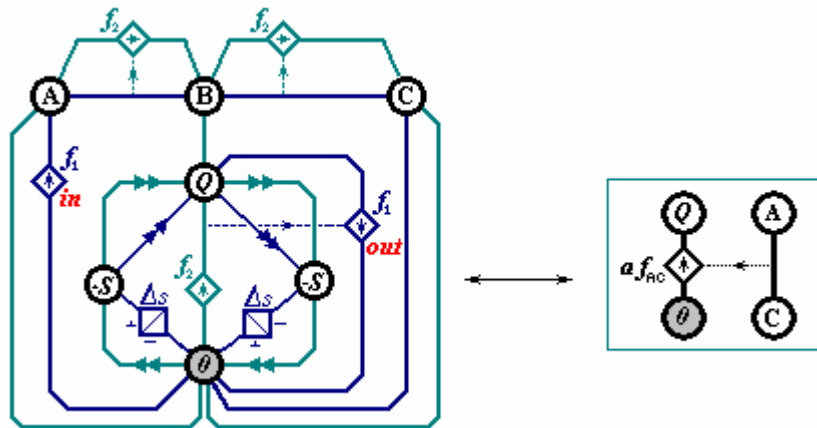
איור-5.18: מימוש מערכת מקור זרימה תלוי זרימה בתחום מכאני קווי.

עבור מקרה כללי בו כוח הכניסה גם חיובי וגם שלילי מערכת זאת (איור-5.18) ניתן להביא לצורה המתוארת באיור-5.19.



איור-5.19: מערכת מקור זרימה תלוי זרימה כללית והייצוג שלה.

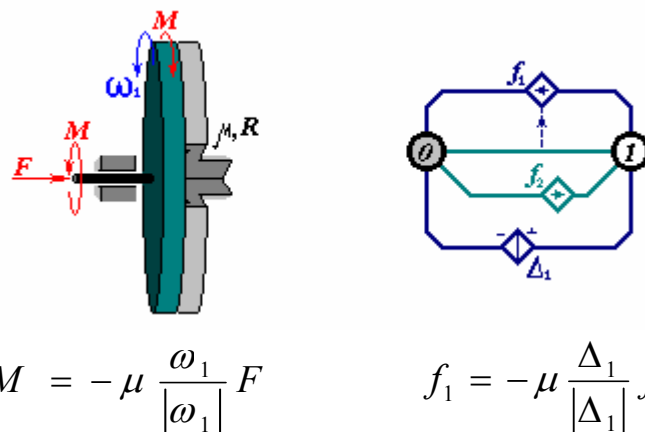
במערכת שהתקבלה משתני הפוטנציאל והזרימה בכניסה ובמוצא הם מאותו הסוג (מהירות קווית, כוח קווי בציר - X). ניתן לפשט את הייצוג שקיבלנו על ידי כך ש"נזרוק" מתוכו את כל מה שאין לנו עניין בו, הווי אומר, את כל ייצוגי האלמנטים היוצרים את התלות המורכבת בין הכניסה למוצא, ונשאיר רק את הכניסה ומוצא עצמם. הייצוג המפושט שיתקבל הוא בדיוק מקור זרימה תלוי זרימה כמתואר באיור-5.19א.



איור-5.19א: ייצוג מפושט של מערכת מקור זרימה תלוי זרימה.

5.4. תכן מערכת מקור זרימה תלוי זרימה במערכת מכאנית סיבובית.

נתבסס על הייצוגים הגרפיים הקיימים מהתכן של המערכת בתחום המכאני הקווי ונעביר תכן זה לתחום המכאני הסיבובי בעזרת טרנספורמציה הפוכה של ייצוג המשותף. נזכיר כי בתחום הקינמטי סיבובי הזרימות הן מומנטים והפוטנציאלים הם מהירויות סיבוביות. תחילה נעביר את הייצוג המשותף של מערכות באיורים-5.15, 5.15, 5.15 לתחום מכאני סיבובי כמתואר באיורים-5.20 ו-5.21.

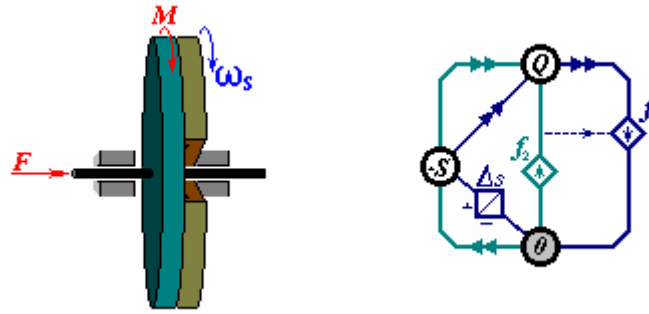


$$M = -\mu \frac{\omega_1}{|\omega_1|} F$$

$$f_1 = -\mu \frac{\Delta_1}{|\Delta_1|} f_2$$

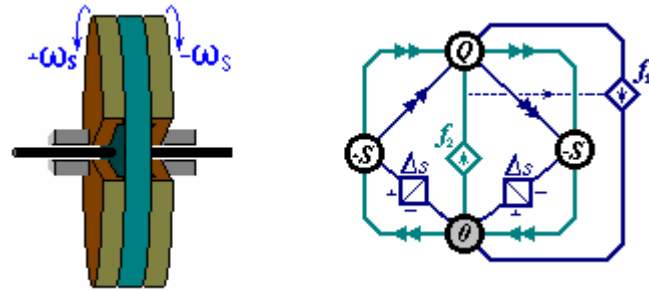
איור-5.20: מנגנון חיכוך החלקה במערכת מכאנית סיבובית האנלוגית למערכת הקווית שבאיור-5.15.

איור-5.21: מערכת מוצא משופרת בתחום מכאני סיבובי האנלוגית למערכת הקווית שבאיור-5.15.



נשפר מערכת זו על ידי שנעשה טרנספורמציה הפוכה לייצוג גרפי של מערכת שבאיור-5.15 לתחום המכאני סיבובי ונקבל את המערכת שבאיור-5.21א.

איור-5.21א: מערכת מוצא משופרת בתחום מכאני סיבובי.

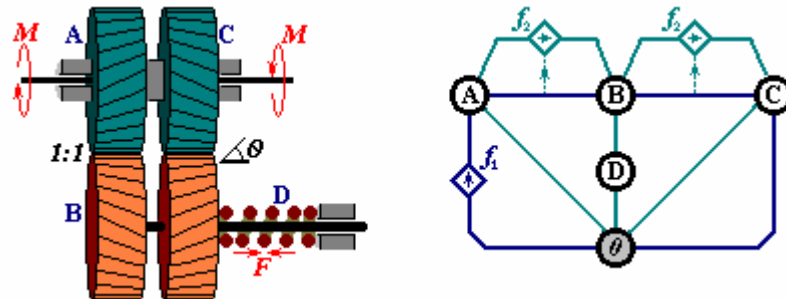


מערכת המבוא 5.17 אינה ניתנת בשלב זה להעברה בעזרת טרנספורמציה הפוכה של ייצוג משותף מכיוון שבמקרה הכללי היא מערכת דו-ממדית ואין לייצוגה הגרפי פירוש יחיד וידוע במערכת מכאנית סיבובית. אולם מכיוון שמדובר במקרה פרטי אשר בו המנגנון של מערכת זו מתנוון לחד-ממדי ופעולתו ברורה, ניתן לפתח באופן עצמאי מנגנון שווה ערך במערכת סיבובית המוצג באיור-5.22.

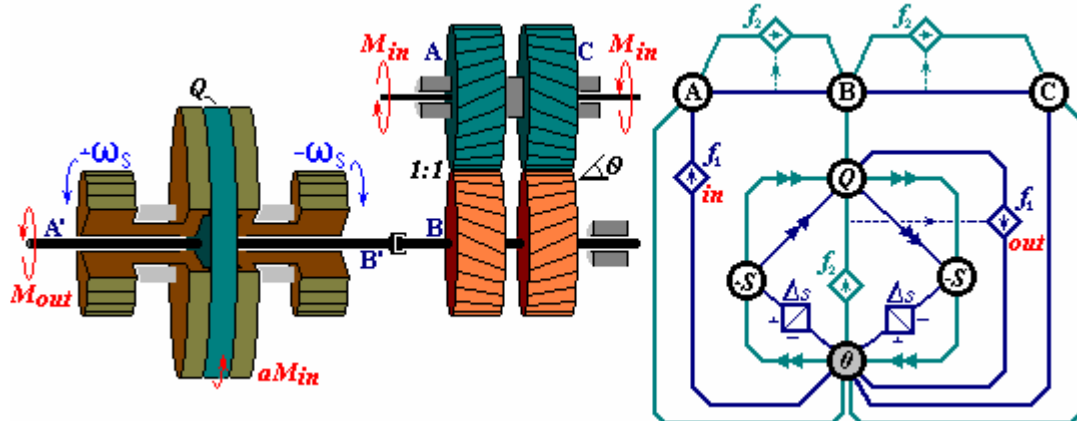
במנגנון זה המומנט שהוא סוג זרימת המבוא יוצר בשלב מסוים זרימת כוח צירי. הדבר מתקבל על ידי שימוש בתמסורת גלגלי שיניים משופעות בהן נוצר קשר ליניארי בין שתי הזרימות הללו. כמו

כן ניתן לראות כי ייצוג מערכת זאת מאד דומה לזה של 5.17.

איור-5.22: מערכת מבוא למערכת מקור זרימה תלוי זרימה בתחום מכאני סיבובי.



שילוב שתי המערכות המוצא עם המבוא מתואר באיור-5.23.



איור-5.23: מערכת מקור זרימה תלוי זרימה ממומשת בתחום מכאני סיבובי. המומנט דרך A'B' תלוי במומנט דרך AB. ייצוג מפושט של מערכת זאת זהה למתואר באיור-5.19א.

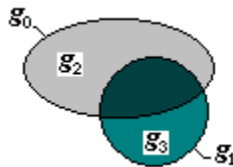
פרק 6 - תכן מערכת בעלת ייצוג ידוע ע"י הרכבתו ממודולים ידועים.

6.1. מבוא:

נניח וידוע לנו ייצוג גרפי- g_0 של מערכת- s_0 בתחום המקורי- D_h . המערכת- s_0 לא ידועה לנו בשלב זה. לעומת זאת ידוע לנו איזושהי מערכת אחרת- s_1 (נקרא לה מערכת ראשונית) שייצוגה הוא- g_1 . נניח ש- g_1 דומה ל- g_0 : כלומר: $g_0 \cap g_1 \approx g_0$.

אם נוכל לשנות את הייצוג של- g_1 ל- g_0 או לייצוג שקול אחר ל- g_0 ובהמשך לממש שינוי זה ב- D_h אזי למעשה יצרנו את s_0 מתוך s_1 .

בהיות נתונים לנו ייצוגים גרפיים של המערכות g_0 ו- g_1 נתבונן בתת-גרפים הבאים:



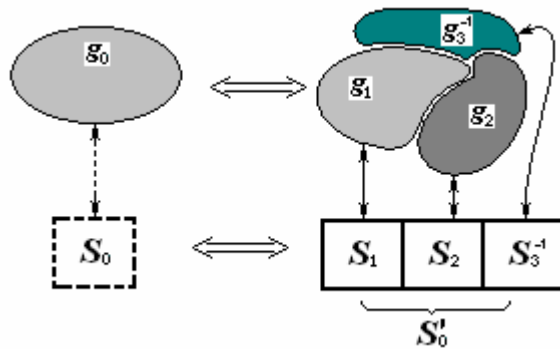
$$(6.1) \quad \begin{aligned} g_2 &= g_0 \setminus g_1 \\ g_3 &= g_1 \setminus (g_0 \cap g_1) \end{aligned}$$

תת-הגרף g_2 יקרא ייצוג משלים של g_1 ל- g_0 .

תת-הגרף g_3 יקרא ייצוג יתיר של g_1 ביחס ל- g_0 .

כמו כן נניח כי קיימות מערכות ממשיות ב- D_h שהן s_2 ו- s_3 המתאימות לייצוגים אלו בהתאמה. המערכת s_2 היא מערכת שיש להוסיף למערכת s_1 על מנת להשלימה ל- s_0 והמערכת s_3 היא מערכת בתוך s_1 העושה פונקציונאליות שאינה רצויה ב- s_1 ומקשה על הפיכתה ל- s_0 .

עבור המערכת s_3 נגדיר מערכת s_3^{-1} שהפונקציונאליות שלה היא הופכית לזו של s_3 . בהרבה מקרים על מנת לקבל את s_3^{-1} מספיק יהיה לקחת את s_3 ולהפוך בין המבוא ומוצא. המערכת s_3^{-1} תיקרא מערכת מתקנת וייצוגה הגרפי במקרה הכללי הוא g_3^{-1} . באופן כזה מערכת היעד שלנו תהיה:



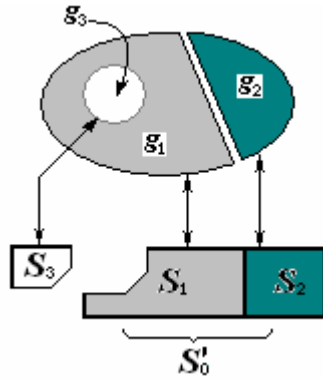
$$(6.2) \quad s_0 = s_1 \cup s_2 \cup s_3^{-1}$$

אופן הצגה זה מבטא את המתודולוגיה בה מתקבלת מערכת היעד כסינתזה של מספר מערכות. הייצוג הגרפי של מערכת זאת הוא:

$$(6.3) \quad g'_0 = g_1 \cup g_2 \cup g_3^{-1}$$

יתכן וייצוג זה (g'_0) לא יהיה זהה ל- g_0 אולם הוא יהיה שקול ערך אליו מהבחינה שמייצג מערכת שהפונקציונאליות שלה זהה לזו שהייתה מתקבלת מ- g_0 לו הדבר היה ניתן.

נקודה עקרונית במתודולוגיה זאת היא שעדיף לבנות את המערכת הסופית מאיחוד ייצוגיהן של מספר תת-מערכות ולא מייצוג המורכב מחיסור של ייצוגים זה מזה כמתואר ב (6.4).



$$(6.4) \quad g'_0 = (g_1 \setminus g_3) \cup g_2$$

משמעות הדבר היא שאין להוציא אלמנטים מתוך מערכת כלשהי על מנת להתאימה למערכת אחרת. באופן זה תהליך התכן הוא מודולארי ולא מצריך הבנה הנדסית/פיזיקאלית מעמיקה (כגון צימוד תפקודי בין האלמנטים השונים של המערכת ההנדסית הראשונית).

לבסוף, במידה ומימוש הייצוגים g_2 ו- g_3 לא ידוע ניתן ליישם עבור כל אחד מהם את אותו תהליך תכן. במידה וכל תהליך התכן לא מתכנס יש לבחור מערכת ראשונית אחרת, דהיינו s_1 אחר.

השיטה המתוארת בפרק זה יכולה לשמש הן כשיטת תכן בפני עצמה והן כשיטה לביצוע טרנספורמציה הפוכה בה מממשים ייצוג גרפי בתחום הנדסי כלשהו.

6.2. שלבי התכן:

בהינתן גרף- g_0 של מערכת אותה רוצים לממש בתחום הנדסי מקורי- D_h יש לבצע את השלבים הבאים:

שלב-1: מציאת מערכת ראשונית.

בוחרים מערכת ידועה s_1 אשר לה יש ייצוג גרפי ידוע g_1 הדומה ל- g_0 . ככלל אצבע ניתן לקחת מערכת ידועה (או שילוב מערכות ידועות) ופשוטה ככל הניתן שייצוגה הוא בעל תת גרף הגדול ביותר אשר קיים גם ב- g_0 :

$$\begin{cases} |g_1| \leq |g_0| \\ |g_1 \cap g_0| \rightarrow |g_0| \end{cases}$$

שלב-2: הגדרת תת-גרף משלים ותת-גרף יתיר.

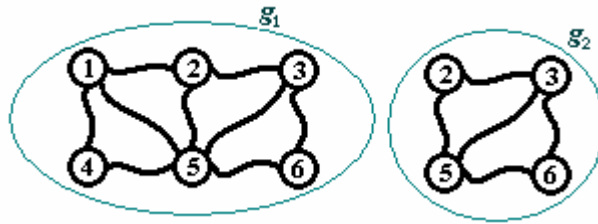
מתוך הגרפים g_0 ו- g_1 מבודדים את תת-הגרפים g_2 ו- g_3 .

g_2 -גרף תת-מערכת המשלימה את g_1 ל- g_0 .

g_3 -גרף תת-מערכת יתירה שקיימת ב- g_1 ביחס ל- g_0 .

בידוד הגרפים g_2, g_3 מתוך g_0, g_1 נעשה כך שאין להם שום קשתות משותפות עם g_0, g_1 אולם צמתים משותפים יכולים להתקיים.

איור-6.1: בידוד תת-גרף מתוך גרף אחר.



שלב-3: מציאת מערכת משלימה.

עבור גרף g_2 מחפשים מערכת הנדסית ב- D_h . עושים טרנספורמציה הפוכה ומקבלים את s_2 .

$$s_2 = T_{Dh}^{G^{-1}}(g_2)$$

לחילופין, אם מזהים את הפונקציונאליות המתבטאת בגרף עצמו ניתן לחפש מערכת כלשהי בעלת אותה פונקציונאליות. במידה ולא מוצאים ניתן לבצע על g_2 את אותו תהליך תכן המבוצע על g_0 .

שלב-4: מציאת מערכת מתקנת.

לאחר שמוצאים את גרף g_3 ומזהים את הפונקציונאליות שלו ובמידה והיא פשוטה, כגון ביטול דרגות חופש או הוצאה של אלמנטים שלמים, עושים את השינוי ישר בייצוג ובמערכת ראשונית s_1 :

$$g'_1 = g_1 \setminus g_3 \longrightarrow s'_1 = s_1 \setminus s_3$$

במידה ולא ניתן להוציא אלמנטים הנדסיים שלמים מתוך s_1 , נניח בגלל קיום צימוד בינם לאלמנטים אחרים. במידה ומזהים את הפונקציונאליות שלהם אזי עבור גרף g_3 מחפשים מערכת הנדסית ב- D_h . עושים טרנספורמציה הפוכה ומקבלים את s_3 .

$$s_3 = T_{Dh}^{G^{-1}}(g_3)$$

עבור מערכת s_3 מחפשים מערכת בעלת פונקציונאליות הפוכה- s_3^{-1} כאשר בהרבה מקרים ניתן לעשותה מ- s_3 עצמה.

שלב-5: סינתזה.

מרכיבים ייצוג כולל ועל פי הטופולוגיה של ייצוג זה מרכיבים את המערכת ההנדסיות.

$$g'_0 = g_1 \cup g_2 \cup g_3^{-1} \longrightarrow s'_0 = s_1 \cup s_2 \cup s_3^{-1}$$

בשלב זה בזמן שילוב המערכות במידת הצורך יש ליישם שיקולים הנדסיים. במקרה פרטי בו אין צורך לבצע את s_3^{-1} :

$$g'_0 = g'_1 \cup g_2 \longrightarrow s'_0 = s'_1 \cup s_2$$

בסעיפים הבאים נביא דוגמאות למערכות אשר בעת פיתוחן ניתן להיעזר בשיטת התכן הזאת.

6.3. פיתוח מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל (מפת"פ) של מערכת מכאנית סיבובית:

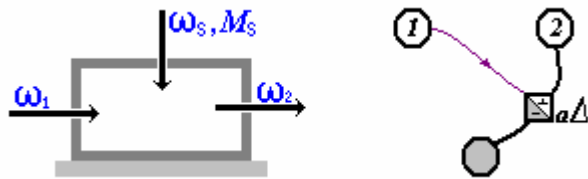
מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל נותן פוטנציאל בצומת מסוימת שהוא כפולה קבועה כלשהי של פוטנציאל בצומת אחרת, ללא התחשבות בזרימות. בתחום מכאני סיבובי פוטנציאל הוא מהירות זוויתית וזרימה היא מומנט.

הגדרת דרישות פונקציונאליות:

- יש לתכנן מערכת בתחום מכאני סיבובי בעלת הדרישות הבאות:
1. המערכת מוציאה מהירות זוויתית במוצאה התלויה ביחס ישר למהירות זוויתית בכניסתה.
 2. מומנט המוצא (עומס) - בלתי מוגבל.
 3. מומנט בכניסה למערכת - אפס.

הגרף- g_0 של מערכת זאת ידוע ומתואר באיור-6.2.

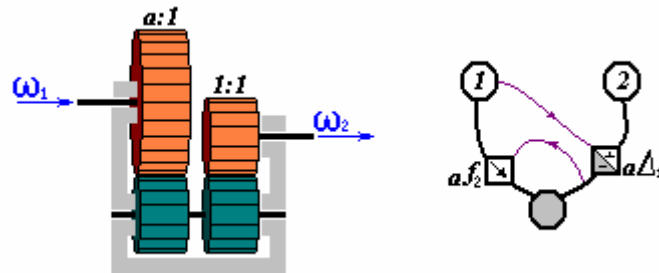
איור-6.2: תרשים פונקציונאלי של מקור תלוי וייצוג גרפי שלו.



שלב-1: מציאת מערכת ראשונית.

ייצוג המערכת שבאיור-6.2 מזכיר במידה מסוימת טרנספורמטור מכאני סיבובי כגון מערכת גלגלי שיניים המתוארת באיור-6.3.

איור-6.3: טרנספורמטור לא הופך סימן של פוטנציאל.



אם נתייחס לצומת-1 ככניסה למערכת ולצומת-2 כמוצא שלה (נתעלם מכך שניתן להחליף כיוונים אלו), נראה שקיים דמיון משמעותי בין הגרפים של שתי המערכות הללו:

g_1 - טרנספורמטור:	g_0 - מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל:

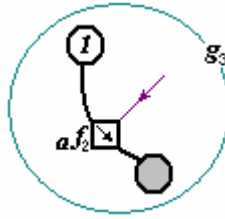
איור-6.4: גרפים של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל (מימין) ושל טרנספורמטור (משמאל).

לאור שיקולים הנדסיים אלו נבחר את מערכת הטרנספורמטור כמערכת ראשונית- s_1 ואת ייצוגה הגרפי כ- g_1 .

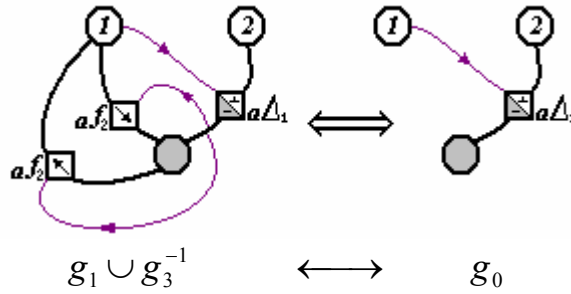
שלב-2: הגדרת תת-גרף משלים ותת-גרף יתיר.

ההבדל היחיד הניכר בין הגרפים הוא שבגרף הטרנספורמטור מופיעה מקור זרימה תלוי שאינו מופיע בגרף של מפת"פ. נקרא לתת-הגרף של מקור הזרימה היתיר- g_3 כמתואר באיור-א-6.4.

איור-6.4א: תת-גרף של מערכת יתירה.



התיקון המתבקש לפיכך עבור גרף הטרנספורמטור הוא הוספת מערכת שייצוגה- s_3^{-1} הוא הוספת מקור זרימה נוסף במקביל למקור הקיים והפוך בכיוונו כך ששכום הזרימות על צומת-1 יהיה אפס כמו בגרף המקור התלוי (איור-6.5).



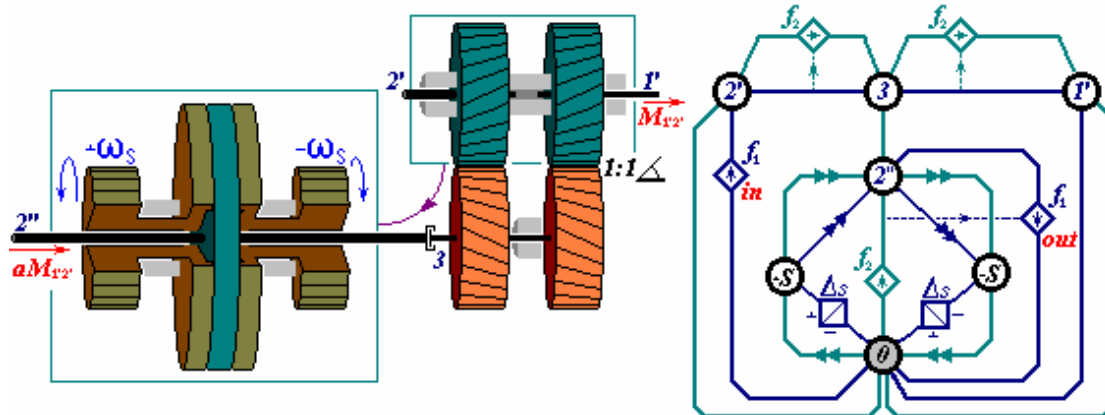
איור-6.5: הפיכת גרף טרנספורמטור לגרף מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל ע"י הוספת מקור זרימה תלוי זרימה מקזז.

שלב-3: מציאת מערכת משלימה.

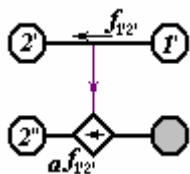
הייצוג הראשוני שנבחר- g_1 לא מכיל אלמנטים שאינם קיימים ב- g_0 ולכן אינו דורש מערכת משלימה. לכן, במקרה פרטי זה יש לדלג על שלב זה.

שלב-4: מציאת מערכת מתקנת.

המערכת המתקנת למערכת שבאיור-6.4א היא למעשה מקור זרימה תלוי זרימה. פתוח מקור זרימה תלוי זרימה עבור מערכת מכאנית קווית וסיבובית תואר בפרק-5 והמערכת שבאיור מבוססת עליו.



איור-6.5א: מערכת מקור זרימה תלוי זרימה מתקנת וייצוגה הגרפי השלם.

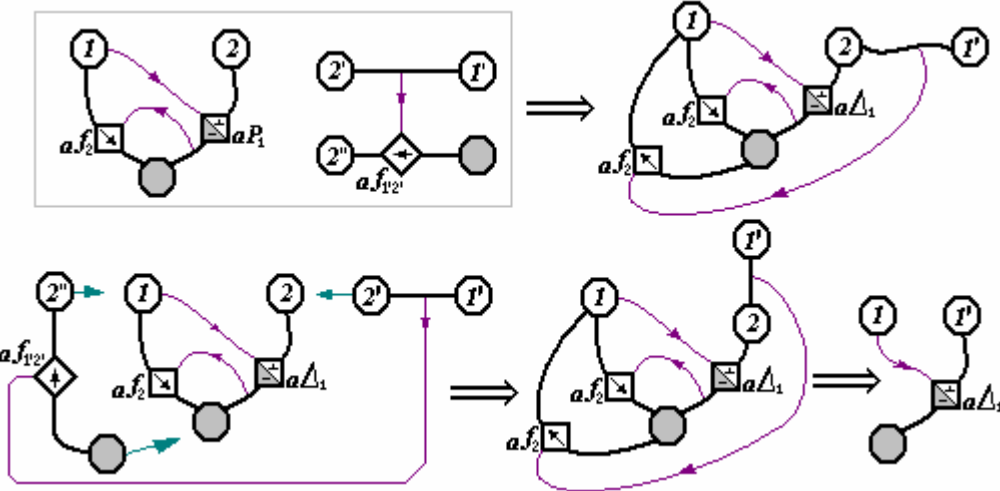


איור-6.5ב: גרף פשוט למערכת באיור-6.5א.

כאשר המערכת מתפקדת באופן תקין ואינה מתקרבת לתחום הרוויה אזי ניתן להסתפק בייצוג פשוט יותר של המערכת. הייצוג הפשוט אינו מתחשב בזרימות/פוטנציאלים מסוג אחר ובפרמטרים פנימיים הנשארים קבועים כגון מהירות- ω_s שניתן להחשיבם כחלק ממקור הזרימה.

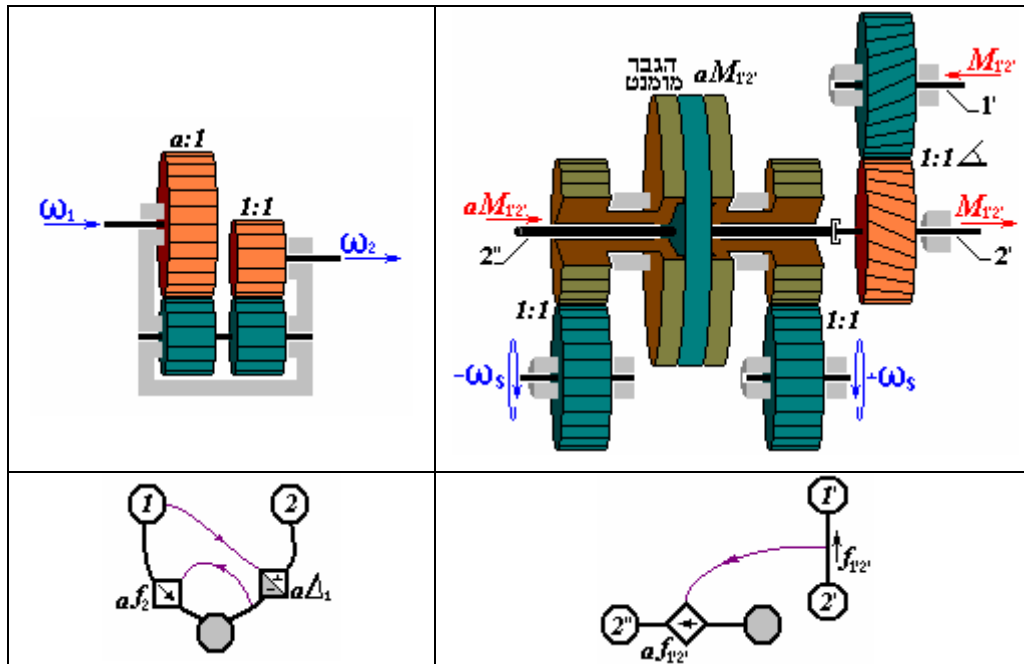
שלב-5: סינתזה.

על מנת לחבר את מקור הזרימה התלוי בין הצמתים 1 ו-0 יש להוסיף קשת נוספת לגרף הטרנספורמטור 2-1' כמתואר באיור-6.6. הדבר נדרש מכיוון שייצוג של הטרנספורמטור הוא ייצוג מקוצר שאינו מפרט את האלמנטים הבסיסיים של המערכת. לפיכך הקשת 0-2 של גרף הטרנספורמטור למעשה אינה אלמנט ממשי ספציפי שניתן למדוד את הזרימה דרכו.



איור-6.6: חיבור גרף הטרנספורמטור עם גרף מקור זרימה תלוי זרימה. על מנת לבצע את החיבור יש לחבר פיזית את הפוטנציאלים של הצמתים 1'' עם 0, 2'' עם 1, ו-1' עם 2.

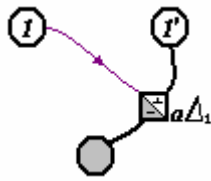
מכיוון שהצומת-2 בגרף הסופי היא מדרגה שתיים, הזרימות בקשתות הנוגעות בה (0-2 ו-1'-2) זהות.



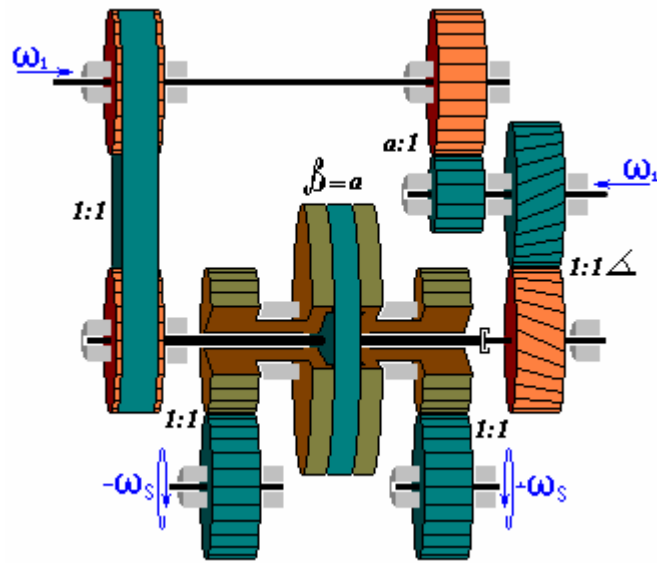
איור-6.7: מערכות מכאניות סיבוביות של מקור זרימה תלוי זרימה וטרנספורמטור(משמאל). המהירות- ω_s המצוינת באיור היא פרמטר פנימי של מקור הזרימה ואינה משפיעה על יתר המהירויות והמומנטים.

לאחר מכן יש לחבר בין הצמתים 1 ו-2''. בנוסף לקשרים הטופולוגיים שיש לעשות על מנת לבנות את המערכת יש לעשות גם התאמות גיאומטריות המבוססת על שיקולים הנדסיים.

יש לציין שהמערכת שהתקבלה מזכירה בעיקרון הפעולה שלה מערכת הידרואולית מתחום הרכב הידועה בשם "הגה כוח" [28] אלא שכאן פעולת ההגבר נעשית בצורה מכאנית לגמרי עם יתרון ברור של אי בזבוז הספק במצב בו אין על המערכת עומס חיצוני.

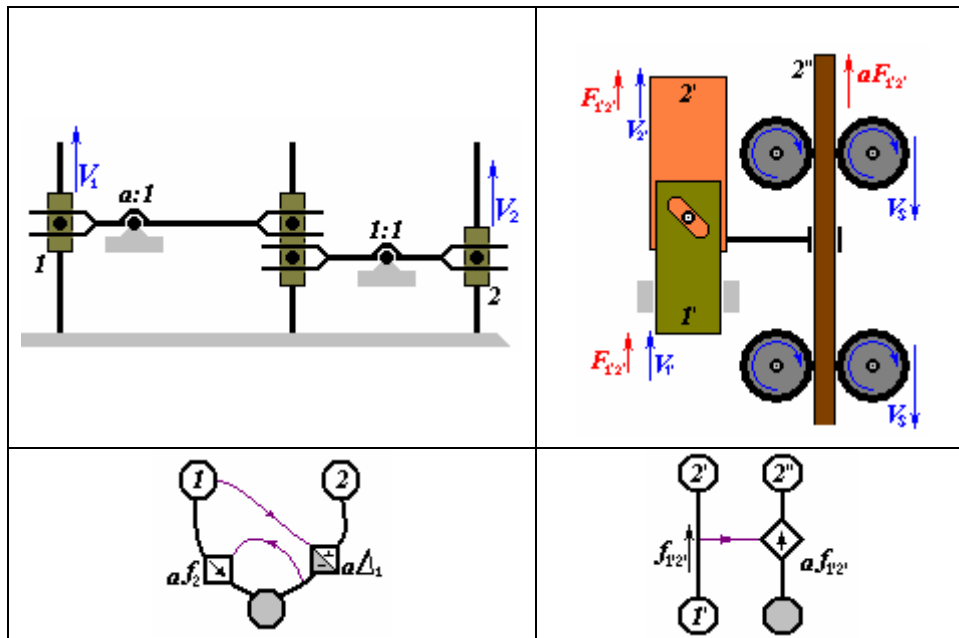


איור-6.8: מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית סיבובית: מהירות זוויתית במוצא- ω_1 תלויה במהירות הזוויתית בכניסה- ω_1 .



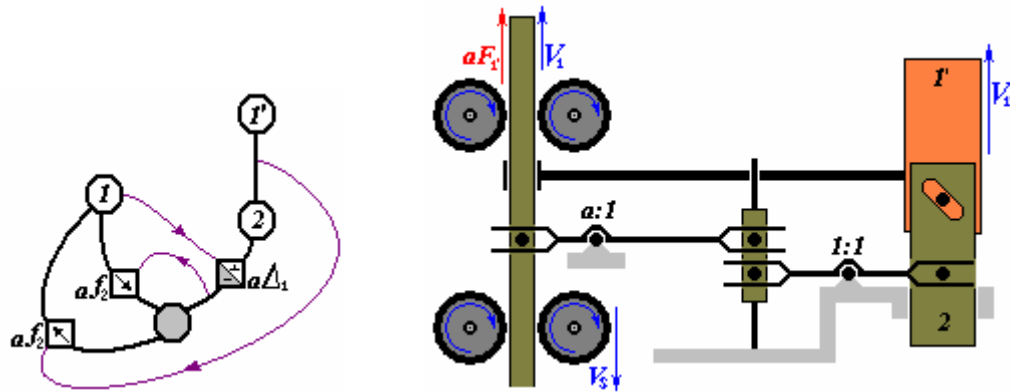
6.4. פיתוח מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית קווית:

באותו האופן בו פותח מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל בתחום מכאני סיבובי ניתן גם לפתח מקור כזה בתחום מכאני קווי תוך שנעזרים בטרנספורמטור מכאני קווי ומקור זרימה תלוי זרימה מכאני קווי המתוארים באיור-6.9. פיתוח מקור פוטנציאלים תלוי פוטנציאל בתחום הנדסי זה יעשה תוך שימוש בייצוג המשותף.



איור-6.9: מימין מקור זרימה תלוי זרימה ומשמאל טרנספורמטור שאינו הופך סימן. בין הגלגלים לבין אלמנט-2'' מתקיים חיכוך החלקה שמקדם החיכוך שלו הוא a .

הערה! מקור זרימה תלוי זרימה המתואר באיור-6.9 הוא אותה המערכת שפותחה בפרק-5 רק בעלת מבנה פשוט לצורך היישום הנוכחי. סינתזה של המערכות מתוארת באיור-6.10.

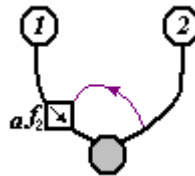


איור-6.10: מערכת מכאנית קווית של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל.

6.5. פיתוח מקור זרימה תלוי זרימה בתחום הידראולי:

בפרק-5 נעשה פיתוח של מקור זרימה תלוי זרימה עבור מערכות מכאניות. נעשה כעת פיתוח זה עבור מערכת הידראולית תוך שימוש בהשלמת מודולים גרפיים. בתחום ההידראולי הזרימה היא ספיקת זורם והפוטנציאל הוא לחץ הזורם. מקור זרימה תלוי זרימה במובן הגרפי הוא מקור המזרים זרימה בקשת מסוימת התלויה תלות ליניארית בזרימה של קשת אחרת ללא תלות בהפרשי פוטנציאלים. נתייחס בדוגמא הנוכחית למקרה פרטי של מקור זרימה תלוי זרימה עם קשת ניטראלית משותפת כמתואר באיור-6.11.

איור-6.11: מקור זרימה תלוי זרימה עם קשת ניטראלית משותפת.



הגדרת דרישות פונקציונאליות:

- יש לתכנן מערכת בתחום הידראולי בעלת הדרישות הבאות:
1. המערכת המוציאה במוצאה ספיקה התלויה ביחס ישר לספיקה בכניסתה.
 2. לחץ המוצא (עומס) - כלשהו.
 3. לחץ בכניסה למערכת - כלשהו.

שלב-1: מציאת מערכת ראשונית.

כמו בדוגמאות הקודמות גם במקרה זה נבחר כמערכת ראשונית טרנספורמטור. נתבונן בטרנספורמטור הידראולי.

	$P_2 = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) P_1$ $q_2 = \frac{1}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)} q_1$	
--	---	--

איור-6.11א: טרנספורמטור מחליף סימן הידראולי וייצוגו הגרפי.

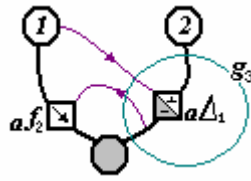
ניתן לראות כי כמו במקרה הקודם גם כאן קיים דמיון בין שני הייצוגים.

טרנספורמטור:	מקור זרימה תלוי זרימה:

איור-6.12: גרפים של מקור זרימה תלוי זרימה וגרף של טרנספורמטור.

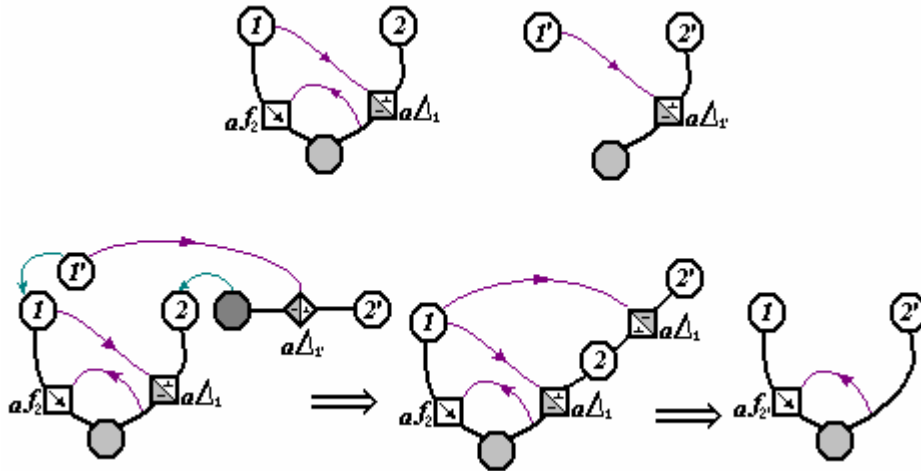
שלב-2: הגדרת תת-גרף משלים ותת-גרף יתיר.

תת-הגרף היתיר- g_3 , במקרה זה, הוא הקשת של מקור פוטנציאל תלוי שקיים בגרף הטרנספורמטור ואינו קיים בגרף מקור הזרימה התלוי (איור-6.13).



איור-6.13: תת-גרף של מערכת יתירה.

על מנת לעשות את המעבר מגרף הטרנספורמטור לגרף המקור התלוי יש לשלק את מקור הפוטנציאל תלוי הפוטנציאל על ידי הוספת אותו המקור בדיוק רק בכיוון שונה בהמשך לאותה קשת כמתואר באיור:



איור-6.14: תיאור שילוב גרף הטרנספורמטור וגרף מקור הפרש פוטנציאלים תלוי פוטנציאל לקבלת גרף מקור זרימה תלוי זרימה. הצמתים אותם יש לאחד הם 1 עם 1', 0 עם 2.

שלב-3-4: מציאת מערכת משלימה ומערכת מתקנת.

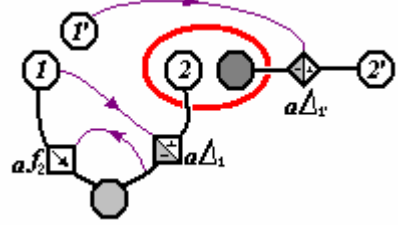
המערכת המיוצגת בעזרת מקור הפרש פוטנציאלים תלוי בתחום ההידראולי היא מערכת של הפרש לחצים תלוי לחץ. במקרה שלנו בו אחד הצמתים הוא הצומת הניטראלית מקור הפוטנציאל התלוי בו אנו יכולים להשתמש הוא ווסת לחץ מופעל לחץ. באיור-6.15 מתואר רכיב ההידראולי שהוא ווסת לחץ מסוג restrictor המופיע בנספח.

<p>טרנספורמטור</p>	<p>מקור לחץ תלוי לחץ</p>	<p>מערכת הנדסית</p>
		<p>ייצוג גרפי</p>

איור-6.15: מערכות ההידראוליות של מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל וטרנספורמטור והגרפים שלהן.

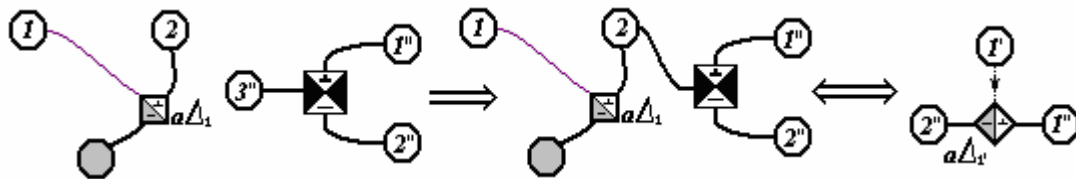
שלב-5: סינתזה.

נבנה את המערכת ההנדסית בעזרת טרנספורמציה הפוכה של גרף מאיור-6.14. אולם, בתהליך הרכבת הגרף השקול המתואר באיור-6.14 קיימת בעייתיות. מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל הוא מקור פוטנציאל מוחלט ולא מקור הפרש פוטנציאלים. אי לכך הצומת-0' היא צומת ניטרלית תמידית ואינה ניתנת לאיחוד עם צומת אחרת שהפוטנציאל בה יכול להשתנות.



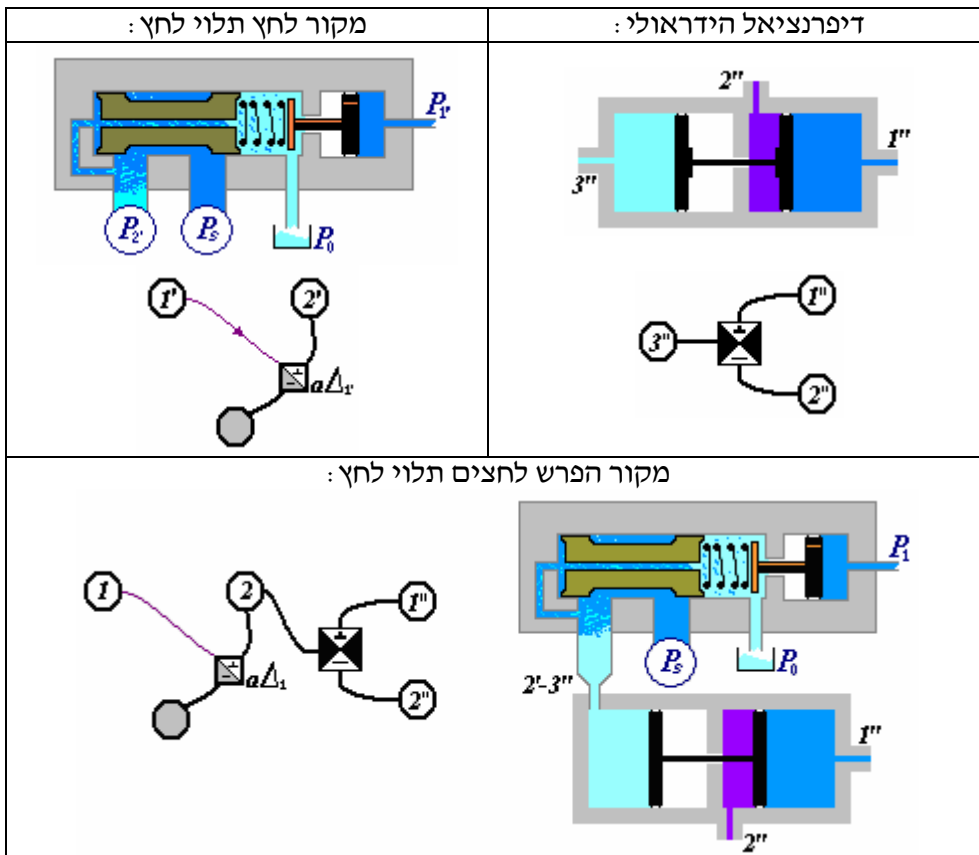
איור-6.16: תיאור בעייתיות של איחוד צומת ניטרלית עם צומת שהפוטנציאל שלה עשוי להשתנות.

על מנת לפתור קושי זה יש לבצע שלב נוסף של הפיכת פוטנציאל להפרש פוטנציאלים. בפרק-4 תואר פתרון לבעיה מסוג זה בעזרת דיפרנציאל כמתואר באיור-6.17.



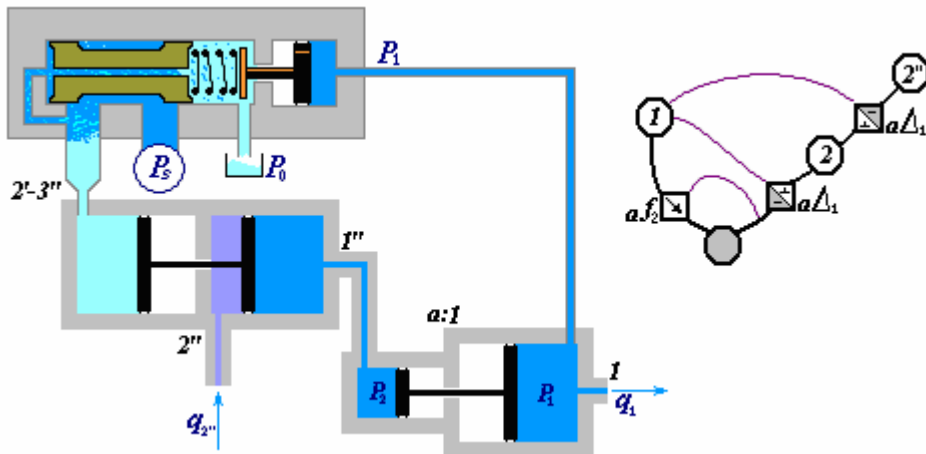
איור-6.17: אופן קבלת גרף מקור הפרש פוטנציאלים תלוי פוטנציאל מגרף מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל ומגרף דיפרנציאל.

שילוב דיפרנציאל עם מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל בתחום ההידראולי מתואר באיור-6.18.



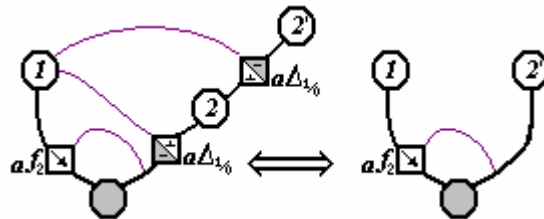
איור-6.18: מערכת משולבת של מקור לחץ תלוי לחץ ודיפרנציאל הידראולי. מערכת מקור לחץ תלוי לחץ עם הוספת הדיפרנציאל הופכת למקור הפרש לחצים תלוי לחץ.

המערכת הסופית שמתקבלת כמקור זרימה תלוי זרימה במערכת הידראולית מתוארת באיור-
 הסופי בין שתי המערכות נראה כך :



איור-6.19: מערכת הידראולית מקור זרימה תלוי זרימה. הספיקה הנכנסת למערכת דרך צומת 2'' יוצאת ממנה מוגברת דרך צומת 1. מערכת ווסת הלחץ עם המשוב גורמות לכך שהגברת הספיקה במוצא לא תגרום לחץ בכניסה.

הגרף המייצג מערכת זאת מבחינה פונקציונאלית שקול לגרף של מקור זרימה תלוי זרימה כמתואר באיור-6.20 בגלל חוק הצמצום (ראה פרק-1).



איור-6.20: שקילות בין גרפים.

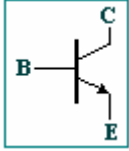
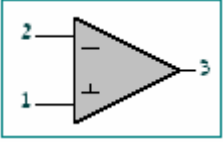
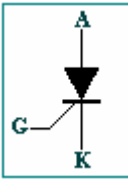
המערכת ההנדסית פועלת באופן הבא :

ספיקה q_2 נכנסת למערכת דרך הפתח 2'' של הדיפרנציאל ההידראולי ויוצאת ספיקה q_1 דרך הפתח-1 הנמצא בטרנספורמטור. הספיקה היוצאת מוכפלת בקבוע- a שהוא יחס התמסורת של הטרנספורמטור. הגדלת הספיקה במוצא גורמת להגדלת הלחץ בתא 1'' באותו הגודל. אולם עליית לחץ זו אינה מורגשת בתא הכניסה 2'' מכיוון שהלחץ בתא 2'-3'' מפעיל את אותו הלחץ על תא 1'' דרך בוכנה. כתוצאה מכך לחצים הקיימים במוצא 1 אינם משפיעים על הכניסה 2'' מכיוון שהם מקוזזים על ידי מקור לחץ תלוי לחץ שבמשוב.

7. פיתוח בין תחומי של רכיבים אלקטרוניים יסודיים ודוגמאות ליישומם בתכן:

7.1. הקדמה:

בפרק זה יוצג פיתוח בין תחומי של אלמנטים שהם רכיבים יסודיים בתחום האלקטרוני. הפיתוח נעשה בתחומים הנדסיים – מכאני קווי ומכאני סיבובי. מהות הפיתוח היא לייצור רכיבים אנלוגיים בתחום המכאני אשר יהיו זהים פונקציונאלית לרכיבים האלקטרוניים המוכרים. הפתוח כולל את הרכיבים הבאים (טבלה 7.1):

טרנזיסטור BJT:	מגבר שרת OA:	מישר סיליקון מבוקר SCR:
		

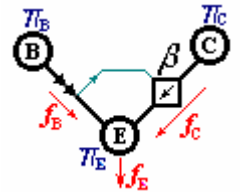
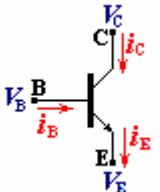
טבלה-7.1: רכיבים אלקטרוניים יסודיים: הטרנזיסטור הבי-פולארי המשמש כמגבר זרם/הספק, מגבר השרת שהנו רכיב רב יישומי ומיישר הסיליקון המבוקר המשמש כמתג נשלט להעברת זרמים/הספקים גדולים.

פיתוח רכיבים אלו במערכות המכאניות ייתן כלי נוסף בעזרתו ניתן יהיה להעביר תכן קונספטואלי של מערכות מורכבות מתחום אלקטרוני לתחום מכאני (בעזרת טרנספורמציה הפוכה של ייצוג המשותף כפי שתואר בפרק-2).

בנוסף לאפשרות ה"העתקה" הבין תחומית של מערכות הנדסיות קיימת גם כוונה להשיג הבנה כוללת יותר של עקרונות התכן הקונספטואלי שנעשה בתחום האלקטרוני המבוססת על שימוש ברכיבים אלה. ברמה ההתנהגותית אנו צופים כי הבנת פעולתם של רכיבים אלו בתחום האלקטרוני תתרום לתחום המכאני, ולהפך הבנת פעולתם של רכיבים אלו בתחום המכאני תאפשר הבנה מחודשת של המערכות האלקטרוניות עצמן.

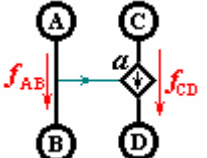
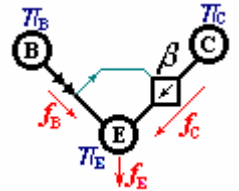
7.2. טרנזיסטור צומת דו-נושאי (BJT):

מידע כללי על טרנזיסטור BJT אלקטרוני נמצא בנספח-1. הגרף המקובל ביותר לייצוג הטרנזיסטור מתואר באיור-7.2 [16]:

ייצוג גרפי של טרנזיסטור BJT:	תרשים טרנזיסטור BJT:
	

איור-7.2: תרשים טרנזיסטור BJT אלקטרוני וייצוגו הגרפי. הזרימה שבתחום האלקטרוני משמעותה-זרם חשמלי שזורמת בקשת CE פרופורציונלית לזו שזורמת בקשת החד-כיוונית BE ומוגברת ביחס ישר במקדם β .

ניתן להבחין כי ייצוגו הגרפי של הטרנזיסטור מבוסס בעיקר על מקור זרימה תלוי זרימה (איור-7.3).

ייצוג גרפי של מקור זרימה תלוי זרימה:	ייצוג גרפי של טרנזיסטור BJT:
	

איור-7.3: השוואה בין גרף המייצג מקור זרימה תלוי זרימה וטרנזיסטור.

ההבדלים בין הטרנזיסטור למקור זרימה תלוי זרימה.

1. ההבדל המשמעותי ביותר, שאינו בה לידי ביטוי בייצוג הגרפי, הוא בכך שהמקור התלוי במקרה של הטרנזיסטור אינו עצמאי אלא ניזון מהבדל פוטנציאלים בין הצמתים C ו-E המשמש עבורו כמקור הספק.
2. הבדל נוסף הוא בכך שצמתים B ו-D של מקור הזרימה התלוי מחוברות לצומת אחת, צומת-E בגרף הטרנזיסטור. דבר זה גורם להשוואת הפוטנציאל שבשני הצמתים הללו וגורם לזרימות שבקשתות AB ו-CD להתאחד לזרימה אחת בהמשך.
3. הבדל נוסף הוא הקשת החד-כיוונית המופיעה בגרף הטרנזיסטור המאלצת גם את זרימתה עצמה וגם את זרימת המקור התלוי להיות בכיוון אחד. הקשר בין הפוטנציאלים בצמתים B ו-E צריך להיות:

$$V_{B/O} \leq V_{E/O} \Rightarrow V_{B/E} \leq 0$$

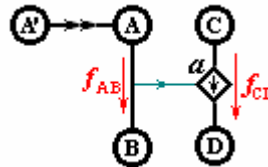
$$V_{B/E} \geq 0 \quad \text{אולם זרימת זרם בקשת BE מחייב ש:}$$

$$V_{B/E} = 0 \Rightarrow V_B = V_E \quad \text{ולכן למעשה:}$$

קבוע תלות הזרם של המקור התלוי בטרנזיסטור מסומן כ- β וערכו נע בין 30 ל-100.

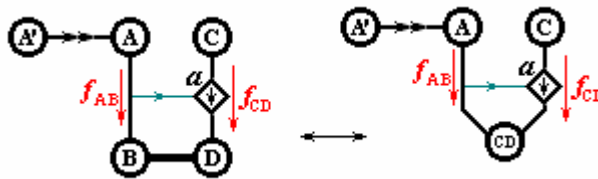
נעשה בשלושה שלבים את המעבר מגרף המקור התלוי לגרף הטרנזיסטור. בשלב הראשון נסלק מהמקור התלוי את מקור הפרש הפוטנציאלים העצמי ואת השפעתו נמיר בהשפעת הפרש הפוטנציאלים בין C ל-D. בשלב השני נוסף קשת חד-כיוונית למקור זרימה תלוי זרימה כמתואר באיור-7.4 המיוצג ע"י הקשת החד-כיוונית A'-A באיור-7.4.

איור-7.4: מקור זרימה תלוי זרימה עם קשת חד-כיוונית.



ובשלב השני נאחד באופן פיזי את הצמתים B ו-D לצומת אחת BD על-ידי שנחבר אותם עם קשת בעלת התנגדות "אפס" (זאת אומרת נקצר אותן כפי שהדבר נעשה במערכות אלקטרוניות) כמתואר באיור-7.5.

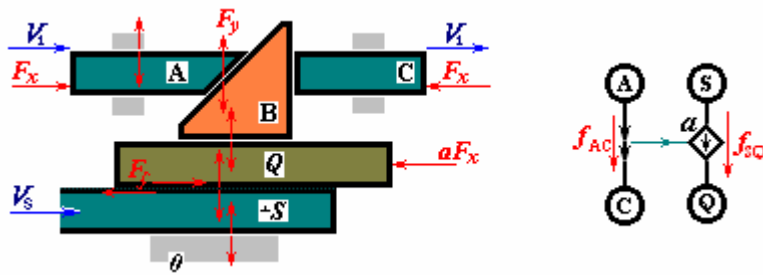
איור-7.5: מקור זרימה תלוי זרימה עם הוספת קשת חד-כיוונית ואיחוד הפוטנציאל בצמתים C ו-D.



המערכת שנוצרה שקולה לגמרי בעיקרון פעולתה לזו של הטרנזיסטור האלקטרוני. בהמשך נממש שלבים אלו במערכת מכאנית בעזרת ביצוע של טרנספורמציה הפוכה לייצוג הגרפי.

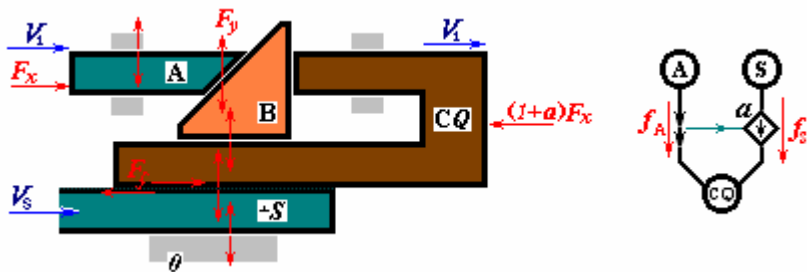
7.2.1 פיתוח טרנזיסטור במערכת מכאנית קווית:

נשתמש במקור זרימה תלוי זרימה עבור מערכת מכאנית קווית שפותחה בפרק-5 והכוללת בתוך עצמה את הקשת החד-כיוונית (איור-7.6):



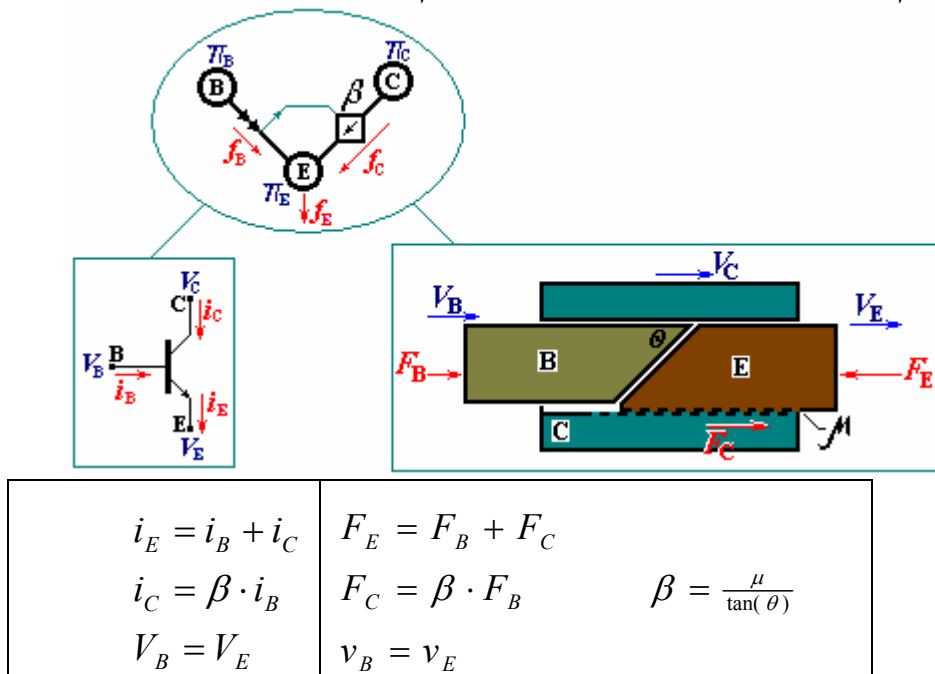
איור-7.6: מערכת מכאנית קווית המתפקדת כמקור כוח תלוי כוח עם אלמנט חד-כיווני והייצוג הגרפי שלה כמקור זרימה תלוי זרימה. במערכת זאת כוח הלחיצה האופקי בין אלמנט-A לאלמנט-C יוצר כוח מוגבר ביחס ישר בקבוע a בין אלמנט-Q לאלמנט-S. אופן הגברת הכוח נעשה בעזרת חיכוך החלקה ומישור משופע. במידה והכוח האופקי בין האלמנטים A ו-C הוא כוח מתיחה אזי מתנתק מגעם עם אלמנט המישור המשופע-B וכתוצאה מכך לא יפעל עוד שום כוח בין האלמנטים Q ו-S.

ניתן לראות שהאלמנט החד-כיווני כבר מובנה בתוך האלמנט-A כיוון שהפעלת כוח או מהירות לכיוון מנוגד לא תעביר אותו לאלמנט-Q. חיבור האלמנטים C ו-Q לאלמנט אחד מתואר באיור-4.6.



איור-7.7: מימוש איחוד צמתים C ו-Q במערכת מכאנית קווית בעזרת חיבור קשיח.

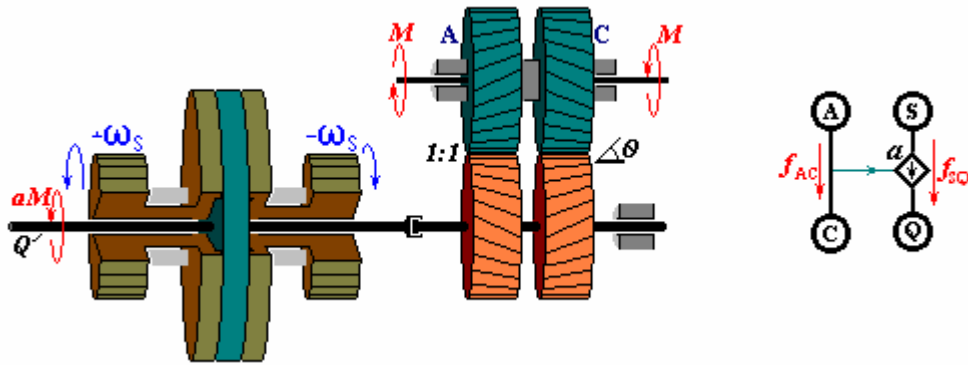
עיצוב קומפקטי למערכת 7.7 מתואר באיור-7.8. כמו כן מתוארת באיור זה השוואה פונקציונאלית והתנהגותית לטרנזיסטור האלקטרוני.



איור-7.8: מערכת מכאנית קווית התואמת טרנזיסטור BJT אלקטרונית.

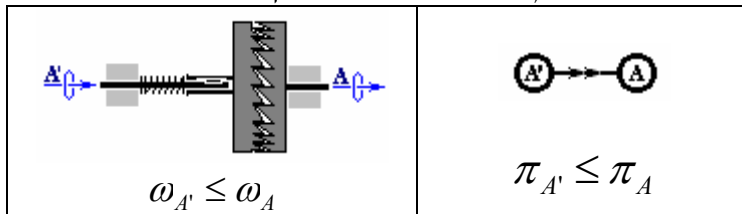
7.2.2 פיתוח טרנזיסטור במערכת מכאנית סיבובית:

כנקודת מוצא נשתמש במקור זרימה תלוי הזרימה של מערכת מכאנית סיבובית המתואר (איור-7.9) שפיתוחו נעשה בפרק-5.



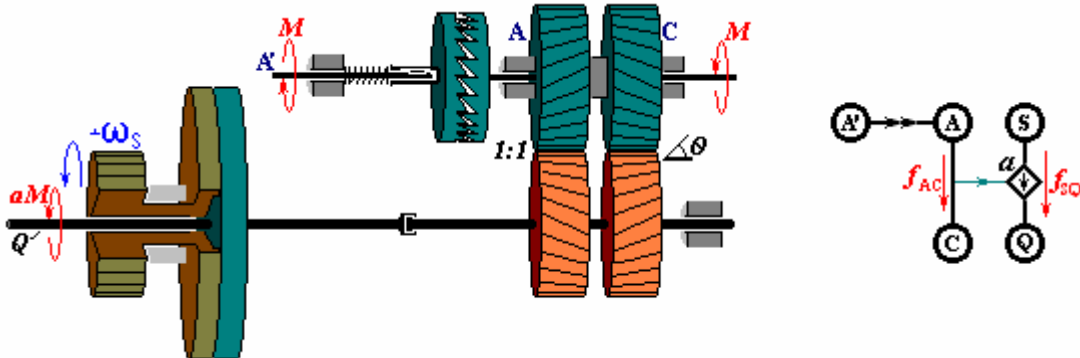
איור-7.9: מערכת מכאנית סיבובית של מקור זרימה תלוי זרימה וייצוגה הגרפי. ניתן להניח כי האלמנטים המסובבים במהירויות $+\omega_s$ ו- $-\omega_s$ שניהם מקבלים את מהירותם מאלמנט אחד-S בעזרת שתי תמסורות שונות.

לאלמנט המיוצג ע"י הצומת-A נחבר אלמנט סיבובי חד-כיווני הנקרא "מצמד חד-כיווני". מידע כללי על מצמד חד-כיווני נמצא בנספח, תיאורו הסכמתי והגרף שלו מתוארים באיור-7.11.



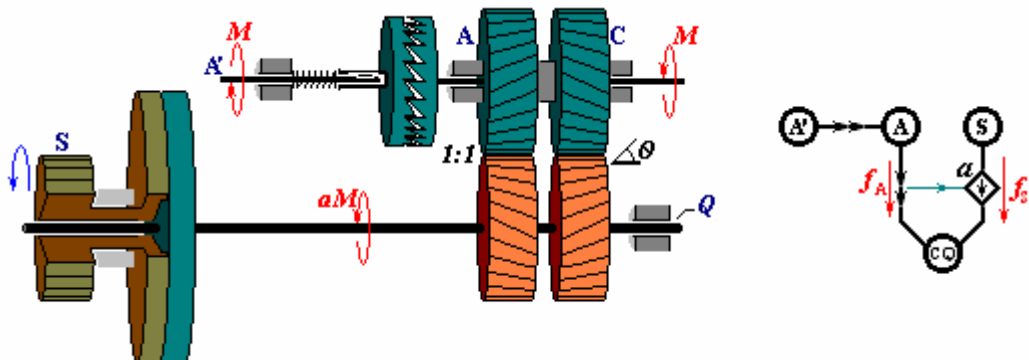
איור-7.11: אלמנט מכאני סיבובי המיוצג ע"י קשת חד-כיוונית.

חיבור שני האלמנטים מתואר באיור-7.12:



איור-7.12: חיבור קשת חד-כיוונית.

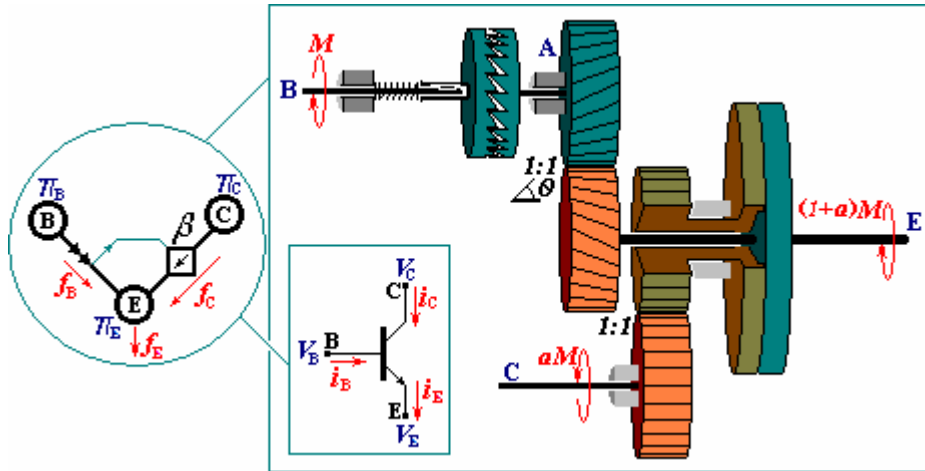
על מנת לאחד את הפוטנציאל של אלמנט-C ואלמנט-Q נבטל את המפרק הנועד לא להעביר מהירות סיבובית (אלא כוח צירי בלבד), ובמקומו נחבר את האלמנטים הללו באופן קשיח כך שלמעשה ייווצר מהם אלמנט אחד, כמתואר באיור-7.13.



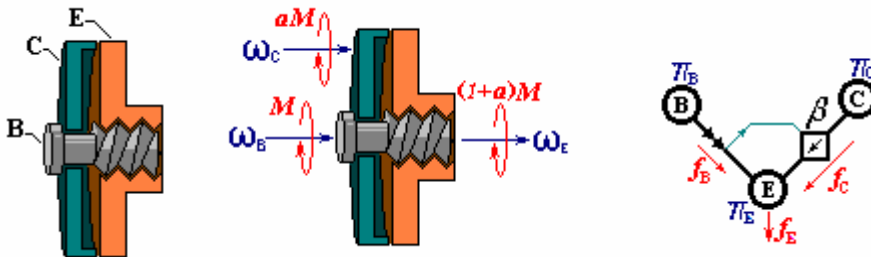
איור-7.13: חיבור פוטנציאלים של צמתים B ו-D.

נפשט מערכת מכאנית זאת ונסמן את הפוטנציאלים והזרימות בטרנזיסטור המכאני באותם הסימונים של האלקטרוני ונעמוד על השוואה מבנית ביניהם (איור-7.14).

איור-7.14:
השוואה בין
טרנזיסטור
אלקטרוני
לטרנזיסטור של
מערכת מכאנית
סיבובית.



פישוט מכאני נוסף למערכת 7.14 שנעשה ע"י ד"ר יפים הכולל החלפת תמסורת גלגלי שיניים משופעות בתמסורת בורגית מתואר באיור-7.15.



איור-7.15: טרנזיסטור של מערכת מכאנית סיבובית, בו מנגנון "מישור משופע" מיושם באמצעות תבריג, דבר המקטין מימדים באופן משמעותי. מנגנון העברת המומנט ע"י חיכוך החלקה נשאר ללא שינוי.

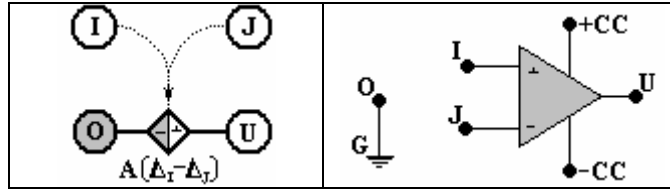
השוואה התנהגותית ופונקציונאלית בין מנגנון הטרנזיסטור המכאני לטרנזיסטור האלקטרוני מסוכמת בטבלה הבאה:

טרנזיסטור אלקטרוני:	טרנזיסטור מכאני:
$i_E = i_B + i_C$ $i_C = \beta \cdot i_B$ $V_B = V_E$	$M_E = M_B + M_C$ $M_C = a \cdot M_B \quad a = 2\pi\mu R / p$ $\omega_B = \omega_E$

איור-7.16: השוואה בין טרנזיסטורים אידיאליים מכאני סיבובי ואלקטרוני.

7.3 . מגבר-שרת (Operational Amplifier):

מידע כללי על מגבר שרת נמצא בנספח. גרף המייצג מגבר השרת מתואר באיור-7.17:

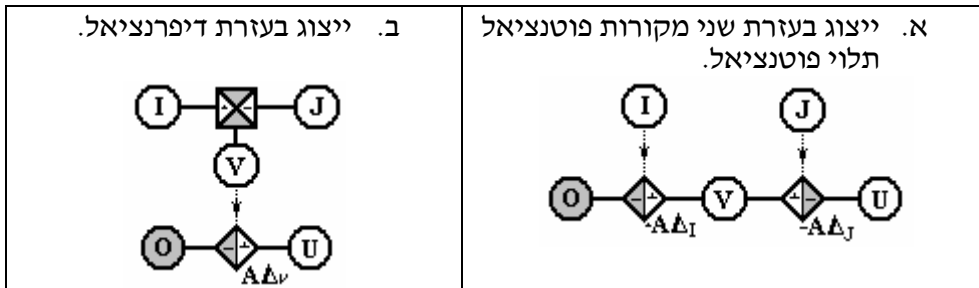


איור-7.17: מגבר שרת אלקטרוני והגרף שלו.

הפונקציונאליות של מגבר השרת מתוארת בנוסחה הבאה:

$$\begin{cases} A \rightarrow \infty \\ V_U = A(V_i - V_j) = AV_{i/j} \end{cases}$$

משמעות הגרף היא שפוטנציאל המוצא π_U (או $\Delta_{U/O}$), תלוי בהפרש הפוטנציאל $\Delta_{i/j}$. ניתן לייצג פונקציונאליות זאת ע"י שני ייצוגים גרפיים שקולים פונקציונאלית כמתואר באיור-7.18:

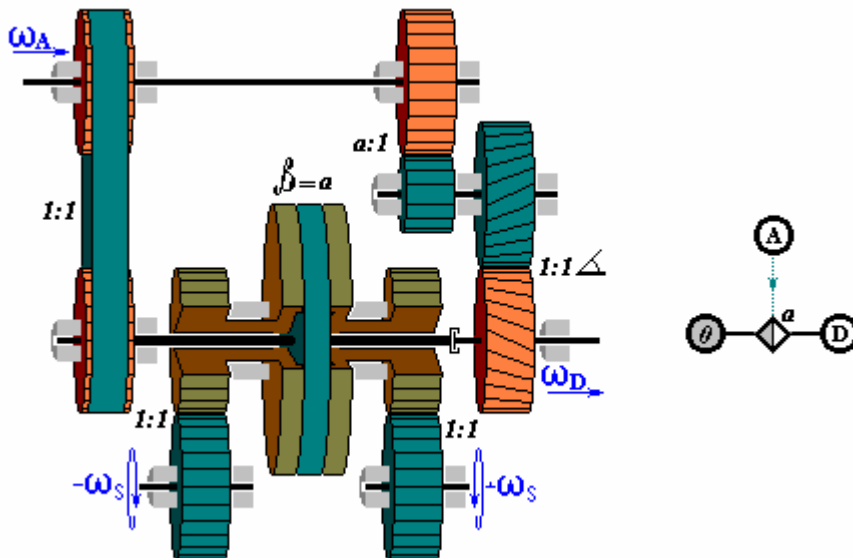


איור-7.18: שתי דרכים שקולות לייצוג גרפי של מגבר שרת. בשני הייצוגים הפרש הפוטנציאלים בין צומת-U לצומת-O (שהיא צומת ניטרלית) הוא הפרש פוטנציאלים בין צומת-J לצומת-I המוכפל בקבוע-A. לפי ייצוג א' $\Delta_{U/O} = A(\pi_i - \pi_j) \rightarrow \Delta_{U/O} = A \cdot \pi_i - A \cdot \pi_j$, לפי ייצוג ב': $\Delta_{U/O} = A \cdot \Delta_{I/O} - A \cdot \Delta_{J/O} = A \cdot \Delta_{I/O} - A \cdot \Delta_{J/O}$.

ניבחר בייצוג-ב כיוון שדיפרנציאל הוא רכיב פשוט בהרבה ממקור תלוי הן במערכת הידראולית והן במערכת מכאנית.

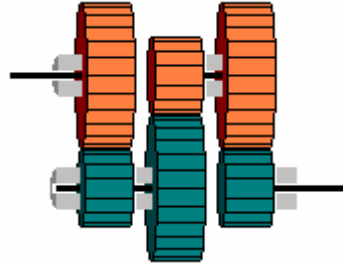
7.3.1 . מגבר שרת במערכת מכאנית סיבובית:

על בסיס מקור הפוטנציאל תלוי הפוטנציאל המופיע באיור-7.19 נבנה את מגבר השרת.



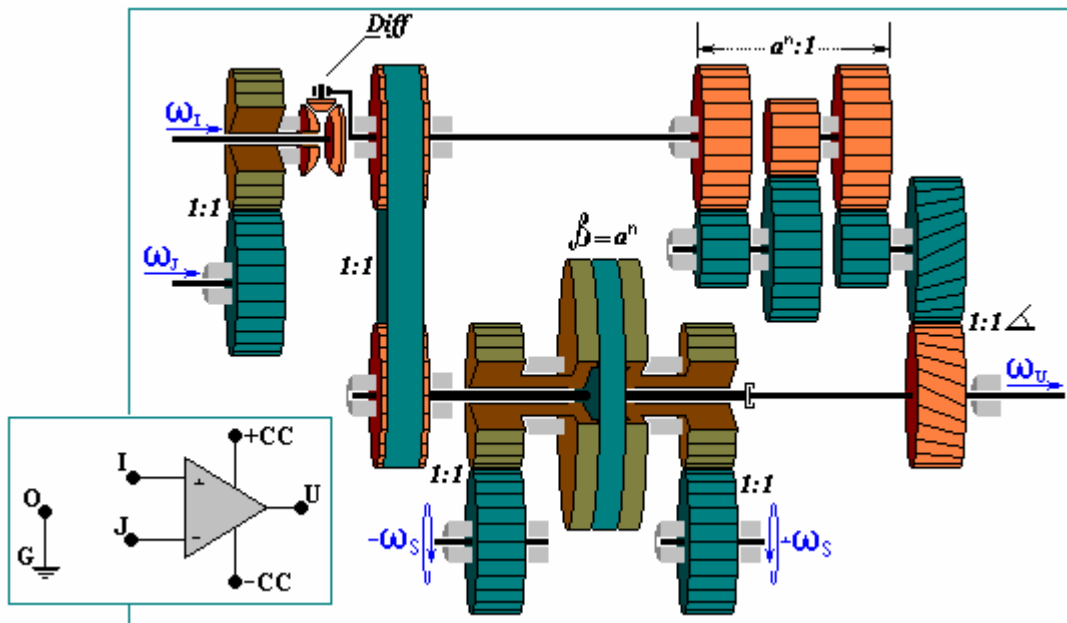
איור-7.19: מקור זרימה תלוי זרימה של מערכת מכאנית סיבובית והגרף שלו.

על מנת ליצור את מגבר השרת בתחום המכאני יש לחבר לאלמנט המיוצג ע"י צומת-A את הדיפרנציאל ואיתו שתי כניסות של מהירות זוויתית. תפקיד הדיפרנציאל הוא לשמש כמחסר מהירויות. על מנת לקבל הגבר מהירות אינסופי יש להגדיל את התמסורת המכאנית לערך רב ככל הניתן. ניתן להשתמש בתמסורת מדורגת המתוארת באיור-7.20 ובעזרתה להגיע להגבר מהירות הסיבוב פי כמה מאות (תמסורות להפחתת מהירות ניתן לבנות ליחסים של כמה אלפים אולם עבור תמסורות הגברת מהירות הנצילות פוחתת דרמטית עם ההגבר).



איור-7.20: תמסורת גלגלי שיניים מדורגת פשוטה המתאימה ביותר כתמסורת הגברת מהירות סיבוב.

מערכת מגבר השרת המתקבלת בתחום מכאני סיבובי והשוואת הפונקציונאליות שלה למערכת האלקטרונית מתוארת באיור-7.21:

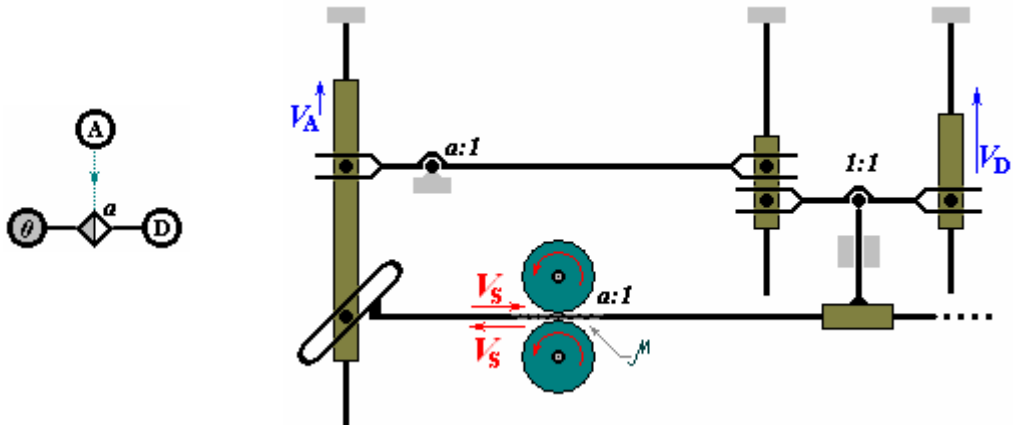


טרנזיסטור אלקטרוני:	טרנזיסטור מכאני:
$V_{U/0} = A(V_I - V_J)$	$\omega_U = a^n (\omega_I - \omega_J)$
$A \rightarrow \infty$	$a^n \rightarrow \infty$
$i_I = i_J = 0$	$M_I = M_J = 0$

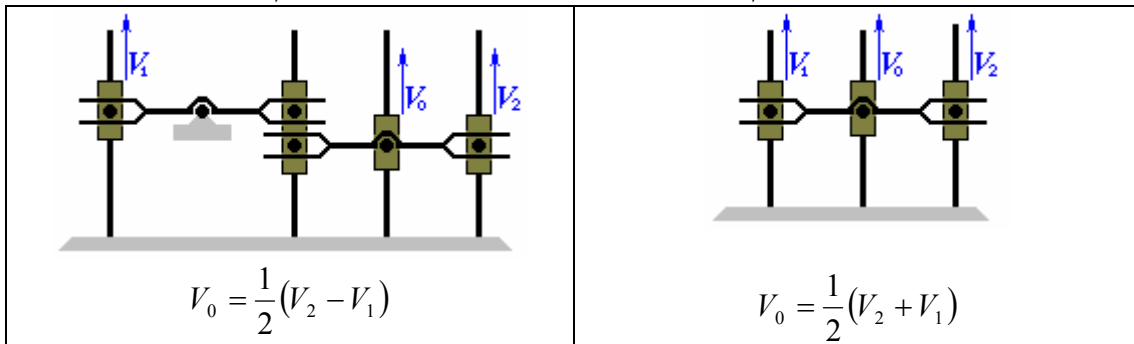
איור-7.21: מערכת מכאנית סיבובית המייצגת מגבר שרת אלקטרוני. המהירויות $\pm \omega_s$ המשמשות כמקור הספק משלים למערכת המכאנית הן אנאלוגיות למתחים $\pm V_{CC}$ המשמשים גם הם כמקור הספק משלים למערכת האלקטרונית.

7.3.2 מגבר שרת במערכת מכאנית קווית:

באופן זהה לגמרי למערכת הסיבובית נבנה את מגבר השרת במערכת מכאנית קווית ממקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל מכאני קווי המתואר באיור-7.22 ומדיפרנציאל מכאני המתואר באיור-7.23

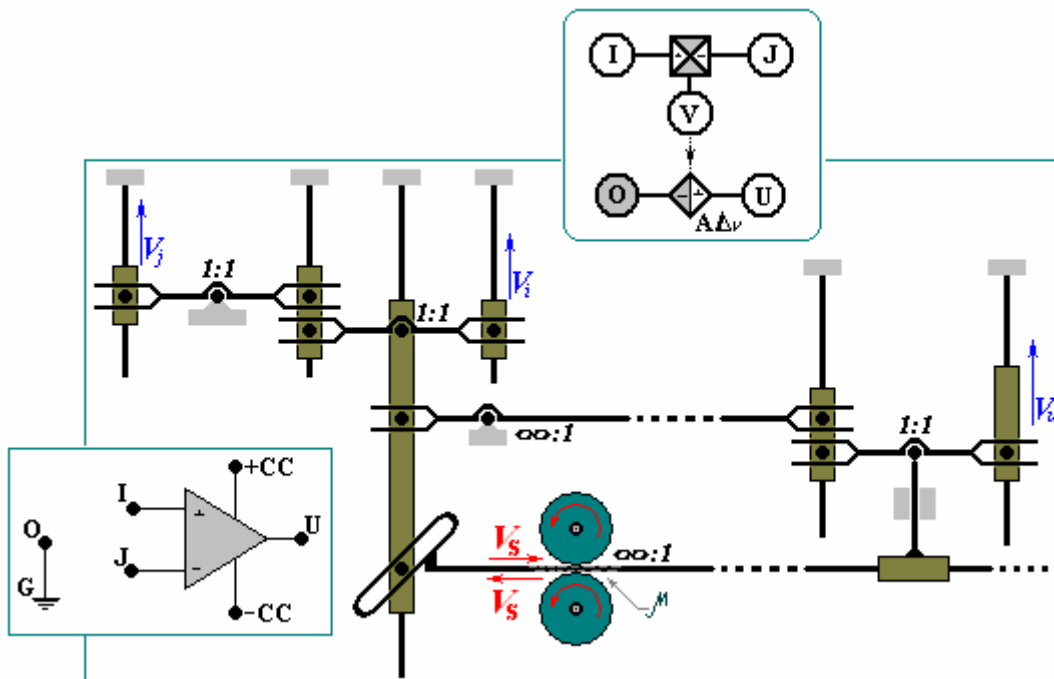


איור-7.22: מקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל של מערכת מכאנית קווית.



איור-7.23: דיפרנציאל של מערכת מכאנית קווית.

מערכת המשלבת את המקור התלוי והדיפרנציאל למערכת התואמת את המגבר שרת האלקטרוני מתוארת באיור-7.24.

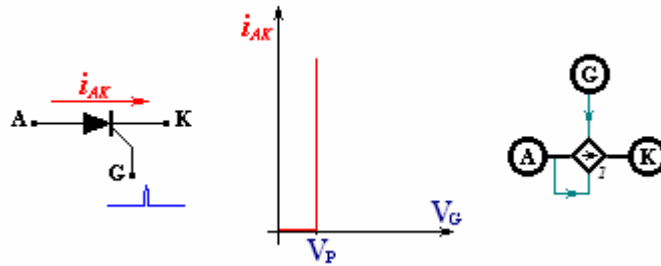


טרנזיסטור אלקטרוני:	טרנזיסטור מכאני:
$V_{U/0} = A(V_I - V_J)$	$v_U = A(v_I - v_J)$
$A \rightarrow \infty$	$A \rightarrow \infty$
$i_I = i_J = 0$	$F_I = F_J = 0$

איור-7.24: מגבר שרת במערכת מכאנית קווית.

7.4 מיישר מבוקר (SCR – Silicon Controlled Rectifier):

ה-SCR הוא רכיב עיקרי ממשפחת הטרנזיסטורים ומידע עליו מצוי בנספח. הרכיב ואופיין העבודה של הרכיב האידיאלי מתואר באיור-7.25:



איור-7.25: תיאור ה-SCR.

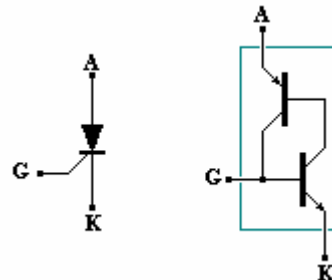
רכיב שלושה הזקים בדומה לטרנזיסטור אולם צורתו הכללית מזכירה דווקא דיודה. ואכן הוא מתפקד במערכת אלקטרונית כרכיב חד-כיווני מבוקר המעביר זרמים (גדולים) בכיוון אחד וגם כמתג ON/OFF מבוקר.

כאשר ישנו מתח V_{AK} כלשהו אולם $V_{GK}=0$ הרכיב מתפקד כנתק. כאשר בין ההזקים AG נותנים מתח בצורת פולס קטן בגודל V_P , מתרחשת "הצתה" של הרכיב והוא עובר למצב הולכה ומתפקד כרכיב חד-כיווני המסוגל להעביר זרמים גדולים. על מנת להפכו שוב לנתק יש להקטין לאפס את הזרם i_{AK} הזורם דרכו.

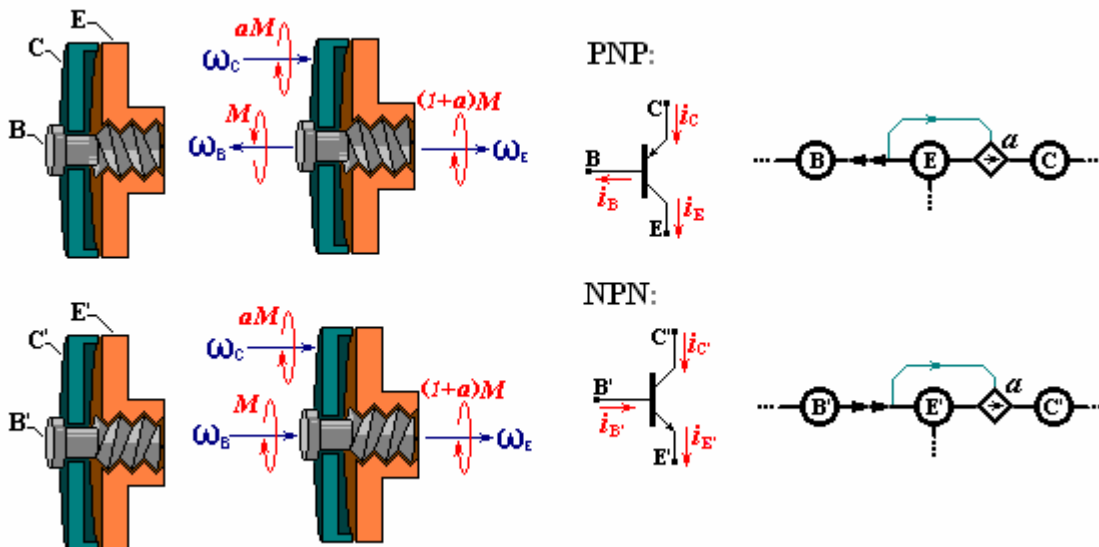
7.4.1 פיתוח ה-SCR במערכת מכאנית סיבובית:

הסכמה המבנית של הרכיב מתוארת באיור הבא:

איור-7.26: סכמה מבנית של SCR בצורת צימוד בין שני טרנזיסטורים אידיאליים PNP ו-NPN (הטרנזיסטור עם החץ הנכנס לקו העבה הוא מסוג PNP).



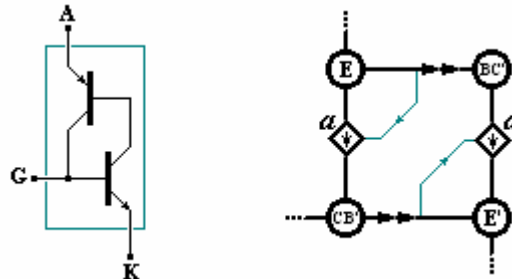
ניתן לראות כי מבנה הרכיב מורכב משני טרנזיסטורים המחוברים זה לזה. בסעיף 5.2 נעשה פיתוח מכאני של טרנזיסטור-NPN על פי ייצוגו הגרפי. באותו האופן ניתן לפתח גם את טרנזיסטור-PNP מאחר וייצוגו ידוע (איור-7.27).



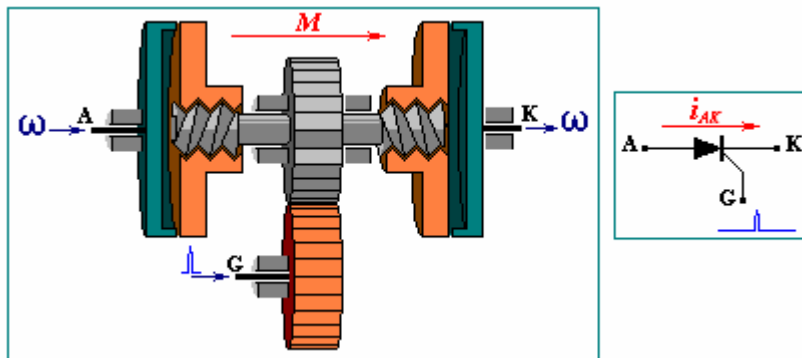
איור-7.27: טרנזיסטור PNP ו-NPN והייצוגים הגרפיים שלהם.

באופן מעשי בתחום האלקטרוני לא בונים את הרכיב על פי התרשים המתואר ב-7.26 מאחר ותיאור זה כולל טרנזיסטורים אידיאליים בעלי "זרם זליגה" אפס [17]. הטרנזיסטורים האלקטרוניים המעשיים אינם כאלה ובפועל מיוצרים טרנזיסטורים מיוחדים. הטרנזיסטורים המכאניים לעומת זאת הם אכן אידיאליים ולכן ניתן לשלבם בייצוג הרכיב. הייצוג הגרפי הכולל ל-SCR מתואר באיור-7.28 הבנוי על שילוב של ייצוגים של שני הטרנזיסטורים.

איור-7.28: מבנה המתואר על ידי שני טרנזיסטורים אידיאליים וייצוגו הגרפי.




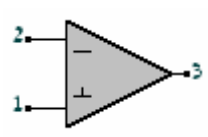
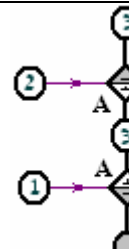
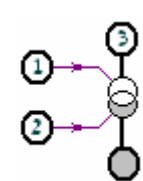
המבנה הסופי שנוצר מטרנספורמציה הפוכה של הייצוג (והמפושט מכאנית) מתואר באיור-7.27. מתן פולס מהירות סיבובית בציר-G יגרום לכך שהתמסורות הבורגיות ההפוכות זו לזו תשלבנה את שני המצמדים ומעבר מומנט בכיוון חיובי מציר-A לציר-K יגרום רק להידוק השילוב של המצמדים וכתוצאה מכך המהירות הזוויתית של ציר-A תועבר בשלמותה גם דרך ציר-K.



איור-7.29: מימוש ה-SCR במערכת מכאנית סיבובית.

7.5. דוגמאות ליישומי תכן:

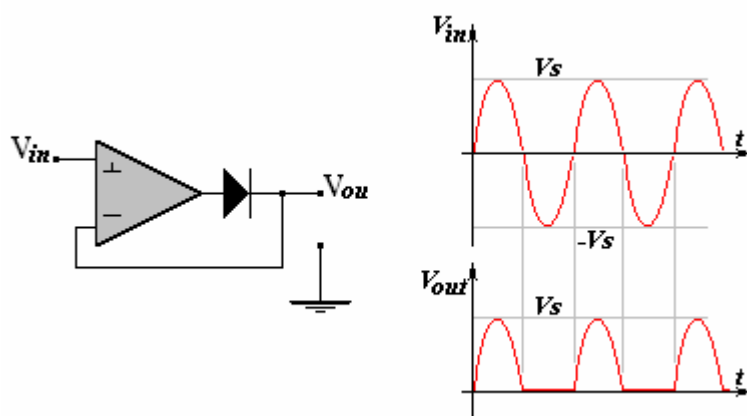
סעיף זה מראה מספר דוגמאות תכן בין תחומי כאשר קונספטים מתחום האלקטרוניקה מועברים לתחום המכאניקה סיבוביות תוך שימוש בייצוג משותף. בסעיף זה המעבר יוצג באופן מידי ולא בדרך מפורטת כפי שנעשה בפרקים הקודמים. הסיבה לכך היא שמערכת מגבר השרת המכאנית המתוארת באיור-7.21 מאד מורכבת, ולכן נשתמש באיור פשוט שלה על מנת להקל על הבנת יתר המכלולים. כמו כן לשם הפשטות גם בייצוג הגרפי נגדיר עבור מגבר השרת סמל מיחד כמתואר באיור-7.31.

מגבר שרת מכאני סיבובי: (איור-מפושט)	מגבר שרת: אלקטרוני:	ייצוג גרפי מלא של מגבר שרת:	ייצוג גרפי מקוצר של מגבר שרת:
			

איור-7.31: מערכת מגבר שרת- תיאורים הנדסיים וייצוגים גרפיים מפושטים.

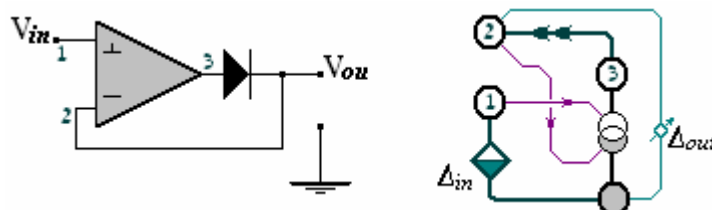
מישר חצי-גל פעיל (Active half-wave rectifier):

המערכת האלקטרונית המתוארת באיור-7.32 [17] מעבירה רק מתחים חיוביים מהכניסה למוצא ביחס תמסורת 1:1 ומחזיקה מתח אפס באופן קשיח במוצא בזמן שבכניסה המתח שלילי. בשונה ממישר מתח רגיל זוהי מערכת פעילה שאינה מעמיסה את הכניסה ומהווה חוצץ בין הכניסה למוצא ז"א שעבור כל עומס שלא נשים במוצא הזרם הכניסה תמיד תהיה אפס.

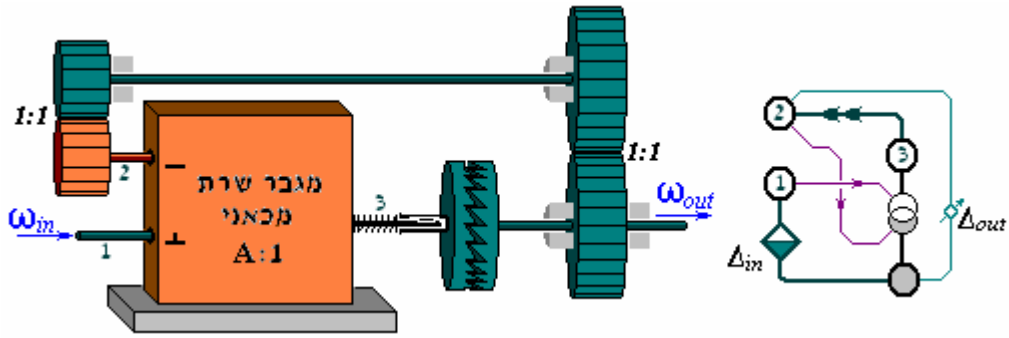


איור-7.32: מישר חצי-גל פעיל אלקטרוני והאופן שלו.

נעשה למערכת זאת מערכת מכאנית סיבובית אנלוגית כמתואר באיור-7.33א. המערכת האנלוגית תוציא בציר המוצא-2 מהירות זוויתית זהה לזו הנכנסת בציר הכניסה-2 בשעה שזו האחרונה חיובית ובשעה שהיא אפס או שלילית המערכת תחזיק את ציר המוצא במהירות אפס קשיחה. המומנט שנצטרך להפעיל בציר-1 יהיה זניח, ללא קשר לגודל העומס שיפעל על ציר-2 ותלוי בגודל המהירות בה נסובב אותו. הייצוג הגרפי של המערכת האלקטרונית מתואר באיור-7.33.



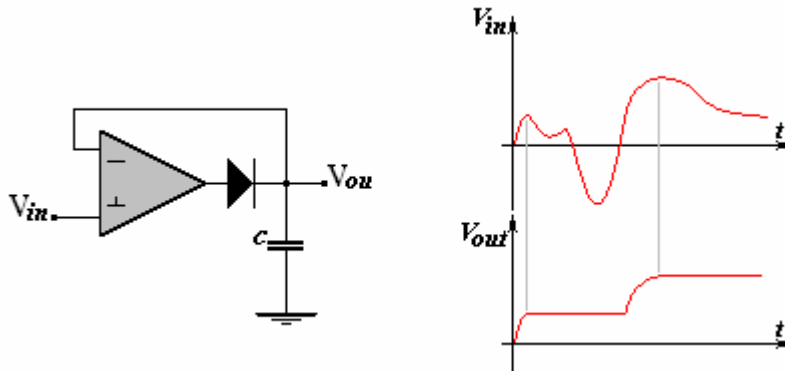
איור-7.33: ייצוג גרפי של מערכת מישר חצי-גל פעיל אלקטרוני.



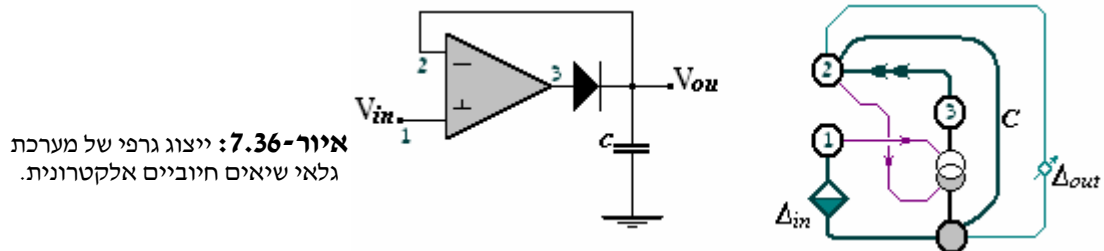
איור-7.33: מערכת מכאנית סיבובית אנלוגית למערכת אלקטרונית של "מישר חצי-גל פעיל".

גלאי שיאים חיוביים:

גלאי שיאים [17] היא מערכת אלקטרונית המוציאה את המתח הגדול ביותר שיהיה בכניסתה מזמן תחילת פעולתה. במערכת האלקטרונית המתוארת באיור-7.35 שמירת הערך המרבי של מתח הכניסה נגרם כתוצאה מן הקבל במוצא וממשוב של הכניסה השלילית. המערכת המכאנית האנלוגית מתוארת באיור-7.36.

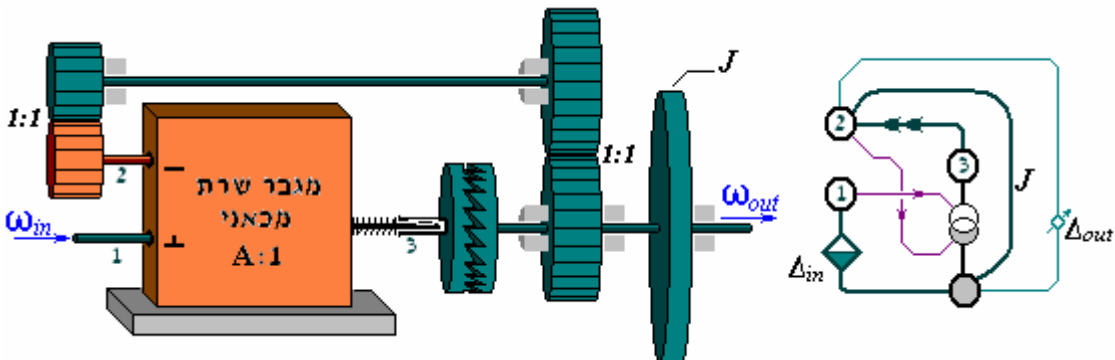


איור-7.35: מערכת אלקטרונית של גלאי שיאים חיוביים והאופין שלה.



איור-7.36: ייצוג גרפי של מערכת גלאי שיאים חיוביים אלקטרונית.

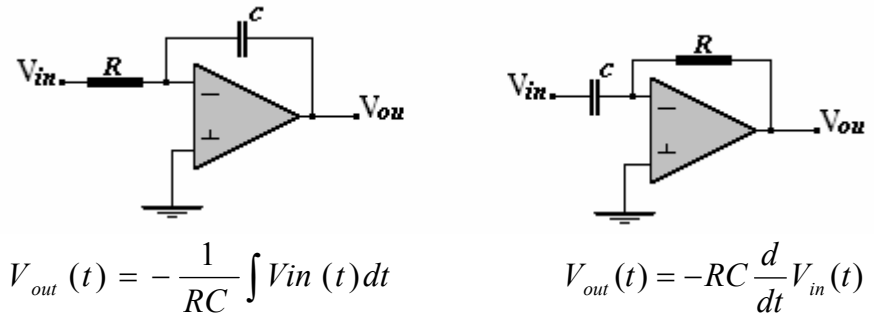
קשת קבל בגרף, כשהיא מייצגת אלמנט מכאני כגון מסה או אינרציה, היא חייבת להיות מחוברת לצומת הניטרלית כפי שהוסבר בסעיף 4.3.4. ניתן למנוע קושי טכני זה בעזרת שימוש בדיפרנציאל כפי שתואר בפרק-4. מכיוון שבדוגמה שלנו בגרף המייצג את המערכת האלקטרונית קשת הקבל מחוברת ישירות לצומת ניטרלית המימוש במכאניקה ניתן להעשות ללא שימוש בדיפרנציאל.



איור-7.36: מערכת מכאנית אנלוגית למערכת גלאי שיאים אלקטרונית.

אינטגרטור וגזר:

אלו שתי מערכות מאד מוכרות אשר משתמשים בהן בתחום הבקרה בדימוי מערכות פיזיקאליות. מוצא המערכות הללו כמתואר באיור-7.37 הוא גזירה או אינטגרציה לפי הזמן של אות הכניסה [17].

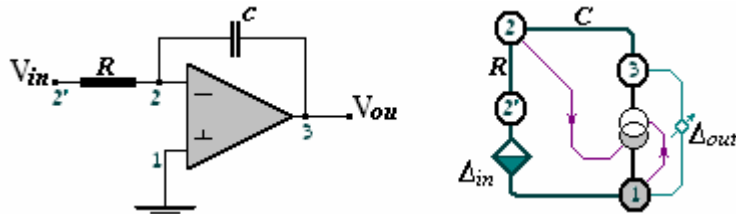


$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt$$

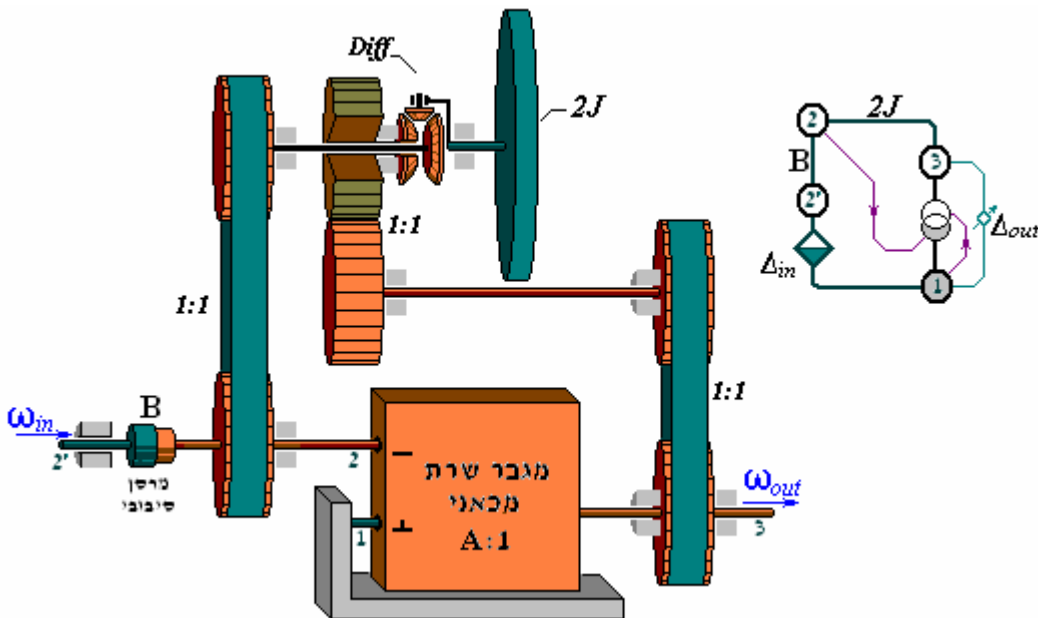
$$V_{out}(t) = -RC \frac{d}{dt} V_{in}(t)$$

איור-7.37: מעגל גזירה (מימין) ומעגל אינטגרטור (משמאל).

ניישם במערכת מכאנית סיבובית את מעגל האינטגרטור. יש לשים לב כי בייצוג הגרפי קשת הקבל אינה מחוברת לצומת ניטראלית ולכן יש לעשות חיסור פוטנציאלים של הצמתים 2 ו-3 בעזרת דיפרנציאל. מכיוון שהדיפרנציאל נותן את מחצית החיסור (במקרה שכל התמסורות הן 1:1) האינרציה במערכת המכאנית הוכפלה על מנת לשמור על יחס זהה בין הפרמטרים כמו במערכת האלקטרונית.



איור-7.38: מעגל האינטגרטור והייצוג הגרפי שלו.

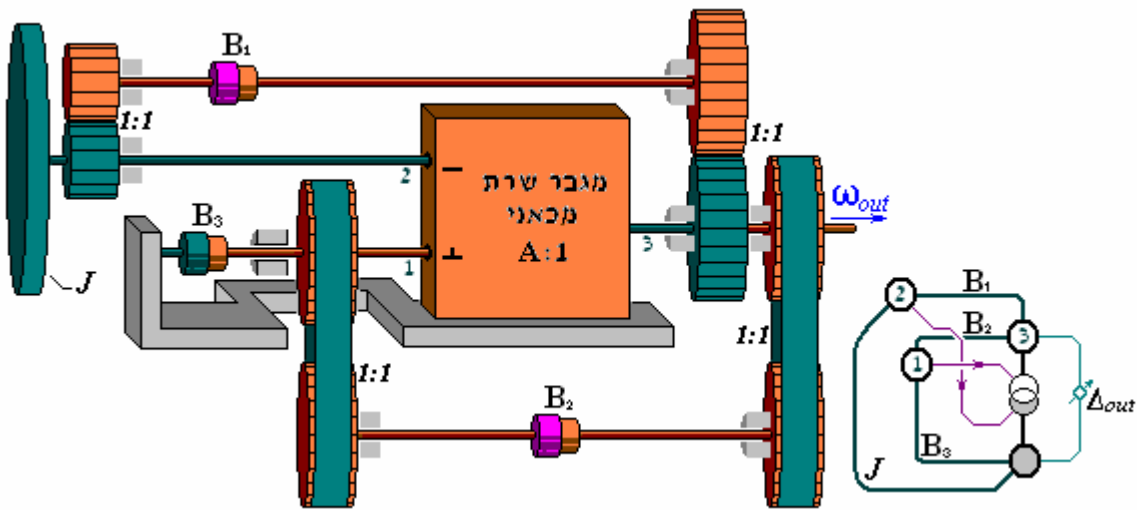
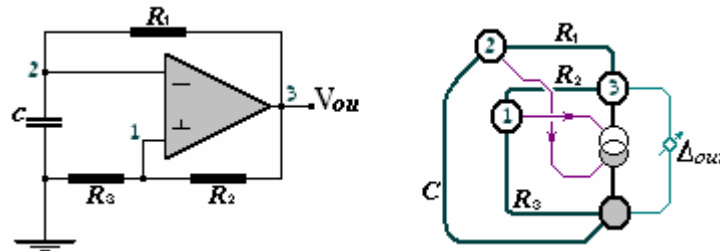
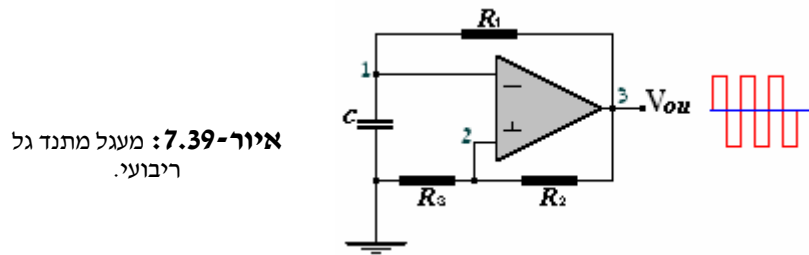


איור-7.38א: מערכת מכאנית סיבובית האנלוגית למעגל האינטגרטור.

מתנד רוויה של גל ריבועי:

המעגל באיור-7.39 מתאר מערכת שמוציאה גל ריבועי אשר אורכי השיא שלו החיובי והשלילי הם מתחי הרוויה של מגבר השרת. המערכת אינה זקוקה למתח כניסה כיוון שכל חוסר-איזון התחלתי, ולו הקטן ביותר, מביא אותה למצב של תנודות [17].

המערכת המכאנית האנלוגית תוציא במוצאה מהירות סיבובית בצורת גל ריבועי, חיובית ושלילית לסרוגין.



חיבור מתנד גל ריבועי יחד עם אינטגרטור בטור ייתן צורת גל משולש במוצא. באופן דומה ניתן לקבל הרבה צורות גל מחזורי. מכיוון שהמערכת כוללת מגברי שרת היא מערכת פעילה, המכילה מקור הספק פנימי, ניתן להשתמש בתצורות הגל המחזורי הללו כמקורות מהירות לכל דבר.

פרק-8: סיכום.

8.1. היעדים שהוצבו:

בעבודה זאת נעשה צעד נוסף לקראת פורמליזציה של תהליך התכן, הפיכתו לשיטתי עם אפשרות למחשובו. היעדים שהוצבו בתחילת העבודה היו:

1. פיתוח שיטות לתכן שתאפשר התמקדות בפונקציונאליות של בעיית התכן ההנדסית. המתודולוגיה מאפשרת העברת מערכות הנדסיות, גם את הטופולוגיה וגם הגיאומטריה וכל זאת באמצעות מודלים מתמטיים מבוססים תורת גרפים. למעשה באמצעות המודלים מועברים קונספטים בין תחומיים לשם ביצוע התכן.

2. פיתוח בין תחומי של מערכות:

א. דיפרנציאל.

ב. טרנזיסטור BJT.

ג. מגבר שרת OA.

מערכות אלו מוכרות כרכיבים בסיסיים מתחומי המכאניקה והאלקטרוניקה בהם ניתן יהיה להשתמש כאבני בניין לתכן מערכות מורכבות על בסיס העברה בין תחומית של ידע.

8.2. תוצאות:

I. לצורך פיתוח שיטה שתאפשר העברת תכן קונספטואלי מתחום הנדסי אחד לשני נעשו העבודות הבאות:

1. נעשתה פורמליזציה של העברה בין תחומית של מערכות הנדסיות בעזרת ייצוג גרפי משותף ובעזרת ייצוג גרפי דואלי.

2. בהמשך לכך הוצגה שיטת תכן בה מתחילים את התכן עם מערכת התחלתית ידועה שאינה מקיימת את הדרישות הפונקציונאליות במלואן. למערכת זאת מוצאים מערכת בתחום הנדסי אחר אשר בו קל לשנות את המערכת כך שתבצע את הפונקציונאל השקול. באמצעות המודל הגרפי מבצעים את אותו השינוי במערכת בתחום המקורי.

3. שיטה נוספת שפותחה בתזה מבצעת את כל תהליך התכן בתחום הגרפי. בשיטה זאת בונים ייצוג אשר בתחום הגרפי מקיים את כל הדרישות הפונקציונאליות. ייצוג זה מחלקים לתת ייצוגים המגדירים אלמנטים הידועים לנו זה מכבר וכל שנותר לנו הוא לבצע את הרכבת המערכת.

4. בנוסף לשיטות המתוארות פותחו מספר אמצעי עזר טכניים המסייעים בבניית אלמנטים חדשים.

א. פותחה שיטה בה בעזרת מנגנון דיפרנציאל ניתן להפוך פוטנציאל של צומת להפרש פוטנציאליים על קשת ולהפך.

ב. פותחו מערכות המממשות מקור זרימה תלוי זרימה ומקור פוטנציאל תלוי פוטנציאל בתחום מכאני קווי ומכאני סיבובי.

II. נעשתה העברת תכן קונספטואלי בין התחומים מכאני ואלקטרוני של המערכות המצוינות לעייל. המערכות שיתקבלו מתוארות בפרקים 4 ו-7. ניתן לראות כי בנוסף לפונקציונאליות התואמת בין התחומים גם התנהגות המערכות עוברת.

8.3. מסקנות:

המסקנות העיקריות שנתקבלו מיישום שיטות התכן השונות בדוגמאות של תכן ממשי שחלק הוצג בגוף העבודה הן :

1. ייצוג מתאים של מערכות הנדסית מונע צורך בהפעלת שיקולים הנדסיים/טכניים של גורם אנושי במהלך טרנספורמציה הפוכה של הייצוג למערכת הנדסית בתחום המקורי.
2. תהליך התכן בעזרת ייצוג גרפי המעביר מבנה של מכשיר הנדסי מתחום הנדסי אחד לשני, מעביר בנוסף לפונקציונאליות גם את ההתנהגות. התנהגות זאת יכולה להיות מאובחנת כבר בשלב הייצוג.
3. בהרבה מקרים הפתרונות המתקבלים בתהליך של העברה ביו תחומית של תכן קונספטואלי הם מעניינים ובלתי צפויים.
4. למרות ששיטת פתרון בעיות תכן בעזרת העברתו מתחום עזר הנדסי בעזרת ייצוג גרפי תיאורטית מעבירה את הפונקציונאליות הנדרשת ופותרת את בעיית התכן בתחום המקורי, הרי שלא תמיד המערכת המתקבלת בתחום המקורי היא יעילה מספיק (מבחינת נצילות אנרגיה/הספק) על מנת לשמש כמתקן הניתן ליישום פרקטי.
5. ככל שייצוג המערכת הנדסית בתחום מסוים פשוט יותר (לדוגמא ייצוג מערכת בעזרת גרף פוטנציאליים - PGR לעומת ייצוגה בעזרת גרף התנגדות - RGR) כך גדלה ישימותו לתחומים הנדסיים אחרים.



מקורות

1. Alperovich, J. *Dynamics*, ORT Israel Publication, Israel, 1986.
2. Altshuller, H. *The Art of Inventing (And Suddenly the Inventor Appeared)*, Worcester, MA: Technical Innovation Center, 1994.
3. Antonsson, E.K. *et al.* *Formal Engineering Design Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
4. Artobolevsky, II. *Mechanisms in Modern Engineering Design*, MIR Publishers, Moscow, 1986.
5. Beer, F.P. and E.R. Jhohnston. *Vector Mechanics for Engineers*, McGraw-Hill Co., N.Y., 1977.
6. Chakrabarti, A. and T.P. Bligh. An approach to functional synthesis of solutions in mechanical conceptual design, Part I: Introduction and knowledge representation, *Research in Engineering Design*, Vol. 6, pp. 127-141, 1994.
7. Chakrabarti, A. and T.P. Bligh., An approach to functional synthesis of solutions in mechanical conceptual design. Part III: spatial configuration, *Research in Engineering Design*, pp. 116-124, 1996.
8. Chernobelsky, A. *Systematic Inventive Thinking and Technological Problems Solving*, Kronenberg Professional Book, Tel-Aviv, 1997.
9. Chiou, S.J. *Conceptual Design of Mechanisms Using Kinematic Building Blocks A Computational Approach*, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1994.
10. Dobrjanskyj, L. and J. Freudenstein. Some application of graph theory to the structural analysis of mechanisms, *Journal of Engineering for Industry*, pp. 153-158, 1967.
11. Ernst, G. and A. Newell. *GPS: A Case Study in Generality and Problem Solving*, New York, Academic Press, 1969.
12. Gero, J.S. and V. Kazakov. Using Analogy to Extend the Behaviour State Space in Creative Design, *Computational Models of Creative Design IV.*, Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sydney, Sydney, Australia, pp. 113-143, 1999.
13. Goldberg, D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley 22, 1989.
14. Goodman, E.D. *et al.*, Toward a Unified and Automated Design Methodology for Multi-Domain Dynamic Systems Using Bond Graphs and Genetic Programming, *Mechatronics*, Vol. 13, pp. 851-885, 2003.

15. Koza, J.R. *et al.*, Automated Synthesis of Analog Electrical Circuits by Means of Genetic Programming, *IEEE Trans. Evol. Computation*, Vol. 1, pp.109-128, 1997.
16. Malmqvist, J. Computational synthesis and simulation of dynamic systems, *ASME Proceedings of the Design Theory and Methodology Conference*, ASME, New York, pp. 221-230, 1994.
17. Millman, J. and C.C. Halkias. *Integrated Electronics*, McGRAW-HILL Com., N.Y., 1986.
18. Navinchandra, D. *Exploration and Innovation in Design*, Springer-Verlag, N.Y., 1991.
19. Norton R.L. *Design of Machinery*, McGRAW-HILL Com., N.Y., 1992.
20. Paynter, H.M. *Analysis and Design of Engineering Systems*, MIT Press, Cambridge, 1961.
21. Pesen, D. and A. Shavit. *Machine Theory*, Mithlal, Israel, 1986.
22. Qian, L. and J.S. Gero. A Design Support System Using Analogy , *Artificial Intelligence in Design*, 1992.
23. Shai, O. The Duality Relation between Mechanisms and Trusses, *Journal of Mechanism and Machine Theory*, Vol. 36(3), pp. 343-369, 2001.
24. Shai, O. The Multidisciplinary Combinatorial Approach and its Applications in Engineering , *Journal of AIEDAM – AI for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 15(2), pp. 109-144, 2001.
25. Shai, O. Utilization of the Dualism between Determinate Trusses and Mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 37(11), pp. 1307-1323, 2002.
26. Shai, O. Design through Common Graph Representations, *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Chicago, September 2-6, 2003.
27. Shai, O. and K. Preiss. *Isomorphic Representation and Well-Formedness of Engineering Systems*, Springer-Verlag London Limited, 1999.
28. Shearer, J.L. *et al.*, *Introduction to System Dynamics*, Addison- Wesley Publication Com., 1969.
29. Shooter, S.B. *et al.*, A Model for Information Flow in Design, *ASME International Design Engineering Technical Conferences* , September 10-13, Baltimore, Maryland, 2000.

30. Stein, B. and E. Vier. Structural analysis in control systems design of hydraulic drives, *Elsevier Science Ltd*, 2000.
31. Suh, N.P. *The Principles of Design*, Oxford University Press, 1990.
32. Tsai, L.W. *Mechanism Design Enumeration of Kinematic Structures According to Function*, CRC Press New York, 2001.
33. Ulrich K.T. and W.P. Seering. Synthesis of Schematic Descriptions in Mechanical Design, *Research in Engineering Design*, Vol. 1, pp.3–18, 1989.
34. Ulrich K.T. and W.P. Seering. Function Sharing in Mechanical Design, *Artificial Intelligence in Engineering Design*, Academic Press, Vol. 2, pp. 185-213, 1992.

A.1 רכיבים אלקטרוניים

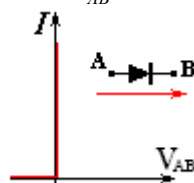
A.1.1 דיודה:

הדיודה [17] היא רכיב אלקטרוני בסיסי ששימושו העיקרי הוא הולכת זרם חשמלי רק בכיוון אחד. הדיודה היא צומת-PN (מוליך למחצה מסוג-P עם מוליך למחצה מסוג-N) ומעבירה זרם דרכה רק עם המתח עליה חיובי כפי שיתואר בהמשך.

תיאור מבני:	תיאור אלקטרוני:	ייצוג גרפי:
A-P-N-B	A → B	⊙A → ⊙B

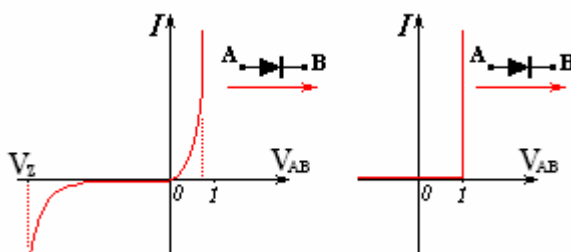
טבלה-A.1: תיאור הדיודה. כיוון הזרמה האפשרי של הזרם החשמלי הוא בכיוון החץ.

עבור דיודה אידיאלית תמיד מתקיים $V_{AB} \leq 0$ (או במונחי פוטנציאלים $\pi_A \leq \pi_B$) כמתואר באיור-8.1. כאשר מפל הפוטנציאלים על הדיודה הוא אפס אז היא הופכת למוליך חד-כיווני וכאשר הוא שלילי, דהיינו $V_{AB} < 0$ אזי הדיודה היא נתק.



איור-A.1: אופיין דיודה אידיאלית.

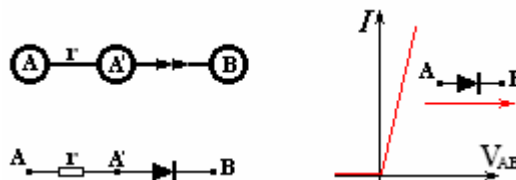
עבור דיודה ממשית מקובל להניח כי מתקיים תמיד $V_{AB} \leq 1[Volt]$ עבור דיודת סיליקון). כאשר $V_{AB} \approx 1[Volt]$ הדיודה היא מוליך חד-כיווני וכאשר $V_{AB} < 0$ היא נתק. התחום $0 \dots 1[Volt]$ הוא תחום מעבר שמשתדלים לא להימצא בתוכו. למעשה קיימת תלות מאד לא ליניארית של הזרם במתח כמתואר באיור-A.2.



איור-A.2: אופיין דיודה ממשית.

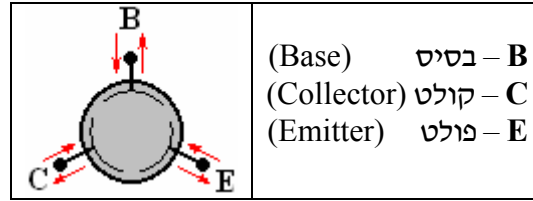
המתח ההפוך אותו יכולה הדיודה להחזיק הנו בעל ערך מרבי V_Z ומעבר לו היא נפרצת ומאפשרת הולכת זרם לכיוון ההפוך. לעיתים מקובל לעשות קירוב לדיודה מעשית בעזרת דיודה אידיאלית ונגד קטן- r המחוברים בטור כמתואר באיור-A.3.

איור-A.3: קירוב לדיודה מעשית בעזרת דיודה אידיאלית ונגד קטן וייצוגו הגרפי.



A.1.2 טרנזיסטור BJT :

הטרנזיסטור הדו-נושאי BJT (Bipolar Junction Transistor) [17] הנקרא גם טריודה מוליכה-למחצה הוא אבן בניין לכל האלקטרוניקה (דיודות, מגברי שרת, אוגרים, מעבדים וכ"ו) ובעיקרו מוצג כהתקן להגברת אותות. באופן כללי הטרנזיסטור הוא התקן - צומת עם שלוש כניסות/יציאות הנקראות קולט, פולט ובסיס כמתואר באיור-A.4 :



איור-A.4: טרנזיסטור BJT.

הטרנזיסטור מורכב משלוש שכבות של מוליך למחצה (בד"כ סיליקון) לסירוגין. בהתאם לכך מבדילים בין שני סוגי טרנזיסטורים PNP ו-NPN. איור-A.5 מתאר את המבנה והסמל האלקטרוני של כ"א מהסוגים :

מבנה PNP :	מבנה NPN :	
<p>קולט בסיס פולט</p>	<p>קולט בסיס פולט</p>	מבנה מל"מ
		סמל אלקטרוני

איור-A.5: טרנזיסטור PNP וטרנזיסטור NPN.

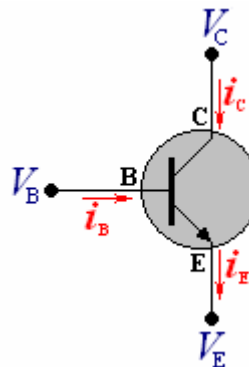
לצורך תכן קונסטרוואלי באלקטרוניקה אין הבדל מהותי בין אם משתמשים בטרנזיסטור בעל מבנה NPN או משתמשים במבנה PNP כיוון שעקרונות כל מה שניתן לבצע עם אחד ניתן גם לבצע עם השני וכל ההבדל ביניהם הוא באיכות המוצר המתקבל.

A.1.2.1 תכונות טרנזיסטור אידיאלי :

א. הגבר זרם בסיס בקולט :

כאמור הטרנזיסטור הוא צומת של שלוש כניסות/יציאות. נתייחס לציור המופיעה בעמוד הבא בו כיוון הזרמים יחשב כחיובי.

הטרנזיסטור כצומת מקיים את חוק הזרימות בהתאם למסומן באיור-A.6 :



איור-A.6: זרמים בטרנזיסטור.

$$\sum i_{transistor} = 0$$

$$i_E = i_B + i_C$$

כמו כן מתקיים בטרנזיסטור יחס ישר בין זרם הבסיס לזרם הקולט.

$$i_C = \beta \cdot i_B \quad (A.1)$$

$$i_E = (1 + \beta)i_B \quad \text{וכן:}$$

כאשר המקדם β הוא גודל קבוע (חסר יחידות) לכל טרנזיסטור וטרנזיסטור וערכו נע בין 30 ל 100 בטרנזיסטור מעשי. יחס זה מתקיים כל עוד מתקיימים הגורמים הבאים:

$$\begin{cases} i_B \geq 0 \\ V_{BE} < 0 \\ V_{CE} > 0 \end{cases}$$

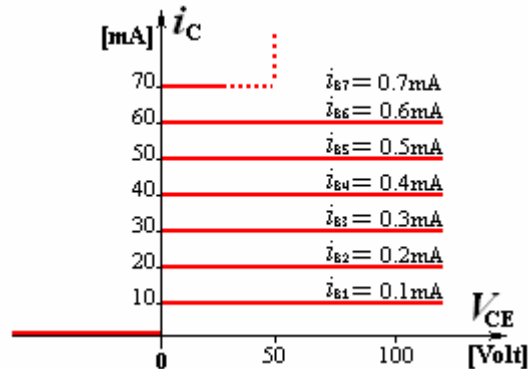
אם מנסים להזרים זרם שלילי דרך כניסת הבסיס (B) אזי כניסה זו הופכת לנתק ז"א לא מאפשרת מעבר זרם דרכה ובהתאם לכך מתקבל גם ש:

$$i_B = i_C = i_E = 0$$

$$V_{BE} \leq 0 \quad \text{עבור מתח בסיס פולט בטרנזיסטור תמיד מתקיים:}$$

$$V_{BE} = 0 \quad \text{אולם במשטר עבודה רגיל תמיד יתקיים:}$$

לגבי מתח קולט פולט V_{CE} הרי שכל עוד הוא חיובי אזי אינו משפיעה כלל על הזרמים כמתואר בגרף הבא.

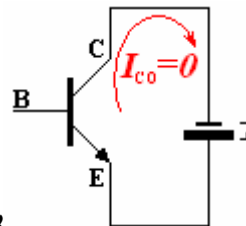


איור-7.A: קשר בין מתח קולט-פולט, זרם בסיס וזרם הקולט.

המשוואה A.1 מעשה מייצגת את מהות הטרנזיסטור כאלמנט שבאמצעותו יוצרים "מקור זרם תלוי זרם".

ב. זרם דליפה - אפס:

זרם דליפה או זרם הפוך (I_{CO}) הוא זרם הנוצר כתוצאה מחיבור הטרנזיסטור בקוטביות הפוכה בין קולט ופולט כלומר: $V_{CE} < 0$.

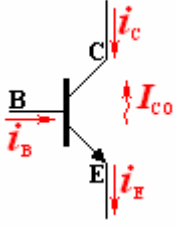
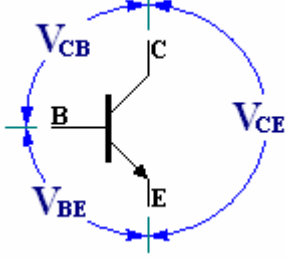


איור-8.A: חיבור קולט/פולט בקוטביות הפוכה.

במצב כזה טרנזיסטור אידיאלי יתנהג כנתק ולא יזרום שום זרם דרך הקולט.

A.1.2.2 תכונות טרנזיסטור ממשי :

תכונות טרנזיסטור אידיאלי באות בקירוב די טוב בטרנזיסטור ממשי. לגבי הפוטנציאלים והזרמים בטרנזיסטור ממשי מתקבל באופן כללי:

	
$i_C = \beta i_B + (1 + \beta) I_{CO}$	$V_{CB} + V_{BE} = V_{CE}$

איור-9.A: תיאור טרנזיסטור ממשי.

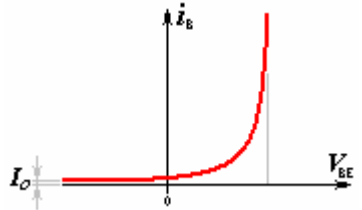
כאשר I_{CO} הוא זרם דליפה או זרם הפוך שגודלו קטן מאד ובד"כ מוזנח (מסדר גודל של כמה מיקרו אמפרים) והוא פונקציה די חזקה של טמפרטורה (מכפיל עצמו כל 10°C). למעשה הטלות מסובכת אף יותר:

$$V_{BE} = f_1(V_{CE}, i_B)$$

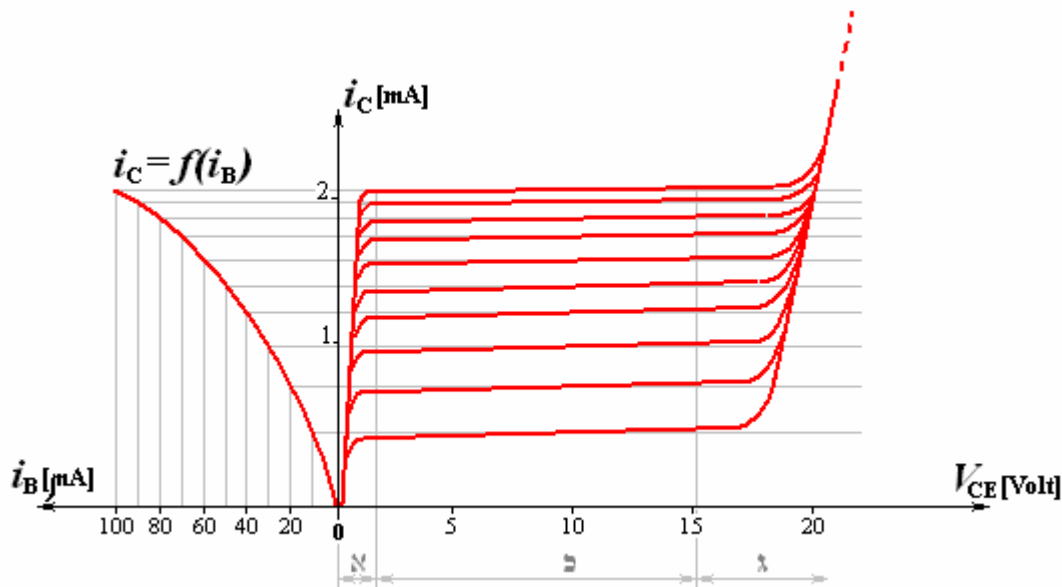
$$i_C = f_2(V_{CE}, i_B)$$

בעוד שבטרנזיסטור אידיאלי המתח V_{BE} הוא אפס הרי שכאן הוא אנלוגי למתח דיודה (תלות מאריכית בינו לבין הזרם בבסיס):

$$(A.2) \quad i_B = I_O (\mathcal{E}^{kV_{BE}/T} - 1)$$

	<ul style="list-style-type: none"> I_O - זרם דליפה דרך הבסיס. k - קבוע חסר יחידות. \mathcal{E} - קבוע דיאלקטרי של אוויר. T - טמפרטורה ב $^{\circ}\text{K}$.
---	--

באופן מעשי במרבית החישובים מניחים כי מתח V_{BE} קבוע וגודלו כ 0.5Volt ונקרא מתח סף. מצב בו מתח בסיס-פולט קטן ממתח הסף נקרא "כתאון" והטרנזיסטור מתנהג כנתק למעבר זרם. מקדם הגברת הזרם בטרנזיסטור הממשי אינו קבוע ותלוי במתח בין קולט לפולט וכן בזרם בסיס. כמו כן בניגוד לטרנזיסטור אידיאלי הזרם בקולט תלוי במתח בין קולט לפולט בתלות המתוארת בגרף הבא:



איור-10.A: אופיין העבודה של טרנזיסטור ממשי.

תחום א' נקרא רוויה. תחום זה הוא מאד קטן בו המתח קולט-פולט קטן מדי ושינויים קטנים בו יוצרים שינויים גדולים בזרם דרך הקולט.
 תחום ב' נקרא תחום העבודה. תחום זה רכב מאד והשפעת המתח קולט-פולט בתחום זה כמעט ואינה ניקרת.
 תחום ג' נקרא תחום פריצה. כאשר מתח קולט-פולט גדול מדי הטרנזיסטור נפרץ וחדל מלשמש כמגבר זרם. תחת זאת הוא משמש כצומת רגילה המקיימת את חוק הזרימות.

$$\bar{i}_B + \bar{i}_C + \bar{i}_E = 0$$

אלו הן התכונות העיקריות של הטרנזיסטור הדו-נושאי שבזכותן הוא משמש בשני תפקידים עיקריים בעולם האלקטרוניקה:

1. **מקור זרם מבוקר זרם:** בזכות התכונה שזרם הקולט (או הפולט) הוא פונקציה של זרם בסיס ביחס ישר.
2. **מתג מבוקר:** בזכות התכונה (או המגבלה) של מצב ה"כטעון" של הטרנזיסטור כך שע"י שליטה במתח בסיס-פולט ניתן להפוך את הטרנזיסטור פעם ל"נתק" ופעם ל"קצר".

יש לציין שתכונה מספר "2" לא באה לידי ביטוי בטרנזיסטור האידיאלי כיוון שאין לו מתח סף. אולם כפי שנראה בהמשך העבודה הזאת ישנן שיטות המאפשרות לקבל תכונה זאת גם אם משתמשים בטרנזיסטור אידיאלי.

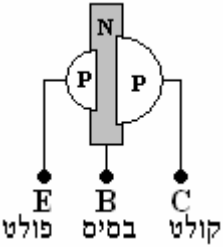
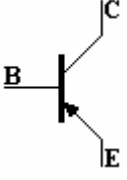
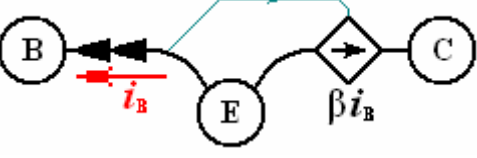
A.1.2.3 ייצוג של טרנזיסטור דו-נושאי ע"י גרף התנגדות RGR :

טרנזיסטור NPN אידיאלי :

סכמה מבנית :	סכמה אלקטרונית :	גרף התנגדות :

איור-11.A: טרנזיסטור NPN אידיאלי.

טרנזיסטור PNP אידיאלי :

סכמה מבנית :	סכמה אלקטרונית :	גרף התנגדות :
		

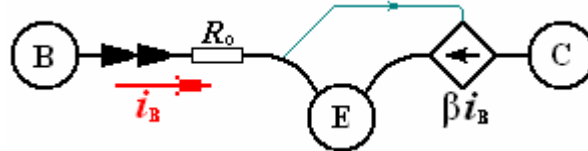
איור-12.A: טרנזיסטור PNP אידיאלי.

בשני הייצוגים יש שני קשתות אחת של מקור זרם תלוי זרם עם מקדם הגברה קבוע β ואחת של קשת חד-כיוונית. שני קשתות אלו מחוברות זו לזו ע"י צומת E.

A.1.2.4 ייצוג לטרנזיסטור ממשי :

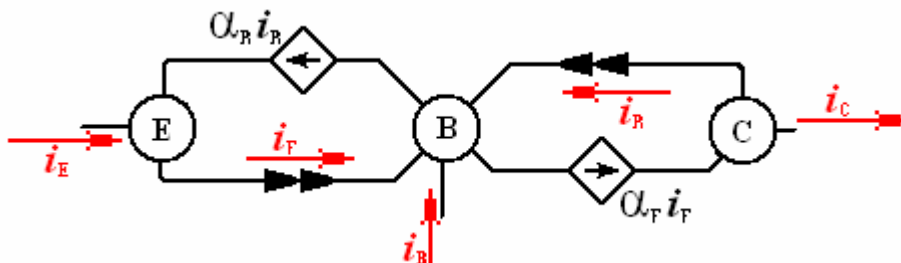
ישנם מספר מודלים עבור ייצוג של טרנזיסטור ממשי כיוון שאין בכוונתי להיכנס לעומקם של המודלים הללו אתייחס בקיצור רק לבסיסיים ביותר שבהם.

בתרשים הבא מופיע ייצוג הדומה לייצוג הטרנזיסטור האידיאלי פרט לכך שבקשת החד כיוונית BE מופיעה התנגדות קטנה R_0 , בצורה כזאת עושים קירוב מסדר ראשון לדיודה הממשית.



איור-13.A: ייצוג טרנזיסטור NPN ממשי.

בתרשים הבא מופיע ייצוג של טרנזיסטור ממשי הנקרא דגם Ebers – Moll. מודל זה נכון עבור טרנזיסטור PNP או NPN (בחיבור הפוך של הקשתות חד-כיווניות).



איור-14.A: מודל Ebers-Moll לטרנזיסטור NPN ממשי.

המודל מתאר את הטרנזיסטור כחיבור של שתי קשתות חד-כיווניות התואמות לדיודות ממשיות עם השפעה הדדית המתוארת ע"י מקורות זרם תלויים.

α_F ו- α_R הם מקדמים קבועים.

התלות בין זרימה להפרש פוטנציאלים וכן בגורם הטמפרטורה בקשתות החד-כיווניות המיוחדות (הממשיות) מתוארת בקשר הבא :

$$(A.3) \quad i_F = I_{FO} \left(\ell^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) \quad i_R = I_{RO} \left(\ell^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$$

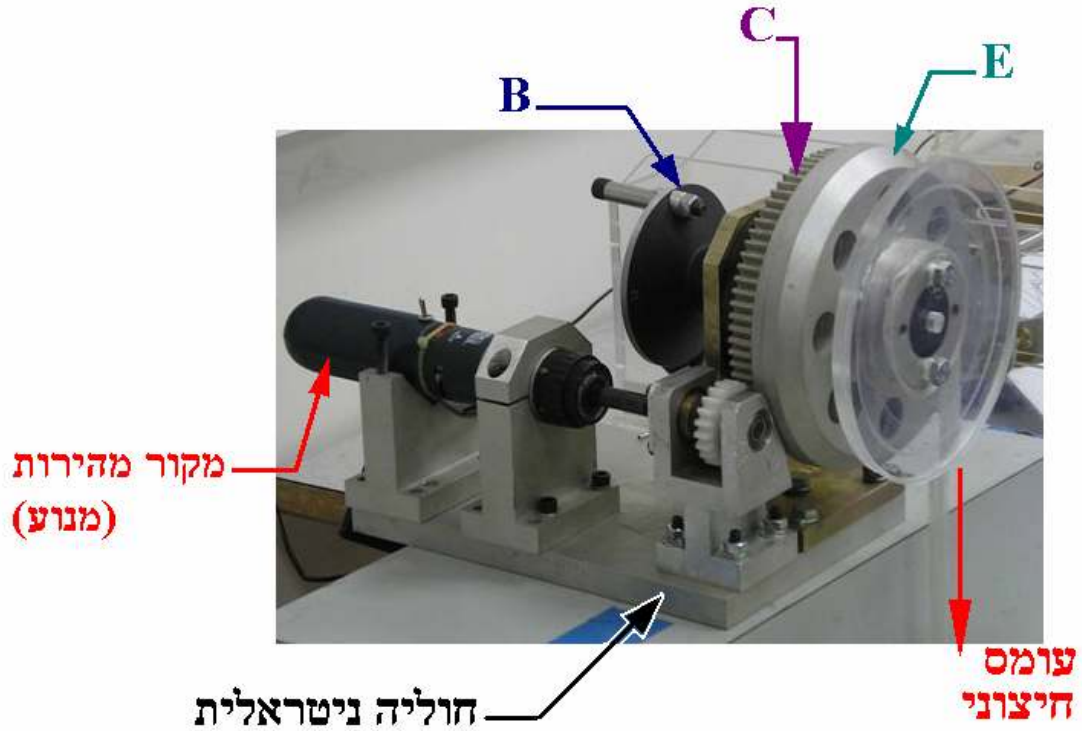
I_{FO} ו- I_{RO} הם זרמי זליגה בקשתות החד-כיווניות והם גדלים קבועים.

מודל זה ומודלים מורכבים אף יותר משמשים כמודלים בתוכנות מחשב לניתוח מעגלים. יש לציין שמודלים אלו למרות מורכבותם הרבה הם רק קירוב לטרנזיסטור הממשי בעוד שהמודל הגראפי לתיאור הטרנזיסטור האידיאלי הוא כן ייצוג מדויק.

A.1.2.5 דגם מכאני לטרנזיסטור:

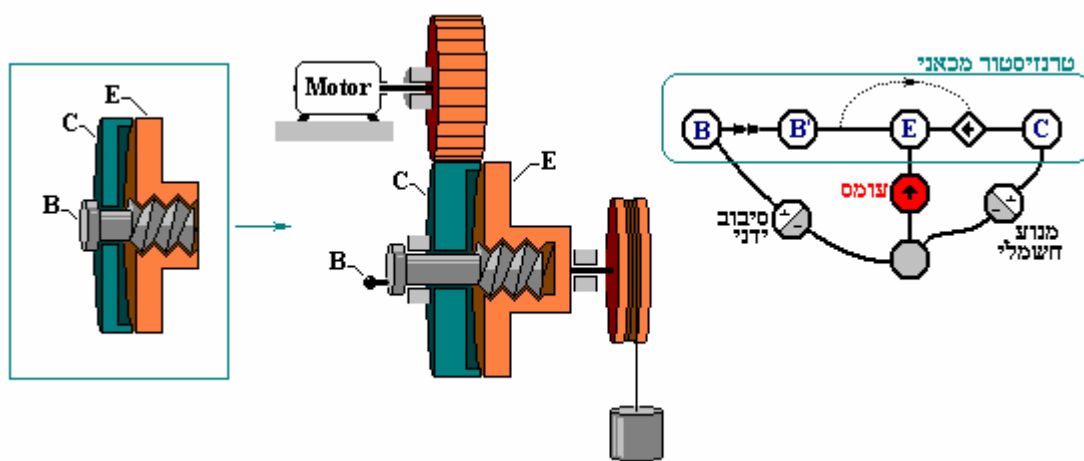
איור-8.16 מתאר דגם מעבדה של הטרנזיסטור שניבנה עם מתמר מערכת קינמטית למערכת סטטית בורגי מיישם אפליקציה של מגבר מומנט כמנגנון הרמה עם יחס תמסורת של 1:1 כמתואר בגרף שבאיור-A.15. צומת C מחוברת ישירות למנוע סיבובי וממנו הנותן לה פוטנציאל מהירות זוויתית יחסית גבוה ויכולת להעביר מומנטים גדולים.

צומת B מונעת ידנית במהירות זוויתית יחסית נמוכה (כ-1 [rps]).
צומת E מחוברת ישירות לעומס חיצוני מצורת מקור זרימה נגדי קבוע.



איור-A.15: דגם טרנזיסטור של מערכת מכאנית סיבובית, אשר נבנה במעבדה, המשולב במתקן הרמה.

יחס הגבר של מנגנון זה כפי שניבדק הוא $\beta = \frac{M_C}{M_B} = 20 \pm 5$



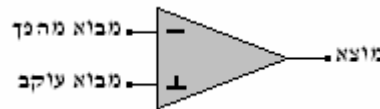
איור-A.16: תיאור יישום טרנזיסטור מכאני כמערכת להגברת כוח וייצוגו הגרפי.

A.1.3 מגבר שרת.

מגבר שרת בעיקרו היה מעגל הבנוי ממספר רב של דרגות הגברה ושימש לביצוע פעולות מתמטיות כגון גזירה, סכימה, חיבור וחיסור במחשבים תקביליים (אנלוגיים). היום תופס רכיב זה מקום נכבד בתחומים רבים הן במערכות ליניאריות והן במערכות ספרתיות, וזאת עקב התפתחות הטכנולוגיה בייצור מעגלים משולבים שהפכה רכיב זה ממעגל די מורכב להתקן סטנדרטי כמו הטרנזיסטור. שימושים עיקריים של מגבר השרת:

- מגבר ליניארי בעל הגבר הניתן לשינוי.
- מתאם עקבות.
- משווה.
- ממיר ספרתי לתקבילי (אנלוגי).
- מגבר לוגריתמי.

מעגלים אלקטרוניים מתואר מגבר השרת באופן הבא:

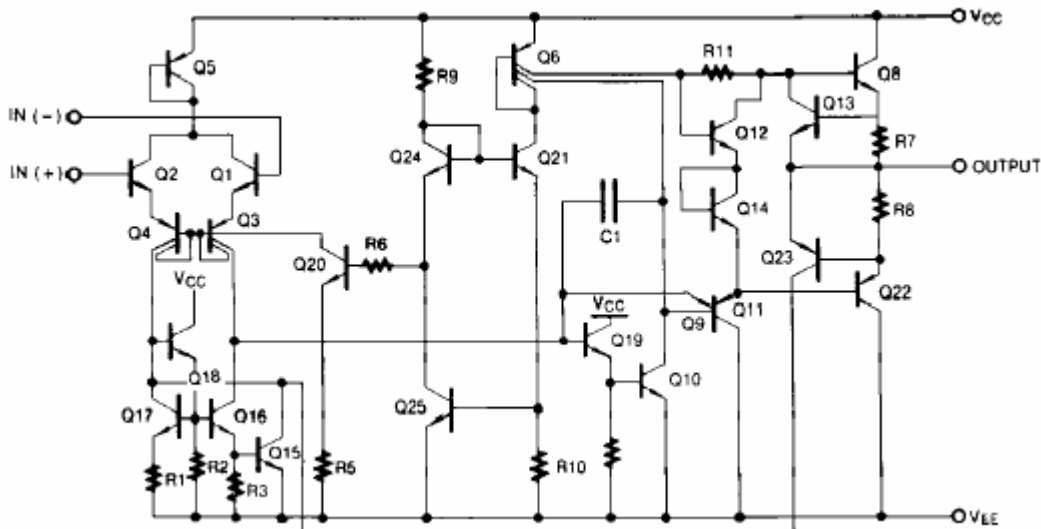


איור-A.17: סמל מגבר שרת.

למגבר שלושה הדקים: שני הדקי מבוא והדק מוצא יחיד. ההדק המסומן "-" מסמל מבוא "מהפך" (INVERTING INPUT). אות המוצא המתקבל יהיה הפוך במופעו לאות הנמסר להדק זה. לאומת זאת את ההדק המסומן "+" מסמל מבוא "עוקב" (NONINVERTING INPUT). אות המוצא המתקבל יהא שווה-מופע לאות הנמסר להדק זה ניתן להשתמש בכל אחד מן ההדקים האמורים או אף בשניהם גם יחד בהתאם לדרישות המעגל. תכונות מגבר השרת האידיאלי:

- הגבר אינסופי בחוג פתוח.
- רוחב-פס אינסופי.
- התנגדות-מבוא אינסופית.
- התנגדות-מוצא שווה לאפס.
- רעש עצמי, מתח-היסט (OFFSET) וזרם היסט השווים לאפס.

על מנת לקבל במגבר מעשי תכונות הקרובות לנדרש במגבר אידיאלי, בונים את מגבר השרת ממגברי-הפרש הצמודים זה לזה בצמוד ישיר בתוספת דרגות מבוא ומוצא המתאימות לקבלת התנגדות מבוא גבוהה והתנגדות מוצא נמוכה. איור-A.18 מתאר מעגל אלקטרוני של מגבר שרת מעשי.



איור-A.18: תרשים אלקטרוני של מגבר שרת LM348. ניתן להבחין בתרשים זה בהדק המוצא, בהדקי המבוא (העוקב והמהפך) ובהדקי מתח ההספקה V_{CC} ו- V_{EE} המאפשרים את תפקוד הרכיב. כמו כן ניתן לשים לב למורכבות הרכיב הבאה לידי ביטוי בין היתר במספר רב של רכיבים אלקטרוניים אלמנטאריים (כגון נגדים וטרנזיסטורים) המרכיבים אותו.

סדרי הגודל של ההגבר בחוג פתוח- A_o , התנגדות המבוא- R_i , והתנגדות המוצא- R_o הם אלו :
 הגבר : עשרות אלפים.
 התנגדות מבוא : עשרות קילו-אוהם עד מספר מגה-אוהם.
 התנגדות המוצא : עשרות עד מאות אוהמים.

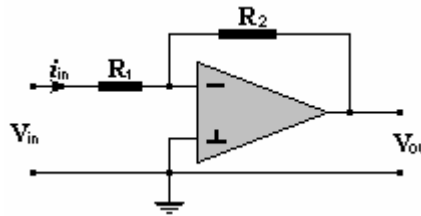
למעשה לא משתמשים במגבר השרת כפי שהוא כיוון שהגברו הגדול גורם לחסרונות הבאים :

- א. אות מבוא בעוצמה חלשה יגרום לשינוי גדול בנקודת העבודה עד כדי הבאת המגבר למצב רוויה.
- ב. קיימת סכנה של היווצרות תנודות טפיליות עקב מבנה המעגל.
- ג. יציבות ההגבר גרועה, כלומר ההגבר הכולל עלול להשתנות במשך הזמן במידה רבה.
- ד. רוחב-הפס קטן יחסית.

כדי להתגבר על חסרונות אלו מוסיפים במעגלים מעשיים משוב שלילי המשפר את תכונות מגבר השרת כשל-עצמו ובעזרתו ניתן להשיג :

- א. הגבר רצוי.
- ב. הגבר יציב.
- ג. רוחב-פס גדול.
- ד. התנגדות מוצא נמוכה יותר.

אחת הדוגמאות לכך היא מגבר מהפך בעל משוב שלילי המתואר באיור-A.19.



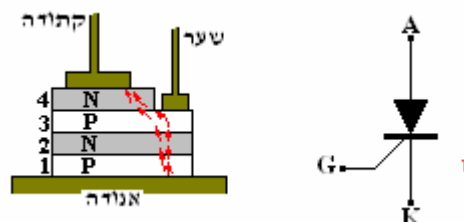
איור-A.19: מגבר שרת מהפך.

עם משוב :	ללא משוב :	הגבר :
$-\frac{R_2}{R_1}$	A_o	
$\approx R_1$	R_{in}	התנגדות מבוא :
$\frac{R_{out}}{A_o} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$	R_{out}	התנגדות מוצא :

טבלה-A.1: נתוני מגבר השרת עם המשוב ביחס לאלו של המגבר ללא המשוב.

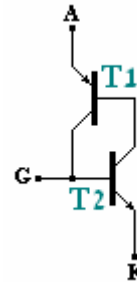
A.1.4 מיישר סיליקון מבוקר-SCR.

המס"מ הקרוי גם בשם תיריסטור (Thyristor) מורכב מארבעה שחבות של מוליך למחצה ובעל שלושה הדקי מוצא הקרויים בשם : אנודה, קתודה ושער. חתך המס"מ וסימלו מתוארים באיור-A.20.



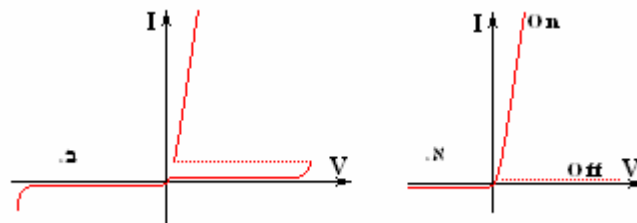
איור-A.20: מיישר סיליקון מבוקר.

ניתן לתאר את המס"מ כצמד של שני טרנזיסטורים המחוברים אחד לשני כמתואר באיור-A.21. לפי האיור הקולט של טרנזיסטור 1 משותף לבסיסו של טרנזיסטור 2 (צורך סוג-N). ברור שהקולט של טרנזיסטור 2 הוא אותה שחבת צורך מסוג P כמו זו של בסיס טרנזיסטור 1.



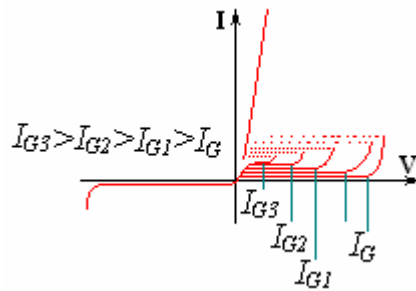
איור-A.21: תיאור המס"מ בעזרת שני טרנזיסטורים.

שחבה משותפת זאת מהווה את הדק מוצאו של המס"מ שהוא הדק השער. אם נותנים למס"מ בין האנודה לבין הקתודה מתח חיובי, לא תהיה כל זרימת זרם במעגל בהיעדר מתח חיובי בין השער לבין הקתודה (פרט לזרם זליגה). הסיבה לכך היא בעובדה כי צומת קתודה שער מומתחת בכיוון הפוך. עליה ניקרת בזרם אנודה-קתודה תחול רק בעליית מתח ביניהם מעבר לערך מסוים. מתח זה קרוי מתח פריצה בו מתבטל מחסום הפוטנציאלים שבין השכבה 2 לשכבה 3.



איור-A.22: אופייני המס"מ. א-מתח שער קתודה. ב-מתח פריצה.

זרימת זרם השער כתוצאה ממפל מתח בינו לבין הקתודה מביאה להגדלת זרם האנודה מצד אחד ולהקטנת ערכו של מתח הפריצה מצד שני כמתואר באיור-A.23. בזכות תופעות אלו משמש המס"מ במעגלי וויסות ובקרה.

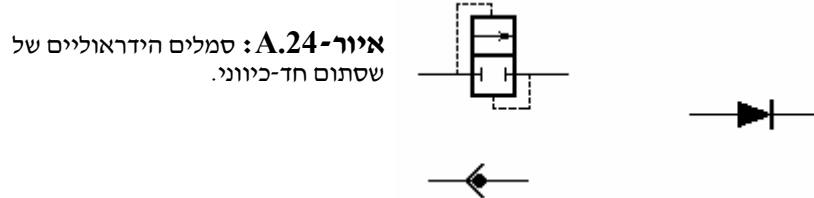


איור-A.23: אופייני המס"מ כאשר הפרמטר הנו זרם-השער.

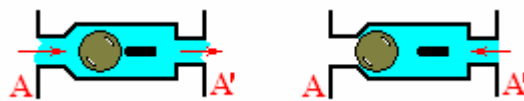
A.2 רכיבים הידראוליים:

A.2.1 שסתום חד-כיווני.

שסתום חד-כיווני הוא רכיב בקרת זרימה המאפשר מעבר זרימה בכיוון אחד בלבד. רכיב זה אנלוגי לדיודה באלקטרוניקה אשר בדומה מאפשרת לזרם החשמלי לעבור רק בכיוון אחד. תרשים סמלי של השסתום מתואר באיור הבא:



השסתום החד-כיווני הפשוט ביותר נקרא "Check Valve" ועיקרון פעולתו מתואר באיור הבא:



איור-A.25: מבנה שסתום חד-כיווני פשוט.

כאשר כיוון הזרימה הוא מ-A' ל-A לחץ הזורם דוחף את הכדור כך שזה סוגר את פתח היציאה ולא מאפשר זרימה. לאומת זאת כאשר הזרימה בכיוון ההפוך לחץ הזורם דוחף את הכדור למצב כזה בו הוא אינו מפריעה לזרימה והיא מתאפשרת תוך התנגדות מינימאלית.

בדומה לדיודה ממשית אשר מפל מתח עליה במצב הולכה הוא מסדר גודל של 1 [Volt], ניתן גם לגרום למפל לחץ מבוקר על פני השסתום החד-כיווני בזמן שזה מעביר ספיקה. הדרך הפשוטה לעשות זאת מתוארת באיור הבא:

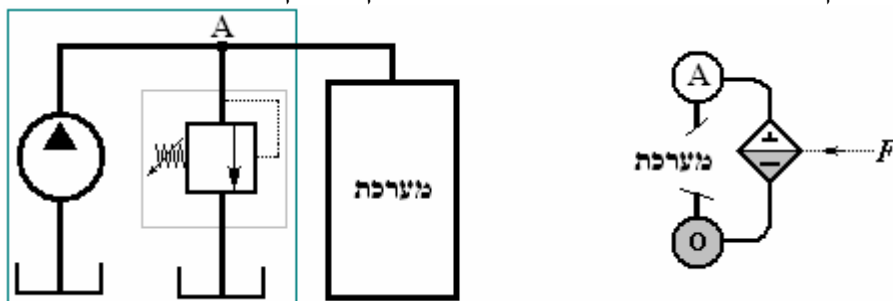


איור-A.26: מבנה שסתום חד-כיווני עם קפיץ.

במקרה זה הקפיץ הדרוך בכוח התחלתי (הניתן לכיוונון) יאפשר לכדור לזוז ולאפשר מעבר זרימה רק עם לחץ הזורם יהיה מעל לגודל מסוים הנקבע על ידי כוח הקפיץ.

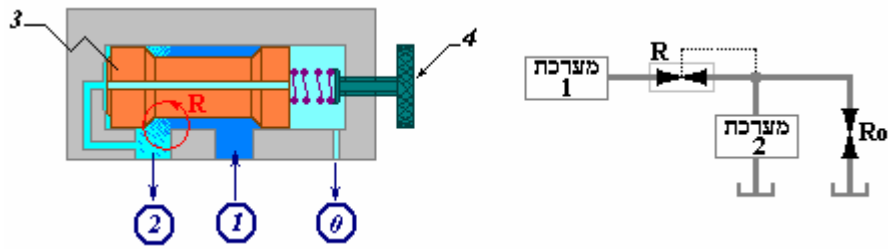
A.2.2 ווסת לחץ.

ההתקן שיכול לתפקד כמקור פוטנציאל מבוקר בהידראוליקה הוא "שסתום בקרת לחץ" כגון שסתום פריקה בעל קפיץ מתכוונון המחובר במקביל לעומס ולמשאבה כמתואר באיור-A.27. שסתום כגון זה מחזיק על פני עצמו הפרש לחצים שניתן להגדירו כקבוע בקנה מידה גס כאשר מופעל ממצב "Close" למצב "Open". ניתן לומר שפעולתו לפעולת דיודת זנר באלקטרוניקה.



איור-A.27: תרשים מערכת הידראולית עם שסתום פריקה והגרף שלה. המשאבה ושסתום הפריקה מיוצגים בגרף כמקור פוטנציאל תלוי בכוח הקפיץ.

מערכת היא שסתום בקרת לחץ מסוג "pressure reducing valve" המתוארת באיור-A.28. מערכת זאת מתפקדת כווסת לחץ ממש ושומרת בדיוק די טוב על לחץ המוצא שלה ללא תלות בשינויי לחץ ההספקה או שינויים בעומס.



איור-28.A: מבנה שסתום בקרת לחץ מסוג "Direct Acting Pressure Reducing Valve".

פתח-1 הוא פתח כניסת לחץ ממערכת לחץ גבוה. פתח-2 הוא פתח יציאה למערכת לחץ נמוך. פתח-3 הוא פתח יציאה לאטמוספירה. מערכת זאת שומרת על הלחץ בפתח-2 קבוע בהתאם לנקבע ע"י סיבוב הבורג-4 הקובע את כוח לחצת הקפיץ במצב התחלתי כל עוד הלחץ בפתח כניסה-1 לא יורד מתחום מינימאלי. עקרון פעולת השסתום מבוסס על שינוי התנגדות הידראולית בעזרת לחץ הזורם. ניתן להבחין במשוב המובנה בשסתום אשר בהתאם לגודל הלחץ בכניסה למערכת-2 מגדיל או מקטין את ההתנגדות ההידראולית לפני מערכת-2 ביחס פרופורציונאלי. באופן כזה שאם הלחץ במערכת-2 מאיזושהי סיבה יגדל אזי גם ההתנגדות R שלפני המערכת-2 תגדל גם היא ותכך על עצמה מפל לחץ רב יותר וכתוצאה מכך מפל הלחץ על מערכת-2 יקטן ולהפך.

כמתואר באיור-A.29 ערך הלחץ עליו המכשיר שומר נקבע על ידי לחיצת הקפיץ של הבוכנה הפנימית דבר שניתן לעשות במספר דרכים כמתואר בציור.

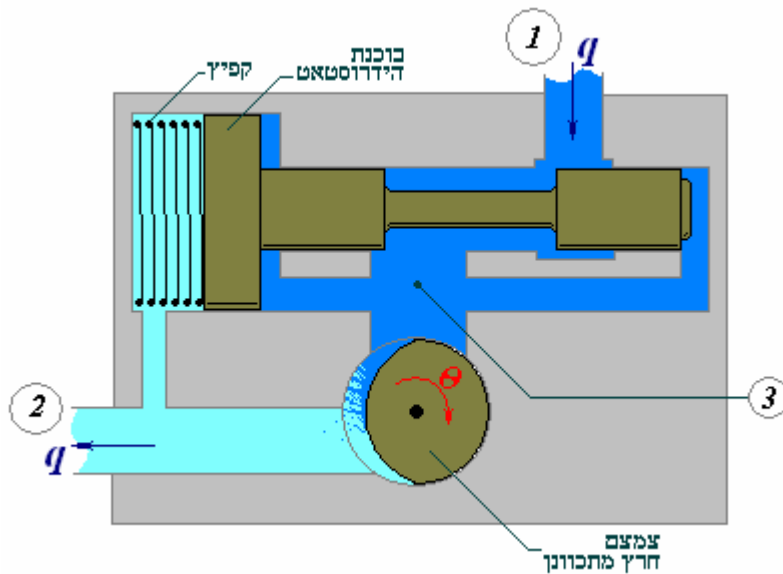


איור-29.A: שסתום בקרת לחץ וייצוג גרפי שלו כמקור פוטנציאל תלוי.

עקרונית ניתן לכייל את המכשיר כך שהמוצא יהיה פחות או יותר ליניארי ביחס לכניסה בתחום די רחב, עם קבוע די קטן וניתן לתיאור כך:

A.2.3 ווסת ספיקה.

במערכת הידראולית "מקור זרימה תלוי" הוא למעשה שסתום בקרת ספיקה (Flow Control Valve). זהו רכיב אשר מזרים ספיקה בהתאם לערך שנקבע מראש ועקרונית אינו מושפע מגודל הפרש לחצים אשר עליו (כל עוד קיים עליו הפרש לחצים חיובי מינימאלי) ומכלל שינויי העומס. באיור-A.30 מתואר מבנה עקרוני של שסתום בקרת ספיקה מסוג Restrictor הפועל על עיקרון הידרוסטט.



איור-30.A: שסתום בקרת ספיקה הידראולית עם מנגנון קיזוז השפעת מפל חלץ (Pressure Compensated Restrictor Type Flow Control Valve), והסמל שלו.

נניח מצב התחלתי בו אין הפרש לחצים $P_{1/2}$ על השסתום. במצב זה הקפיץ מחזיק את בוכנת ההידרוסטט במצב פתוח כך שהתנגדות ההידראולית בין הנקודות 1-3 זניחה. תפקיד הצמצם המתכווץ הוא לקבוע את הערך הרצוי של הספיקה העוברת דרך השסתום. הוא בנוי כציר גלילי עם חריץ וניתן לסיבוב ידני מבחוץ. זווית הסיבוב בה הוא נמצא קובעת את ההתנגדות ההידראולית בין נקודות 2-3 ובהתאם לכך את הספיקה. עקב מבנהו המיוחד סיבובו מתאפשר רק ע"י מגע חיצוני ולא ע"י הזורם.

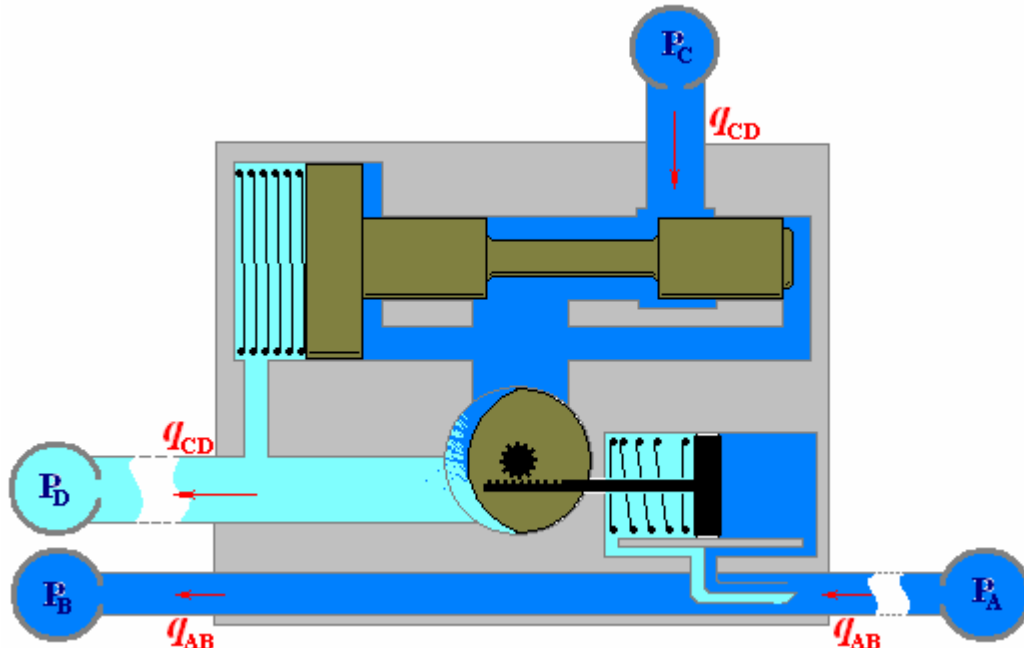
כאשר מתקיים הפרש לחצים $P_{1/2}$ מינימאלי וחיוני, הלחץ בנקודה 3 רוצה לגדול ומאלץ את בוכנת ההידרוסטט לנוע שמאלה כנגד הקפיץ. כתוצאה מתנועה זו גדלה התנגדות ההידראולית בין נקודות 1-3 והדבר גורם להקטנת הלחץ בנקודה 3. משחק זה מתקיים עד אשר נמצא איזון בו בוכנת ההידרוסטט נמצאת בשיווי משקל בין כוחות הפועלים עליה מהלחץ ההידרוסטטי של הזורם ובין כוח הקפיץ. הספיקה במקרה זה נקבעת ע"י מצב הצמצם והגדלת או הקטנת הפרש לחצים $P_{1/2}$ תקווז ע"י הגדלת או הקטנת ההתנגדות ההידראולית בין נקודות 1-3 ע"י ההידרוסטט.

אם העומס עליו מזרים השסתום את ספיקתו יגדל והספיקה תרצה לקטון הדבר יוביל להגדלת הלחץ בנקודה 2 שכתוצאה ממנו בוכנת ההידרוסטט תרצה לנוע ימינה ולהקטין את ההתנגדות בין נקודות 1-3 דבר שיוביל להגדלת הלחץ בנקודה 3 ולהחזרת וספיקה לארכה המקורי.

המערכת הנוצרת היא למעשה עם בקרה פנימית (בקר PI) וכל עוד קיים הפרש לחצים $P_{1/2}$ חיובי מינימאלי בין כניסה-1 ליציאה-2, הספיקה q דרך השסתום היא, בקירוב טוב, פונקציה של זווית כוונון θ בלבד. אולם כאשר הפרש הלחצים $P_{1/2}$ שלילי אזי השסתום חדל מלתפקד כשסתום ספיקה ומתנהג כהתנגדות הידראולית (התלוי בזווית θ) מכיוון שהמפל הלחץ השלילי גורם לפתיחה תמידית של ההידרוסטט.

A.2.4 טרנזיסטור במערכת הידראולית:

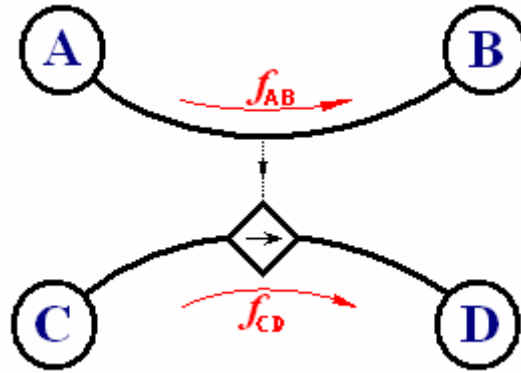
באותו אופן בו יצרנו את הטרנזיסטור המכאני בפרק-7 בעזרת צירוף מודולים גרפיים ידועים ניתן ליצור במערכת הידראולית מבנה תואם של טרנזיסטור הידראולי. על בסיס ווסת הספיקה המתואר באיור-A.30 ניתן לפתח מקור זרימה תלוי זרימה במערכת הידראולית המתואר באיור-A.31.



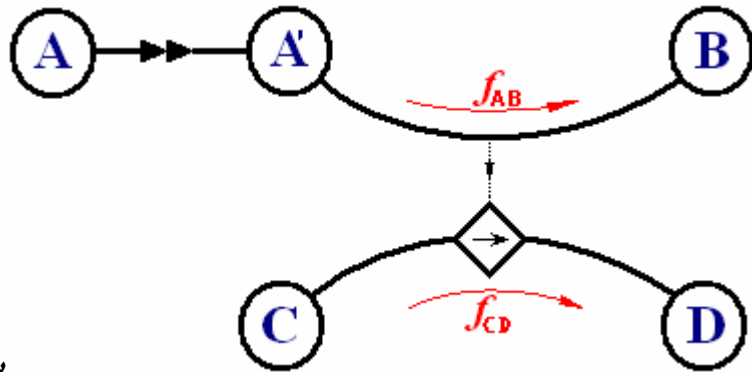
איור-A.31: מקור זרימה תלוי זרימה הידראולי. הספיקה q_{CD} תלויה בספיקה q_{AB} בלבד ולא בגודל הבדל פוטנציאלים ΔP_{CD} כל עוד זה חיובי.

הייצוג הגרפי של הרכיב מתואר באיור-A.32.

איור-32.A: ייצוג מקור זרימה תלוי זרימה. במערכת הידראולית משמעות הצמתים A,B,C,D הוא הלחצים הקיימים בנקודות אלו. משמעות הזרימות f_{AB}, f_{CD} הוא הספיקות בין נקודות הלחץ.

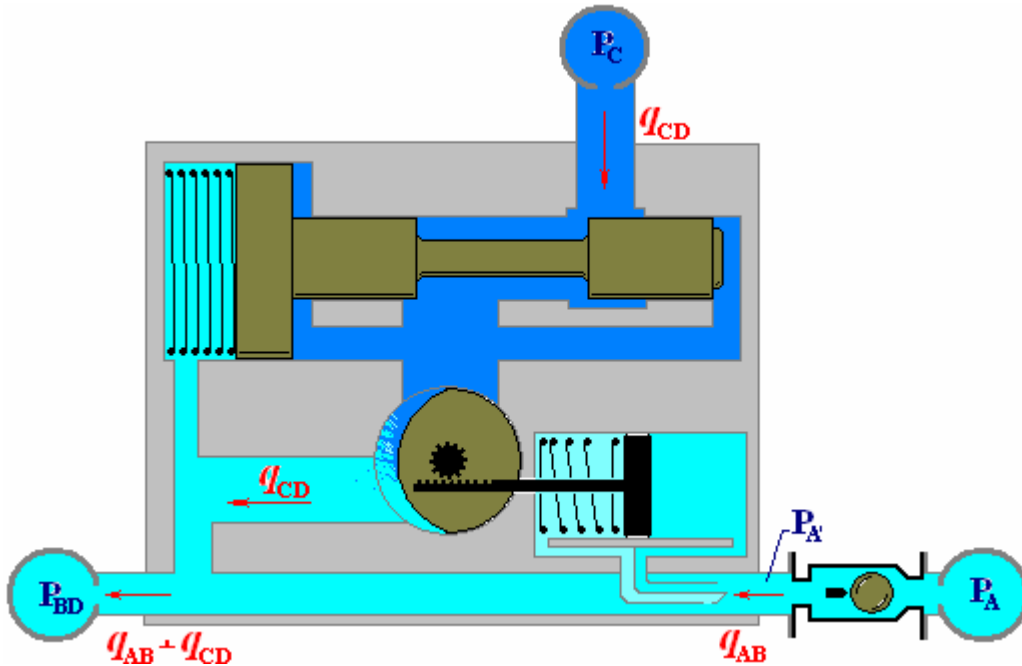


ייצוג המערכת איליה אנו שואפים להגיע מתואר באיור-33.A.



איור-34.A: ייצוג הטורניסטור.

על מנת להגיע למערכת זאת ממערכת המתוארת באיור-31.A בנוסף לה אלמנט חד-כיווני המתואר באיור-25.A ונחבר פיזית את האלמנטים המסומנים ע"י הצמתים B ו-D לאלמנט אחד. חיבור הצמתים במקרה זה מתבצע ע"י חיבור הלחץ שבצינורות בנקודות B ו-D לצינור משותף ובאופן זה גם הספיקות (זרימות) מתחברות לאחת.



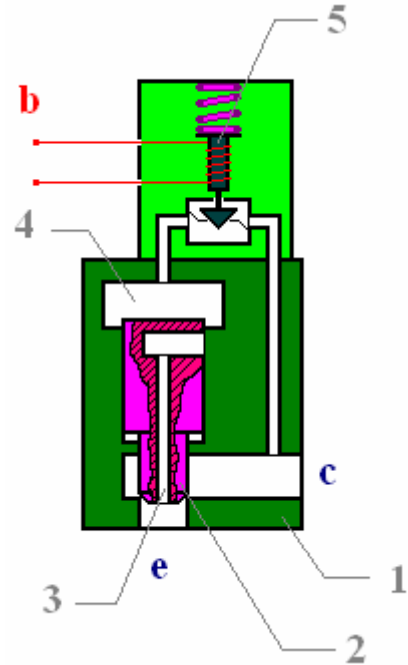
איור-35.A: מערכת הידראולית של לחצים וספיקות האנלוגית בעיקרון פעולתה לטרנזיסטור בי-פולארי BJT והגרף הקווי שלה.

A.2.5 וולוויסטור:

זהו רכיב אלקטרו-הידראולי תעשייתי הנקרא אשר בדומה לטרנזיסטור האלקטרוני מייצר זרימה (ספיקה) שאינה תלויה בהפרש פוטנציאלים (הפרש לחצים) שעליו הודות למנגנון הדומה בפעולתו להידרוסטט. האמצעי המבקר על הספיקה הוא זרם חשמלי מסופק לסולנואיד של הרכיב. מבנה עקרוני של הרכיב מתואר באיור-A.36. מצבי העבודה של הרכיב מתוארים באיור-A.37.

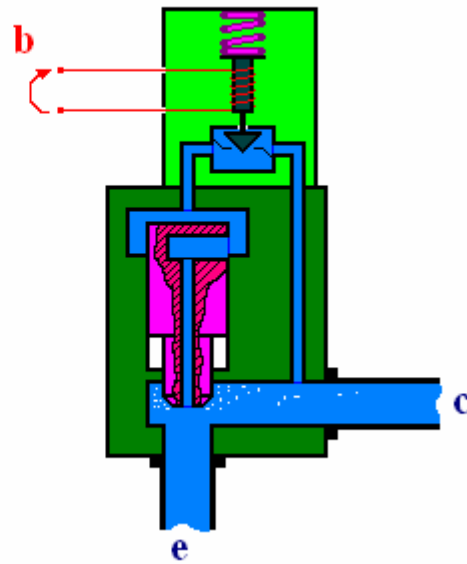
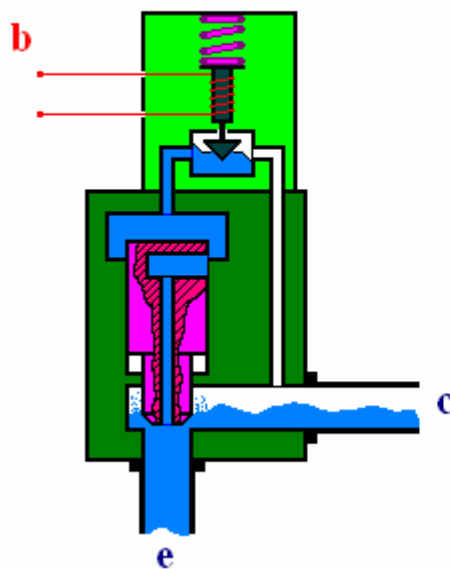
איור-A.36: תיאור כללי של הוולוויסטור.

1. גוף.
2. בוכנה פנימית דו צדדית (עם שני שטחי חתך אחת גדול ואחד קטן).
3. תעלה פנימית.
4. תא לחץ משוב.
5. שסתום המופעל ע"י זרם חשמלי (סגור ללא זרם, והזרם פותח אותו).



(א)

(ב)



איור-A.37: מצבי עבודה של הוולוויסטור.

(א) מצב בו אין זרם דרך b והסולנואיד סגור. במצב זה לא מתאפשרת זרימה מ-e ל-c מכיוון שלחץ הזורם ב-e גורם לסגירת הבוכנה הפנימית.

(ב) מצב בו מזרימים זרם דרך b. פתיחת הסולנואיד פרופורציונאלית לזרם בסליל. הלחץ הנגדי שדוחף את הבוכנה הפנימית להיסגר קטן והיא עולה כלפי מעלה ומאפשרת זרימה מ-e ל-c. אם הלחץ ב-e עולה הספיקה תשאף לגדול הדבר יגרום לבוכנה הפנימית לרדת ולהקטין חזרה את הספיקה. באופן זה המערכת שומרת על ספיקה יחסית קבוע אשר נקבעת על ידי הזרם ב-b.

Abstract

The target of the research was developing of conceptual design methods and techniques of an engineering systems which are based on transformation of conceptual design principals and ideas which are exists in different engineer domains. The transformation of conceptual design information from different engineering domains is done by mathematical representations.

The methods and techniques which were developed in the thesis are based on integrated combinatorial models which are especially based on a graph theory. In this methods the topology and the physical laws of an engineering systems are mapped by a suitable combinatorial model. This action allows a cross-dimensional information transfer by means of mathematical meta level which has a global engineering units.

A number of formal conceptual design methods were developed in the thesis which are:

Conceptual design by common graph methode; Conceptual design by dual graph methode; Design innovation by common graph; Design by integrated representation method; Design by graphical modules. The first tow methods were already reported but in this thesis were formulated and applied on a new applications. The three other methods are new and reported in this thesis for a first time.

Several new engineering systems which were achieved by applying the methodologies are presented in the thesis. The engineering domains on which the methodologies were allied are mechanical electrical and hydraulic.

By transforming concepts from mechanical domain the following systems were achieved: Electric and Hydraulic Differential, Current adder/substructor, Voltage adder/substructor, Greatest current chooser, Greatest voltage chooser, Flow chooser, Pressure chooser, etc...

By transforming concepts from electrical domain the following systems were achieved: Active mechanical force/moment amplifier, Active hydraulic flow amplifier, Active mechanical velocity amplifier, Active hydraulic pressure amplifier, Active mechanical rectifier, Velocity picks detective, Velocity keeper, etc...

In this research were also developed a number of engineering systems which has a significant importance as a basic known elements from electronics and mechanics. This elements are Bi-Polar Transistor and Operational Amplifier from electronics and Differential from mechanics. The development of these systems was made in mechanical electrical and hydraulic domains and is reported it the thesis for a first time. The transformation of this systems to the different engineering domains gives a great verity of possibilities to use the design methods that reported in the thesis especially the common graph methode.

In the thesis, after applying the design methods on a design problems, the engineering systems which were achieved have both a theoretical and practical importance. This result points on a possibility of expanding the approach to a formal inventive engineering methods. Moreover, one of the conclusions was the importance of chousing a proper mathematical representation. A good representation for an engineering system allows transforming from one domain to another not only the systems structure but also its behavior and its function one to one.

TEL AVIV UNIVERSITY
The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering
The Zandman-Slaner School of Graduate Studies

CROSS DOMAIN CONCEPTUAL DESIGN

A thesis submitted toward the degree of
Master of Science in Mechanical Engineering

by

Roman D.R. Gorodetsky

This research was carried out in the Department of Solid Mechanics, Materials
and Systems under the supervision of Dr. Offer Shai

June 2005

TEL AVIV UNIVERSITY
The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering
The Zandman-Slaner School of Graduate Studies

CROSS DOMAIN CONCEPTUAL DESIGN

A thesis submitted toward the degree of
Master of Science in Mechanical Engineering

by

Roman D.R. Gorodetsky

June 2005