

**אוניברסיטת תל - אביב**

הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן

# **תכן קונספטואלי שיטתי באמצעות ייצוגים בגרפים**

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

על - ידי

**נמרוד דגני**

תשרי תשס"ה

**אוניברסיטת תל - אביב**

הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן

# **תכן קונספטואלי שיטתי באמצעות ייצוגים בגרפים**

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

על - ידי

**נמרוד דגני**

העבודה נעשתה במחלקה למכניקה, חומרים ומערכות

בהנחיית דר' עופר שי

תשרי תשס"ה

## תקציר

בתיזה זאת פותחו שתי שיטות לתכן קונספטואלי ממוקדות פונקציה המאפשרות בניית תכן המבוסס על טרנספורמציה של המבנה וההתנהגות של מערכות התואמות מבחינה פונקציונאלית, דרך ייצוגים מתמטיים דיסקרטים המכונים ייצוגים גרפים. שימוש בייצוגים אלו מאפשר את העברת ההתנהגות בצורה לא מפורשת כך שאינה לוקחת חלק פעיל בתהליך התכן.

ייצוגים גרפים שימשו כייצוגים דיסקרטים מתמטיים למדל ולהעביר ידע בין תחומים הנדסיים שונים. שתי שיטות התכן שפותחו הן שיטות הייצוג בגרף משותף והייצוג בגרף הדואלי. השימוש בייצוג בגרף משותף הוא כאשר לשני תחומי הנדסה יש ייצוג משותף שדרכו אפשר להעביר ידע. הייצוג השני עוסק בתחומים שאינם קשורים ישירות, דהיינו אין להם ייצוג משותף, אך העברת ידע מתאפשרת באמצעות קשר דואלי בין הייצוגים שלהם. שני הייצוגים ניתנים לשימוש בו-זמנית ואחד הוא הרחבה של השני כך שמתקבל כיסוי רחב יותר של תחומי הנדסה. יתרה מכך, הייצוג המשותף המתקבל יכול לשמש להעברת ידע בתוך התחום ההנדסי, דהיינו לבצע טרנספורמציה מתכן אחד לשני תוך הרחבת מימדי התכן. שתי שיטות התכן מאפשרות זיהוי של קונספטים וטרנספורמציה של תכן אחד לשני תוך שימור הפונקציה. הייצוגים הגרפים מאפשרים להגדיר ולזהות קונספטים זהים פונקציונאלית המתגלים ברמת הייצוג, ולזהות מספר סופי של קונספטים המאפשר מיפוי של תחום התכן.

בתיזה נעשה שימוש בשיטות התכן שפותחו לפיתוח אפליקציות ידועות כגון שדכנים, תמסורות חד-כיווניות ומגבילי מומנט אבל גם לפיתוחים חדשים כגון מנגנונים להגבר כוח גדול ומעגל אלקטרוני. כל אלו פותחו תוך כדי הפעלת שלבי תכן שיטתיים שאיפשרו כיסוי של קונספטים תעשייתיים ידועים וגילו את היחסים ביניהם.

על סמך התוצאות הראשוניות של מחקר זה, ניתן לסכם כי תהליך התכן הופך לשיטתי כאשר נעשה שימוש בייצוגים גרפים על מנת להעביר ידע מבני והעברת ההתנהגות מתאפשרת דרך טופולוגיית הייצוג. יתרה מכך, מכיוון שהמתמטיקה עליה מבוססים הייצוגים היא תורת הגרפים, אחד מהענפים העיקריים של מתמטיקה דיסקרטית והבסיס למדעי המחשב, נפתחת האפשרות להפוך את התהליכים שפותחו במחקר לברי-מחשוב. דבר זה יאפשר לפתח תוכנה שתהווה כלי עזר לתהליך התכן הקונספטואלי.

# תוכן עניינים

v	סימונים והגדרות
vii	רשימת איורים וטבלאות
	<b>1. מבוא ורקע מדעי</b>
<b>1</b>	<b>1.1 מטרת המחקר</b>
<b>1</b>	<b>1.2 עיקרון פעולה של השיטה</b>
1	1.2.1 הקדמה
2	1.2.2 העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף משותף
5	1.2.3 העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף הדואלי
8	1.2.4 תכונות מיוחדות הניתנות לזיהוי ברמת הייצוג
<b>10</b>	<b>1.3 סקר ספרות</b>
10	1.3.1 אטלסים של מכניזמים
10	1.3.2 תכן קונספטואלי מבני
12	1.3.3 תכן קונספטואלי ממוקד פונקציה (function)
13	1.3.4 תכן קונספטואלי באמצעות התנהגות (behavior)
15	1.3.5 תכן קונספטואלי באמצעות אלגוריתם גנטי
15	1.3.6 תכן קונספטואלי באמצעות אנלוגיה
16	1.3.7 תכן קונספטואלי באמצעות TRIZ
<b>17</b>	<b>1.4 רקע תיאורטי בתורת הגרפים</b>
17	1.4.1 הייצוג הגרפי (Graph Representation)
18	1.4.2 פוטנציאל (Potential)
19	1.4.3 גרף פוטנציאליים PGR (Potential Graph Representation)
19	1.4.4 זרימה (Flow)
20	1.4.5 גרף זרימות FGR (Flow Graph Representation)
21	1.4.6 גרף דואלי (Dual Graph)
22	1.4.7 הקשר הדואלי בין גרף פוטנציאליים (PGR) לבין גרף זרימות (FGR)

## 2. תכן קונספטואלי באמצעות גרף משותף

23	2.1 הקדמה
24	2.2 תיאור שלבי התכן הקונספטואלי באמצעות הגרף המשותף
30	2.3 תכן קונספטואלי באמצעות גרף משותף – הפעלת השיטה לתכן שדכנים
30	2.3.1 תהליך התכן לבניית קונספט למנגנון שדכן
37	2.3.2 מנגנוני שדכן הקיימים
38	2.3.3 סיכום תכן שדכנים באמצעות הייצוג המשותף
40	2.4 תכן קונספטואלי של מכניזמים חד-כיווניים ליניאריים
40	2.4.1 תכן קונספטואלי של מכניזם חד-כיווני ליניארי
48	2.4.2 תכן קונספטואלי של מכניזם חד-כיווני ליניארי-פתרון נוסף
53	2.4.3 סיכום תכן מכניזמים חד-כיווניים ליניאריים
55	2.5 המרת תכן קונספטואלי ליניארי לאנגולרי באמצעות הגרף המשותף
56	2.5.1 תכנון תמסורת חד-כיוונית על בסיס מיישר גל שלם
61	2.5.2 תכנון תמסורת חד-כיוונית על בסיס גשר דיודות
62	2.5.3 סיכום - תכן תמסורת חד-כיוונית

## 3. תכן קונספטואלי באמצעות גרף דואלי

63	3.1 הקדמה
63	3.2 תיאור שלבי התכן הקונספטואלי באמצעות הגרף הדואלי
68	3.3 תכן קונספטואלי באמצעות גרף דואלי – תכן מערכת להגבלת כוח
68	3.3.1 תכן מגביל כוח
80	3.3.2 מנגנון נוסף להגבלת כוח
81	3.3.3 סיכום תכן מנגנונים מגבילי כוח
82	3.4 המרת מגביל הכוח הליניארי לאנגולרי באמצעות הגרף המשותף
83	3.4.1 תכנון מגביל מומנט על בסיס מנגנון להגבלת כוח
89	3.4.2 מגביל מומנט דו-כיווני
95	3.4.3 סיכום - תכן מגבילי מומנט
97	3.5 תכן קונספטואלי ממכניקה למכניקה באמצעות הגרף הדואלי
97	3.5.1 תכן קונספטואלי של מערכת הגבר כוח גדול
101	3.5.2 סיכום - תכן קונספטואלי ממכניקה למכניקה
103	3.6 תכן קונספטואלי של מעגל משולב באמצעות ייצוג בגרף
103	3.6.1 מעגל קטימה ויישור ממכניקה
110	3.6.2 סיכום תכן מעגל משולב

## 4. תחום הקונספטים (Domain of Concepts)

111	4.1 הקדמה
111	4.1.1 דוגמה לתחום פתרונות אפשרי
114	4.2 תחום קונספטים של שדכנים ידניים
114	4.2.1 מעגל קטימה 1
115	4.2.2 מעגל קטימה 2
116	4.3 תחום קונספטים לפי גרף משותף עבור תמסורות חד-כיווניות
116	4.3.1 מיישר גל שלם
123	4.3.2 מיישר גשר דיודות
124	4.3.3 סיכום
125	4.4 תחום הקונספטים לפי גרף משותף עבור מגבילי מומנט
125	4.4.1 צמצום אלמנטים בייצוג ההנדסי של מגביל מומנטים דו-כיווני
128	4.4.2 קונספטים נוספים של מגבילי מומנט
132	5. סיכום, מסקנות, והמשך מחקר
132	5.1 סיכום
132	5.1.1 הבעיות שטופלו במסגרת העבודה
132	5.1.2 עיקרי התוצאות שהתקבלו בעבודה
133	5.2 מסקנות
133	5.3 המשך מחקר
135	מקורות
	נספחים
a	שלבים דטרמיניסטיים לבניית מערכות הנדסיות מהייצוג בגרפים

## סימונים, מושגים והגדרות











### אותיות

רדיוס	$r$	תחום הנדסי	$D_1$
צומת זנב של אלמנט קשת	$t$	תזוזה	$d$
מומנט	$T$	קשת בגרף	$e$
משתנה זמן (בפונקציות)	$t$	משתנה זרימה	$F$
מהירות	$V$	גרף מישורי	$G$
מתח	$V$	דואלי לגרף מישורי	$G^*$
צומת בגרף	$v$	ייצוג גרפי	$GR$
הפרש פוטנציאליים של קשת	$\Delta$	ייצוג גרפי דואלי	$GR'$
פוטנציאל של אלמנט צומת	$\pi$	צומת ראש של אלמנט קשת	$h$
מהירות זוויתית	$\omega$	אינדקס אלמנט מבנה	$i$
זווית של אלמנט	$\theta$	אינדקס אלמנט בגרף	$j$
		מסלול בגרף	$P$

### קיצורים







Potential Graph Representation	PGR	Analogy Based Design	ABD
Theory of Inventive Design	TRIZ	Bondgraph	BG
הפרש פוטנציאליים	ה.פ.	Genetic Programming	GP
		Flow Graph Representation	FGR

### איורים בגרף

קשת התנגדות		צומת ייחוס/אדמה	
קשת מקור הפרש פוטנציאליים מתחלף		צומת	
קשת מקור זרימה מתחלפת		קשת	
קשת מקור הפרש פוטנציאליים קבוע		קשת חד-כיוונית	
קשת מקור זרימה קבועה		קשת מכוונת	

## איורים הנדסיים

### אלקטרוניקה

נגד	
מקור מתח מתחלף	
מקור מתח קבוע	
מקור זרם קבוע	
דיודה	
אדמה	

### מכניקה

אדמה במכניקה	
סמך או ציר ניח	
מחליק	
רכיב או פלטפורמה	
רכיב גלילי	
חוליה	
מפרק	
קפיץ	
קפיץ כוח קבוע	
כבל (cable)	
תומך (strut)	
מסב חד-כיווני	
מסב חד-כיווני אנגולרי	
גלגל שיניים (מבט פנים וחתך)	
גלגל שיניים עם מסב חד כיווני (חתך)	



# רשימת איורים וטבלאות

## פרק 1

<u>עמוד</u>	<u>מס' האיור</u>
2	<b>איור 1.1</b> תרשים זרימה של תהליך העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף משותף
3	<b>איור 1.2</b> בניית ייצוג מתמטי איזומורפי למערכת מתחום הנדסי
3	<b>איור 1.3</b> בניית ייצוג מתמטי איזומורפי למערכת מתחום הנדסי אחר
4	<b>איור 1.4</b> שני ייצוגים זהים ההופכים לייצוג יחיד ומשותף
4	<b>איור 1.5</b> העברת ידע בין שני תחומים דרך הייצוג המשותף
5	<b>איור 1.6</b> העברת ידע בין הנדסת אלקטרוניקה להנדסה מכנית
5	<b>איור 1.7</b> תרשים הזרימה לתהליך העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף דואלי
6	<b>איור 1.8</b> מצב בו לא קיימת מערכת החולקת ייצוג משותף עם התחום
6	<b>איור 1.9</b> הוספת ייצוג איזומורפי לתחום הנדסי שאינו ייצוג משותף
6	<b>איור 1.10</b> קשר דואלי בין שני תחומים הנדסיים
7	<b>איור 1.11</b> קשר דואלי בין שני הייצוגים
7	<b>איור 1.12</b> העברת ידע בין שני תחומים דואליים דרך הייצוג הדואלי
7	<b>איור 1.13</b> העברת ידע בין הנדסת אלקטרוניקה להנדסה מכנית
8	<b>איור 1.14</b> משחק חיבור בין קצוות ארה"ב
8	<b>איור 1.15</b> בניית הייצוג הדואלי של לוח המשחק וזיהוי תכונות מיוחדות
9	<b>איור 1.16</b> תכן מסבך יציב באמצעות הייצוג הדואלי
17	<b>איור 1.17</b> ייצוג גרפי מהסוג בו יעשה שימוש בעבודה
17	<b>איור 1.18</b> גרף מכוון
18	<b>איור 1.19</b> ייצוגים איזומורפיים
19	<b>איור 1.20</b> ייצוג גרפי עם פוטנציאלים בצמתים והפרש פוטנציאלים בקשתות
20	<b>איור 1.21</b> ייצוג גרפי עם חתך על שני צמתים
21	<b>איור 1.22</b> גרף לא מישורי וגרף מישורי
21	<b>איור 1.23</b> גרף ופאותיו המודגשים
22	<b>איור 1.24</b> גרף והגרף הדואלי שלו

## פרק 2

- 24 **איור 2.1** תרשים זרימה של תהליך התכן הקונספטואלי באמצעות גרף משותף
- 24 **איור 2.2** הגדרת מערכת רצויה ברמה ההנדסית בתחום ההנדסי המקורי
- 25 **איור 2.3** הגדרת דרישת התכן רצויה לפי מושגי הייצוג המשותף
- 26 **איור 2.4** פונקציה שהוגדרה ברמה ההנדסית
- 26 **איור 2.5** פונקציה שהוגדרה ברמת הייצוג
- 27 **איור 2.6** הגדרת בעיה במונחים של התחום ההנדסי המשני וחיפוש פתרון
- 27 **איור 2.7** ייצוג פתרון מהתחום ההנדסי כגרף המשותף לתחום ההנדסי המקורי
- 28 **איור 2.8** ייצוג פתרון בתחום ההנדסי המקורי הנבנה מהגרף המשותף
- 30 **איור 2.9** הגדרת פונקציה להגבלת כוח מתחלף בתחום ההנדסי המקורי
- 31 **איור 2.10** הגדרת דרישת התכן הרצויה ברמת הייצוג המשותף
- 31 **איור 2.11** ניסוח הבעיה במונחים של תחום הנדסי משני וחיפוש פתרון אפשרי
- 32 **איור 2.12** מעגלי קטימה שהתקבלו מאלקטרוניקה
- 32 **איור 2.13** בנייה של ייצוג איזומורפי מסוג PGR למעגלים האלקטרוניים שנמצאו
- 33 **איור 2.14** הגרפים האיזומורפיים של מעגלי הקטימה
- 33 **איור 2.15** ייצוג פתרון בתחום ההנדסי המקורי הנבנה מהגרף המשותף
- 36 **איור 2.16** המכניזם המתקבל מבנייה לפי ייצוג מעגל 2
- 36 **איור 2.17** חלק הפונקציה התואם את המצב:  $d_B < d_C$
- 36 **איור 2.18** התנהגות מעגל 1 (א) והמכניזם שנבנה ממנו (ב) במצב הנתון  $d_B < d_C$
- 37 **איור 2.19** חלק הפונקציה התואם את המצב:  $d_B \geq d_C$
- 37 **איור 2.20** התנהגות מעגל 1 (א) והמכניזם שנבנה ממנו (ב) במצב הנתון  $d_B \geq d_C$
- 38 **איור 2.21** מנגנון שדכן 1 כפי שקיים בשדכן ידני
- 38 **איור 2.22** מנגנון שדכן 2 כפי שקיים בשדכן ידני
- 39 **איור 2.23** שיטת התכן והקונספטים שהתקבלו על ידי העברת הידע
- 40 **איור 2.24** הגדרת פונקציה של מערכת חד-כיוונית (מיושרת)
- 40 **איור 2.25** טרנספורמציה מהגדרת פונקציה הנדסית להגדרת פונקציה בייצוג.
- 41 **איור 2.26** Full Wave Rectifier והפונקציה המתקבלת מהפעלתו
- 41 **איור 2.27** אופן פעולה של מיישר גל שלם (Full Wave Rectifier)
- 42 **איור 2.28** מיישר גל שלם מאלקטרוניקה (א) וייצוג ה-PGR האיזומורפי שלו (ב).
- 47 **איור 2.29** בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני

47	<b>איור 2.30</b> בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני
48	<b>איור 2.31</b> מיישר גשר דיודות והאות המתקבלת מהפעלתו
48	<b>איור 2.32</b> אופן הפעולה של גשר דיודות
49	<b>איור 2.33</b> מיישר גשר דיודות (א) וייצוג ה-PGR האיזומורפי שלו (ב).
53	<b>איור 2.34</b> בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני
53	<b>איור 2.35</b> בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני
54	<b>איור 2.36</b> העברת הידע והקונספטים החד-כיווניים הליניאריים שהתקבלו ממיישר גל שלם
54	<b>איור 2.37</b> העברת הידע והקונספטים החד-כיווניים הליניאריים שהתקבלו מגשר דיודות
55	<b>איור 2.38</b> המרה של קשת מהגרף לאלמנטים מכנים בעלי מהירות ליניארית
56	<b>איור 2.39</b> המרה של קשת מהגרף לאלמנטים מכנים בעלי מהירות אנגולרית
60	<b>איור 2.40</b> התמסורת החד-כיוונית עם הסימונים המתאימים לייצוג הגרפי
60	<b>איור 2.41</b> בדיקת התנהגות של התמסורת החד-כיוונית
61	<b>איור 2.42</b> התמסורת החד-כיוונית שתוכננה על בסיס גשר הדיודות
61	<b>איור 2.43</b> חתך של התמסורת החד-כיוונית עם הסימונים המתאימים לייצוג הגרפי
62	<b>איור 2.44</b> קונספט תמסורת גלגלי שיניים ממיישר גל שלם
62	<b>איור 2.45</b> קונספט תמסורת גלגלי שיניים מגשר דיודות

### פרק 3

63	<b>איור 3.1</b> תרשים זרימה של תהליך התכן הקונספטואלי באמצעות גרף דואלי
64	<b>איור 3.2</b> הגדרת דרישות התכן בתחום ההנדסי המקורי
64	<b>איור 3.3</b> הגדרת דרישות התכן לפי הייצוג המשותף
65	<b>איור 3.4</b> טרנספורמציה למונחים של תחום הנדסי משני וחיפוש פתרון אפשרי
65	<b>איור 3.5</b> טרנספורמציה לייצוג הדואלי על מנת להרחיב את שדה החיפוש
66	<b>איור 3.6</b> הגדרת הבעיה לפי מונחים של תחום הנדסי דואלי וחיפוש פתרון
66	<b>איור 3.7</b> בניית ייצוג איזומורפי לפתרון ההנדסי
66	<b>איור 3.8</b> טרנספורמציה מהייצוג הדואלי חזרה לייצוג המשותף
67	<b>איור 3.9</b> בניית התכן בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג המשותף
68	<b>איור 3.10</b> הגדרת דרישות התכן בתחום ההנדסי המקורי
69	<b>איור 3.11</b> ניסוח דרישת התכן לפי הייצוג המשותף

69	<b>איור 3.12</b> ניסוח הבעיה במונחים של תחום הנדסי משני וחיפוש פתרון אפשרי
70	<b>איור 3.13</b> טרנספורמציה מהייצוג המשותף (זרימה), לייצוג הדואלי (פוטנציאל)
70	<b>איור 3.14</b> הגדרת מגביל הפוטנציאל במונחים של התחום הנדסי דואלי וחיפוש פתרון
71	<b>איור 3.15</b> הפתרונות שהתקבלו מתחומי ההנדסה הדואליים
71	<b>איור 3.16</b> בנייה של ייצוג איזומורפי למעגלים האלקטרוניים/מנגנונים מכניים
71	<b>איור 3.17</b> מערכות הנדסיות והגרפים האיזומורפיים שלהם
72	<b>איור 3.18</b> טרנספורמציה של הגרפים שהתקבלו מהייצוג הדואלי לייצוג המשותף
72	<b>איור 3.19</b> בניית הגרף דואלי על בסיס הגרף שנבנה בשלב הקודם
72	<b>איור 3.20</b> בניית התכן בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג המשותף
75	<b>איור 3.21</b> חתך A בייצוג FGR של מערכת להגבלת זרימה
75	<b>איור 3.22</b> זרימות בחתך A כאשר הזרם במקור $F_{in}$ נמוך מהזרם הקבוע $F_c$
76	<b>איור 3.23</b> צומת B מקוצרת לצומת A
77	<b>איור 3.24</b> המנגנון מעביר כוח חיובי מרכיב A לרכיב B
77	<b>איור 3.25</b> זרימות בחתך A כאשר הזרם במקור $F_{in}$ גבוה מהזרם הקבוע $F_c$
78	<b>איור 3.26</b> עודף זרימה מצומת A חוזר לאדמה דרך קשת ההתנגדות
78	<b>איור 3.27</b> התנהגות המנגנון תחת העמסת יתר
78	<b>איור 3.28</b> זרימות בחתך A כאשר הזרם במקור $F_{in}$ זורם מחוץ לחתך
79	<b>איור 3.29</b> צומת B מקוצרת לצומת A
80	<b>איור 3.30</b> התנהגות המנגנון תחת עומס שלילי
80	<b>איור 3.31</b> בניית מנגנון נוסף להגבלת כוח
81	<b>איור 3.32</b> שיטת התכן באמצעות הייצוג הדואלי והקונספטים שהתקבלו
82	<b>איור 3.33</b> המרה של קשת מהגרף לאלמנטים מכניים המועמסים בכוח ליניארי
82	<b>איור 3.34</b> המרה של קשת מהגרף לאלמנטים המפעילים מומנטים
83	<b>איור 3.35</b> גרף המציג יחס בין מומנט הכניסה למומנט היציאה במגביל מומנט
84	<b>איור 3.36</b> שני ייצוגי FGR שהתקבלו כפתרון להגבלת הזרימה
88	<b>איור 3.37</b> מגביל המומנט הפועל תחת העמסה $T_{in} = T_{out}$
88	<b>איור 3.38</b> מגביל המומנט תחת העמסה $T_{in} = T_c$
89	<b>איור 3.39</b> מגביל המומנט תחת העמסה $T_{in} = T_{out}$
89	<b>איור 3.40</b> ייצוג גרפי ופונקציה של מגביל זרימה חד-כיווני ודו-כיווני
90	<b>איור 3.41</b> מנגנון להגבלת כוח דו-כיווני

93	איור 3.42	פונקציית זרימה מוגבלת דו-כיוונית $ F_{in}  \geq  F_c $
93	איור 3.43	התנהגות הייצוג תחת זרימת יתר בכיוון חיובי
94	איור 3.44	התנהגות המגביל תחת העמסת יתר בכיוון חיובי
94	איור 3.45	התנהגות הייצוג תחת זרימת יתר בכיוון שלילי
95	איור 3.46	התנהגות המגביל תחת העמסת יתר בכיוון שלילי
96	איור 3.47	העברת הידע והקונספטים הליניאריים ואנגולרים שהתקבלו
97	איור 3.48	הגדרת מערכת המתוכננת להפיק יתרון מכני גדול
97	איור 3.49	משתני הכוח בפונקציית ההגבר מנוסחים כמשתני זרימה
98	איור 3.50	מכניזם להגברת מהירות
99	איור 3.51	החלפת העוקב והפיקה בחוליה ומחליק אקווילנטים
99	איור 3.52	מכניזם להגברת מהירות לאחר החלפת העוקב והפיקה
99	איור 3.53	המכניזם ובבואת המהירות שלו קרוב לנקודת הגבר מהירות מקסימאלית
100	איור 3.54	ייצוג PGR איזומורפי לחלק הסימטרי של המכניזם
100	איור 3.55	בניית הייצוג הדואלי על גבי הייצוג המקורי
100	איור 3.56	בניית המסבך הדואלי על גבי המכניזם
101	איור 3.57	שני מצבים במכניזם ובמסבך הדואלי
101	איור 3.58	מכניזם להגבר כוח גדול המתקבל לאחר הוספת מחליק
102	איור 3.59	שלבי בניית מנגנון להגבר כוח גדול המוצגים במקביל בתחום ההנדסי ובייצוג הגרפי
103	איור 3.60	מערכת ההנדסית הדואלית והפונקציה המורכבת שהיא מבצעת
108	איור 3.61	המערכת ההנדסית והייצוג הגרפי האיזומורפי הנבנה ממנה
108	איור 3.62	בניית הגרף הדואלי לייצוג שנבנה עבור המערכת המשולבת
109	איור 3.63	מעגל אלקטרוני שנבנה על-פי ייצוג הזרימות
109	איור 3.64	האות החשמלית הנמדדת ביציאה של המעגל
110	איור 3.65	תהליך העברת הידע מהמכניקה לייצוג, דרך הייצוג הדואלי וקבלת מעגל אלקטרוני

## פרק 4

111	איור 4.1	בעיית סבל וארגז
112	איור 4.2	ייצוג גרפי של בעיית הסבל והארגז
112	איור 4.3	ייצוג גרפי של קשת חד-כיוונית

113	איור 4.4	פתרונות אפשריים השונים מבנית אך זהים התנהגותית
114	איור 4.5	הקונספטים מהייצוג הגרפי של מעגל הקטימה 1
115	איור 4.6	מנגנון 1' המתקבל הינו עוד תכן המבוסס על הקונספט של מעגל 1
115	איור 4.7	הקונספטים מהייצוג הגרפי של מעגל הקטימה 2
116	איור 4.8	מנגנון 2' המתקבל הינו עוד תכן המבוסס על הקונספט של מעגל 2
116	איור 4.9	הייצוג הגרפי של מיישר הגל השלם
117	איור 4.10	חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית כפי שפותחה בפרק השני
117	איור 4.11	חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 2
119	איור 4.12	אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 2
119	איור 4.13	חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 3
120	איור 4.14	אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 3
121	איור 4.15	חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 4
122	איור 4.16	אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 4
123	איור 4.17	הייצוג של מיישר גשר דיודות
123	איור 4.18	חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית כפי שתאורה בפרק השני
123	איור 4.19	חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 5
124	איור 4.20	אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 5
125	איור 4.21	חלק ממגביל פוטנציאל דו-כיווני וייצוגו הדואלי
126	איור 4.22	החיבור ההנדסי האחראי על הגבלת המומנט וחלק הגרף עליו הוא מבוסס
127	איור 4.23	המרה וצמצום של מגביל המומנט הדו-כיווני
127	איור 4.24	מגביל מומנט דו-כיווני בעל הגבלת מומנט זהה לכל כיוון
128	איור 4.25	מגביל מומנט דו-כיווני בעל בורג גזירה
129	איור 4.26	מגביל מומנט דו-כיווני בעל משטחי הצמדה
130	איור 4.27	מגביל מומנט דו-כיווני בעל מסבי הצמדה
131	איור 4.28	מגביל מומנט דו-כיווני בעל מצמידים מגנטיים

	<b>מס' הטבלה</b>	
<b>עמוד</b>	<b>טבלה 2.1</b>	טבלת משתנים עיקריים ברמת המערכת ההנדסית
25,30	<b>טבלה 2.2</b>	טבלת הגדרת משתנים ברמת הייצוג
31,32,40,65,68,69,70	<b>טבלה 2.3</b>	טרנספורמציה של רכיב מרמת הייצוג לרכיב ברמת ההנדסה
28	<b>טבלה 2.4</b>	שלב דטרמיניסטי לדוגמה בבניית מערכת ההנדסית מהגרף
29		

# 1. מבוא ורקע מדעי

## 1.1 מטרות המחקר

- היעד העיקרי במחקר זה הינו פיתוח שיטות לתכן הנדסי קונספטואלי, תוך טרנספורמציות באמצעות ייצוגים מתמטיים של מערכות נתונות בתחומים אחרים.
- התמקדות בתהליך העברת ידע שיטתי ומבני, המאפשר קבלת מערכת המבצעת פונקציה ללא התייחסות להתנהגות המערכת, למרות שהתנהגות זאת מועברת באמצעות הייצוגים. התבססות של השיטה על תורת הגרפים נותנת את היסודות למחשוב עתידי של השיטות.
- ישום השיטה על כמה תחומי הנדסה תוך כדי העברה ושיתוף ידע בין תחומים אלו.
- גילוי תכונות מיוחדות הקיימות במערכות בזמן ביצוע הייצוג והטרנספורמציות.

בעבודה זו תוצג שיטה לתכן קונספטואלי של מערכות הנדסיות ממגוון תחומים באמצעות ייצוגים מתמטיים שונים. תחילה יובא רקע מדעי, המתמקד בעיקרון הפעולה של השיטה, ודוגמאות לשימוש בייצוגים בפתיחת בעיות. בהמשך תובא סקירה של עבודות שנעשו בתחום לאורך השנים ולאחר מכן, מונחים והסברים על הייצוגים בהם יעשה שימוש בעבודה זו. לאחר הכרת הבסיס לעבודה, תוצגנה השיטות הכלליות, תחילה ברמה כללית ולאחר מכן לעומק. לאחר כל הסבר של שיטה ספציפית, יוצגו מספר דוגמאות ליישום השיטות ויוצגו תוצאות עם הסברים מקבילים מרמת ההנדסה ומרמת הייצוגים תוך דיון בתוצאות ובאפשרויות שונות. לסיכום יפורטו תכונות מיוחדות שניתנות לזיהוי ושימוש בעט שימוש בייצוגים.

## 1.2 עיקרון פעולה של השיטה

### 1.2.1 הקדמה

הדבר הראשון הנחוץ בהקדמה זו, הוא להגדיר בעצם, מהו התכן הקונספטואלי ומה המאפיינים שלו:

"תכן קונספטואלי הינו השלב בפרויקט בו מפותח רעיון ראשוני של פעולת התכן ואיך הוא יראה" (Ullman, 1992).

הגדרה זאת הינה אחת מההגדרות הרבות לתכן קונספטואלי, אך ניתן לומר כי כל ההגדרות מובילות למיקום התכן הקונספטואלי כשלב הראשון בתהליך לתכנון מוצר. התכן בכלל והתכן הקונספטואלי בפרט, נשען על שלושה מאפיינים חיוניים להגדרת קונספט (Pahl and Bietz, 1996):

1. פונקציה (function) – מה התכן עושה.

2. התנהגות (behavior) – איך התכן עושה את זה.

3. מבנה (structure) – איך התכן נראה/בנוי.

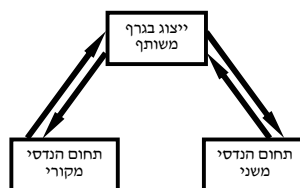
יעשה שימוש נרחב בשלושת המאפיינים האלה, לתאר את השיטות והשלבים בעבודה זו, ולמקמה בין מחקרים נוספים בתחום. מאפיינים אלו, מהווים את הבסיס לכל המחקרים שנעשו בתחום התכן הקונספטואלי, ועל זה יורחב בהמשך.

הדבר השני הנחוץ, הוא להסביר למה נבחרו ייצוגים גרפיים ככלי לתכן הקונספטואלי כפי שהוגדר. לייצוגים גרפיים היסטוריה ארוכה של כלי עזר מוכח מתמטית לפתירת בעיות. הייצוג בגרפים מתמקד בשינוי ובהפשטת הבעיה על ידי הצגתה בצורה שונה או מקבילה, תוך כדי השמת דגש על התכונות החשובות לפתרון והזנחת מידע לא רלוונטי. כאשר מערכת הנדסית מיוצגת על ידי ייצוג גרפי, המערכת מובאת לרמה מתמטית גבוהה יותר המאפשרת להעבירה לתחומים אחרים ולזהות תכונות מיוחדות. תהליך זה הוא הבסיס לתהליך התכן הקונספטואלי בו דרישות התכן אינן מאפשרות קבלת פתרון בנקל, אך ייצוג הבעיה בגרפים פותח אפשרויות לביצוע תכן יעיל יותר.

בחלק זה יוצג עיקרון הפעולה עליו מבוססת העבודה עם כמה דוגמאות של בעיות שהן קשות לפתרון בצורתן המקורית אך באמצעות ייצוגים גרפיים וטרנספורמציה שלהם, הבעיות נעשות קלות לפתרון. גישה זאת תואמת את טענתו של חתן פרס נובל, פרופ' סימון מאוניברסיטת קרנגי מלון שטען כי- "תהליך פתרון הבעיה – משמעותו פשוט הצגתה של הבעיה כך שהפתרון יהפוך לשקוף. אם היה אפשר לארגן את תהליך פתרון הבעיה במונחים אלו, עניין הייצוג בהחלט יהפוך למרכזי" (Simon, 1996).

בחירת הייצוג היא הבסיס לתהליך זה, וחשוב שהייצוג יהיה מבוסס אלגוריתמים וחוקים ידועים שיאפשרו פתרון שיטתי. הייצוג הנבחר במחקר זה הינו תורת הגרפים מכיוון שזהו תחום מתועד היטב ונעשה בו שימוש נרחב ככלי ייצוגי וכן מבוסס מתמטיקה בדידה, תשתית מתמטית של מדעי המחשב. תהליך הפתרון הופך אפוא לתהליך מציאת הגרף המתאים לייצוג הבעיה ואז נותר להשתמש באלגוריתמים ומשפטים ידועים מתורת הגרפים. השימוש בייצוגים מוביל למחשוב השיטות בעתיד. הייצוגים הגרפיים והמונחים שלהם יורחבו בהמשך.

## 1.2.2 העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף משותף

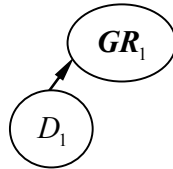


**איור 1.1** תרשים זרימה של תהליך העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף משותף



פתרון באמצעות גרף משותף הוא פתרון הנעזר בגרף איזומורפי. כאשר בעיות שונות ניתנות לייצוג על ידי אותו גרף, ניתן להסיק כי הבעיות איזומורפיות. במקרה שבעיה אחת תנותח, התוצאות יהיו זהות לכל הבעיות האיזומורפיות. בדרך כלל, בבעיות מסוג אלו משתמשים בגרף האיזומורפי או התחום האיזומורפי לנתח בעיה מהסיבה שיותר קל להבין או לפתור אותה כך שהפתרון בסופו של דבר הופך ל"שקוף". הגרף המשותף מאפשר ערוץ להעברת ידע בין תחום אחר, תחום משני לבעיה חזרה לתחום הבעיה המקורי. הדוגמה הבאה תנותח ותוסבר על מנת להבהיר את השימוש בגרף משותף לפתירת בעיות.

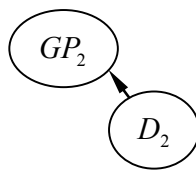
תבחר מערכת הנדסית  $D_1$ , ועל ידי הפעלת שלבים דטרמיניסטיים, המבנה (structure) של המערכת  $D_1$  עובר טרנספורמציה למבנה איזומורפי בייצוג הגרפי. הייצוג כעת הינו מודל של המבנה הטופולוגי (structure) של המערכת, אבל אינו מוגבל רק למאפיין זה. עקב אופי הייצוג המתמטי בו נעשה שימוש בתיזה, הייצוג  $GR_1$  ממדל גם את ההתנהגות (behavior) של מערכת  $D_1$  ועקב זאת, בעצם גם ממדל את הפונקציה של המערכת (function).



### איור 1.2 בניית ייצוג מתמטי איזומורפי למערכת מתחום הנדסי

מערכת  $D_1$  מיוצגת איזומורפית באמצעות  $GR_1$ . בניית המודל הינה מבנית, אך גם תכונות הפונקציה וההתנהגות מעוברות במפורש.

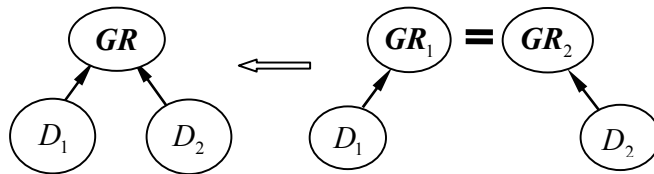
באופן זהה לחלוטין מהלך הקודם, ניתן לקחת מערכת הנדסית מתחום אחר- $D_2$ , ולבנות עבורה ייצוג מתמטי איזומורפי  $GR_2$ . שוב, כל התכונות ממודלות על ידי הייצוג – המבנה מועבר על ידי הפעלת שלבי בנייה דטרמיניסטיים, וההתנהגות והפונקציה מעוברים אוטומטית עם הבנייה.



### איור 1.3 בניית ייצוג מתמטי איזומורפי למערכת מתחום הנדסי אחר

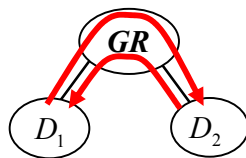
כרגע יוצגו שני תחומים הנדסיים שונים על ידי שני ייצוגים איזומורפיים שונים. אך מה קורה אם הייצוגים זהים ( $GR_1 = GR_2$ ) ?

הייצוגים זהים מבחינת המבנה שלהם, אך הזהות לא נגמרת כאן. מכיוון שכל ייצוג בנפרד היה מודל לא רק של המבנה, אלא גם של התנהגות והפונקציה, הרי שגם המערכות  $D_1$  ו- $D_2$  הן בעלות מאפייני התנהגות והפונקציה זהים. חשוב להדגיש כי הזהות הינה ברמת הייצוג בלבד, ואין זה אומר כי המערכות זהות הנדסית. את הייצוגים זהים, ניתן לייצג על ידי ייצוג אחד המשותף לשתי המערכות  $GR$ . ייצוג משותף זה הינו ייצוג מתמטי איזומורפי הן של מערכת מתחום  $D_1$  והן של מערכת מתחום  $D_2$ .



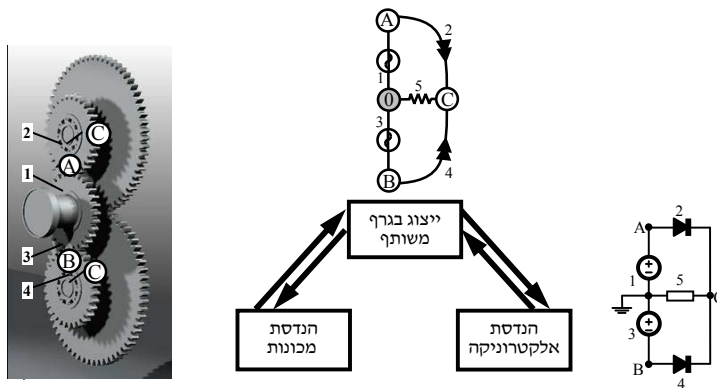
**איור 1.4** שני ייצוגים זהים ההופכים לייצוג יחיד ומשותף

הייצוג המשותף ממדל את כל מאפייני התכן של שני תחומים שונים  $D_1$  ו- $D_2$ . דבר זה מבטיח כי כל תוספת רכיב הנדסי שתבצע למערכת בתחום  $D_1$ , תעבור טרנספורמציה לייצוג האיזומורפי  $GR$ , ומשם למערכת בתחום  $D_2$  בו יתווסף השינוי כרכיב הנדסי שווה-ערך. תהליך זה נכון כמובן גם לכיוון השני ולכן, הייצוג המשותף  $GR$  הופך להיות ערוץ להעברת מידע בין-תחומי.



**איור 1.5** העברת ידע בין שני תחומים דרך הייצוג המשותף

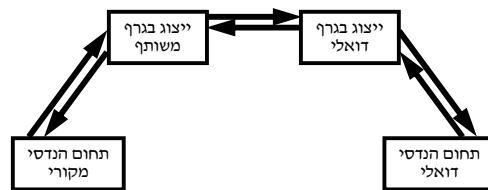
באותו אופן גם אם לא קיימת מערכת הנדסית כלל בתחום אחד, ניתן לבנות כזאת באמצעות מערכת מתחום אחר החולקת ייצוג משותף עם התחום. זהו בעצם הבסיס לשיטת התכן, לקחת תכן ידוע מתחום הנדסי אחד, ולבנות אותו מחדש באמצעות הייצוג המשותף בתחום הנדסי אחר. על השיטה והדוגמה המופיעה באיור 1.6 עוד יורחב בפרק 2.



**איור 1.6** העברת ידע בין הנדסת אלקטרוניקה להנדסה מכנית

תכן זה הינו דוגמה לשיטה כאשר נלקח מעגל מאלקטרוניקה בעל פונקציה ידועה, עבר טרנספורמציה לייצוג האיזומורפי, ועבר טרנספורמציה לתחום המכניקה. המכניזם שתוכנן הינו בעל התנהגות ופונקציה שווי ערך למעגל עליו הוא מבוסס.

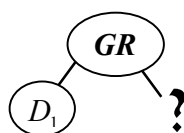
**1.2.3 העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף הדואלי**



**איור 1.7** תרשים הזרימה לתהליך העברת ידע באמצעות ייצוג בגרף דואלי

**פתרון באמצעות ייצוג דואלי הוא פתרון הנעזר בייצוג דואלי (להסבר למונח הדואליות ראה חלק 1.4).** כאשר לא ניתן למצוא ייצוג המשותף לשני תחומים, ניתן להמיר את הייצוג לייצוג דואלי, ולחפש פתרון מהתחום הדואלי. במקרה שהבעיה אחת תנותח, התוצאות יהיו זהות לכל הבעיות הדואליות. בדומה לשיטה באמצעות גרף משותף, משתמשים בייצוג הדואלי במקרים בהם יותר קל להבין ולפתור בעיות בתחום זה. הייצוג המקורי יחד עם הייצוג הדואלי שלו הינם בעלי כללי המרה ידועים מראש ולכן שניהם מהווים ערוץ להעברת ידע בין התחום אחר, דואלי לבעיה, חזרה לתחום הבעיה המקורי.

אם חוזרים להסבר על שיטת העברת הידע בייצוג המשותף, ניתן לראות כי חיפוש מערכת בעלת פונקציה מתאימה, מסתמכת על קיום מערכת הנדסית בתחום כלשהו בעלת פונקציה משותפת. תנאי זה הינו הכרחי על מנת להעביר ידע מהמערכת ההנדסית המתאימה דרך הייצוג וחזרה לתחום ההנדסי הרצוי. משמע, אם מערכת כזאת אינה קיימת, אין באפשרות המתכנן לנצלה.

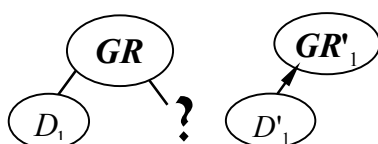


**איור 1.8** מצב בו לא קיימת מערכת החולקת ייצוג משותף עם התחום

אין מערכת המשותפת בעלת ייצוג איזומורפי  $GR$ , ולכן לא ניתן להעביר ידע לתחום הנדסי  $D_1$ .

ניתן לקחת מערכת הנדסית מתחום אחר ובעלת משתנים אחרים אשר לא חולקת ייצוג משותף עם  $D_1$ .

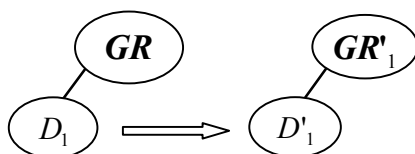
עבור מערכת זאת התקרא- $D'_1$ , נבנה ייצוג מתמטי איזומורפי  $GR'_1$  לפי כל הכללים שנידונו בחלק הקודם.



**איור 1.9** הוספת ייצוג איזומורפי לתחום הנדסי שאינו ייצוג משותף

הוספת תחום  $D'_1$  בעל ייצוג איזומורפי  $GR'_1$ .  $GR'_1 \neq GR_1$ , ולכן לא ניתן להעביר ידע מתחום  $D'_1$  לתחום הנדסי  $D_1$ .

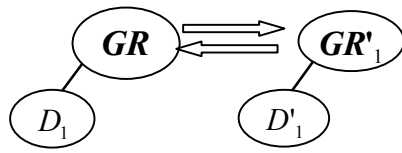
אם ניתן לזהות דמיון של פונקציה בין המערכת ההנדסית ב- $D'_1$  לבין המערכת ב- $D_1$ , למרות שלא ניתן לייצגם בייצוג משותף, ייתכן והם תחומים דואליים. דואליות היא נושא מוכר מתורת הגרפים (Swamy and Thulasiraman, 1981), אשר מקשרת בין ייצוגים שלעיתים אין ביניהם קשר נראה לעין. אם שני התחומים ההנדסיים דואלים אחד לשני, אזי קיים ביניהם קשר בו פעולת טרנספורמציה מתמטית תאפשר להגדיר פונקציה של  $D_1$  במונחים של תחום  $D'_1$  ולהפך.



**איור 1.10** קשר דואלי בין שני תחומים הנדסיים

פונקציה ב- $D_1$  עוברת המרה לפונקציה ב- $D'_1$ . בהמרה מתבצעת רפורמולציה של המשתנים למשתנים דואליים.

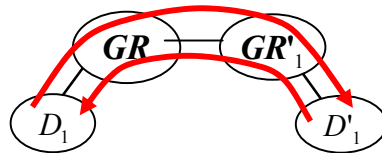
מכיוון שהייצוגים  $GR_1$  ו- $GR'_1$  ממדלים את התנהגות והמבנה של המערכות ההנדסיות, וקיים קשר דואלי בין המערכות ההנדסיות, המסקנה היא כי שני הייצוגים הנ"ל דואליים אחד לשני מבחינת מאפיינים אלו. אם אכן הפעלת חוקי תורת הגרפים מאפשרת טרנספורמציה מייצוג אחד לשני ולהפך, אז אין ספק כי התחומים ההנדסיים דואליים אחד לשני.



**איור 1.11** קשר דואלי בין שני הייצוגים

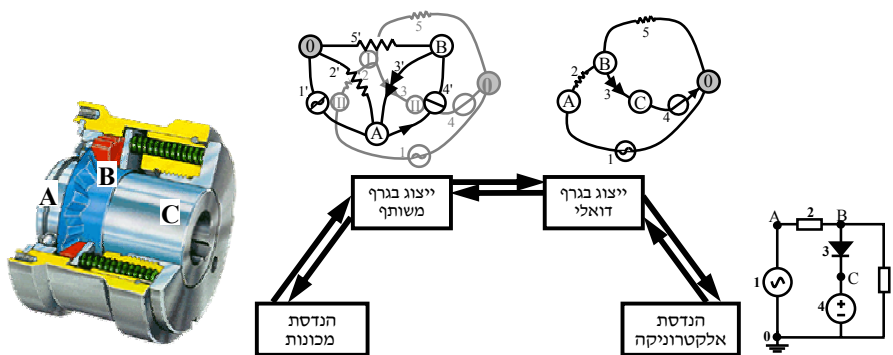
עקב דואליות בין ייצוג  $GR'$  ל- $GR$ , ניתן לעבור בין השניים על ידי טרנספורמציה מתמטית מתורת הגרפים.

הייצוגים הדואליים ממדלים איזומורפית כל אחד את התחום ההנדסי שלו. מכיוון שקיים קשר דואלי בין הייצוגים, ניתן להעביר ידע מתחום  $D_1$  לייצוג האיזומורפי שלו, להמיר את הייצוג דרך טרנספורמציה מתמטית לייצוג דואלי, ומשם לבנות מערכת איזומורפית בתחום  $D_1$ . הייצוגים וקשר הדואליות ביניהם, מהווים ערוץ דו-כיווני להעברת ידע בין שני תחומים שאין ביניהם קשר של ייצוג משותף. הייצוג הדואלי מאפשר להרחיב את שדה הקונספטים ההנדסיים הנגישים להעברת ידע.



**איור 1.12** העברת ידע בין שני תחומים דואליים דרך הייצוג הדואלי

כפי שנעשה בייצוג משותף, כאשר לא קיימת מערכת הנדסית כלל בתחום אחד, ניתן לבנות כזאת באמצעות מערכת מתחום אחר החולקת ייצוג דואלי עם התחום. זהו בעצם הבסיס לשיטת התכן המוצעת, לקחת תכן ידוע מתחום הנדסי אחד, ולהעבירו דרך ייצוגים דואליים לבנייה בתחום הנדסי אחר. על השיטה והדוגמה המופיעה באיור 1.13 עוד יורחב בפרק 3.



**איור 1.13** העברת ידע בין הנדסת אלקטרוניקה להנדסה מכנית

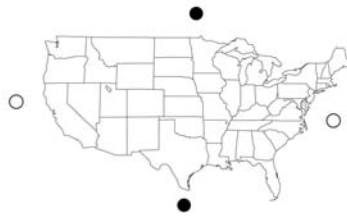
תכן זה הינו דוגמה לשיטה כאשר נלקח מעגל מאלקטרוניקה בעל פונקציה ידועה, עבר טרנספורמציה לייצוג האיזומורפי, ועבר טרנספורמציה לייצוג הדואלי ומשם לתחום המכניקה. המסבך שתוכנן הינו בעל התנהגות ופונקציה שווי ערך למעגל עליו הוא מבוסס.

#### 1.2.4 תכונות מיוחדות הניתנות לזיהוי ברמת הייצוג

בחלקי ההקדמה ניתן לראות כי הייצוגים מאפשרים העברת ידע בין תחומים שונים. בייצוגים עצמם גם טמון ידע ברמת הייצוג אשר מאפשר לזהות תכונות מיוחדות. תכונות כמו זהות בין מערכות הנדסיות או יחסים מיוחדים במערכת, מתגלים לפעמים רק ברמת הייצוג. תופעה זאת מסייעת בתהליך התכן בזיהוי ושימוש בתכונות אלו.

#### זיהוי תכונות מיוחדות בייצוג במשחק חיבור

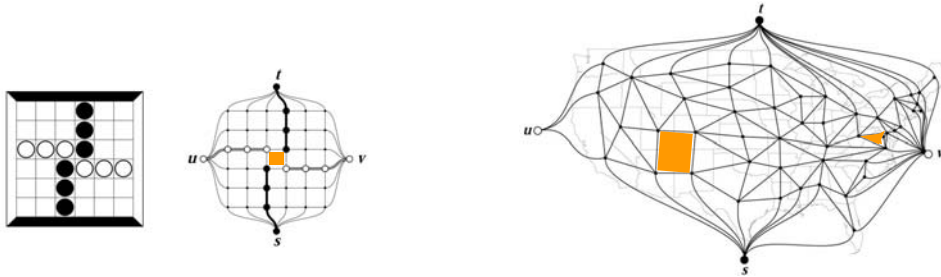
משחק החיבור כולל שני שחקנים אשר מנסים לחבר בין קצוות רשת המשחק כאשר כל שחקן מנסה לנצח על ידי חיבור בין הקצוות תוך כדי חסימת השחקן השני.



#### איור 1.14 משחק חיבור בין קצוות ארה"ב

לוח המשחק המורכב ממפת המדינות של ארה"ב. שני שחקנים - שחור ולבן, צובעים כל מדינה לפי תור במטרה לחבר בין קצוות הלוח. שחור צריך לחבר בין קנדה למקסיקו, ולבן צריך לחבר בין שני האוקיינוסים. משחק זה נחקר בהקשר של תיאורית טופולוגית ארבעת הצבעים (Gardner, 1959).

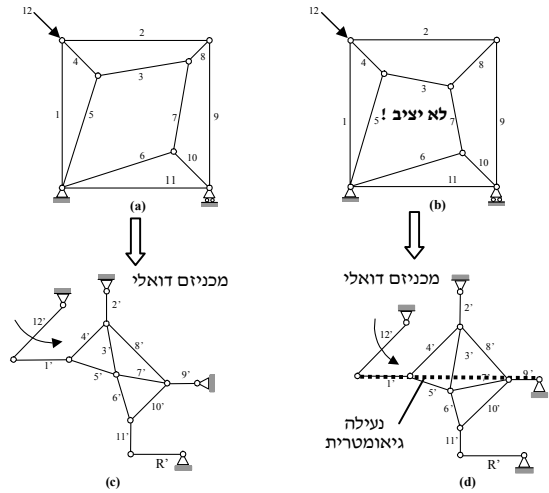
המשחק נראה פשוט למדי, אך בניית הייצוג הדואלי של לוח המשחק, תגלה כמה תופעות מעניינות.



#### איור 1.15 בניית הייצוג הדואלי של לוח המשחק וזיהוי תכונות מיוחדות

בשלב זה, ניתן לגלות תכונות מיוחדות במשחקי חיבור אשר ניתנות לזיהוי בייצוג הדואלי. אחד המצבים הבולטים במשחקי חיבור, הוא מצב של תקיעה (deadlock). דוגמה לכך מופיעה בצד שמאל של האיור, בו הטופולוגיה המקורית כוללת לוח המתואר של על ידי תאים מרובעים. תאים מרובעים סביב נקודה משותפת אינם סמוכים אחד לשני ולכן ניתן לזהות בגרף הדואלי שלהם כי יש מצב בו גם שחור וגם לבן יפגשו ללא אפשרות למעבר. ניתן לזהות נקודות תקיעה באזורים בעלי מעגלים של ארבע קשתות אשר הודגש על גבי הייצוג הדואלי.

הייצוג המופיעה באיור 1.15 מאפשר לזהות מצב מיוחד שאינו ברור או ידוע באיור 1.14. בהקשר ההנדסי, מקרה בו ניתן לזהות תכונות מיוחדות הוא מקרה של יציבות של מסבך. במקרה המוצג באיור 1.16 ניתן לראות איך נעזרים בתכונת הדואליות בעת תכנון מסבכים. ישנם עוד יתרונות בייצוג הגרפי, ואלה יורחבו בהמשך.



### איור 1.16 תכן מסבך יציב באמצעות הייצוג הדואלי

בחלק העליון של האיור ניתן לראות שני מסבכים זהים טופולוגית וקיים קושי להבדיל בין השניים. בניית המכניזם הדואלי דרך הייצוג הדואלי, מאפשר מבט חדש בבעיה. בדואלי ניתן לזהות כי המכניזם הימני התחתון, יש סידור חוליות על אותו קו הגורם לנעילה גיאומטרית. דבר זה מעיד על חוסר יציבות של המסבך עליו הוא מבוסס. לעומתו, הדואלי של המסבך השמאלי תקין, משמע המסבך יציב.

### 1.3 סקר ספרות

**בחלק הקודם הוצגו שיטות שנחקרו ופותחו בעבודה זו. התכן קונספטואלי שהוצג ויורחב בהמשך הוא רק כיוון אחד מהמון כיוונים ושיטות תכן אשר פותחו במהלך השנים. על מנת לעמוד טוב יותר על העבודות שנעשו בתחום התכן הקונספטואלי ומיקום העבודה בין מחקרים אחרים, מובאת פה סקירה של מספר עבודות אשר נעשו בתחום.**

#### 1.3.1 אטלסים של מכניזמים

תכן מכני קונספטואלי במובן הקלאסי, תמיד התבסס על קונספטים שכבר היו קיימים תוך פיתוח והוספה של רכיבים חדשים. בתחום התכן המכני, נעשה שימוש רב באטלסים של מכניזמים. אטלסים מהווים מקבץ של רעיונות ישירים או קונספטים שימושיים ודוגמאות לשימוש במכניזמים המוצגים ביישומים תעשייתיים. מקבץ זה, מהווה בסיס ידע לתכן קונספטואלי. המכניזמים בספרים אלו מחולקים בדרך כלל לקבוצות לפי הפונקציה שלהם ושימושם בתחומים הנדסיים ספציפיים. אטלסים נודעים כוללים את (Artobolevsky, 1986), אשר ערך מעל 2000 מכניזמים ומיין אותם לפי צורת פעולתם ו-(Chironis, 1978), שערך מכניזמים כאשר אלו מוינו לפי התנהגותם, והביא דוגמאות לשימוש במכניזמים המוצגים ביישומים תעשייתיים.

(Jones et al., 1960), ערכו אוסף של מכניזמים ופטנטים, כאשר אופן פעולת המכניזמים הוסבר ואלו חולקו לפי סוג פעולתם ויישומם. דוגמאות נוספות לאטלסים של מכניזמים הם ספרי handbook למהנדסים, קטלוגים, בסיסי נתונים של יצרנים ומספר רב של פטנטים מכניים הרשומים היכולים לספק פתרון הנדסי זמין. מקורות בעצם משמשים כמקור ידע להתבססות על מקרי תכן קודמים ומאפשרים ולקבל רעיונות חדשים מהקונספטים הטמונים בפתרונות הקודמים.

רוב המקרים המתועדים מוצגים בצורת רישומים סופיים ושרטוטים של המכניזמים שאינם מתאימים לצורת העברת ידע שיטתית או שימוש באלגוריתמים ליצירת קונספטים חדשים. שימוש באטלסים היא הדרך הנפוצה ביותר לתיכון מכניזמים אך גם דרך מסורבלת הדורשת ניסיון רב, חיפוש נרחב וגם מגבילה את אפשרויות לפתרון מכיוון שמתבססים על תכן קיים.

#### 1.3.2 תכן קונספטואלי מבני (structure)

באמצע שנות השישים (Freudenstien and Dobryjanskyj, 1964) חלוצי הדרך, בכול הקשור לשימוש בתורת הגרפים לצרכי תכן, התחילו להשתמש ולפתח ייצוגים גרפים לצורך תכן מכני קונספטואלי. ייצוגים גרפים שימשו לייצוג המבנה הקינמטי של מכניזמים. שיטות אלו כללו אפיון ובחירה של שרשרת קינמטית ופעולות מבניות אשר כללו שינויים מבניים וסידור מחודש של השרשרת הקינמטית על מנת להפיק קונספטים חדשים מאותה שרשרת.



הגרפים על מנת לייצג שרשראות קינמטיות ומכניזמים. ייצוגים אלו אפשרו לתכן מכניזמים על ידי מניפולציה של דרגות החופש באופן שיטתי, כאשר המבנה עובר את תהליך התכן בלי דגש על התנהגות (behavior) או פונקציה (function). שיטה זאת נודעה כ- "type synthesis", ותהליך זה הניב מספר רב של קונפיגורציות של המערכת המקורית שעברו אנליזה לבדיקת התאמתם לתכן הרצוי מבחינת התנהגות ופונקציה. עקב מספר הפתרונות הרב שהתקבלו בשיטה, שיטה זאת נקראה מאוחר יותר שיטת ה-Enumeration (Freudenstien, 1967).

ממשיכי דרך של שיטה זאת כללו את (Crossley, 1965) ומאוחר יותר (Woo, 1967), (Freudenstien and Bauschbaum, 1970). כולם חקרו את התחום ה-Enumeration בתכן המבני. תחום זה כלל בחירת שרשרת קינמטית ודרגת החופש רצויה לתכן ובניית כל הקונספטים האפשריים של השרשרת הקינמטית אשר יוצגה על ידי גרף מבני. תהליך זה היה מניפולציה מבנית של השרשרת. שיטה זו תמיד דגלה בהפרדת הפונקציה (מה המכניזם אמור לבצע) והמבנה כפי שסוכם על ידי (Freudenstien and Maki, 1978). הם טענו שהגדרת הפונקציה ושיקולי התנהגות של מכניזמים מקבעת את המחשבה ואינה מאפשרת לקבל קונספטים חדשים. הפרדה זאת אפשרה לחוקרים לקבל קונספטים מכניים מרובים עבור כל שרשרת קינמטית חוקית.

בשנים מאוחרות יותר, השתמשו (Pryor *et al.*, 1979) ב-Enumeration בתוספת צביעת הגרפים בהם נעשה שימוש, לייצוג ומיון השרשראות הקינמטיות. (Hong-Sen, 1985), השתמש בשיטת ה-Enumeration לתכן קונספטואלי בתעשיית הרכב היפנית, וניצל את הפתרונות על מנת למנוע חזרה על פטנטים קיימים.

עם התפתחות המחשוב בתחילת שנות השמונים, נצפה צורך בשימוש במחשבים לסייע בשלבי התכן המוקדמים. חוקרים התחילו לחקור איך ניתן להשתמש בשיטות המנצלות ייצוגים גרפים לבצע Enumeration אוטומטי ממוחשב לפיתוח הקונספטים. (Erdman *et al.*, 1986) ו-(Soni *et al.*, 1988), השתמשו בשיטות מבינה מלכותית לבחירת סוג המכניזם המתאים ביותר לזרועות רובוטיות וקבלת קונספטים נוספים. בשיטות אלו, היה צורך להגדיר דרישות פונקציונאליות ולבחור את גרף השרשרת הקינמטית ממנו מתחיל תהליך ה-Enumeration כמו כן, ההתנהגות הרצויה הייתה תלויה בדרגת החופש של הגרף הנבחר ולכן, הבעיה לא אופיינה כהלכה. מחקרים נוספים (Hakim and Shrivistava, 1991; Sohn and Freudenstein, 1986), נעזרו בגרפים לייצוג וייצור אוטומטי של מבנים קינמטיים של מכניזמים. (Olson, 1988), ייצג מערכות גלגלי שיניים על ידי גרפים קוויים לצורך אנליזה וגם הדגים את השימוש של תיאוריות הגרפים בייצוג בשלב הקונספטואלי של תכן מכני.

שיטת ה-Enumeration מאפשרת קבלת מספר רב של קונספטים גדול עבור אותו גרף אך ופה גם טמון חסרונה. עקב התעלמות מפונקציות המערכת והתנהגותה בשלב הקונספטואלי מתקבלים הרבה פתרונות שהם לא עונים לדרישות התכן ואף הרבה פעמים אינם הגיוניים או מעשיים בהכרח. שימוש במבנה ללא הכנסת

שיקולי פונקציה והתנהגות לתהליך התכן מצריך אנליזה ארוכה של קונספטים רבים ואינה תמיד יעילה. למרות השיטות הרבות הקיימות, עדיין 50% מעבודת התכן המבני נעשות תוך כדי התבססות על מקרים קודמים (Moore, 1993).

בעבודה זו, הייצוגים הגרפיים ושיטות התכן פותחו על מנת להתגבר על קבלת פתרונות בעלי פונקציה לא מתאימה על ידי שילוב בין הפונקציה למבנה.

### 1.3.3 תכן קונספטואלי ממוקד פונקציה (function)

הרבה חוקרים אשר מנסים לפתח שיטת תכן חוקרים את נושא הפירוק לפונקציה. שיטה זאת המוכרת כשיטת building blocks (Chiou, 1994), היא שיטה בה דרישות התכן או הפונקציה הכללית מפורקות לתת-משימות פשוטות יותר. עבור התת-פונקציות, קיימים פתרונות הנדסיים ידועים מראש. קונספט הפירוק של פונקציה בתכן לתת-פונקציות תואר בספרם של (Pahl and Beitz, 1988) והן במאמרים כגון (Pahl and Wallace, 2002). שיטה זו מצריכה ידע ספציפי לתחום בו עובדים ועזרת בבסיס נתונים הנדסי המספק פתרונות הנדסיים עבור תת-פונקציות.

מחקרים בולטים בתחום נעשו על ידי (Maher and Fenves, 1985; Rivard and Fenves, 2000) ויותר מאוחר על ידי שהשתמשו ב-CBD (Case Based Reasoning) לצורך תכן הנדסי. בשיטות שלהם ממדלים רכיבים ידועים כפונקציות ומחברים ומשנים אותם על מנת למדל תכן חדש.

(Li et al., 1995), פיתחו שיטה לסינתזה ממוחשבת לתכן קונספטואלי על בסיס פירוק בעיית התכן לפונקציות. אלגוריתם תכן מנצל חיפוש היוריסטי best-first search (Cormen et al, 1990) על מנת להתאים רכיבים מכניים לפונקציות מתוך ספריית רכיבים ממוחשבת.

(Kota and Chiou, 1999), העשירו את הפירוק לפונקציות על ידי ייצוג תת-פונקציות הנדסיות על ידי מטריצות. מטריצות אלו משמשים לייצוג ויצירת קונספטים הנדסיים על ידי חיבורם האוטומטי בהתאם לפונקציה המגדירה כניסה ויציאה.

(Nam Suh, 1990) פירק את תהליך התכן לסדרת אקסיומות וחוקים כאשר התכן מוגדר על ידי דרישות פונקציונאליות. רכיבים מבניים המתאימים לדרישות נבחרים, ותהליך של הפעלת אקסיומות מתבצע על מנת לבטל צימוד מיותר בין הדרישות הפונקציונאליות למבנה.

שיטת הפירוק לפונקציות היא שיטה נוחה להגדרת מערכות מסובכות, אך חסר לה פן התנהגותי בתיאורים. למרות זאת, היתרון שהופק על ידי הפירוק לתת-פונקציות והגדרות הפונקציה מהשיטה שימש בסיס להגדרת בעיות התכן במהלך עבודה זו.

#### 1.3.4 תכן קונספטואלי באמצעות התנהגות (behavior)

פירוק המשימות לתת-משימות הנדסיות והתמקדות בפונקציה כפי שתואר בשיטה הקודמת, בעצם מגביל את תחום הקונספטים לפתרונות ידועים מראש או וריאציות על פתרונות קיימים. אלטרנטיבה לשיטה זו היא להוסיף ייצוג גרפי המתאר את התנהגות המערכת. ייצוג גרפי זה יכול להיות מכול סוג (Graph) representations, Bond Graph כאשר הייצוג בעל חוקים מוגדרים היטב המאפשרים מידול מדויק של ההתנהגות ההנדסית. השלב הבא בייצוגים היה בעצם Enumeration, כפי שהתבצע בעבר על גרפים של מערכות קינמטיות, לקבל את כל הגרפים האפשריים אשר משמרים את התנהגות המערכת. Enumeration זו כוללת התאמה והחלפה של תת-גרפים בייצוג בתת-גרפים אקויוולנטים, והרחבת הגרף על ידי יצירת קשרים חדשים בין האלמנטים. השלב הסופי הוא למצוא רכיבים הנדסיים מתוך בסיס נתונים המתאימים לתת-גרפים או אלמנטים מהייצוג.

ניתן להבין כי זוהי הרחבה של שיטות התכן המתבססות על פונקציה כאשר הגרף מעשיר את השיטה עם ייצוג ההתנהגות. שיטה זאת בעצם הובילה לאחד מהענפים המעניינים בתכן המכני הקונספטואלי כאשר מידול ההתנהגות התבצע באמצעות Bond Graphs (BG). פותחו לצורך מידול ואנליזה של מערכות הנדסיות על ידי (Paynter, 1961), כאשר אלו מאפשרים ייצוג גרפי של התנהגות של מערכות דינאמיות על בסיס שימור אנרגיה במערכת. האלמנטים של BG שומרים על הספק קבוע כאשר הייצוג ממפה את הקשרים במעבר הספק זה.

מחקרים על השימוש של BG ככלי בתכן קונספטואלי הראו כיצד ייצוג תכן מבוסס בונד גרפים יכול לספק בסיס לסיומת של מערכות בעלות כניסה ויציאה יחידה (Ulrich and Seering, 1989) ועבור כניסות ויציאות מרובות עם דרישות וקטוריות (Prabhu and Taylor, 1990). עבודות אלו הניחו תנאים של מצב קבוע. (Karnopp *et al.*, 1990) הראו בספרם, כי מידול באמצעות BG מאפשר ייצוג גרפי שהינו מתאים ביותר למידול מערכות דינאמיות. תיכון ומידול של מערכות בעלות תנודות נחקר בעיקר על ידי (Redfield, 1999; Redfield and Krishnan, 1992).

(Ulrich and Seering, 1989) השתמשו בייצוג לפיתוח אסטרטגיה שהם הגדירו כ- "design and debug" בה המתכנן בוחר דרישה אחת ומציע פתרון אפשרי שיעמוד בדרישה זאת בלבד. פתרון ראשוני זה עובר איטרציות עד שהוא עומד בכל שאר הדרישות מהמערכת. הם השתמשו בשיטה לתכן קונספטואלי של מערכות אלקטרו-מכאניות. מטרת בעיית התכן שלהם הייתה לייצר מודל סכמאתי למערכת מפרמטרים נתונים. לאיברי ה-BG מיוחסים פונקציות חישוביות ספציפיות כמו אינטגרציה, חלוקה וסכימה. הפרמטרים הנתונים במתודולוגיה שלהם הם סוג כניסה וסוג יציאה בדומה לשיטות תכן לפי פונקציה. הקשר בין הכניסה ליציאה מוצג כמושוואה דיפרנציאלית. נתוני הכניסה והיציאה מוצגים בתור חלקי BG אשר מתארים את סוג הכניסה/יציאה והמדיום ללא יחס להתנהגות כפונקציה של זמן.

מכיוון שכל BG נותן פונקציה חישובית ספציפית, תהליך הסינתזה בונה את המשוואה הדיפרנציאלית של המפרט במושגים של האלמנטים שנוספו. מכיוון שמשוואה דיפרנציאלית אחת יכולה למדל מגוון רחב של מערכות, משתמשים בהיוריסטיקה על מנת להגביל את שדה החיפוש. מכיוון שיש רק כניסה אחת ויציאה אחת למערכת תיווצר רק משוואה דיפרנציאלית אחת שתחבר ביניהם והמתארת את התנהגות המערכת. למשוואה הדיפרנציאלית נבחרו רכיבים או הרכבות של רכיבים אשר תואמים את חלקי המשוואה. כך נבנית סידרה של חלקי BG אשר מחברת בין הכניסה ליציאה ועומדת בדרישות הפונקציה וההתנהגות.

(Malmqvist, 1994) השתמש בשיטה דומה לזאת של (Ulrich and Seering), כאשר פיתח שיטת סינתזה של מערכות דינאמיות הניתנות למחשוב. הוא הסתמך על ההיפותזה כי תכן קונספטואלי ניתן לשיפור על ידי התאמת תיאור פונקציה לשפת המידול שבשימוש. תיאור הפונקציה נעשה באמצעות "Function Structures", קופסאות שחורות שהכילו תיאור של הפונקציות האלמנטאריות שהן מבצעות באופן דומה לתכן פונקציונאלי. פונקציות הכניסה והיציאה היו את קלט ההתחלה והתהליך פירוק מיפה את ההבדלים בין הכניסה ליציאה לסדרה של Function Structures אשר אפשרו את החיבור בין השניים. לכל תיאור היה BG המתאר אותו ולכל BG ניתן למצוא אלמנט המבצע את הפונקציה. התוצאה הייתה סדרה של אלמנטים המחברים שנותנים את התכן הרצוי.

(Rinderle and Finger, 1994) השתמשו ב-BG גם לתכן מבני. הם התייחסו לתהליך התכן כתהליך טרנספורמציה מהטופולוגיה של אלמנטים של הגרף למבנה. פירוט התכן כלל BG אחד המקשר בין היציאה לכניסה ועונה על דרישת הפונקציה. גרף זה עובר טרנספורמציה ופורק לגרפים קטנים יותר על ידי הוספת אלמנטים של בונד גרף על מנת לשמור על היחס בין היציאה לכניסה ולשמור על דרישות התכן. תוספות ה-BG מבוססים על התכונות הגיאומטריות שלהם ולא רק לפי התנהגות כמקובל. הדוגמה שניתנת לשיטה זאת היא ליניארית ואינה מתארת אלמנטים אחרים והינה בלתי תלויה בזמן כך שהיא מקרה פרטי ואין השלכה על מערכות כלליות.

חוקרים אחרים הכוללים את (Joskowicz and Sacks, 1988) ו-(Kannapan and Marshek, 1990) ביצעו פעולות דומות אך ללא ייצוג ב-BG. הם לקחו את דרישות התכן והשוו לרכיבים בבסיס נתונים באמצעות ייצוגים ושיקולים שונים. אם לא נמצאת התאמה מלאה, השיטה שואפת לשלב את הרכיבים לקבל את התוצאה הנדרשת או אפילו לבצע שינויים מבניים על מנת לעמוד בדרישות. עבודות אלו לא התייחסו לפירוק הדרישות לתת-פונקציות פשוטות יותר ודבר זה הפחית את יעילותם.

(Schmidt and Cagan, 1995), הציגו גישה מופשטת לתכן כאשר הם התחילו את תהליך התכן ברמה גבוהה אשר כללה תיאור כללי של מעבר וטרנספורמציה של האנרגיה במערכת. לאחר ההגדרה הראשונית, נעשה פירוק של הרמה לפי מעבר האנרגיה לדרישות/פונקציות קינמטיות פשוטות ולבסוף, ברמה התחתונה הותאמו אלמנטים מבניים לפונקציות.

שיטות ייצוג ההתנהגות בכלל וה-BG בפרט, מהווים ייצוג נוח לייצוג ההתנהגות והקשרים הטופולוגיים בין רכיבים, אך מתקשים לייצג מבנה embodiment והתנהגות של מערכת בייצוג התכן כפונקציה של זמן, (Madhusudan 1995). טיעון נוסף שעלה הקושי בשימוש והבנת ה-BG כמתודולוגיה לייצוג הקונפיגורציה (Hinrichs, 1995). הייצוג הגרפי בעבודה מאפשר ייצוג נוח של התנהגות ומבנה הכולל קשרים טופולוגיים. הדבר אולי החשוב ביותר במחקר הינו העובדה שבייצוג הגרפי בו נעשה שימוש, לא היה צורך בהבנת ההתנהגות של הייצוג על מנת לבנות תכן קונספטואלי.

במחקר נעשה שילוב של הגורמים המאפיינים בעיית תכן. לאחר שנמצאת מערכת הנדסית בעלת פונקציה שקולה, כל המבנה של המערכת עובר באמצעות הייצוגים המתמטיים ומתקבל התכן הרצוי בתחום הרצוי המבצע את אותה פונקציה. הייצוג המתמטי מעביר גם את ההתנהגות של המערכת ההנדסית יחד עם המבנה.

### 1.3.5 תכן קונספטואלי באמצעות אלגוריתם גנטי

Genetic Algorithm Program (GP) היא שיטה אשר מוסיפה מודל של התפתחות טבעית לאופטימיזציה של אלגוריתם או תוכנה, על מנת לפתור בעיות (Goldberg, 1989), (Holland, 1975). למודל קיים ייצוג גרפי לרוב ובשנים האחרונות, התחילה מגמה של תכן באמצעות GP. הצורה הנפוצה ביותר של GP פותחה על ידי (Koza, 1997) ומשתמשת בעצים על מנת לייצג את האלמנטים שישתתפו באלגוריתם. GP "מגדל" עצים בעלי סיבוכיות הולכת וגדלה, ומאפשר קבלת תחום פתרונות גדול. כל עץ ב-GP מייצג מודל ספציפי בתוך דור של מודלים הנבנים. הדור הבא של גרפים מתקבל על ידי שילוב ומוטציה בין עצים מהדור הנוכחי.

(Goodman and Rosenberg *et al.*, 2002) השתמשו בשילוב של שיטת ה-GP עם (BG) Bondgraphs לפתח מתודולוגיה של תכן. הרעיון המרכזי כלל פיתוח של שיטה שתשלב בין הייצוג ההתנהגותי של BG, לבין ביצועים משופרים תוך כדי תהליך איטרטיבי של סינתזה באמצעות GP. הפיתוח הודגם על מערכות מכטרוניקה.

האלגוריתם הגנטי מאפשר קבלת פתרונות שונים שבאופן שונה מייצוגים מבניים בלבד, משלב גם התנהגות בפיתוח הפתרונות. מצד שני, אלגוריתם החיפוש גם יכול להניב דור עם שילוב לא רצוי של פרמטרים מכיוון שהוא אינו שיטה להעברת ידע אלה בנייה שיטתית של תכן מנקודת התחלה כלשהי.

### 1.3.6 תכן קונספטואלי באמצעות אנלוגיה

תכן באמצעות אנלוגיה התפתח כאשר היה צורך להרחיב שדה של פתרונות אפשריים ולחפש פתרונות מתחומי הנדסה אחרים. בניגוד לרוב השיטות הקיימות אשר מתמקדות בתחום הנדסי ספציפי, תכן אנלוגי מחפש פתרון שהוא דומה לדרישות התכן אך לא בהכרח מתחום הבעיה. תכן באמצעות אנלוגיה יכול לפעול על

הפונקציה, ההתנהגות או מבנה של ידע. אנלוגיה דורשת מטרה (החפץ אותו מתכננים) ומקור (המוצר ממנו לוקחים את האנלוגיה).

רוב האנלוגיות מבוצעות בין מצבים באותו התחום (Navichandra, 1991), למרות שהאנלוגיות הכי מעניינות מגיעות מתחומים שונים כפי שחקרו (Gero and Qian, 1992) ב-ABD (Analogy Based ABD). Design פותח על מנת לאפשר למצוא מבנים אנלוגיים התואמים מבחינת התנהגות או פונקציה. הצורה הכי נפוצה של העברת ידע באמצעות אנלוגיה מתבצעת ברמה המבנית של התכן למרות שקיימות שיטות להעברת התנהגות (Gero and Kazakov, 1999). השפעת האנלוגיה על פונקציה והתנהגות יכולה לגרום להכנסת משתנים חדשים למבנה המקורי.

אנלוגיה התנהגותית שאומנם פותחה מכבר עבור אלקטרוניקה ומכניקה, הינה בעלת פוטנציאל גדול לתכנון קונספטים חדשים, אך חסרים לה הייצוגים הגרפיים המתאימים. במחקר זה, נעשה שימוש רב באנלוגיה בשילוב בייצוגים גרפיים. הייצוגים הגרפיים גם הוסיפו לאנלוגיה, כאשר התווספו קשרים בין הייצוגים ברמת תורת הגרפים שהיו להם השלכה ישירה על האנלוגיה. תכונה ברמת הייצוג אשר תרמה רבות לאנלוגיה הינה תכונת הדואליות אשר נעשה בה שימוש נרחב בעבודה זו.

### 1.3.7 תכן קונספטואלי באמצעות TRIZ

TRIZ Theory of the Solution of Inventive Problems, פותח באמצע שנות הארבעים על ידי Altshuller. TRIZ אינה שיטה מחקרית אקדמאית, אלה סקר פטנטים נרחב שכלל למעלה מ-20,000 פטנטים. במחקר הוגדרו חמש רמות של יצירתיות שהתבססו על המרחק של הפטנט מהתחום המוכר לממציא, מספר הניסויים עד לקבלת קונספט ועד כמה הפתרון הסופי היה רחוק מהקונספט. על בסיס המחקר הסיק Altshuller כ-90% מכלל בעיות התכן של מהנדסים נפתרו כבר, לרוב בתחומים אחרים (Altshuller, 1994). השיטה כוללת אנלוגיה כללית של מאפייני התכן (פונקציה, מבנה והתנהגות) אשר תומצתו לארבעים עקרונות תכן. עקרונות אלו הם כלי עזר לתכן לאחר בחירת קונספט לאנלוגיה.

TRIZ הינה שיטה מקובלת בתעשייה, למרות שאין לה בסיס מתמטי מכיוון שהיא נשענת על חוקים כלליים שהתקבלו מניסיון וידע שנצבר. שיטת התכן בתזה זו מבוססת על ייצוגים מתמטיים ולכן יש לה חוקים יותר שיטתיים להעברת ידע באמצעות אנלוגיה.

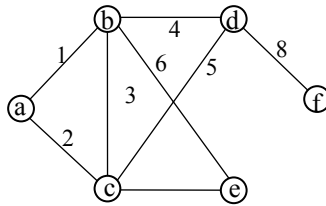
## 1.4 רקע תיאורטי בתורת הגרפים

שיטת התכנן הקונספטואלית המוצגת בעבודה זו, מבוססת על שימוש נכבד במוזלים מתמטיים מוכרים ומתועדים היטב הנקראים ייצוגים גרפיים. הייצוגים הגרפיים מאפשרים לייצג ולקשר בין כמה תחומים הנדסיים שונים. כאשר מערכות הנדסיות יוצגו באמצעות הייצוגים האלו ניתן לבצע אנליזה ותכנן למערכות ההנדסיות עצמן, ללא צורך בהתעמקות לתוך תחומי ההנדסה המקוריים. חלק זה נותן רקע כללי על תורת הגרפים כאשר הנושאים העיקריים מתורת הגרפים יינתנו באופן תמציתי. להרחבה והעמקה בנושאים הקשורים לתורת הגרפים, ניתן להיעזר בספרות מקצועית מתורת הגרפים כגון (Swamy and Thulasiraman, 1981).

### 1.4.1 הייצוג הגרפי (Graph Representation)

הייצוג הגרפי הינו גרף אשר תיאורו הורחב באמצעות תכונות וחוקים מתמטיים כאשר תכונות וחוקים שונים נותנים גרפים שונים. הייצוגים השונים מאפשרים להפוך גרפים לייצוגים נוחים לייצוג מערכות מכאניות ומאפשרות פעולות לשנותם.

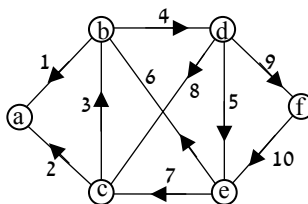
**גרף (graph)** - הוא אוסף של קשתות (edges) וצמתים (nodes או vertices), כאשר לכל קשת מתאים זוג של צמתים, שייקראו צמתי הקצה של הקשת. אפשר לייצג גרף בעזרת דיאגרמה, שבה כל צומת יסומן בעזרת נקודה מודגשת וכל קשת בעזרת קו המחבר את צמתי הקצה שלו. על מנת להבדיל בין הצמתים, הם מסומנים בעזרת אות לטינית. אפשר לסמן כל קשת בעזרת זוג צמתי הקצה שלה, אבל לרוב יסומנו הקשתות בעזרת מספרים. כפי שניתן לראות באיור 1.17.



איור 1.17 ייצוג גרפי מהסוג בו יעשה שימוש בעבודה.

**גרף קשיר (connected graph)** - הגרף קשיר אם ורק אם בין כל 2 צמתים בגרף יש לפחות מסלול אחד, כלומר כל צומת נגיש (reachable) מכל צומת אחר של גרף. העבודה תתמקד בגרפים קשירים בלבד.

**גרף מכוון (directed graph)** - הוא גרף שבו לכל קשת יש כיוון, כלומר כל קשת מאופיינת על-ידי זוג סדור של צמתים, שבו הצומת הראשון נקרא צומת הראש (head) והצומת השני - צומת הזנב (tail). באיור 1.18 מוצג גרף מכוון כאשר כל קשת מסומנת בעזרת חץ מהזנב לראש הקשת. ישנם גרפים בהם קיימים קשתות מסוג זה וחשיבותם רבה בייצוג מדויק של מערכות הנדסיות.

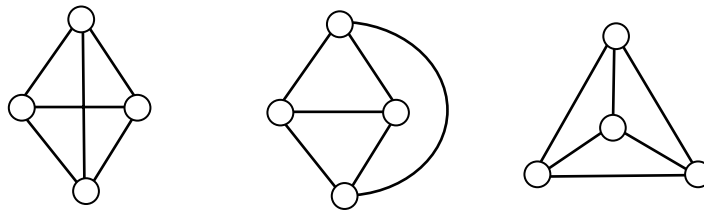


איור 1.18 גרף מכוון

**מסלול (path)** - הוא סדרה מן הצורה  $P = (v_0, e_1, v_1, e_2, v_2, \dots, e_k, v_k)$  כאשר  $v_i$  מסמנים את הצמתים של הגרף, ו- $e_i$  מסמנים את הקשתות של הגרף, כאשר צמתי הקצה של הקשת  $e_i$  הם  $v_{i-1}$  ו- $v_i$ . צמתים  $v_0$  ו- $v_k$  נקראים צומתי הקצה של המסלול.

**מעגל (cycle)** - הוא מסלול בגרף ששני צומתי הקצה שלו - הם אותו צומת. במילים אחרות, מעגל - הוא מסלול שחוזר לאותה נקודה שממנה התחיל. דוגמה לכך הוא המסלול  $P = (v_c, e_3, v_b, e_4, v_d, e_5, v_e, e_7, v_c)$  באיור 1.18.

**גרפים איזומורפיים (isomorphic)** - שני גרפים נקראים איזומורפיים אם קיימת התאמה בין צמתים בגרף הראשון לצמתים בגרף השני, כך שכל שני צמתים סמוכים בגרף הראשון, אם ורק אם הם סמוכים בגרף השני. לגרפים איזומורפיים יש את אותן מספר קשתות ואותם מספר צמתים. לשני גרפים איזומורפיים יש תמיד בדיוק אותן תכונות, ובכל יישום ניתן להשתמש בכל אחד מהם ולקבל אותה תוצאה. תכונה זאת של הגרפים מאפשרת ייצוג של תחומי הנדסה שונים והעברת ידע ביניהם והיא תורחב בהמשך. באיור 1.19 מוצגים גרפים, המייצגים את אותם המצבים אך נראים שונים לגמרי. גרפים אלה הינם גרפים איזומורפיים. זה לזה.



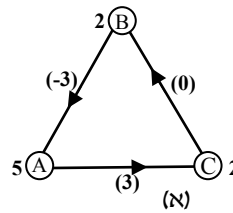
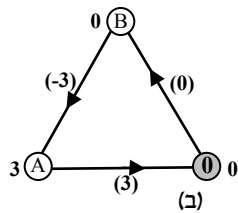
איור 1.19 ייצוגים איזומורפיים

## 1.4.2 פוטנציאל (Potential)

ניתן לייחס לכל צומת בגרף ערך פוטנציאל אופייני, המציין את מיקום הצומת במרחב הקשור לגרף. לדוגמה, אם מייצגים מעגל חשמלי לצורך העברת ידע לתחום הנדסי אחר, המרחב הקשור אליו הוא מרחב הפוטנציאל החשמלי. במרחב זה, יאופיין בפוטנציאל חשמלי של נקודה ברשת שאותה הוא מייצג. מרחב זה הוא חד מימדי ולכן הפוטנציאל של הצומת הוא סקלרי (ערך המתח בצומת). במרחב רב-מימדי, הפוטנציאל בצומת יוצג על ידי וקטור של ערכים. דוגמה לכך היא מפה דו-ממדית בה כל צומת מקבלת שני ערכי פוטנציאל התואמים את מיקומו  $(x,y)$  במרחב.

כל עוד שדה הפוטנציאל בגרף אינו תלוי בגורמים אחרים, פוטנציאל הצומת ניתן לקביעה שרירותית, מבלי להשפיע על הפוטנציאלים של יתר הצמתים. יתר על כן, לא ניתן להשפיע על פוטנציאל צומת על ידי שינוי הפוטנציאלים של יתר הצמתים. לפיכך, מספר הפוטנציאלים הבלתי-תלויים הוא כמספר הצמתים. תכונה זאת היא חשובה לתכן הקונסטואלי בו מעוניין המתכנן תחילה לקבל ייצוג ראשוני של המערכת ללא חשיבות לערכים ספציפיים של דינמיקת המערכת.





**איור 1.20** ייצוג גרפי עם פוטנציאלים בצמתים והפרש פוטנציאלים בקשתות

ההפרש בין הפוטנציאלים של הצמתים נקרא "הפרש פוטנציאלים" או בקיצור "ה.פ." כאשר זה נמדד על הקשת ( $e$ ) בין זוג צמתים וערכו הוא ההפרש בין פוטנציאל צומת הזנב  $i(e)$  לבין פוטנציאל צומת הראש  $h(e)$ :

$$(1.1) \quad \Delta(e) = \pi_i(e) - \pi_h(e)$$

באיור 1.20 (א) מוצג גרף בו ערכי הפוטנציאל נתונים ליד הצמתים במספרים מודגשים וה.פ. מוצג בסמוך לקשתות בסוגריים. ערכי הפוטנציאל נקבעו שרירותית. בדרך כלל, לנוחות במיוחד בתהליך התכנון, קובעים צומת אחד בגרף כצומת ייחוס שהפוטנציאל שלו אפס, ואז לקבוע את ה.פ. הצמתים ביחס לצומת זה. צומת ייחוס זה, בדרך כלל מייצג חלק מקובע או קבוע הנבחר במערכת ההנדסית המקורית. באיור 1.20 (ב) צומת אחת (C) נבחר כצומת ייחוס וניתן לו פוטנציאל 0. ה.פ. בקשתות נשארו קבועים וערכי הפוטנציאל בצמתים השתנו בהתאם וביחס לצומת הייחוס. קשת בה ה.פ. נקבע שרירותית מראש נקראת קשת מקור ה.פ., או-"מקור ה.פ." (P.D. Source).

**חוק פוטנציאלים** - סכום הפרשי הפוטנציאלים בכל מעגל בגרף שווה לאפס. חוק זה נובע מהגדרה של הפרש פוטנציאלים ומבוסס על חוק KVL (Kirchoff's Voltage Law). כפי שניתן לראות בגרפים באיור 1.20 :

$$(1.2) \quad \sum_1^j \Delta_j = 0$$

### 1.4.3 גרף פוטנציאלים PGR (Potential Graph Representation)

הייצוג המתאר את הפוטנציאלים וה.פ. בגרף נקרא PGR. (Potential Graph Representation) ייצוג זה מתאים לייצוג מערכות הנדסיות שהתנהגותן מוגדרת על ידי משתני הפוטנציאל וה.פ. בצורה של מהירות, תזוזה או פוטנציאל חשמלי (מתח). בתהליך התכנון, בייצוגים המתארים פוטנציאלים יעשה שימוש נרחב בתיאור פוטנציאל צומת וה.פ. ביחס לצומת השכן על מנת לייצג, לבנות להבין התנהגות של רכיבים הנדסיים ויחסם לשאר החלקים במערכת ההנדסית.

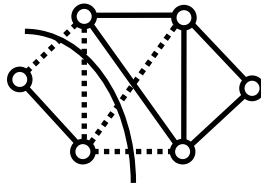
### 1.4.4 זרימה (Flow)

זרימה היא מעבר של ערכים דרך קשתות הגרף, כך שבכל קשת זורם ערך אופייני מצומת הזנב לצומת הראש. הזרימה נקבעת על ידי מסלול משלים דרכו תחזור הזרימה מצומת הראש לצומת הזנב. תכונה

חשובה של זרימה בקשתות היא קיום חוק הזרימות. על מנת להבין את חוק הזרימות יש צורך להגדיר תחילה מהו חתך בגרף.

**חתך (cut) -** זוהי קבוצת קשתות בגרף המקיימת את שתי התכונות הבאות:

- (1) הורדת קבוצת קשתות זו מן הגרף תהפוך אותו לגרף לא קשיר.
- (2) כל תת-קבוצה של חתך לא מקיימת את התכונה הראשונה.



**איור 1.21** ייצוג גרפי עם זרימות וחתך על שני צמתים

**חוק הזרימות -** סכום הזרימות בכל חתך שווה לאפס. חוק זה נובע מחוק הזרימות של קירכהוף (Kirchoff's Current Law) KCL:

$$(1.3) \quad \sum_1^j F_j = 0$$

זרימה בקשת הינה בעלת כיוון מוגדר מראש אך עקב חוק הזרימות לא ניתן לקבוע את כל כיווני הזרימה. מספר הקשתות שניתן לקבוע את כיוון זרימתם תלוי בדרגה.

**דרגת הצומת (degree) -** מספר הקשתות שצומת פוגשת, כלומר: מספר הקשתות שהצומת הוא צומת הקצה שלהן. קל לראות שסכום כל הדרגות בגרף תמיד שווה לפעמיים מספר הקשתות של הגרף, כי הוספת כל קשת לגרף גורמת להגדלה באחד של הדרגות של שני צומתי הקצה של הקשת. הדרגה תאפשר לקבוע כיוון וגודל רצוי לכל הקשתות בחתך חוץ מהקשת האחרונה בה הזרימה נקבעת שרירותית (גודל וכיוון). קשת בה הזרימה נקבעת שרירותית מראש נקראת קשת מקור זרימה, או "מקור זרימה" (Flow Source).

### 1.4.5 גרף זרימות (Flow Graph Representation) FGR

הייצוג המתאר את מהלך הזרימות והחוקים בגרף נקרא (Flow Graph Representation) FGR. הגרף יקרא גרף זרימות וגרף זה מתאים לייצג מערכות הנדסיות שבהן האלמנטים הינם אלמנטים המתאימים לזרימה. הזרימה בגרף יכולה להשתנות לפי סוג המערכת המתוארת: בחשמל זה זרם, בהידראוליקה זו ספיקה, במכניקה יש שני סוגי זרימה – ליניארית שמתאימה לכוחות וזוויתית – למומנטים, בהנדסת ניהול אלו אנשים.

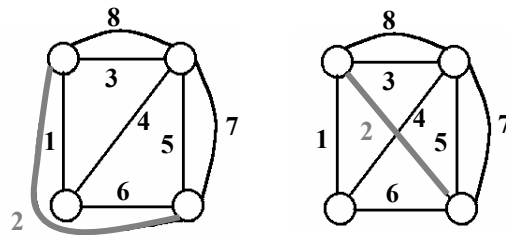
בתהליך התכן, בייצוגים המתארים פוטנציאליים יעשה שימוש נרחב בתיאור הזרימה בקשתות על מנת לייצג רכיבים הנדסיים ויחסם לשאר החלקים במערכת ההנדסית ועל מנת להבין את התנהגות

המערכות ההנדסיות המתקבלות. החשיבות של תכונת יודגש בשלב בנייה והבנת המערכות הנדסיות בהם מספר הבחירות לתכן מצטמצמות עם בחירה וקביעה רכיבים נוספים.

### 1.4.6 גרף דואלי (Dual Graph)

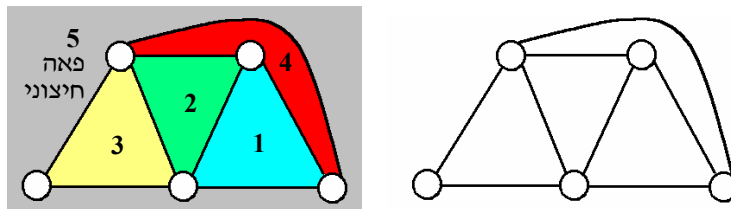
גרף דואלי הוא גרף בו יעשה הרבה שימוש במהלך העבודה ועל מנת להבינו יש להגדיר כמה תכונות חשובות של גרפים שלהם יש גרף דואלי.

**גרף מישורי** - גרף שניתן לשרטט אותו כך שהקשתות שלו ייפגשו אך ורק בצמתים. שירטוט כזה של גרף נקרא - הייצוג המישורי של הגרף. באיור 1.22 מוצג גרף שאינו מישורי המשורטט מחדש לייצוג מישורי. תכונה של הגרף משפיע על דואליות הגרף שתוסבר בהמשך.



איור 1.22 גרף לא מישורי וגרף מישורי

**פאה של גרף** - גרף מישורי  $G$  מחלק את המישור עליו הוא נמצא למספר אזורים מחוברים- הקשתות והצמתים הסוגרים כל אזור יוצרים פאה. הפאה מגדירה אזור שאינו נחתך על ידי קשתות אחרות. המישור החיצוני של הגרף, דהיינו האזור שאינו תחום על ידי קשתות הגרף, נקרא הפאה החיצונית.



איור 1.23 גרף וגרף לאחר צביעת הפאות (כולל פאה חיצונית)

**גרף דואלי (Dual Graph)** - הגרף הדואלי  $G^*$  של גרף מישורי  $G$  הינו גרף מישורי שצמתיו מתאימים לפאות של  $G$ . לכל גרף מישורי  $G$ , קיים גרף דואלי אחד ויחיד  $G^*$  המתקבל מ- $G$  על ידי ביצוע הפעלות הבאות:

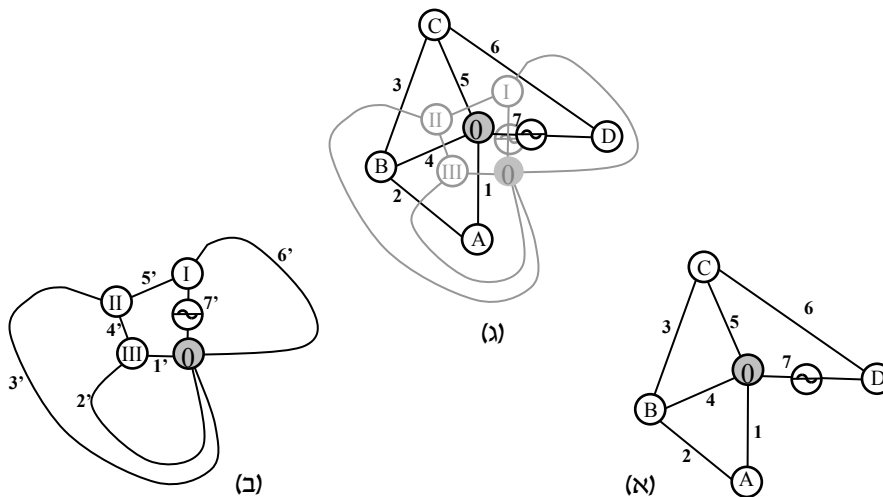
1. לכל פאה ב- $G$  מתאים צומת ב- $G^*$ .
2. לכל קשת  $e$  בגרף  $G$  מתאימה קשת  $e^*$  ב- $G^*$  כך שצומתי הקצה שלה יתאימו לשתי הפאות אותם היא מפרידה.
3. ברור כי  $(G^*)^*$ , הגרף הדואלי של הגרף הדואלי הינו הגרף המקורי.

במקרה של גרף מישורי  $G$  שהוא גם גרף מכוון או שחלק מהקשתות שלו הן בעלות כיוון מוגדר, כיוון הקשתות הדואליות ב- $G^*$  יקבע בהתאם לכיוון הקשת ב- $G$ . כיוון רוב הקשתות יקבע לפי כלל יד ימין, כך שאם קשת בגרף  $G$  מייצגת את ציר  $x$ , הקשת הדואלית תייצג את ציר  $y$  ב- $G^*$ . הסיבה שנאמר "רוב הקשתות" היא כי יש יוצאים מהכלל אבל הם ידונו בהמשך ובהתאם לבעיות המוצגות.

**גרף דואלי לעצמו (Self-Dual Graph)** – גרף דואלי לעצמו הינו גרף  $G$  שהינו איזומורפי לגרף הדואלי שלו  $G^*$ . ישנם גרפים מישוריים איזומורפיים שהגרפים הדואליים שלהם אינם איזומורפיים אחד לשני. תכונה זאת היא תכונה חשובה בתהליך התכן בו ניתן לנצל ו/או לאתר בעיות באמצעות תכונה זו.

### 1.4.7 הקשר הדואלי בין גרף פוטנציאליים (PGR) לבין גרף זרימות (FGR)

הדואליות מאפשרת לקשר בין שני גרפים שימושיים, בין PGR ל-FGR, ולכן פותחת בפני מהנדס תחומים נרחבים לנצל בתהליך התכן. ההוכחה לכך לא תורחב במסגרת עבודה זאת אך היא מפורטת ומפותחת במאמרים כגון (Shai, 2001). הסבר מופשט לקשר הדואלי הינו שבחוק הזרימות, סה"כ הזרימה בחתך הינה אפס. מכיוון שצומת הוא גם חתך אז ניתן להגיד כי סה"כ הזרימות על צומת שוות לאפס. מחוק הפוטנציאליים, סה"כ כל הפוטנציאליים במעגל הוא אפס. ניתן אם כך לומר כי צומת בגרף זרימה והקשתות היוצאות/נכנסות אליו הוא שווה ערך למעגל בגרף פוטנציאליים. אם הגרף המקורי הוא גרף פוטנציאל, ערך הפוטנציאל בצומת הדואלי יהיה כערך הזרימה בפאה הדואלית שלו. ולהפך – אם גרף המקורי הוא גרף זרימות, ערך הפוטנציאל בצומת הדואלי שלו יהיה כערך הזרימה בפאה המקורית שלו. כפועל יוצא, ערך הזרימה בקשת בגרף זרימות הוא ערך הפרש הפוטנציאליים בקשת המתאימה בגרף הדואלי, וכן להפך: ערך ה.פ. של קשת הגרף פוטנציאליים הוא ערך הזרימה בקשת הדואלית המתאימה.



### איור 1.24 גרף והגרף הדואלי שלו

גרפים (א) ו-(ב) הינם דואליים אחד לשני. בניית הדואלי לפי כללי הבנייה שתוארו לאחד מהגרפים (ג), תניב את הגרף השני.

## 2. תכן קונספטואלי באמצעות גרף משותף

### 2.1 הקדמה

**בפרק הקודם הוסברו המונחים הבסיסיים עליהם מושתתת העבודה, הובאו דוגמאות לשימוש בגרפים לייצוג הבעיות ושימושם ככלי לחיפוש והעברת פתרונות בבעיות, ולבסוף נעשה סקר ספרות של מחקרים שנעשו בתחום התכן הנדסי תוך שימוש בייצוגים שונים. שיטת התכן הקונספטואלי בפרק זה מבוססת על ייצוגים גרפיים משותפים תוך כדי ניצול איזומורפיות של הגרפים שונים. בפרק זה, תוצג שיטת התכן כאשר הינה מותאמת להנדסה. הייצוגים יוסברו יותר לעומק כאשר הדגש הוא על שימושם של הייצוגים הגרפיים שתוארו ברקע המדעי לייצוג תחומים הנדסיים שונים ולהעברת ידע ביניהם.**

התכן השיטתי מבוסס על אותן עקרונות שהוצגו בדוגמאות בפרק הקודם כאשר הרעיון הוא לייצג בעיה הנדסית כבעיה ברמת הייצוג המתאים, המאפשר לראות את הבעיה באופן כללי המתאים גם לתחומי הנדסה אחרים. לאחר מכן מתבצע איתור והעברת פתרון אפשרי מתחום הנדסי אשר חולק ייצוג בגרף משותף לתחום המקורי. ייצוג זה הופך לערוץ העברת המידע והתכונות המיוחדות ההנדסיות.

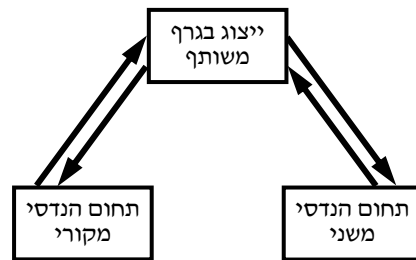
האיזומורפיות, הינה מושג מפתח ביישום השיטה לצורכי תכן קונספטואלי (Conceptual Design). ישנן מספר רמות של איזומורפיות בין המערכות ההנדסיות, מהרמה הגבוהה ביותר כאשר ניתן להגדיר התאמה חד-חד ערכית בין המשתנים המתארים את המערכות ההנדסיות השונות. במקרה זה ניתוח של מערכת אחת יניב תוצאות המשותפות לכל המערכות האיזומורפיות. המסקנות שניתן להסיק יהיו זהות גם מבחינת ההתנהגות של המערכות (משתני הזרימה – כוחות ומומנטים, משתני הפוטנציאלים - תזוזות ומהירויות) וגם מבחינת השיקולים האנרגטיים.

בגישה המוצגת בתיזה, למערכת הנדסית קיים ייצוג מתמטי איזומורפי, ייצוג המתאר את הקשרים בין המשתנים המגדירים את המערכת. מורכבות הייצוג תלויה ברמת האיזומורפיות בין המערכת ההנדסית לגרף שמייצגה. ניתן לפשט את התיאור המתמטי כאשר מתרכזים בסוג אחד של המשתנים. למשל אם נדרש לתכנן מערכת שהתנהגותה ניתנת להגדרה על ידי תזוזות, מהירויות, מתחים או כל משתני הפוטנציאל, ייצוג גרף פוטנציאלים (PGR) יאפשר להשוות בין מערכות איזומורפיות מבחינת משתני הפוטנציאלים. במקרה של התכן הדואלי, המאופיין על ידי כוחות, מומנטים או הזרימה של מערכות הנדסיות, ייצוג FGR יהיה נאות.

כאשר מערכות הנדסיות שונות ניתנות לייצוג בגרף זהה או משותף, נוכל להסיק שמערכות אלו איזומורפיות. כאמור האיזומורפיות בין המערכות תהיה ברמה שבה הוחלט לייצגן, זאת אומרת התקן שנבנה על ידי העברת רעיון מתחום הנדסי אחר יקיים בהכרח את התכונות שהוכנסו לייצוג. תכונות נוספות שהתקיימו במערכת המקורית ולא הועברו דרך הייצוג לא בהכרח יקוימו בתכן החדש.

השימוש בשיטת הייצוג בגרף משותף הופך את היכולת של המצאת התקנים הנדסיים ליכולת להעביר פתרונות לבעיות איזומורפיות בין תחומי הנדסה שונים. בפרק זה תוסבר השיטה ויובאו כמה יישומים לתכן מספר מערכות הנדסיות על ידי שימוש ברעיון הקיים במערכות מתחום הנדסי שונה.

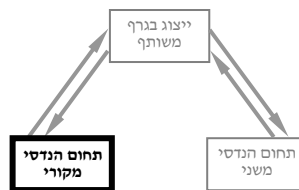
## 2.2 תיאור שלבי התכן הקונספטואלי באמצעות הייצוג בגרף משותף



איור 2.1 תרשים זרימה של תהליך התכן הקונספטואלי באמצעות גרף משותף

התכן הקונספטואלי בנוי מכמה שלבים המתבצעים לפי סדר הנקבע מראש. תחילה יש להגדיר את המערכת ההנדסית הרצויה ולהמירה לייצוג בגרף, לאחר מכן לאתר פתרון הנדסי ולהמירו חזרה לגרף המשותף ואיזומורפי גם למערכת ההנדסית המתוכננת. בסוף יש לבנות מתוך הייצוג הגרפי מערכת מכנית שוות-ערך ולבדוק אותה.

### שלב 1. הגדרת הבעיה במושגים של התחום ההנדסי המקורי



איור 2.2 הגדרת מערכת רצויה ברמה ההנדסית בתחום ההנדסי המקורי

שלב ידוע בכל בעיית תכן הוא בעצם הגדרת הבעיה ההנדסית. הגדרת הבעיה היא הקובעת במידה רבה את הפתרון ולכן הגדרה לא מדויקת יכולה להוביל לתהליך של תכן בלתי מתאים. אי לכך, יש צורך להגדיר בעיה באופן המדויק ביותר הכולל את התכונות המיוחדות או אופייניות הדרושות. הגדרת הבעיה גם צריכה להיות פשוטה ככל האפשר מבלי לאבד ממאפייניה ומבלי להוסיף מידע מיותר שעלול לפגום ברמת הפתרון או באפשרויות החיפוש. התחום ההנדסי בו מבוצע התכן קובע אילו מונחים יתארו את הבעיה. לדוגמה, במעגל חשמלי מונחים כמו מתחים וזרמים יתארו את הבעיה ובמכניזם אלו יהיו המהירויות וכוחות. הדרך היעילה והמקובלת בתחום התכן הקונספטואלי להגדרת בעיה היא הפונקציה (Pahl and Bietz, 1996).

### ניסוח הפונקציה ברמת ההנדסה

הגדרה: (function) פונקציה – פונקציה מגדירה את התכלית המיועדת באופן ניטרלי מהתוצאה. לצורך תיאור ופתירה של בעיות תכן, שימושי להשתמש במונח פונקציה לתיאור כניסה – יציאה של מערכת שתכליתה לבצע משימה (Pahl and Wallace, 1996).

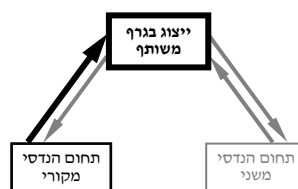
ניסוח הפונקציה צריך להתבצע כך שיהיה ניסוח מתאים לייצוגים הגרפיים בהם יעשה שימוש. הניסוח יתבצע לפי הגדרות של (Pahl and Wallace, 1996). המשתנים אשר יוגדרו בפונקציה צריכים להיות במונחים שמאפיינים את דרישת התכן העיקרית. דרישות מבניות והתנהגותיות, יוזנחו בשלב זה כי הן משניות לקבלת קונספט רצוי והן מצמצמות את שדה הפתרונות האפשריים. לאחר קבלת הקונספט, ניתן לבצע שינויים או החלפת הקונספט. משתני הפונקציה העיקריים בהנדסה (תוך התמקדות בהנדסה מכאנית) מוצגים בטבלה 2.1.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה			
מכנית ליניארית	מכנית אנגולרית	הידראוליקה זרימה	אלקטרוניקה
כוח	מומנט	לחץ	זרם
מהירות/ תזוזה	מהירות זוויתית	מהירות זרימה	מתח

### טבלה 2.1 טבלת משתנים עיקריים ברמת המערכת ההנדסית

רוב הבעיות ההנדסיות שהתיזה עסקה בהם, ניתנות להגדרה על ידי המשתנים המופיעים מעלה. מערכות הנדסיות מבצעות פונקציות המקבלות משתנים אלו ככניסה, משנות אותן והם מתקבלים עם ערכים שונים והתנהגות שונה ביציאה. כל מערכת הנדסית תוגדר כפונקציה עם משתנים המופיעים בטבלה הנ"ל.

### שלב 2. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג



### איור 2.3 הגדרת דרישת התכן הרצויה לפי מושגי הייצוג המשותף

#### ניסוח הפונקציה ברמת הייצוג

על מנת להיעזר בייצוגים הגרפיים, יש צורך לנסח את הפונקציה מחדש בשפה משותפת ובעלת חוקים ידועים. שפה משותפת זו היא מעין שפת-על של הנדסה המשותפת לכל תחומי ההנדסה השונים ומאפשרת הצגה של כל בעיה כבעיה כללית הנוגעת לתחומים רבים ומגוונים בהנדסה, ללא הגבלה לתחום אחד ויחיד.

השפה המשותפת הזאת הינה שפת הייצוג בגרפים כאשר מונחי השפה הם אלו התואמים את המשתנים הקיימים בייצוגים הגרפיים. הייצוגים הגרפיים בהם יעשה שימוש הם אותם ייצוגים שנסקרו ברקע המדעי – ייצוג גרף פוטנציאליים (PGR) וייצוג גרף זרימות (FGR). המשתנים שלהם כמובן הם פוטנציאל זרימה והם ישמשו ככלי התיאור בשלב זה של התכן.

זהו שלב התרגום משפת התחום ההנדסי (מהירויות, כוח, וכו..) לשפה המשותפת של הייצוגים הגרפיים (פוטנציאל, זרימה) לצורך יצירת הערוץ להזרמת המידע ממאגרי הידע ההנדסי. השלב הוא טכני ביסודו, ורמת הקושי בביצועו נקבעת על ידי האיכות של תיאור המערכת שנעשתה בשלב הקודם. כמו כן, קיימת חשיבות רבה לסוג הייצוג המתאים.

הבעיה ההנדסית שהוגדרה בשלב 1, נתורגם לבעיה ברמת המערכת על ידי טבלה 2.2 המתארת את הקשר בין משתנים ברמה ההנדסית לבין משתנים ברמת הייצוג, ומבוססת על טבלה שהציגו Ulrich and Seering, (1989) לתיאור תהליך תכן. יש לשים לב, שברמת הייצוג יש בדרך כלל שני משתנים בלבד, מה שמאפשר כיסוי רחב יותר של תחומים והרחבת הכלליות של התיאור.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
טרמינולוגיה ברמת הייצוג	מכנית ליניארית	מכנית אנגולרית	הידראוליקה זרימה	אלקטרוניקה
משתנה זרימה $F$	כוח	מומנט	לחץ	זרם
משתנה פוטנציאל $\pi$	מהירות/תזוזה	מהירות זוויתית	מהירות זרימה	מתח

#### טבלה 2.2 טבלת הגדרת משתנים ברמת המערכת – ייצוג משותף

כפי שהוסבר, הטבלה מאפשרת "קפיצה" לרמה כללית יותר. לכן כפי שניתן לראות בדוגמה באיור 2.4 פונקציה שהוגדרה כך:



**כניסה:** מהירות  $V_{in}$  משתנה

**יציאה:** מהירות  $V_{out}$  מוגבלת על ידי ערך סף

#### איור 2.4 פונקציה שהוגדרה ברמה ההנדסית

נתורגם על ידי טבלה 2.2 לתאר את הבעיה במונחי המערכת כפי שמוצג באיור הבא:



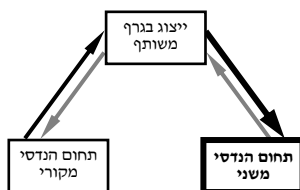
**כניסה:** פוטנציאל  $\pi_{in}$  משתנה

**יציאה:** פוטנציאל  $\pi_{out}$  מוגבל על ידי ערך סף

#### איור 2.5 פונקציה שעברה טרנספורמציה והוגדרה ברמת הייצוג



### שלב 3. חיפוש פתרון אפשרי ברמה ההנדסית



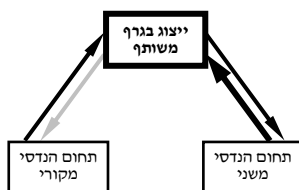
#### איור 2.6 הגדרת בעיה במונחים של התחום ההנדסי המשני וחיפוש פתרון

הבעיה הוגדרה ברמת הייצוג ועכשיו היא מהווה שאילתה שאותה ניתן להציג בכל תחום הנדסה שעבורו קיים ייצוג זהה. באמצעות טבלה 2.2 ניתן לתרגם את פונקצית התכן הרצויה לפונקציה הנדסית ספציפית לכל תחום. המהנדס יבצע חיפוש על ידי השוואת הפונקציה או תיאור שלה. הבעיה שנוסחה ברמת המערכת תהפוך לבעיה של מעגלים באלקטרוניקה או בעיית הידראוליקה בזרימה וכול.

חיפוש פתרונות אפשריים יעשה בספרות הנדסית מקצועית אשר תשמש בסיס נתונים רחב לפתרונות אפשריים. מכיוון שהבעיה הוגדרה כבעיית זרימה או פוטנציאל, והספרות המקצועית אינה משתמשת במונחים אלו להגדרת מערכות, ניתן גם לתרגם את הפונקציות של מערכות הנדסיות למונחים ברמת הייצוג על מנת לבדוק אם הן עונות על דרישות התכן. עם הפעלת השיטה, ניתן להעביר פתרונות ופונקציות מתחומים שונים לרמת המערכת ולשמרם לעיון בעתיד ועל ידי כך ליצור בסיס נתונים מערכתי. קיימים ספרים רבים (Chironis, 2001; Artobolevsky, 1986), חלקם אף הוזכרו בסקר ספרות, אשר כוללים אטלסים של מערכות הנדסיות המחולקות לפי תחומים ופונקציות על מנת לשמש כעזר בתכן.

אם נמצאים כמה מערכות בעלות אותה פונקציה, מהנדס צריך להפעיל שיקולים הנדסיים על מנת להחליט איזה פתרון יוכל להתאים לבעיה המקורית. שיקולים אלו יכולים לכלול תכונות התנהגותיות או מבניות כגון מספר האלמנטים וסידורם הפיזיקאלי.

### שלב 4. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג

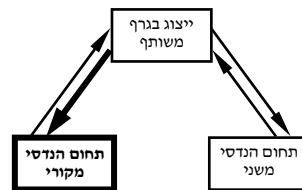


#### איור 2.7 ייצוג פתרון מהתחום ההנדסי כגרף המשותף לתחום ההנדסי המקורי

פתרון שנמצא בשלב הקודם הוא פתרון שעונה על דרישת פונקצית התכן שהוצגה בתחילת התהליך ונבחר על ידי המהנדס משיקולים תכנוניים ספציפיים לדרישות התכן. מכיוון שחיפוש ברמת המערכת מניב תוצאות מתחומי הנדסה רבים, רוב הסיכויים הם שהפתרון הנמצא אומנם עומד בדרישות התכן כאשר אלו מוגדרים על ידי משתני המערכת, אך מכיוון שמשתני המערכת אינם אלה ייצוג של המשתנים הפיזיקאליים, אין באפשרות המהנדס להשתמש בפתרון כפי שהוא מופיע.

כאן, נדרש שוב להמיר את הפתרון מהתחום ההנדסי המשני לייצוג הגרפי המתאים ומשותף לתחום ההנדסי המקורי. הייצוג הוא מאותו סוג ייצוג (PGR,FGR), שהגדיר את הבעיה ההנדסית ברמת הייצוג. הגרף שנבנה מהפתרון שהתקבל מהתחום ההנדסי המשני הנבחר, הינו גרף איזומורפי למערכת ההנדסית. לכל מערכת הנדסית קיים ייצוג מתמטי איזומורפי, ייצוג המתאר את הקשרים בין המשתנים המגדירים את המערכת. מורכבות הייצוג תלויה ברמת האיזומורפיות בין המערכת ההנדסית לגרף שמייצגה. במילים אחרות יוצרים ייצוג גרפי על פי חוקים ידועים היטב אשר יוגדרו בהמשך. הגרף המתקבל הוא ייצוג מדויק של הפתרון ההנדסי המתאר את מבנה והתנהגות הפתרון.

## שלב 5. בניית התכן בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף



### איור 2.8 ייצוג פתרון בתחום ההנדסי המקורי הנבנה מהגרף המשותף

בשלב זה, הגרף המתאים לפתרון הרצוי עובר טרנספורמציה למערכת איזומורפית הנמצאת ברמת הנדסה, בתחום המקורי בו הוצגה הבעיה המקורית בשלב 1. המרה זאת מעבירה, בגלל אופן הייצוג בגרף, את התכונות המבניות וההתנהגותיות (structure and behavior) של המערכת ההנדסית שממנה נלקח הפתרון.

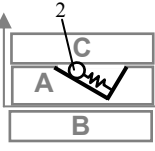
הטרנספורמציה מבוצעת על ידי ניסוח מחדש של קשתות וצמתי הגרף בתור רכיבים השייכים לתחום ההנדסי המקורי. העברת ידע זאת היא לרובה מבנית (structure) ומתמקדת בהעברה שיטתית אשר אינה דורשת שיקולי הנדסיים רבים או הבנה עמוקה של המערכת. בגלל אופי הייצוג של גרפים שממדלים הן את המבנה והן את הטופולוגיה, ההתנהגות (Behavior) מועברת באופן עקיף.

ההעברה שניתן גם לנסח בתור "בניית המערכת", מתבצעת בצורה שיטתית ובשלבים כאשר הטרמינולוגיה מוגדרת מראש עבור התחום ההנדסי וכמובן הגרף. שיטה נוחה לבניית המערכת כוללת טבלה כפי שמוצגת בטבלה 2.3 המתארת את האלמנט הנמצא בגרף והרכיב האקוויוולנטי שלו ברמה ההנדסית. שיקולי מיקום וקונפיגורציה הם לרוב אקראיים בתהליך הבנייה אך טופולוגית הגרף מבטיחה את הקשרים המבניים בין הרכיבים ולכן אחרי כמה בחירות אקראיות של קונפיגורציה, שאר הקונפיגורציה נקבעות שרירותית על ידי הגרף.

טרמינולוגיה של ייצוג בגרף משותף	טרמינולוגיה של התחום ההנדסי המקורי
קשת	סוג רכיב אקוויוולנטי
צומת	קונפיגורציה/ מיקום

### טבלה 2.3 טרנספורמציה של רכיב מרמת הייצוג לרכיב ברמת ההנדסה

את שלבי הבנייה גם ניתן להציג בפורמט של טבלה המקלה על בניית המערכת ומאפשרת צורת עבודה שיטתית תוך השוואה לייצוג הגרפי. פורמט זה יהווה את הפורמט העיקרי להצגת שלבי הבנייה במהלך עבודה זו. דוגמה לשלב בנייה מסוג זה, כאשר הוסף עוד אלמנט למערכת מוצג בטבלה 2.4.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
רכיב 2 – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן מהירויות: $V_C \geq V_A$		קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים: $\pi_C \geq \pi_A$	

**טבלה 2.4** שלב דטרמיניסטי לדוגמה בבניית מערכת ההנדסית מהגרף

במקרים מסוימים יש צורך בהפעלת שיקולים הנדסיים הכוללים הבנה מבנית של הייצוג אך הבנה זאת היא נקודתית לאלמנט בגרף/רכיב הנדסי, ואינה דורשת ראייה כוללת של המערכת. בשלב זה, יש לציין שקיים לפעמים קושי להעביר ידע מחלק מהייצוגים, לרמה ההנדסית ולהפך בגלל הבדלי מימדים ומונחים. חלק מההמרות האלו גם תרמו לבניית המערכת ולקבלת תכונות מיוחדות. מצבים אלו ידונו בהמשך עבודה זאת.

### שלב 6. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת

שלב בניית המערכת מהגרף לרמה ההנדסית הינו שלב מבני ברובו שאינו כולל תהליך הפעלת שיקולים הנדסיים רבים. בשלב האחרון, אחרי תהליך התכן שלא התייחס כלל להתנהגות המערכת הכוללת, הפעלת המערכת מתבקשת על מנת לוודא התנהגות תקינה של המערכת המתוכנת. באמצעות תוכנות מתאימות ו/או ראייה מכנית, מהנדס יכול לוודא התנהגות זאת ולוודא עמידה בדרישות התכן.

### תכן קונספטואלי באמצעות גרף משותף – סיכום

שיטת התכן הקונספטואלי באמצעות גרף משותף נעזרת בייצוג גרפי של בעיה הנדסית אשר מאפשר לעבוד עם תחומים הנדסיים מחוץ לתחום ההנדסי המקורי, במידה וקיים ייצוג משותף לשניים. השיטה מנצלת ידע הקיים בתחום הנדסי משני ואינו קיים או אינו ברור בתחום ההנדסי המקורי. הייצוג המשותף מאפשר העברת ידע חזרה לתחום המקורי ובאמצעות תהליך בנייה שיטתי. כתוצאה, ניתן לבנות תכן קונספטואלי העונה על דרישות התכן בתחום ההנדסי המקורי. בהמשך תפורט ותודגם השיטה – הן מבחינת הייצוג והן מבחינת הבנייה לפי התחומים ההנדסיים.

## 2.3 תכן קונספטואלי באמצעות גרף משותף – הפעלת השיטה לתכן שדכנים

בחלק זה נעשה שימוש בשיטת התכן הקונספטואלי שתוארה בחלק הקודם על מנת לתכנן מנגנונים להגבלת תנועה. הקונספטים שהתקבלו מהווים בסיס למנגנוני שדכנים. מנגנוני שדכנים הינם מנגנונים פשוטים יחסית לתיאור ובנייה אך הבנתם פותחת אפשרות לחקור לעומק את השימוש בגישה שפותחה בתיזה זו הן לתיכון קונספטים והן לקבלת תחום קונספטים בהמשך. השיטה עוקבת אחר השלבים מתחילת התהליך, בו מוגדרת הבעיה דרך ייצוגה וחיפוש הפיתרון בתחום הנדסי אחר, ועד בנייה של תכן קונספטואלי בתחום המכניקה. כנאמר, הבנת התהליך בשלב זה מהווה בסיס לשיטות התכן והרחבתן.

### 2.3.1 תהליך התכן לבניית קונספט למנגנון שדכן

שלב 1. הגדרת הבעיה במושגים של התחום ההנדסי המקורי



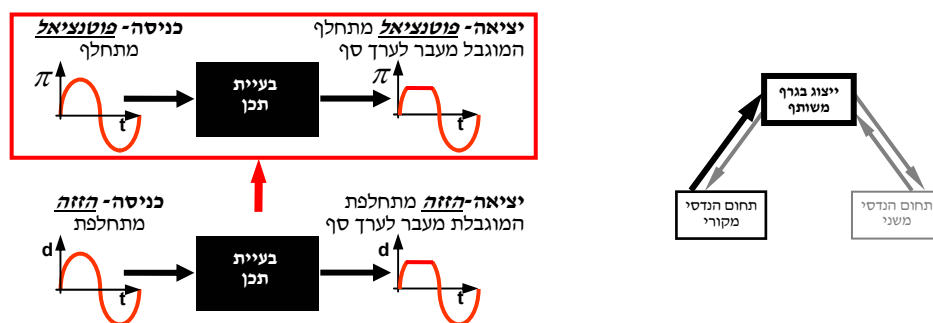
איור 2.9 הגדרת פונקציה להגבלת כוח מתחלף בתחום ההנדסי המקורי

התחום ההנדסי המקורי בו מוגדרת הבעיה שייך לתחום המכניזמים הליניאריים. המערכת מתוכננת לקבל כניסה של הזזה המשתנה בכיוון ובגודל כאשר העתקה בכיוון אחד מוגבלת לערך קבוע. ובלתי תלוי בכניסה (איור 2.9). הבעיה הוגדרה והוצגה כ-Black Box Function לפי ההגדרות של (Pahl and Wallace, 1996). המשתנים המתאימים להגדרת הבעיה ההנדסית נלקחו מטבלה 2.1. הפונקציה הוגדרה ללא שיקולים התנהגותיים או מבניים וזאת על מנת להגדיל את שדה הפתרונות האפשריים.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה			
מכנית ליניארית	מכנית אנגולרית	הידראוליקה זרימה	אלקטרוניקה
כוח	מומנט	לחץ	זרם
מהירות/ הזזה	מהירות זוויתית	מהירות זרימה	מתח

טבלה 2.1 טבלת משתנים עיקריים ברמת המערכת ההנדסית.

## שלב 2. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג המשותף



### איור 2.10 הגדרת דרישת התכנן הרצויה ברמת הייצוג המשותף

משתנה ההזזה בפונקציה ההנדסית עובר טרנספורמציה להגדרה המתאימה לייצוג, ומוגדר כמשתנה פוטנציאל.

### ניסוח הפונקציה לפי הגרף המשותף

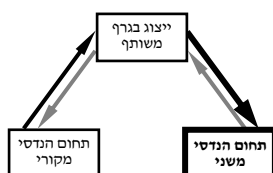
על מנת להיעזר בייצוג המשותף יש צורך לנסח מחדש, בשפה משותפת ובעלת חוקים ידועים, את הפונקציה. מכיוון שדרישת התכנן היא רק הגבלת תזוזה, מתרגמים את המשתנים ההנדסיים (הזזה) למשתנים משותפים (פוטנציאל). הבעיה ההנדסית שהוגדרה בשלב 1 תתורגם לטרמינולוגיה של הייצוג על ידי טבלה 2.2 המתארת את הקשר בין משתנים ברמה ההנדסית לבין משתנים ברמת הייצוג.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
אלקטרוניקה	הידראולי קה זרימה	מכנית אנגולרית	<b>מכנית ליניארית</b>	טרמינולוגיה ברמת הייצוג
זרם	לחץ	מומנט	<b>כוח</b>	משתנה זרימה $F$
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	<b>מהירות/הזזה</b>	משתנה פוטנציאל $\pi$

### טבלה 2.2 טבלת הגדרת משתנים ברמת הייצוג ורמת ההנדסה

משתנה ההזזה, שעליו חלה דרישת התכנן, מתורגם למשתנה פוטנציאל.

## שלב 3. חיפוש פתרון אפשרי ברמה ההנדסית



### איור 2.11 ניסוח הבעיה במונחים של תחום הנדסי משני וחיפוש פתרון אפשרי

תחום הנדסי משני זה יכול להיות כל תחום אשר חולק ייצוג משותף עם התחום המקורי.

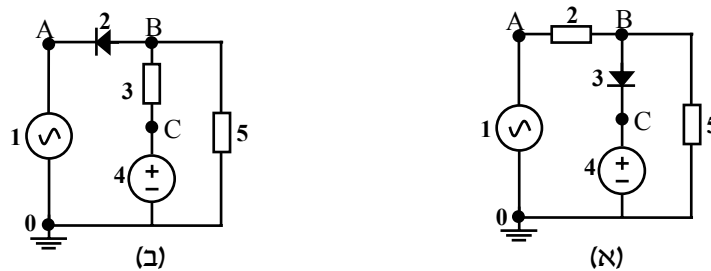
הבעיה שהוגדרה ברמת המערכת מהווה שאילתה שאותה ניתן להציג בכל תחום הנדסה שעבורו קיים ייצוג זהה. באמצעות טבלה 2.2 ניתן עכשיו לתרגם את פונקציית התכנן הרצויה לפונקציה הנדסית ספציפית לכל תחום.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
אלקטרוניקה	הידראוליקה זרימה	מכנית אנגולרית	מכנית ליניארית	טרמינולוגיה ברמת ייצוג
זרם	לחץ	מומנט	כוח	משתנה זרימה $F$
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	מהירות/הזזה	משתנה פוטנציאל $\pi$

## טבלה 2.2 טבלת הגדרת משתנים לפי הייצוג ורמת ההנדסה

משתנה הפוטנציאל מתורגם למשתנים הנדסיים המתאימים לתחומים הנדסיים שונים.

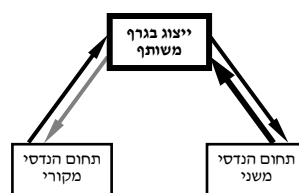
חיפוש בתחומי ההנדסה השונים מניב שני פתרונות מתחום הנדסת האלקטרוניקה. הפתרונות המתאימים הינם מעגלי קטימת מתח, המוכרים כמעגלי הגנה מפני עומסי מתח ( voltage clipping circuits) ומוצגים באיור 2.12.



### איור 2.12 מעגלי קטימה שהתקבלו מאלקטרוניקה

מעגל קטימה 1 (א), ומעגל קטימה 2 (ב). התנהגות המעגלים: מעגלים אלו מקבלים בכניסה מתח ממקורות מתח מתחלפים. כאשר הדיודות מתקצרות או מתנתקות בהתאם להפרש בין המקורות המתחלפים למקורות המתח הקבוע. פעולת המעגל אינה מאפשרת מעבר של מתח חילופין גדול ממקור המתח הקבוע ביציאה שלו.

## שלב 4. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית חזרה לרמת הייצוג המשותף

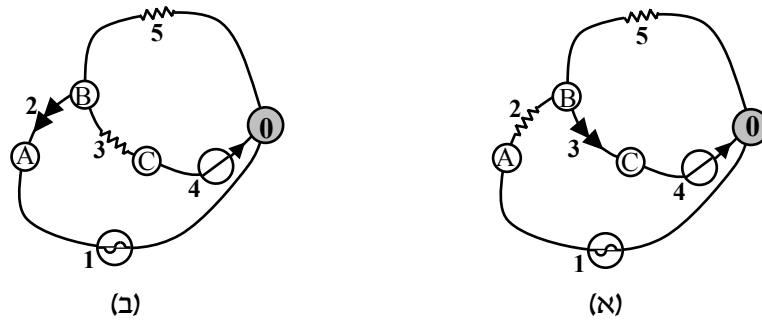


### איור 2.13 בנייה של ייצוג איזומורפי מסוג PGR למעגלים האלקטרוניים שנמצאו

מתוך המעגלים האלקטרוניים יבנו גרפים איזומורפיים. מכיוון שהמתחים במעגל מתורגמים לפוטנציאלים, הייצוג הגרפי המתאים הינו מסוג PGR כאשר:

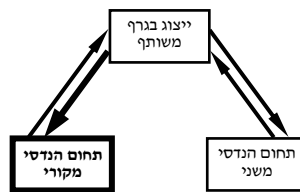
- 1 כל צומת במעגל החשמלי בו נמדד מתח הופך לצומת בגרף בעל פוטנציאל שווה ערך למתח.
- 2 כל רכיב במעגל החשמלי שעליו ניתן למדוד מתח, הופך לקשת שוות-ערך ששומרת על הפרשי פוטנציאלים של הצמתים, כפי שהרכיבים האלקטרוניים עושים זאת במעגל החשמלי.

שלבי בניית הגרף הם שלבים דטרמיניסטיים אשר מבוצעים לפי נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים. הגרפים המתקבלים באיור 2.14 הם ייצוג מדויק של הפתרון ההנדסי המתאר את המבנה וההתנהגות שלהם במונחי הייצוג ומשמר את תכונותיהם.




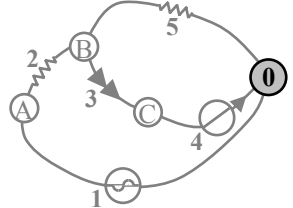

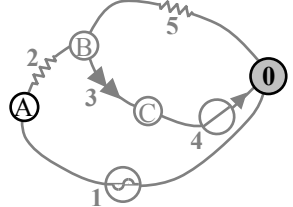
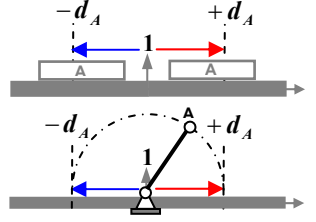
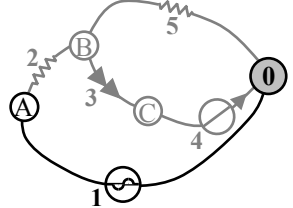
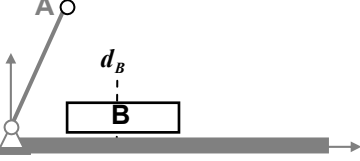
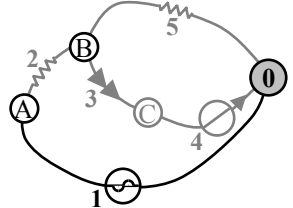
איור 2.14 הגרפים האיזומורפיים של מעגלי הקטימה. מעגל 1 (א) ומעגל 2 (ב).

**שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**

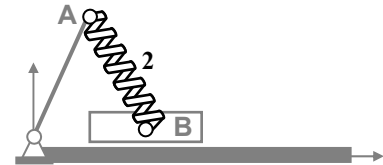
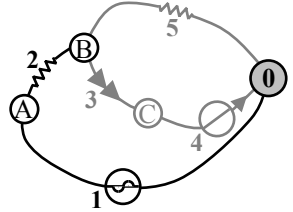
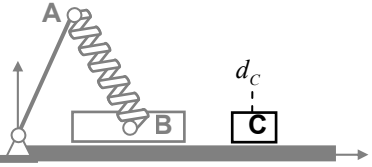
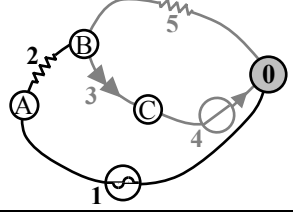
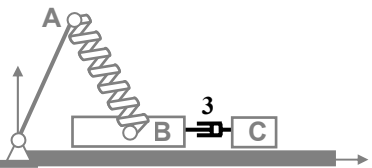
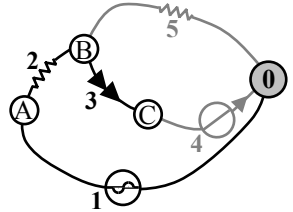
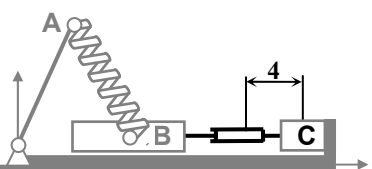
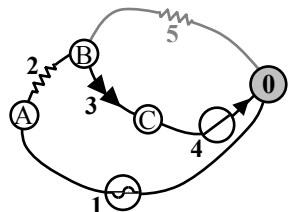


איור 2.15 ייצוג פתרון בתחום ההנדסי המקורי הנבנה מהגרף המשותף.

בשלב זה, הגרף המתאים לפתרון הרצוי עובר טרנספורמציה למערכת איזומורפית הנמצאת ברמת הנדסה ובתחום המקורי בו הוצגה הבעיה המקורית בשלב 1. המרה זאת מעבירה, בגלל אופן הייצוג הגרף, את התכונות המבניות וההתנהגותיות (structure and behavior) של המעגלים מאלקטרוניקה למכניקה. ההמרה מתבצעת על ידי ניסוח מחדש של קשתות וצמתי הגרף בתור רכיבים השייכים לתחום ההנדסי בו בונים את המערכת החדשה. בנייה זו היא בעצם התהליך ההפוך מהתהליך שנעשה בשלב הקודם (שלב 4), מכיוון שבאופן הפוך לגרף שנבנה מהמעגל אלקטרוניקה, תהליך הבנייה מתבצע מהגרף להנדסה כאשר הרכיבים המייצגים את חלקי הגרף מתאימים למכניקה. שלבי בניית המכניזם הם שלבים דטרמיניסטיים אשר מבוצעים לפי נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים. המערכת הראשונה שתיבנה תהיה על בסיס מעגל 1.

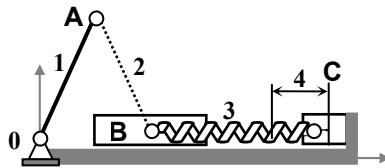
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>אדמה 0 – בעלת מיקום:  <math>d = 0</math></p>		<p>צומת 0 בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = 0</math></p>	
<p>רכיב A – עליו ניתן למדוד תזוזה:  <math>d = d_A</math></p>		<p>צומת A בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_A</math></p>	
<p>הפעלת הזזה ליניארית דו-כיוונית:  <math>d = \pm d_A</math>  הפעלת שיקול הנדסי:  הנעה זאת יכולה להתקבל על ידי היטל של חוליה 1 תחת הנעה</p>		<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים (1) המפעילה פוטנציאל מתחלף על צומת A:  <math>\pi = \pm \pi_A</math></p>	
<p>רכיב B – עליו ניתן למדוד תזוזה:  <math>d = d_B</math></p>		<p>צומת B בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_B</math></p>	



תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב 2 – קפיץ ליניארי עליו ניתן למדוד הפרש תזוזות:  <math>d_{B/A} = d_B - d_A</math></p>		<p>קשת התנגדות (2) השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים B ל-A:  <math>\Delta_{BA} = \pi_B - \pi_A</math></p>	
<p>רכיב – עליו ניתן למדוד תזוזה:  <math>d = d_C</math></p>		<p>צומת בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_C</math></p>	
<p>רכיב – תומך (strut) חד-כיווני ליניארי הנותן יחס הזזות:  <math>d_C \geq d_B</math></p>		<p>קשת חד-כיוונית (3) השומרת על יחס פוטנציאלים:  <math>\pi_C \geq \pi_B</math></p>	
<p>הזזת רכיב C במרחק קבוע יחסית לאדמה וחיבורו חזרה לאדמה.  <math>d_{C/0} = d_C - d_0 = const</math></p>		<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים (4) המפעילה פוטנציאל חיובי קבוע על צומת C יחסית לאדמה:  <math>\Delta_C = \pi_C - \pi_0 = const</math></p>	

אין צורך להוסיף את הקשת החמישית בבניית המערכת ההנדסית (אם כי אפשר לחבר קפיץ בין B ל-0) וזה מכיוון שקשת זאת רק מהווה חיבור למדידת הפרש הפוטנציאלים בין B ל-0. ניתן לראות זאת גם במעגל הקטימה עליו מבוססת המערכת בו משמשת קשת 5 למדידת המתח בלבד ואינה רכיב המשפיעה על פעולת המערכת.

ניתן להתרשם כי תהליך הבנייה שיטתי ומבני ברובו, חוץ מהפעלת שיקול הנדסי בודד. אם הבנייה הייתה מתבצעת בסדר אקראי אחר, יכול להיות שהייתה מתקבלת מערכת שונה במקצת מבנית אך זהה הן מבחינת ההתנהגות והן מבחינת הפונקציה. הייצוג השני, המבוסס על מעגל 2, עבר תהליך בנייה זהה והתקבל המכניזם המופיע באיור 2.16.

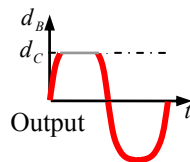


איור 2.16 המכניזם המתקבל מבנייה לפי ייצוג מעגל 2

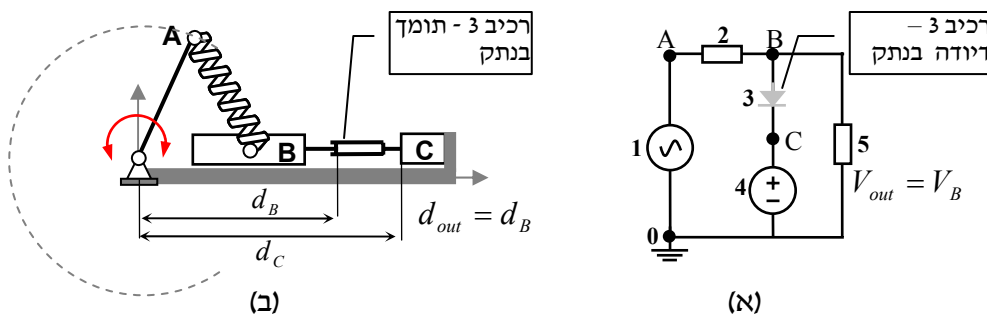
**שלב 6. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת**

בשלב זה, אחרי תהליך התכן שאחד ממאפייניו העיקריים הוא שאין התייחסות להתנהגות המערכת ההנדסית בזמן הטרינספורמציה, תופעל המערכת על מנת לוודא התנהגות תקינה. התנהגות המעגל החשמלי תוצג במקביל להתנהגות המערכת ההנדסית. יציאת כפי שניתן לראות מהייצוג, תהיה התזוזה של B יחסית לנקודת ה-0.

$$d_B < d_C \quad 1.$$

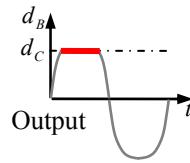


איור 2.17 חלק הפונקציה התואם את המצב:  $d_B < d_C$



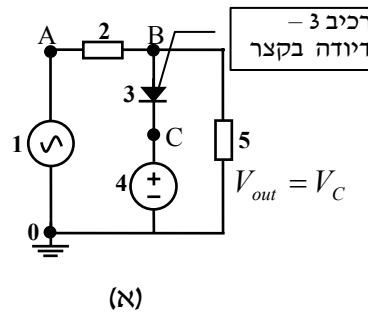
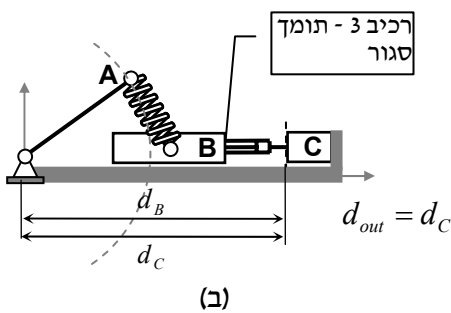
איור 2.18 התנהגות מעגל 1 (א) והמכניזם שנבנה ממנו (ב) במצב הנתון  $d_B < d_C$

כפי שניתן לראות באיור 2.18, כל עוד התזוזה של רכיב B קטנה מהמרחק הקבוע שנקבע ב-C, התומך (strut) נמצא בנתק וקיימת הזזה המשתנה בהתאם לתזוזה של B. כמובן, אותה התנהגות מאפיינת גם את המעגל החשמלי. כל עוד מתח החילופין הנמדד בצומת B קטן מהמתח הקבוע החיובי שנקבע על ידי המקור הקבוע לצומת C, הדיודה נמצאת בנתק והמתח הנמדד הינו זהה למתח ב-B בגודל ובכיוון.



$$d_B \geq d_C \cdot 2$$

איור 2.19 חלק הפונקציה התואם את המצב:  $d_B \geq d_C$

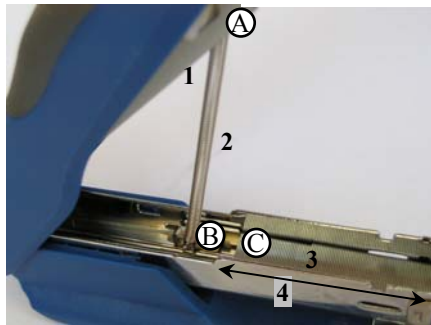
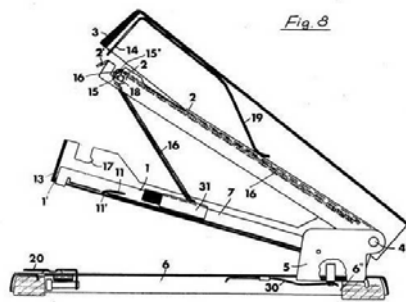


איור 2.20 התנהגות מעגל 1 (א) והמכניזם שנבנה ממנו (ב) במצב הנתון  $d_B \geq d_C$

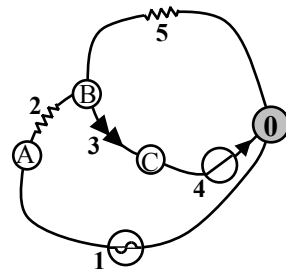
במצב המתואר באיור 2.20, התזוזה של רכיב B שווה למרחק הקבוע שנקבע ב-C, התומך נמצא במצב סגור ולכן אין באפשרות B להמשיך תנועה מעבר לערך שנקבע על ידי C. החוליה המניעה A לעומת זאת ממשיכה לנוע באופן בלתי תלוי. שוב, אותה התנהגות מאפיינת גם את המעגל החשמלי. מתח החילופין הנמדד בצומת B גדול מהמתח הקבוע החיובי שנקבע על ידי המקור הקבוע לצומת C, הדיודה נמצאת בקצר וכתוצאה, המתח הנמדד הינו זהה למתח ב-C בגודל.

### 2.3.2 מנגנוני שדכן הקיימים

שני הפתרונות שהתקבלו זהים למנגנונים הקיימים בשדכנים ידניים. המכניזם הראשון (איור 2.21) הוא בעצם מנגנון שדכן ידוע עליו נרשם פטנט (Mitsuhashi, 1976) כאשר סיכות השדכן מהוות את התומך (מסוגלות להחזיק לחיצה של המנגנון) ומספר הסיכות בעצם מהווה את ערך הסף בו נפסקת תזוזת המנגנון. המכניזם השני שנבנה גם נפוץ כמנגנון לשדכנים.



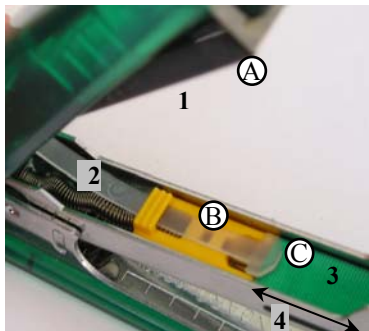
(ב)



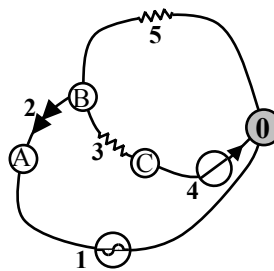
(א)

**איור 2.21 מנגנון שדכן 1 כפי שקיים בשדכן ידני**

למעלה: איור רישום הפטנט של מכניזם שדכן 1 (Mitsuhashi, 1976). (א) הייצוג הגרפי שממנו נבנה שדכן 1 ותקריב של מנגנון השדכן עצמו (ב) עם הסימונים המתאימים של הייצוג הגרפי.



(ב)



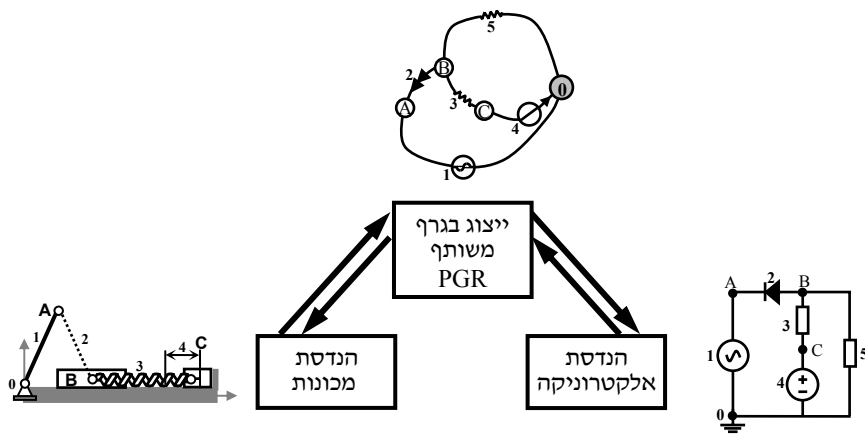
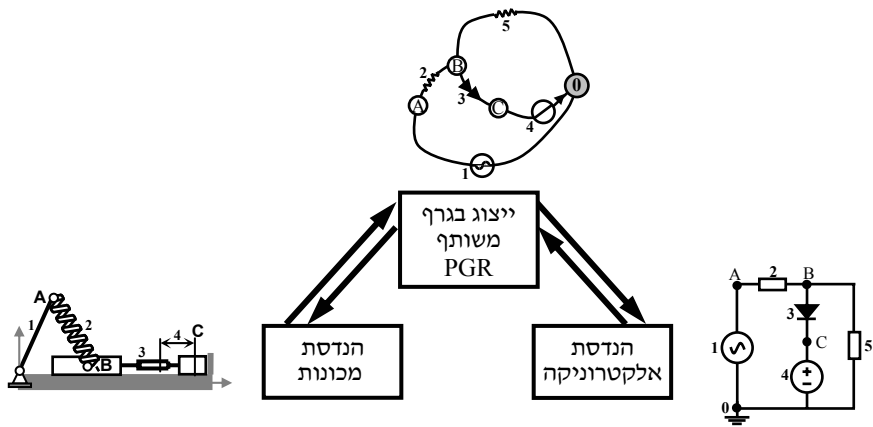
(א)

**איור 2.22 מנגנון שדכן 2 כפי שקיים בשדכן ידני**

(א) הייצוג הגרפי שממנו נבנה שדכן 1 ותקריב של מנגנון השדכן עצמו (ב) עם הסימונים המתאימים של הייצוג הגרפי.

**2.3.3 סיכום תכן שדכנים באמצעות הייצוג המשותף**

הייצוג המשותף מסוג PGR מאפשר להעביר ידע מתחום האלקטרוניקה לתחום המכניקה ליצירת מנגנונים עם אפליקציות ידועות לתעשייה. התהליך היה ברובו שיטתי, כאשר המיקוד היה בהעברת ידע מבני וטופולוגי באמצעות הייצוג. ההתנהגות עברה בצורה מפורשת, ווידוי נעשה על ידי ביצוע אנליזה של ההתנהגות רק בסופו של תהליך התכן. את תכן מנגנוני השדכנים לפי השיטה, ניתן לסכם באיור 2.23.



**איור 2.23** שיטת התכן והקונספטים שהתקבלו על ידי העברת הידע

## 2.4 תכן קונספטואלי של מכניזמים חד-כיווניים ליניאריים

בחלק הקודם, הוסבר תהליך התכן באמצעות תכן מנגנוני שדכנים. בחלק זה יעשה שימוש בשיטה לתכן קונספטואלי של מנגנונים חד-כיווניים. מנגנונים אלו מורכבים יותר הן מבחינת רכיבים והן מבחינה מבנית ומהווים חלק מעניין במחקר. שיטת התכן תופעל שוב, תוך העמקה של השיטה והמכניזמים שיפותחו יהוו בסיס לתכן תמסורות גלגלי שיניים אשר יפותחו בהמשך.

### 2.4.1 תכן קונספטואלי של מכניזם ליישור מהירות ליניארי

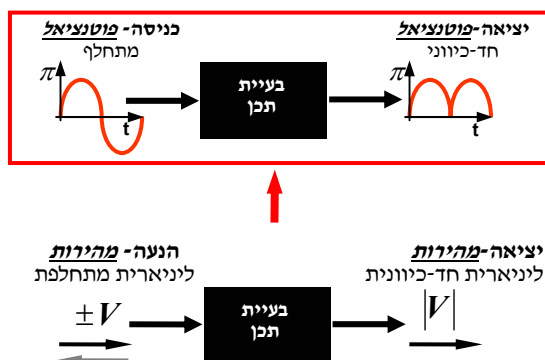
שלב 1. הגדרת הבעיה במושגים של התחום ההנדסי המקורי



איור 2.24 הגדרת פונקציה של מערכת מכנית חד-כיוונית

התחום ההנדסי המקורי בו מוגדרת הבעיה שייך למכניזמים ליניאריים. הבעיה הוגדרה כבעיית יישור מהירות והוצגה באיור 2.24 כ-Black Box Function (Pahl and Wallace, 1996). הפונקציה הוגדרה ללא שיקולים התנהגותיים או מבניים וזאת על מנת להגדיל את שדה הפתרונות האפשריים.

שלב 2. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג המשותף



איור 2.25 טרנספורמציה מהגדרת פונקציה הנדסית להגדרת פונקציה בייצוג משותף

משותף המהירות בפונקציה ההנדסית מנוסחים מחדש כמשתני פוטנציאל.

### ניסוח הפונקציה לפי הגרף המשותף

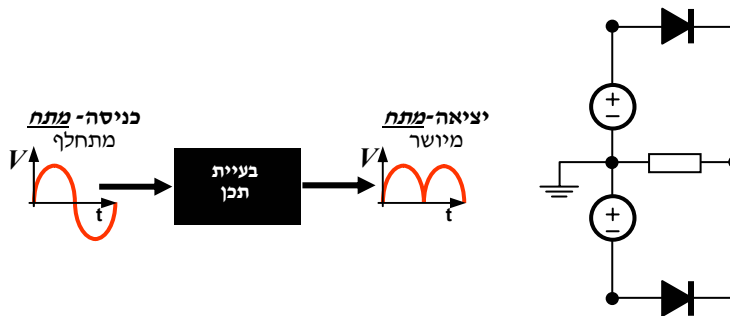
הבעיה ההנדסית שהוגדרה בשלב 1 תתורגם לטרמינולוגיה של הייצוג על ידי טבלה 2.2 המתארת את הקשר בין משתנים ברמה ההנדסית לבין משתנים ברמת הייצוג. במקרה זה, משתנה מהירות יוגדר כמובן כמשתנה פוטנציאל.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
אלקטרוניקה	הידראוליקה זרימה	מכנית אנגולרית	מכנית ליניארית	טרמינולוגיה ברמת הייצוג
זרם	לחץ	מומנט	כוח	משתנה זרימה $F$
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	מהירות/הזזה	משתנה פוטנציאל $\pi$

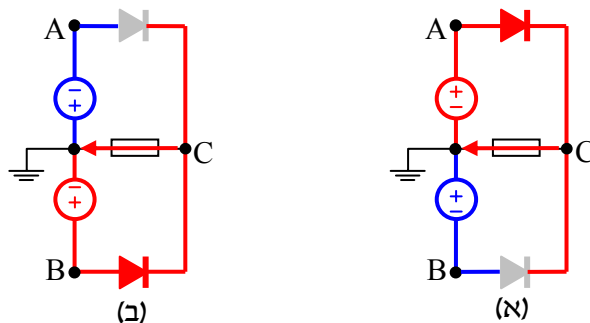
### טבלה 2.2 טבלת הגדרת משתנים ברמת הייצוג המשותף ורמת ההנדסה

### שלב 3. חיפוש פתרון אפשרי ברמה ההנדסית

באמצעות טבלה 2.2, ניתן עכשיו לתרגם את פונקציית התכן הרצויה לפונקציה הנדסית ספציפית לכל תחום. חיפוש בתחומי ההנדסה השונים מניב פתרון מתאים מהנדסת אלקטרוניקה. הפתרון הינו מיישר גל שלם (Full Wave Rectifier) המוצג באיור 2.26.



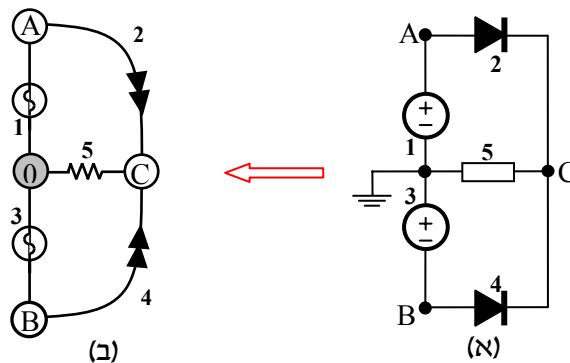
איור 2.26 Full Wave Rectifier והפונקציה המתקבלת מהפעלתו



איור 2.27 אופן פעולה של מיישר גל שלם (Full Wave Rectifier)

(א) על A מופעל מתח חיובי ועל B מופעל מתח שלילי. הדיודה העליונה נמצאת בקצר והתחתונה בנתק. על הנגד נמדד מתח חיובי ביחס אדמה. (ב) על A מופעל מתח שלילי ועל B מופעל מתח חיובי. הדיודה העליונה נמצאת עכשיו בנתק והתחתונה בקצר. על הנגד שוב נמדד מתח חיובי ביחס לאדמה.

**שלב 4. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית חזרה לרמת הייצוג המשותף**



**איור 2.28** מיישר גל שלם מאלקטרוניקה (א) וייצוג גרף ה-PGR האיזומורפי שלו (ב)

מתוך המעגל האלקטרוני נבנה גרף איזומורפי למערכת ההנדסית. מכיוון שהמתחים במעגל מתורגמים לפוטנציאלים, הייצוג הגרפי הינו מסוג PGR כאשר:


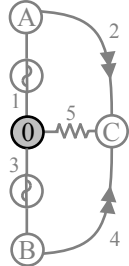

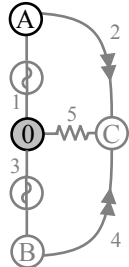

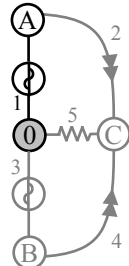
- 1 כל צומת במעגל החשמלי בו נמדד מתח, הופך לצומת בגרף בעל פוטנציאל שווה ערך למתח.
  - 2 כל רכיב במעגל החשמלי שעליו ניתן למדוד מתח, הופך לקשת שוות-ערך ששומרת על הפרשי פוטנציאליים של הצמתים, כפי שהרכיבים האלקטרוניים עושים זאת במעגל החשמלי.
- שלבי בניית הגרף הם שלבים דטרמיניסטיים אשר מבוצעים לפי נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים. הגרף המתקבל באיור 2.28 הוא ייצוג מדויק של הפתרון ההנדסי המתאר את מבנה והתנהגות הפתרון במונחי הייצוג ומשמר את תכונותיו.


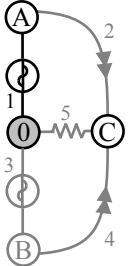
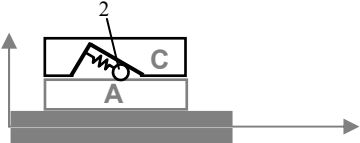
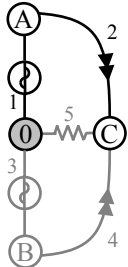
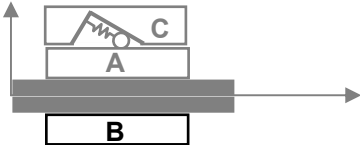
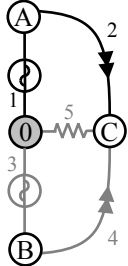
**שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**

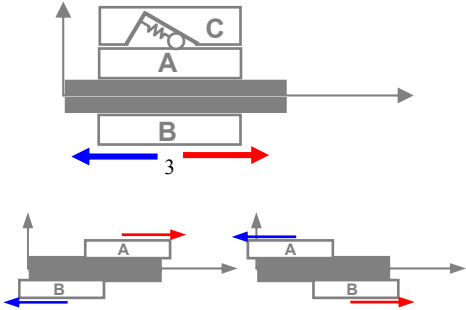
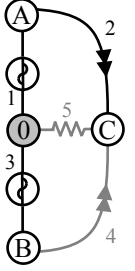
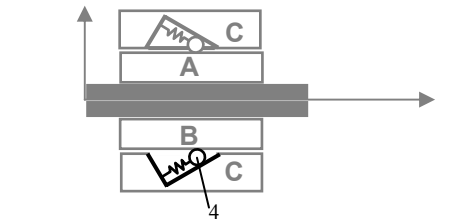
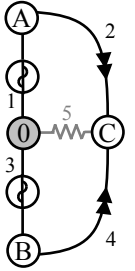
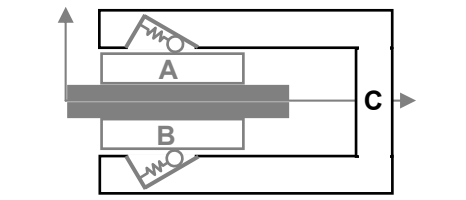
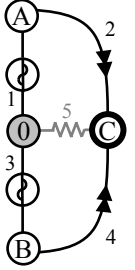
בשלב זה, הגרף המתאים לפתרון הרצוי עובר טרנספורמציה למערכת איזומורפית הנמצאת ברמת הנדסה ובתחום המקורי בו הוצגה הבעיה המקורית בשלב 1. המרה זאת מעבירה, בגלל אופן ייצוג הגרף, את התכונות המבניות וההתנהגותיות (structure and behavior) של מיישר הגל השלם מאלקטרוניקה למכניקה.

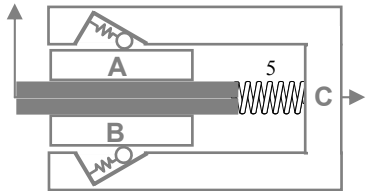
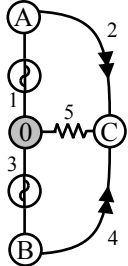
ההמרה מתבצעת לפי שלבי בנייה דטרמיניסטיים אשר מבוצעים לפי נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים. בבניה זאת, יושם דגש על בחירת רכיבים הנדסיים ליניאריים שהינם איזומורפיים לייצוג. תכן מנגנון ליניארי, חוץ מיצירת המנגנון עצמו, גם מאפשר לתכן קונספט חד-מימדי שיכול להקל בתכנון מערכות בעלות יותר מימדים או רכיבים מורכבים יותר.



תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>אדמה – בעלת מהירות:  <math>V = 0</math></p>		<p>צומת בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = 0</math></p>	
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:  <math>V = V_A</math></p>		<p>צומת בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_A</math></p>	
<p>הפעלת מהירות ליניארית דו-כיוונית:  <math>V = \pm V_A</math></p>		<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים (1) המפעילה פוטנציאל מתחלף על צומת A:  <math>\pi = \pm \pi_A</math></p>	

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:</p> $V = V_C$		<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	
<p>רכיב – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן יחס מהירויות:</p> $V_C \geq V_A$		<p>הוספת קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_C \geq \pi_A$	
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:</p> $V = V_B$		<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_B$	

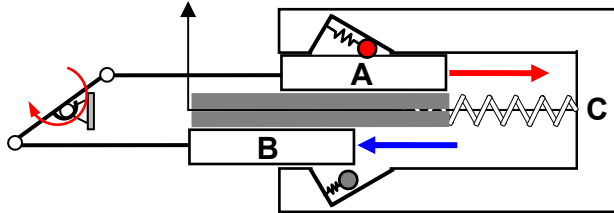
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>הפעלת מהירות ליניארית דו-כיוונית:</p> $V = \pm V_B$ <p>וקטור המהירות של B הינו בכיוון הפוך מוקטור הכיוון של A:</p> $V_B = -V_A$		<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים (3) המפעילה פוטנציאל מתחלף על צומת B:</p> $\pi = \pm \pi_B$ <p>פוטנציאל זה הינו הפוך מהפוטנציאל שמופעל על A:</p> $\pi_B = -\pi_A$	
<p>רכיב – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן יחס מהירויות:</p> $V_C \geq V_B$		<p>הוספת קשת חד-כיוונית (4) השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_C \geq \pi_B$ <p>באותו אופן שנוספה קשת חד-כיוונית בין C ל-A.</p>	
<p>שלב הפעלת שיקול הנדסי קיימים שני רכיבים בעלי מהירויות זהות:</p> $V = V_C$ <p>על מנת לוודא שיחס זה מתקיים יש לחבר ביניהם גוף קשיח שישמור על יחס זה.</p>		<p>שלב הפעלת שיקול לתיאום בין הגרף להנדסה קיימת רק צומת C אחת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב - קפיץ ליניארי עליו ניתן למדוד הפרש מהירויות:</p> $V_{C/0} = V_C - V_0$		<p>קשת התנגדות השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים C ל-0:</p> $\Delta_C = \pi_C - \pi_0$	

## שלב 6. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת

בשלב זה, אחרי תהליך התכן שלא התייחס להתנהגות (behavior) המערכת הכוללת, יופעל המכניזם על מנת לוודא התנהגות תקינה של התכן. ההפעלה תבצע באמצעות הוספת רכיב מנוף אשר יפעיל את שני הרכיבים המניעים בכניסה, A ו-B בכיוונים הפוכים. יציאת המערכת תימדד ככיוון מתיחת הקפיץ.

1.  $V_A$  מניעה בכיוון חיובי,  $V_B$  מניעה בכיוון שלילי.

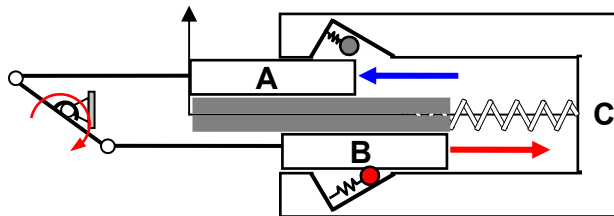


**איור 2.29** בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני

רכיב A מניע בכיוון חיובי ומצמיד את המסב החד-כיווני העליון. כתוצאה מכך, רכיב C מונע בכיוון חיובי ולכן גם הקפיץ נמתח בכיוון זה. רכיב B מניע בכיוון שלילי אך עקב החלקת המסב החד-כיווני, המסב נדחף פנימה לחרוץ ואינו משפיעה על שאר המערכת.

2.  $V_B$  מניעה בכיוון חיובי,  $V_A$  מניעה בכיוון שלילי.

כאן מתבצע שינוי כיוון במהירות הזוויתית המופעלת על ידי המניעה ועקב כך גם התנהגות המערכת משתנה:



**איור 2.30** בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני

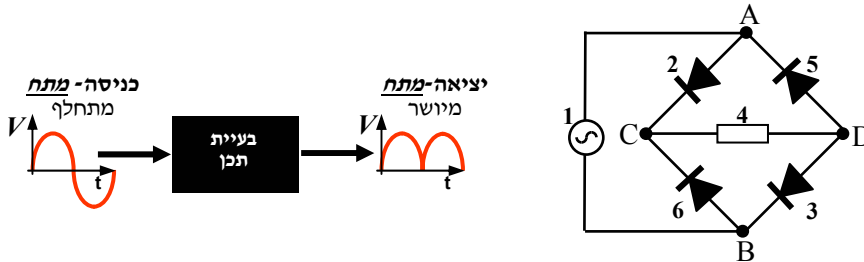
רכיב B מניע בכיוון חיובי ומצמיד את המסב החד-כיווני התחתון. כתוצאה מכך, רכיב C מונע בכיוון חיובי ולכן גם הקפיץ נמתח בכיוון זה. רכיב A מניע בכיוון שלילי אך עקב החלקת המסב החד-כיווני המסב נדחף פנימה לחרוץ ואינו משפיעה על שאר המערכת.

ניתן לראות כי המערכת המתקבלת הינה חוקית, והיא עומדת בדרישות התכן כמו כן, בהשוואה בין המערכת המכנית לבין הגרף והמעגל החשמלי ניתן לראות התאמה של ההתנהגות הן ברמה ההנדסית והן ברמת הייצוג בגרף.

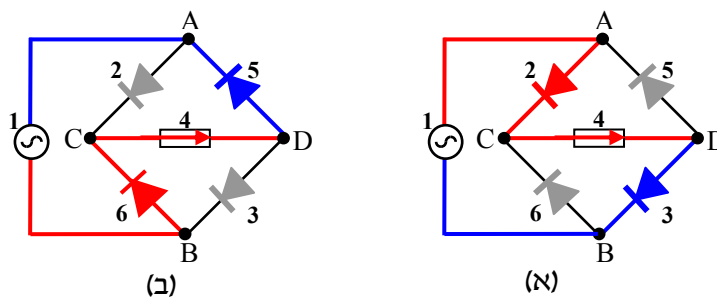
## 2.4.2 תכן קונספטואלי של מכניזם חד-כיווני ליניארי-פתרון נוסף

### שלב 3-1.

ביצוע שלבים 1 עד 3, הניב פתרון אפשרי נוסף שעומד בפונקציית התכן. פתרון זה התקבל גם מתחום הנדסת האלקטרוניקה אך המבנה והתנהגות שלו שונים. המעגל החשמלי שנמצא הינו מעגל גשר הדיודות (Diode Bridge Circuit), עוד פתרון מוכר ליישור מתח בהנדסת אלקטרוניקה.



איור 2.31 מיישר גשר דיודות והאות המתקבלת מהפעלתו

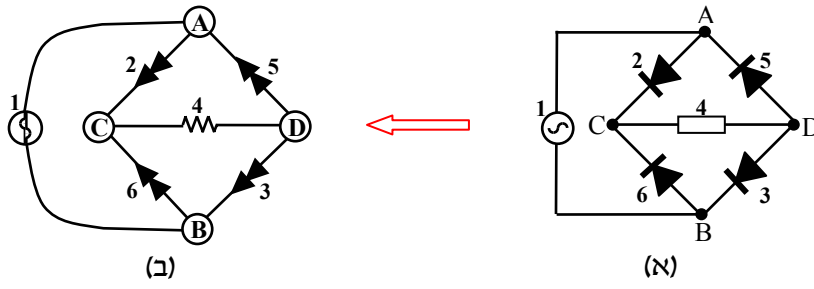


איור 2.32 אופן הפעולה של גשר דיודות

(א) מקור מתח מפעיל מתח חיובי על A ומתח שלילי על B. דיודות 3 ו-2 נמצאות בקצר ודיודות 5 ו-6 נמצאות בנתק. על הנגד נמדד מתח חיובי בצומת D ביחס לצומת C. (ב) מקור מתח מפעיל מתח שלילי על A ומתח חיובי על B. דיודות 3 ו-2 נמצאות בנתק ודיודות 5 ו-6 נמצאות בקצר. על הנגד נמדד מתח חיובי בצומת C ביחס לצומת D.

### שלב 4. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית לרמת המערכת

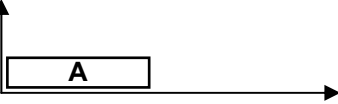
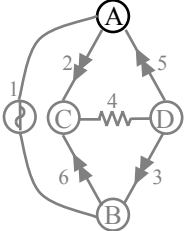
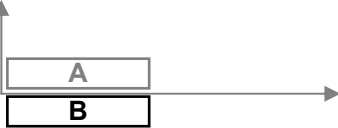
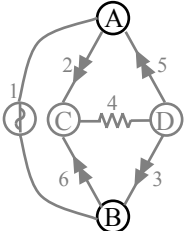
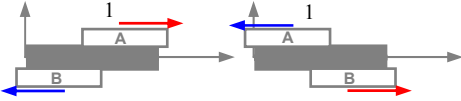
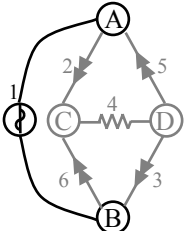
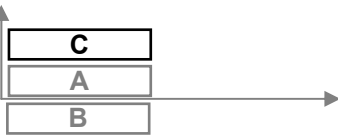
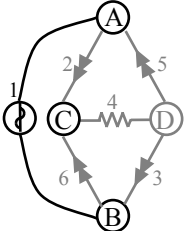
מתוך המעגל האלקטרוני יבנה גרף איזומורפי למערכת ההנדסית. מכיוון שהמתחים במעגל מתורגמים לפוטנציאלים, הייצוג הגרפי הינו מסוג גרף פוטנציאל PGR, ובאותו אופן בו הוצג מעגל מיישר הגל השלם כגרף, יוצג גם מעגל גשר הדיודות כגרף. שלבי בניית הגרף הם שלבים דטרמיניסטיים אשר מבוצעים לפי נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים.



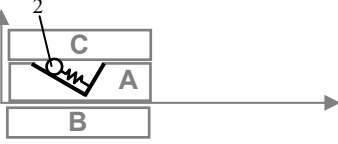
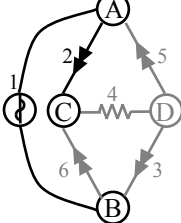
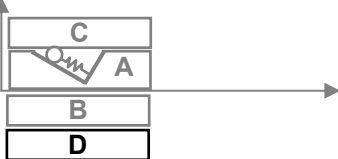
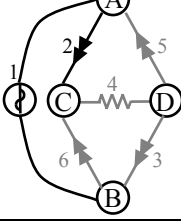
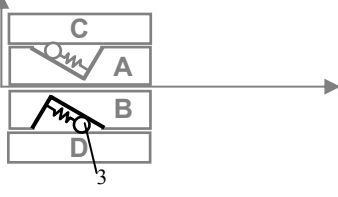
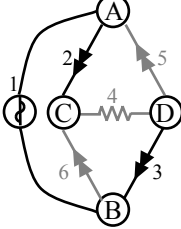
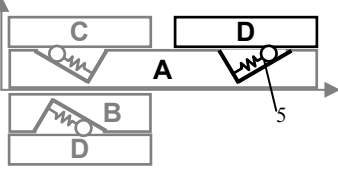
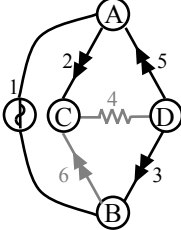
איור 2.33 מיישר גשר דיודות (א) וייצוג ה-PGR האיזומורפי שלו (ב).

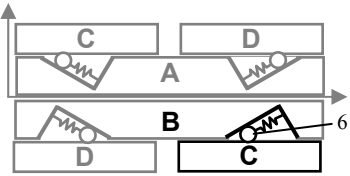
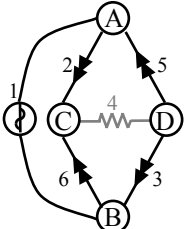
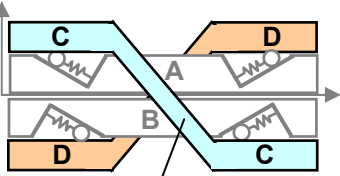
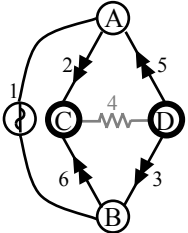
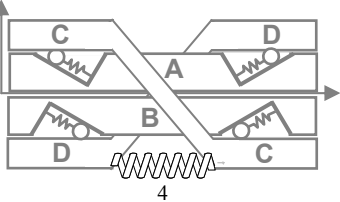
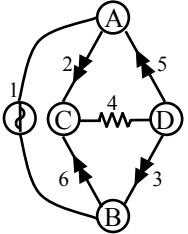
**שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף.**

בתהליך דומה לבניית מיישר הגל השלם, שלבי בניית המכניזם הם שלבים דטרמיניסטיים אשר מבוצעים לפי נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:</p> $V = V_A$		<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_A$	
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:</p> $V = V_B$		<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_B$	
<p>הפעלת מהירות חיובית מתחלפת על צומת A ביחס ל-B ולהפך:</p> $V_A > V_B$ $V_B > V_A$		<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים (1) המפעילה פוטנציאל מתחלף על צומת A ביחס ל-B ולהפך:</p> $\pi_A > \pi_B$ $\pi_B > \pi_A$	
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:</p> $V = V_C$		<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	



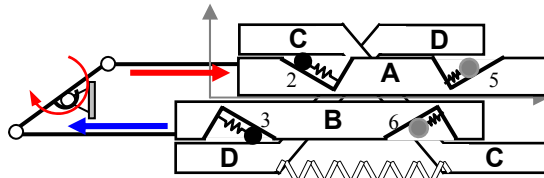
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן יחס מהירויות:  <math>V_C \geq V_A</math></p>		<p>קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים:  <math>\pi_C \geq \pi_A</math></p>	
<p>רכיב – בעל מהירות ליניארית:  <math>V = V_D</math></p>		<p>צומת בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_D</math></p>	
<p>רכיב – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן יחס מהירויות:  <math>V_B \geq V_D</math></p>		<p>קשת חד-כיוונית (3) השומרת על יחס פוטנציאלים:  <math>\pi_B \geq \pi_D</math></p>	
<p>רכיב – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן יחס מהירויות:  <math>V_A \geq V_D</math></p>		<p>קשת חד-כיוונית (5) השומרת על יחס פוטנציאלים:  <math>\pi_A \geq \pi_D</math></p>	

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב – מצמד חד-כיווני ליניארי הנותן יחס מהירויות:  <math>V_C \geq V_B</math></p>		<p>קשת חד-כיוונית (6) השומרת על יחס פוטנציאלים:  <math>\pi_C \geq \pi_B</math></p>	
<p><b>שלב הפעלת שיקול הנדסי</b>  קיימים שני זוגות רכיבים בעלי מהירויות זהות:  <math>V = V_C, V = V_D</math>  על מנת לוודא שיחס זה מתקיים יש לחבר ביניהם גוף קשיח שישמור על יחס זה.</p>	 <p>חיבור קשיח C-C</p>	<p><b>שלב הפעלת שיקול לתיאום בין הגרף להנדסה</b>  קיימת רק צומת C אחת ו-D אחת בעלי פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_C, \pi = \pi_D</math></p>	
<p>רכיב – קפיץ ליניארי עליו ניתן למדוד הפרש מהירויות:  <math>V_{C/D} = V_C - V_D</math></p>		<p>קשת התנגדות (4) השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים C ל-D:  <math>\Delta_{CD} = \pi_C - \pi_D</math></p>	

## שלב 6. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת

בשלב זה, אחרי תהליך התכן שלא התייחס להתנהגות המערכת, יופעל המנגנון על מנת לוודא התנהגות תקינה של התכן.

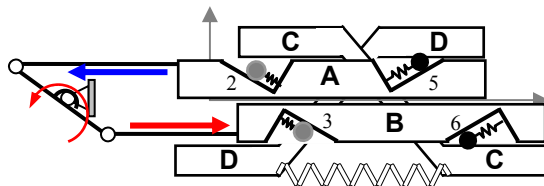
1.  $V_A$  מניעה בכיוון חיובי,  $V_B$  מניעה בכיוון חיובי.



### איור 2.34 בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני

רכיב A מניע בכיוון חיובי ומצמיד את המסב החד-כיווני (מסב 2) ל-C. כתוצאה מכך, רכיב C (הצלע האלכסונית) נע יחד עם A. בו-זמנית, רכיב B מניע בכיוון שלילי ומצמיד את המסב החד-כיווני (מסב 3) ל-D. כתוצאה מכך רכיב C (הצלע האלכסונית) D מונע יחד עם B. עקב התנועה של C ו-D, מסבים 5 ו-6 נמצאים בהחלקה והקפיץ עליו נמדד היישר, נמצא במתיחה.

2.  $V_B$  מניעה בכיוון חיובי,  $V_A$  מניעה בכיוון שלילי.

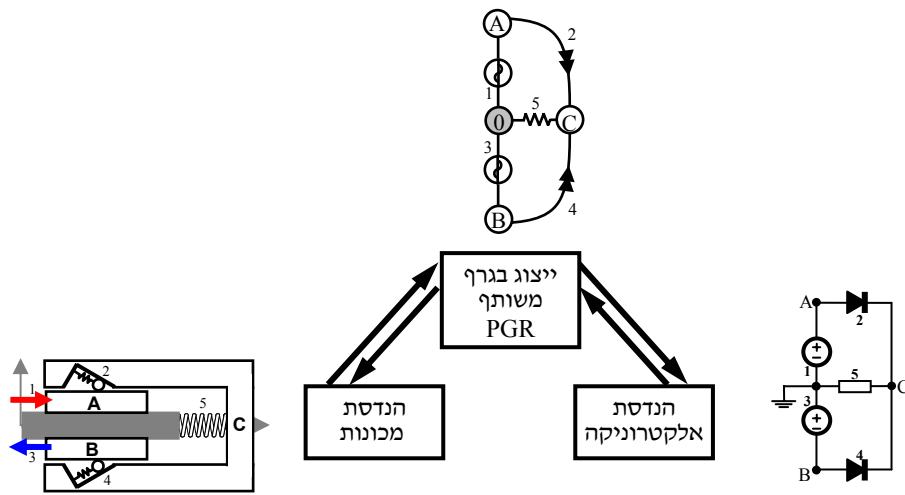


### איור 2.35 בדיקת התנהגות של המנגנון החד-כיווני

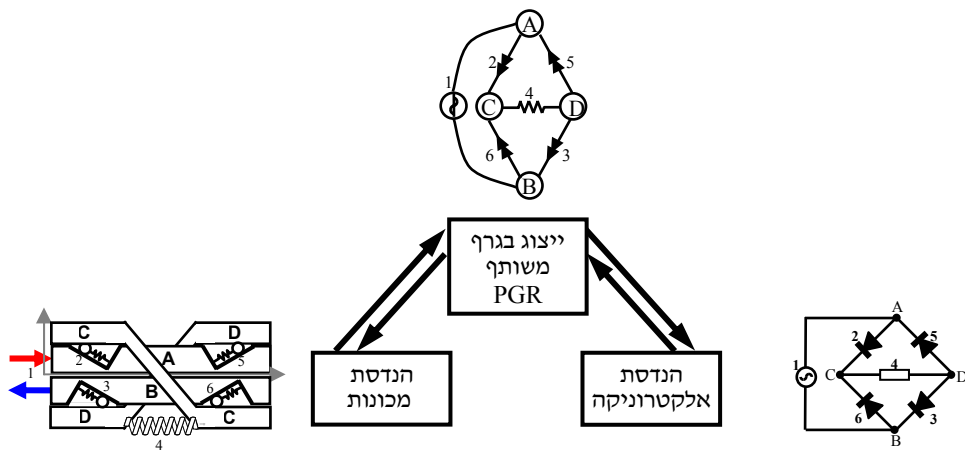
רכיב A מניע בכיוון שלילי ומצמיד את המסב החד-כיווני (מסב 5) ל-D. כתוצאה מכך, רכיב D (הצלע האלכסונית) נע יחד עם A. בו-זמנית, רכיב B מניע בכיוון חיובי ומצמיד את המסב החד-כיווני (מסב 6) ל-C. כתוצאה מכך רכיב C (הצלע האלכסונית) נע יחד עם B. עקב התנועה של C ו-D, מסבים 2 ו-3 נמצאים בהחלקה והקפיץ עליו נמדד היישר, נמצא במתיחה.

## 2.4.3 סיכום תכן מכניזמים חד-כיווניים ליניאריים

הייצוג המשותף מסוג PGR אפשר להעביר ידע מתחום האלקטרוניקה לתחום המכניקה ליצירת מנגנונים חד-כיווניים. הייצוגים היו מורכבים יותר וכן גם העברתם למכניקה. שוב, התהליך היה ברובו שיטתי, כאשר המיקוד היה בהעברת ידע מבני וטופולוגי באמצעות הייצוג. נעשה שימוש לפעמים בשיקולים הנדסיים על מנת לתאם בין הייצוג למערכת המתוכננת. אנליזה של ההתנהגות בוצעה רק בסופו של תהליך התכן. תהליך זה סוכם באיורים הבאים.



**איור 2.36** העברת הידע והקונספטים החד-כיווניים הליניאריים שהתקבלו ממישר גל שלם



**איור 2.37** העברת הידע והקונספטים החד-כיווניים הליניאריים שהתקבלו מגשר דיודות

## 2.5 המרת תכנ קונספטואלי ליניארי לאנגולרי באמצעות הגרף המשותף

בחלק הקודם פותחו מנגנונים ליניאריים חד-כיוונים דרך הייצוג משותף. בחלק זה, יעשה שימוש בייצוג המשותף על מנת לבצע טרנספורמציה ממנגנונים אלו, לתמסורות גלגלי שיניים חד-כיווניות. הייצוג המשותף מאפשר גם העברת ידע בתוך התחום הנדסי כאשר ניתן לנצל לטרנספורמציה ממנגנונים חד-מימדים לדו-מימדים. גם כאן, הטרנספורמציה היא מבנית (structure) ואין התייחסות להתנהגות (behavior) אלא רק כאמצעי בדיקה. תהליך זה שימושי בתכנ מכיוון שהגרף המשותף כבר קיים, ושימש לקבלת פתרון ליניארי. ישנם הרבה מקרים בתהליך התכנ בו יותר קל להתחיל מתכנ ליניארי חד-ממדי, מאשר להתחיל לבנות מנגנון בעל יותר מימדים בעל מהירות אנגולרית. במקרים אלו, ניתן להיעזר בגרף על מנת קודם לבנות מנגנון ליניארי ולאחר מכן, להמירו למנגנון בעל מהירות זוויתית.

על מנת להתאים את הייצוג למערכת בעלת יותר מימדים (במקרה זה לעבור לתמסורת גלגלי שיניים), יש להגדיר את הייצוג אחרת. הייצוג אינו משתנה טופולוגית, אך הטרנספורמציה שלו למערכת ההנדסית תשתנה.

הגרף המשותף במקרה זה הינו מסוג PGR כפי שהוגדר במבוא, כל צומת מהווה וקטור התואם פוטנציאל  $(\pi)$  וכל קשת מייצגת הפרש פוטנציאליים  $(\Delta)$  בין צמתיה. כאשר מבוצעת טרנספורמציה מהייצוג למערכת ההנדסית האיזומורפית (מכניקה ליניארית), משתנים אלו הופכים למהירות ומהירות יחסית בהתאם. הייצוג והטרנספורמציה ניתן לראות באיור 2.38.

ייצוג	קשת וצמתים בייצוג	הייצוג מכני הליניארי התואם
PGR		

איור 2.38 המרה של קשת מהגרף לאלמנטים מכניים בעלי מהירות ליניארית

טרנספורמציה של כל קשת בייצוג למהירות זוויתית וכל צומת למהירות משיקית, בעצם מאפשרת מעבר למערכת מכנית אנגולרית. ניתן לבצע טרנספורמציה זאת על המערכת הליניארית שנבנתה על בסיס הייצוג המשותף ובעזרתו. כל האלמנטים הליניאריים מוסטים אחד מהשני, כאשר חוליה בעלת מהירות סיבובית מפרידה ביניהם. חוליה ניתנת לייצוג, לפי התכנ הדרוש, על ידי גלגלי שיניים או כל תמסורת בעלת מהירות סיבובית. את טרנספורמציה זאת ניתן לראות באיור 2.39.

ייצוג	קשת וצמתים בייצוג	הייצוג מכני האנגולרי התואם
PGR	 $\Delta_{yx} = \pi_y - \pi_x$	 $\omega_{yx} = \frac{V_y - V_x}{r}$

**איור 2.39** המרה של קשת מהגרף לאלמנטים מכניים בעלי מהירות אנגולרית


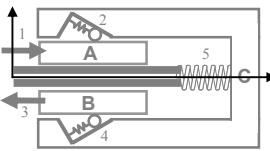
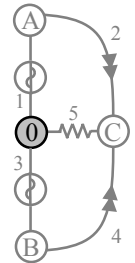

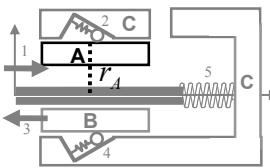
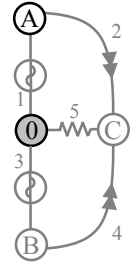
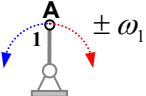
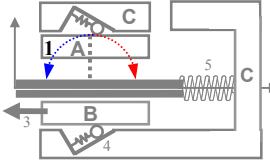
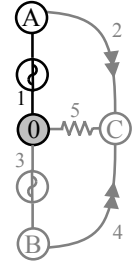
על פי דפוס הפעולה המתואר, ניתן לבנות מערכות בעלות מהירות זוויתית ממערכות ליניאריות ואף ניתן, במידה וזה יותר קל, לתכן מערכות אלו ישירות מהייצוג בגרף.

### 2.5.1 תכנון תמסורת חד-כיוונית על בסיס מיישר גל שלם (full wave rectifier)

התמסורת החד כיוונית הבאה, פותחה על בסיס טרנספורמציה של המערכת הליניארית שהתקבלה מהמערכת האלקטרונית – מיישר גל שלם (full wave rectifier). התכן התבצע על ידי הגדרת כל רכיב במערכת הליניארית מחדש כרכיב בעל מהירות משיקית בתמסורת גלגלי שיניים המעבירה מהירות זוויתית. שלב הבנייה הוא חזרה על השלב החמישי של תהליך התכן אך במקום לייצג מחדש את כל הרכיבים, מוסיפים רדיוס פעולה לכל רכיב ומשנים אותו במידת הצורך על מנת להתאימו לגרף.

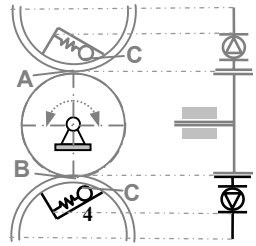
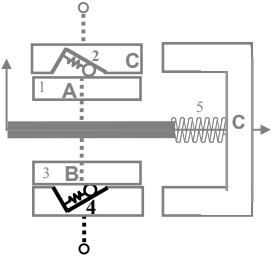
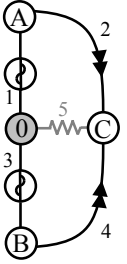
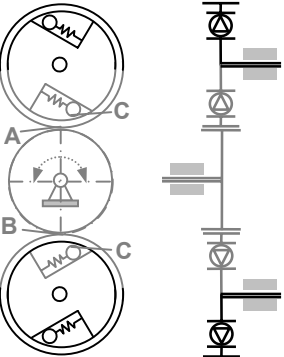

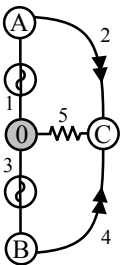
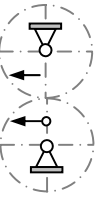
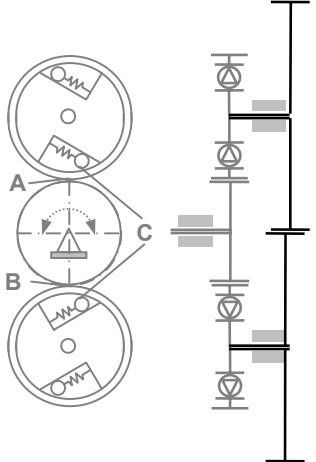
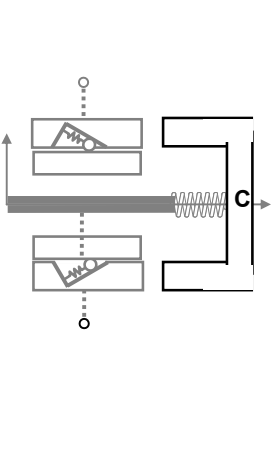
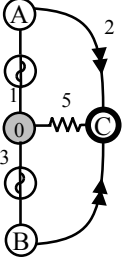
#### שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף

בניית המערכת תתבצע בטבלה כאשר מתווספת עמודה המתארת את שלבי הביניים של טרנספורמציה של המערכת הליניארית לאנגולרית.

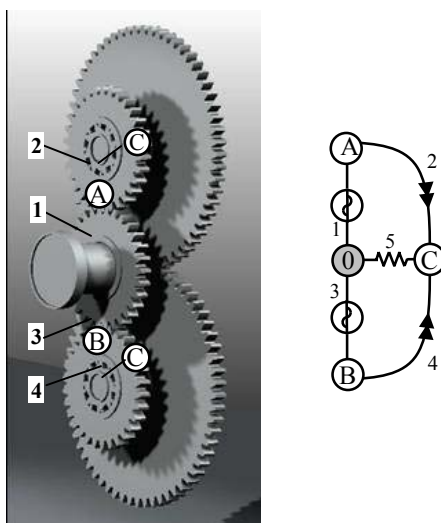
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג אנגולרי ברמה ההנדסית	ייצוג ליניארי ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>אדמה – בעלת מהירות:  <math>V = 0</math></p>			<p>צומת בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = 0</math></p>	
<p>רכיב – בעל מהירות משיקית:  <math>V = V_A</math>  מתקבל על ידי הזזת רכיב A ברדיוס <math>r_A</math> מציר סיבוב וחיבורו לחוליה.</p>			<p>צומת בעלת פוטנציאל:  <math>\pi = \pi_A</math></p>	
<p>הפעלת מהירות משיקית דו-כיוונית:  <math>V = \pm V_A</math>  המתקבלת על ידי הפעלה של מהירות זוויתית על חוליה 1:  <math>\omega = \pm \omega_1</math></p>			<p>קשת מקור הפרש פוטנציאליים (1) המפעילה פוטנציאל מתחלף על צומת A:  <math>\pi = \pm \pi_A</math></p>	

<p><b>הפעלת שיקולי סימטריה</b> חזרה על שני השלבים הקודמים והוספת חוליה כאשר המהירות המשיקית של B:</p> $V_B = -V_A$ <p>בגלל הסימטריה, ניתן לחבר בין החוליות ליצירת גלגל שיניים מניע.</p>			<p><b>הפעלת שיקולי סימטריה</b> חזרה על שני השלבים הקודמים להוספת קשת (3) וצומת B, כאשר:</p> $\pi_B = -\pi_A$	
<p>רכיב - בעל מהירות משיקית:</p> $V = V_C$ <p>מתקבל על ידי הזזת רכיב C ברדיוס <math>r_C</math> מציר סיבוב וחיבורו לחוליה.</p>			<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	
<p>רכיב - מצמד חד-כיווני אנגולרי המאפשר יחס מהירויות:</p> $V_C \geq V_A$			<p>הוספת קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_C \geq \pi_A$	



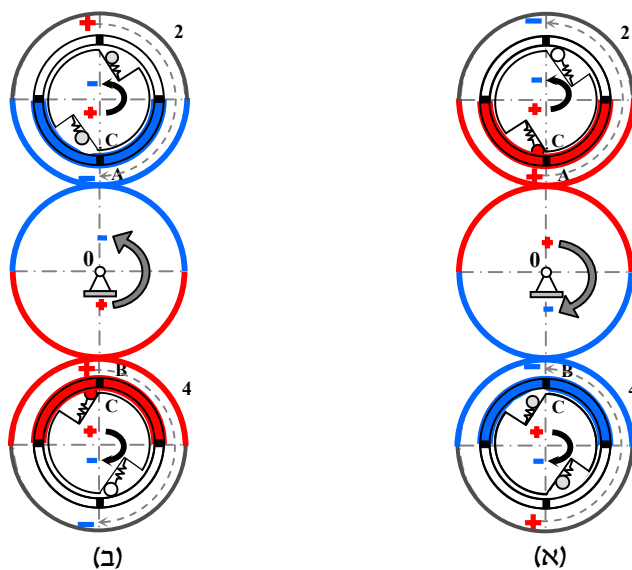
<p><b>הפעלת שיקולי סימטריה</b> חזרה על שני השלבים הקודמים והוספת מצמד חד-כיווני אנגולרי המאפשר יחס מהירויות:</p> $V_C \geq V_B$			<p><b>הפעלת שיקולי סימטריה</b> חזרה על שני השלבים הקודמים להוספת קשת (4) כאשר:</p> $\pi_C \geq \pi_B$	
<p><b>שלב הפעלת שיקול הנדסי</b> השלמת המצמד לרכיב אנגולרי מטעמי סימטריה.</p> <p>רכיב – חיבור של רכיבי C חזרה לאדמה כך שניתן למדוד את הפרשי המהירויות.</p> $V_{C/0} = V_C - V_0$			<p>קשת התנגדות השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים C ל-0:</p> $\Delta_C = \pi_C - \pi_0$	
<p><b>שלב הפעלת שיקול הנדסי</b> קיימים שני רכיבים בעלי מהירויות משיקות זהות:</p> $V = V_C$ <p>חיבור ביניהם באמצעות תשלובת של שני גלגלי שיניים מקיים יחס זה.</p> 			<p><b>שלב הפעלת שיקול</b> <b>לתיאום בין הגרף להנדסה</b> קיימת רק צומת C בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	

שלב 6. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת



איור 2.40 התמסורת החד-כיוונית עם הסימונים המתאימים לייצוג הגרפי

התמסורת המתקבלת מוצגת באיור 2.40 כאשר בשלב זה תופעל המערכת הכוללת על מנת לוודא התנהגות תקינה של המכניזם שתוכנן.



איור 2.41 בדיקת התנהגות של התמסורת החד-כיוונית

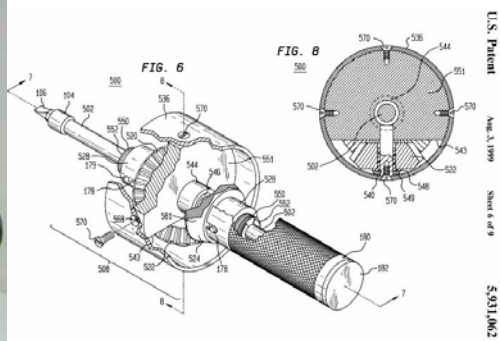
הנעה עם כיוון השעון (א) ונגד כיוון השעון (ב). בשני המקרים ניתן לזהות כי כיווני הסיבוב של צירי המסבים (המחוברים ליציאה) זהים ובלתי תלויים בכיוון הגלגל המניע.

## 2.5.2 תכנון תמסורת חד-כיוונית על בסיס גשר דיודות

כפי שפותחה תמסורת עבור מיישר גל שלם, ניתן גם לתכנן תמסורת עבור גשר הדיודות. בחלק 2.4.2 כבר נבנה מנגנון מכני ליניארי על בסיס מעגל גשר הדיודות ועתה, ניתן לעבור גם לתמסורת גלגלי שיניים באמצעות הייצוג הגרפי. באופן דומה לבניית התמסורת הקודמת, כל רכיב של מנגנון גשר הדיודות הליניארי, מוסט ברדיוס מציר והרכיבים הופכים לרכיבים אנגולרים. כפי שכבר הוצג בתמסורת הקודמת, שלבי הפעלת שיקולים הנדסיים הכרחיים על מנת להתאים את המבנה של התמסורת לייצוג הגרפי. על התמסורת המתקבלת, הוצא פטנט בשנת 1999, אך היא גם נבנתה ישירות מהייצוג הגרפי (Shai 2003).



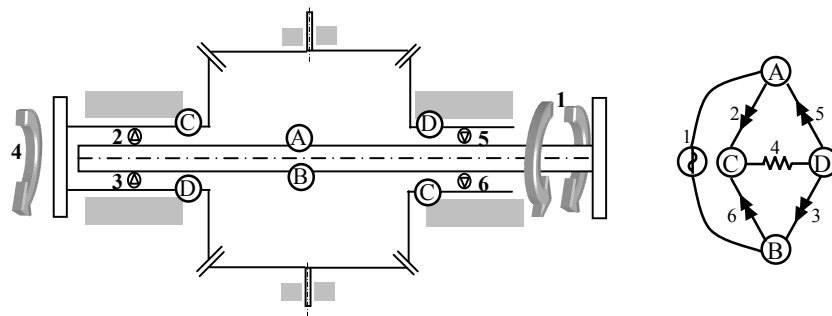
(ב)



(א)

### איור 2.42 התמסורת החד-כיוונית שתוכננה על בסיס גשר הדיודות

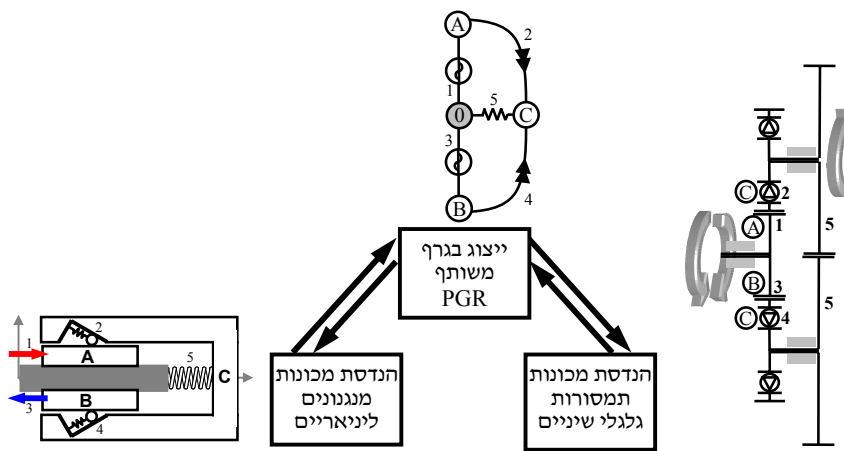
כפי שתוארה בפטנט (1999) (א) וכפי שנבנתה באוניברסיטת תל-אביב על בסיס הייצוג הגרפי של גשר הדיודות (ב).



### איור 2.43 חתך של התמסורת החד-כיוונית עם הסימונים המתאימים לייצוג הגרפי

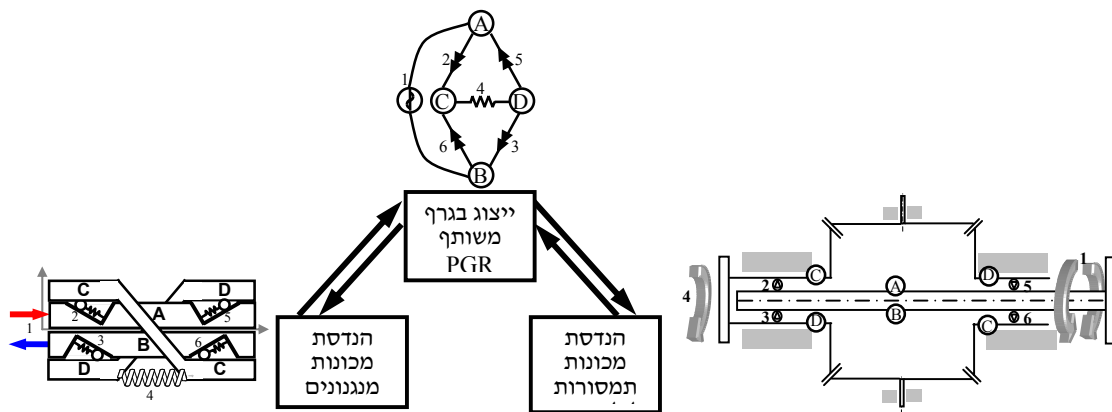
### 2.5.3 סיכום - תכן תמסורות חד-כיווניות

הייצוג המשותף מסוג PGR איפשר לא רק להעביר ידע מתחום האלקטרוניקה לתחום המכניקה ליצירת מנגנונים חד-כיווניים ליניאריים, אלא גם להמשיך בתחום המכניקה ולתן תמסורות אנגולריות. התהליך ניצל את אותם ייצוגים שכבר נמצאו בחלק 2.4 לקבלת קונספטים שהינם שונים לחלוטין מבנית, אך זהים התנהגותית. התהליך היה ברובו שיטתי, כאשר המיקוד היה בהעברת ידע מבני וטופולוגי באמצעות הייצוג הפעם, עקב העלייה במימדי התכן, נעשה שימוש רב יותר בשיקולים הנדסיים על מנת לתאם בין הייצוג למערכת המתוכננת. המעבר מליניארי לאנגולרי הניב שתי מערכות כאשר אחת מתועדת בספרות מקצועית, והשנייה פטנט חדש יחסית. העברת הידע מליניארי לאנגולרי מסוכמת באיורים הבאים.



**איור 2.44** קונספט תמסורת גלגלי שיניים ממישר גל שלם

העברת הידע מהמנגנון החד-כיווני שפוח, דרך הייצוגים לבניית תמסורת חד-כיוונית על בסיס ייצוג מיישר גל שלם.



**איור 2.45** קונספט תמסורת גלגלי שיניים מגשר דיודות

העברת הידע מהמנגנון החד-כיווני שפוח, דרך הייצוגים לבניית תמסורת חד-כיוונית על בסיס ייצוג גשר דיודות.

### 3. תכן קונספטואלי באמצעות גרף דואלי

#### 3.1 הקדמה

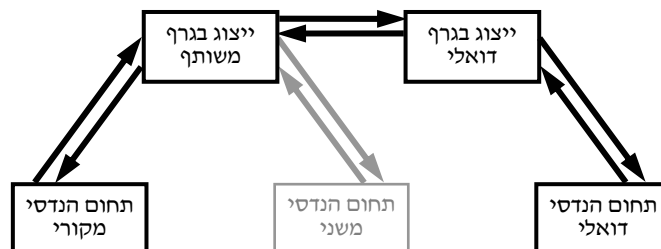
*בפרק הקודם הוסברה שיטת התכן הקונספטואלי באמצעות הגרף המשותף והובאו דוגמאות לתכן באמצעות ייצוגים גרפיים אלו. בשיטה הקודמת, נמצאה מערכת בתחום אחר, אשר מבצעת את אותה פונקציה ולכן בוצעה טרנספורמציה דרך הייצוגים המתמטיים. אולם, בהחלט ניתן להניח מצב בו לא קיימת מערכת כזאת בתחומים אחרים. במקרה כזה, גישת התכן באמצעות הייצוג הדואלי, היא אחת השיטות המאפשרת לעבוד עם תחומים הנדסיים שאינם בעלי ייצוג משותף.*

התכן השיטתי הדואלי מבוסס על אותן עקרונות שהוצגו בדוגמאות בפרק הקודם כאשר הרעיון הוא לייצג תחילה, בעיה הנדסית כבעיה ברמת הייצוג. מהלך זה מאפשר לראות את הבעיה כייצוג כללי המתאים גם לתחומי הנדסה אחרים. במידה ולא נמצא פתרון הולם, מבוצעת טרנספורמציה לייצוג דואלי. איתור והעברת פתרון אפשרי מתחום הנדסי אשר חולק ייצוג בגרף דואלי לתחום ההנדסי המקורי. הייצוג הדואלי הופך להיות ערוץ חדש להעברת המידע והתכונות המיוחדות ההנדסיות.

גרף דואלי הוגדר במדויק בפרק הראשון וכן, הובאה דוגמה לשימוש בייצוג זה. הכוונה של פרק זה היא להציג את הגרף הדואלי כטרנספורמציה של הגרף המשותף על מנת להתאימו למערכות הנדסיות שעבורם לא קיים בהכרח ייצוג משותף. הדואליות אינה מתמקדת רק בביצוע פעולות על הגרף אלא גם בהצגת בעיות ופונקציות במונחים הדואליים שלהם על מנת לחפש פתרונות אפשריים לבעיית התכן. בדרך כלל, עקב אופי התחום הדואלי והשונוות שלו מהתחום המקורי, שיטת תכן זו מאפשרת קבלת פתרונות חדשים ומעניינים וגם מאפשרת לגלות תכונות מיוחדות שלא נראו בתחום הייצוג המשותף.

השימוש בשיטת הייצוג בגרף דואלי מאפשרת להרחיב את שדה הקונספטים המתקבלים ומאפשרת להעביר פתרונות מתחומי הנדסה שונים שאין להם קשר ישיר לתחום המקורי. בפרק זה תוסבר השיטה ויובאו כמה יישומים לתכן מספר מערכות הנדסיות על ידי שימוש בפתרונות הקיימים במערכות מתחומי הנדסה שונים.

#### 3.2 תיאור שלבי התכן הקונספטואלי באמצעות ייצוג בגרף דואלי

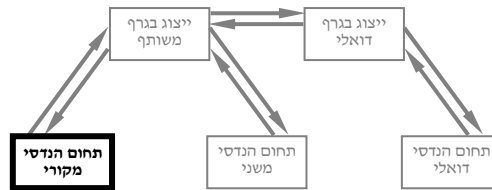


איור 3.1 תרשים זרימה של תהליך התכן הקונספטואלי באמצעות ייצוג גרף דואלי

כפי שתואר בהקדמה, תהליך התכן הקונספטואלי הדואלי הינו הרחבה של תהליך התכן באמצעות גרף משותף. התהליכים חולקים את אותם שלבים ראשוניים ואחרונים הכוללים: הגדרת המערכת

ההנדסית הרצויה וטרנספורמציה לייצוג בגרף, לאחר מכן התהליך מתפצל לטרנספורמציה לייצוג דואלי ואיתור פתרון הנדסי בתחום הדואלי. הפתרון נבנה כגרף איזומורפי ועובר המרה חזרה לגרף המשותף לתחום המקורי, על ידי ביצוע דואליות. כאן, שוב חולקות השיטות את שלבי בנייה ובדיקת התכן ההנדסי. ניתן לראות את השלבים המשותפים באיור 3.1.

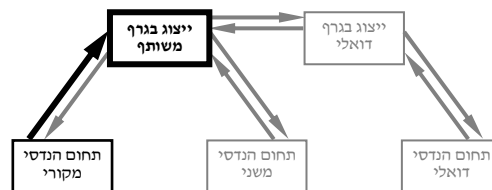
### שלב 1. הגדרת הבעיה במונחים של התחום ההנדסי המקורי



### איור 3.2 הגדרת דרישות התכן בתחום ההנדסי המקורי

שלב זה הינו שווה-ערך לשלב 1 אשר פורט בשיטת התכן הקונספטואלי באמצעות גרף משותף שנידון בפרק הקודם. חשוב לציין כי בשלב הגדרת הבעיה, אין בהכרח ידע מוקדם לקיום פתרון בתחום הנדסי זה או אחר ולכן השלב הזה והשלב הבא מבוצעים כפי שהיו מבוצעים אילו הייתה אפשרות להשתמש בתחום הנדסי משני החולק גרף משותף עם התחום המקורי.

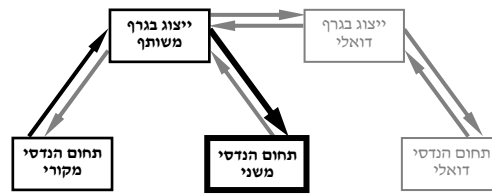
### שלב 2. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג המשותף



### איור 3.3 הגדרת דרישות התכן לפי הייצוג המשותף

שלב זה הינו שווה-ערך לשלב 2 בתהליך התכן שנידון בפרק הקודם. יש לציין כי בסוף שלב זה נבחר הייצוג המתאים להגדרת הבעיה – גרף פוטנציאל (PGR) או גרף זרימות (FGR). פרט זה חשוב מכיוון שהוא המפתח למעבר לשלבים מתקדמים יותר. המתכנן מבין באיזה ייצוג נעשה שימוש ומה האפשרויות העומדות לפניו במידה וייצוג אחד לא יניב תוצאות.

### שלב 3. חיפוש פתרון אפשרי ברמה ההנדסית המשנית

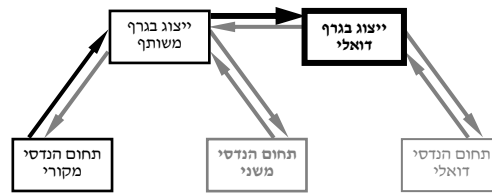


#### איור 3.4 טרנספורמציה למונחים של תחום הנדסי משני וחיפוש פתרון אפשרי

הבעיה הוגדרה ברמת הייצוג ועכשיו היא מהווה שאילתה שאותה ניתן להציג בכל תחום הנדסי שעבורו קיים ייצוג זהה. שלב זה אינו בהכרח השלב הבא בשיטת התכן, אך ההערכה היא כי מהנדס המחפש פתרון באמצעות תהליך התכן יעדיף לחפש פתרון דומה לבעיה המקורית ובעל ייצוג משותף.

שלב זה מתבצע לפי שלב 3 בתהליך התכן שנידון בפרק הקודם. לאחר חיפוש פתרון בספרות מקצועית ו/או קטלוגים, היה ולא נמצא פתרון מתאים לבעיה המוצגת בגרף המשותף, תהליך התכן חוזר אחורה לשלב הייצוג המשותף. משלב זה ובהתאם לייצוג הנבחר, מתחיל תהליך התכן באמצעות גרף דואלי. תהליך זה הוא בעצם פיצול והמשך מתהליך התכן בגרף משותף.

### שלב 4. טרנספורמציה מייצוג בגרף משותף לייצוג בגרף דואלי



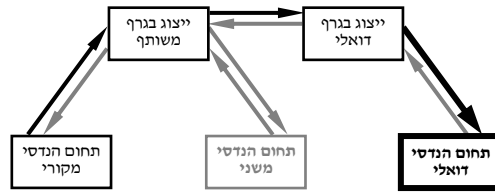
#### איור 3.5 טרנספורמציה לייצוג הדואלי על מנת להרחיב את שדה החיפוש

הדואליות מאפשרת לקשר בין שני ייצוגים גרפיים שימושיים, בין גרף פוטנציאלים PGR לגרף זרימות FGR, ולכן פותחת בפני מהנדס תחומים נרחבים לנצל בתהליך התכן. שלב זה הינו חזרה אחורה לייצוג המשותף שהוגדר עבור בעיית התכן. ייצוג זה יעבור טרנספורמציה לייצוג הדואלי שלו. פונקציות שהוגדרו על ידי פוטנציאליים יוגדרו מחדש במונחי זרימה שהיא כפי שהוסבר ברקע המדעי, הייצוג הדואלי. בטבלה 2.2 ניתן לראות איך השינוי בהגדרת הפונקציה ממונחי פוטנציאל לזרימה או להפך, בעצם משנה את הטרמינולוגיה ברמה הנדסית, ומאפשרת לחפש פתרונות הנדסיים שונים שלא היו נגישים בייצוג המשותף.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
אלקטרוניקה	הידראוליקה זרימה	מכאנית אנגולרית	מכאנית ליניארית	טרמינולוגיה ברמת המערכת
זרם	לחץ	מומנט	כוח	משתנה זרימה $F$
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	מהירות/הזזה	משתנה פוטנציאל $\pi$

#### טבלה 2.2 טבלת המרת משתנים ברמת המערכת – המרה לייצוג דואלי

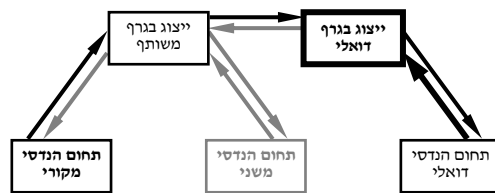
**שלב 5. חיפוש פתרון הנדסי ברמה ההנדסית הדואלית**



**איור 3.6** הגדרת הבעיה לפי מונחים של תחום הנדסי דואלי וחיפוש פתרון

באמצעות טבלה 2.2 ניתן עכשיו לתרגם את פונקציות התכן הדואלית, לפונקציה הנדסית ספציפית לכל תחום. שלב זה הינו זהה לחלוטין לשלב 3 המתואר בשיטת התכן הקונספטואלי באמצעות גרף משותף. אין צורך בהפעלת שיקולים המתאימים לתחום ההנדסי המקורי כיוון שברמה ההנדסית הם אינם קשורים ישירות לתכונות בתחום ההנדסי הדואלי. אם ישנן תכונות רצויות שהן בעלי חשיבות לתכן, ניתן לבצע את השלבים הקודמים על מנת להמירם לתחום ההנדסי הדואלי. המהנדס חופשי לבצע חיפוש בלתי תלוי בתחום ההנדסי המקורי.

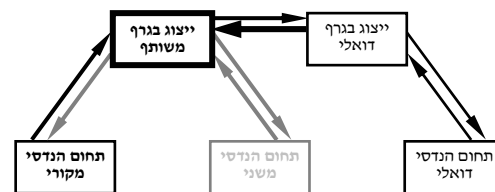
**שלב 6. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג הדואלי**



**איור 3.7** בניית ייצוג איזומורפי לפתרון ההנדסי

פתרון שנמצא בשלב הקודם הוא פתרון שעונה על דרישת התכן במונחים הדואליים. מכיוון שחיפוש ברמת המערכת מניב תוצאות מתחומי הנדסה רבים אשר שונים מהותית מהתחום המקורי, הפתרון הנמצא אומנם עומד בדרישות התכן כאשר אלו מוגדרים על ידי משתני הייצוג, אך מכיוון שהמערכת הינה דואלית, אין אפשרות להשתמש בפתרון כפי שהוא מופיעה. כאן, נדרש שוב להמיר את הפתרון מהתחום ההנדסי הדואלי לייצוג בגרף המתאים. גרף איזומורפי נבנה עבור הפתרון שהתקבל מהתחום ההנדסי הדואלי. הגרף נבנה ברמת המערכת על פי שלבים דטרמיניסטיים ידועים היטב כפי שנעשה בשיטה עם הייצוג המשותף. שלבים אלו הם שלבי בנייה הפיכים אשר מעבירים מבנה הנדסי לייצוג האיזומורפי שלו. הייצוג בגרף המתקבל הוא ייצוג מדויק של הפתרון ההנדסי המתאר את מבנה והתנהגות הפתרון.

**שלב 7. תרגום מייצוג בגרף דואלי לייצוג בגרף משותף**

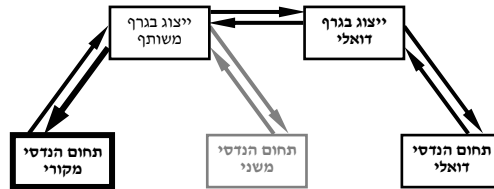


**איור 3.8** טרנספורמציה מהייצוג הדואלי חזרה לייצוג המשותף



בשלב זה חוזרים לתהליך התכן באמצעות שלב 4 המבוצע בכיוון הפוך כאשר הגרף הדואלי עובר טרנספורמציה חזרה לגרף משותף, שהינו איזומורפי לתחום ההנדסי המקורי. כפי שהוגדר מכבר, גרף דואלי אשר מבצעים עליו המרה דואלית, הוא הגרף מקורי – הגרף בעל משתנים התואמים את המקור, אשר במקרה זה, הינו הגרף המשותף לתחום ההנדסי המקורי. בניית הגרף הדואלי היא תהליך שיטתי לפי החוקים של תורת הגרפים.

**שלב 8. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**



**איור 3.9 בניית התכן בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג המשותף**

שלב זה זהה לחלוטין לשלב 5 בתהליך התכן שנידון בפרק הקודם. הגרף המתאים לפתרון הרצוי עובר טרנספורמציה למערכת איזומורפית הנמצאת ברמת הנדסה ובתחום המקורי בו הוצגה הבעיה המקורית.

**שלב 9. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת**

כפי שתואר בשלב 6 בפרק הקודם, שלב בניית המערכת מהגרף לרמה ההנדסית הינו שלב מבני ברובו, שאינו כולל תהליך הפעלת שיקולים התנהגותיים. בשלב האחרון, אחרי תהליך התכן שלא התייחס להתנהגות המערכת, הפעלת המערכת מתבקשת על מנת לוודא התנהגות תקינה של המערכת המתוכנת. באמצעות תוכנות מתאימות ו/או ראייה מכנית, מהנדס יכול לוודא התנהגות זאת ולוודא עמידה בדרישות התכן.

**תכן קונספטואלי באמצעות גרף דואלי – סיכום**

שיטת התכן הקונספטואלי באמצעות גרף דואלי נעזרת בייצוג גרפי איזומורפי של בעיה הנדסית אשר עובר טרנספורמציה לייצוג בגרף דואלי. הייצוג הדואלי מאפשר למצוא פתרונות תכן בעלי אופי שונה מהתחום ההנדסי המקורי ולעבוד עם תחומים הנדסיים שונים, שאינם חולקים את אותה פונקציה, על מנת לקבל פתרונות. השיטה מנצלת ידע הקיים בתחום הנדסי דואלי ואינו קיים או אינו ברור בתחום ההנדסי המקורי כאשר הגרף המשותף האיזומורפי והגרף הדואלי המתקבל ממנו מאפשרים להעביר ידע הנדסי מהתחום הדואלי למקורי דרך הייצוגים. הייצוגים מאפשרים לבצע תהליך בנייה שיטתי, ולבנות מערכת העונה על דרישות התכן בתחום ההנדסי המקורי. בהמשך תפורט השיטה – הן מבחינת הייצוג והן מבחינת הבנייה לפי התחומים ההנדסיים.

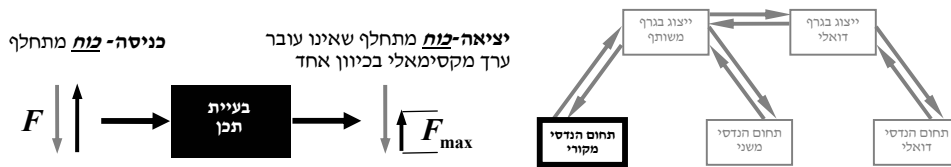
### 3.3 תכן קונספטואלי באמצעות גרף דואלי – תכן מערכת להגבלת כוח

בחלק זה נעשה שימוש בשיטת התכן הקונספטואלי שתוארה בחלק הקודם על מנת לתכנן מנגנונים מכניים. השיטה עוקבת אחר השלבים מתחילת התהליך, בו מוגדרת הבעיה דרך ייצוגה, טרנספורמציה לייצוג דואלי וחיפוש הפיתרון בתחום הנדסי דואלי, ועד בנייה של תכן קונספטואלי בתחום המכניקה. השיטה שתוארה בחלק הקודם תופעל על בעיה הנדסית ידועה על מנת להדגים את אופן פעולתה תוך כדי ליווי תהליך התכן הקונספטואלי.

#### 3.3.1 תכן מגביל כוח

במערכות הנדסיות בהם נדרש הפעלת כוח ליניארי, יש עומס מקסימאלי שניתן להפעיל. עקב נקודות תורפה, מבנה או חומרים במערכת, עומס יתר עלול לגרום לכשל כלשהו. על מנת להגן על מערכות אלו, יש צורך במנגנונים להגבלת העומס כאשר אלו אינם מאפשרים העברה של עומס מעבר לעומס הנקבע מראש. העומס שנקבע מראש נמוך כמובן מהעומס המקסימאלי. כאמור, המנגנון מונע מעומס יתר לגרום לכשל כלשהו במערכת. על מנת לתכנן מנגנון כזה, יעשה שימוש בשיטת התכן באמצעות הייצוג הדואלי.

#### שלב 1. הגדרת הבעיה במושגים של התחום הנדסי המקורי



#### איור 3.10 הגדרת דרישות התכן בתחום הנדסי המקורי

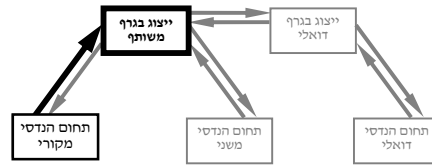
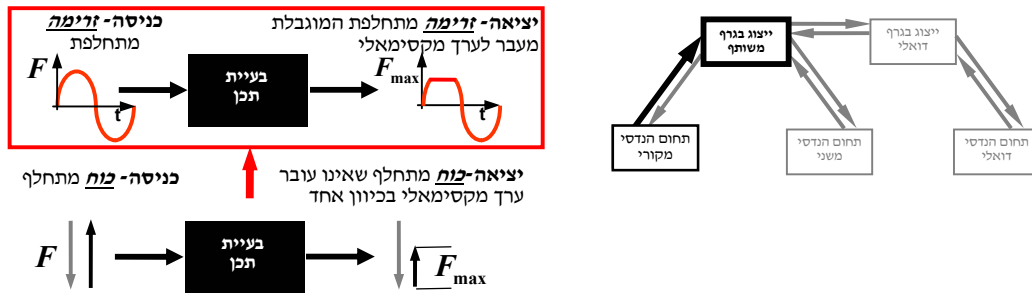
המערכת מתוכננת לקבל כניסה של כוח המשתנה בכיוון ובגודל ובמידה שבכיוון אחד יש עומס יתר ביציאה יתקבל כוח קבוע ובלתי-תלוי בכוח בכניסה.

התחום הנדסי המקורי בו מוגדרת הבעיה הוא תחום המכניקה. הבעיה הוגדרה כבעיית הגבלת כוח והוצגה כ-Black Box Function (Pahl and Wallace, 1996). המשתנים המתאימים להגדרת הבעיה ההנדסית נלקחו מטבלה 2.2.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה			
אלקטרוניקה	הידראוליקה זרימה	מכנית אנגולרית	מכנית ליניארית
זרם	לחץ	מומנט	כוח
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	מהירות/ תזוזה

#### טבלה 2.2 טבלת משתנים עיקריים ברמת המערכת ההנדסית

**שלב 2. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג המשותף**



**איור 3.11 ניסוח דרישת התכן לפי הייצוג המשותף**

משתני הכוח בפונקציה ההנדסית מנוסחים כמשתני זרימה בפונקציה של הייצוג.

כפי שנעשה בפרק הקודם, מגדירים מחדש את המשתנים ההנדסיים (כוחות) כמשתנה משותף (זרימה)

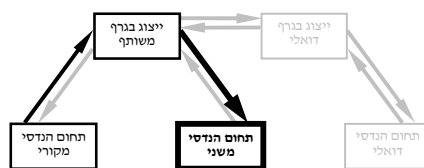
לפי טבלה 2.2.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
אלקטרוניקה	הידראוליקה זרימה	מכנית אנגולרית	מכנית ליניארית	טרמינולוגיה ברמת הייצוג
זרם	לחץ	מומנט	כוח	משתנה זרימה $F$
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	מהירות/תזוזה	משתנה פוטנציאל $\pi$

**טבלה 2.2 טבלת הגדרת משתנים לפי הייצוג המשותף ורמת ההנדסה**

משתנה הכוח מהתחום ההנדסי מתורגם למשתנה זרימה ברמת הייצוג.

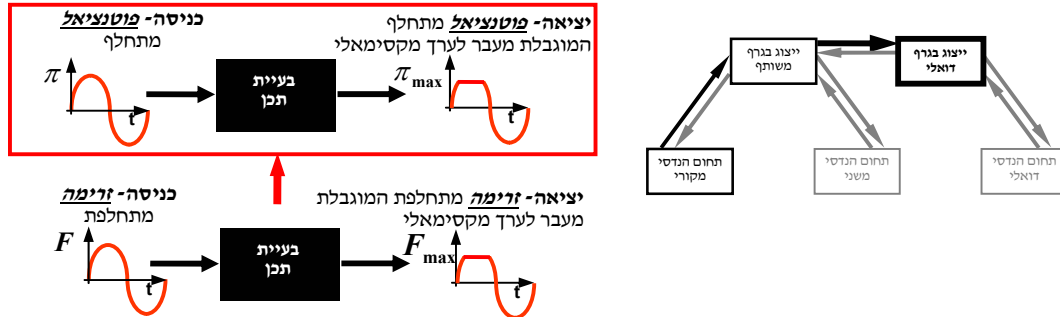
**שלב 3. חיפוש פתרון אפשרי ברמה ההנדסית**



**איור 3.12 ניסוח הבעיה במונחים של תחום הנדסי משני וחיפוש פתרון אפשרי**

דרישות התכן נוסחו עבור תחומי הנדסה שונים לפי טבלה 2.2. במקרה זה חיפוש בתחומים משניים בעלי ייצוג אפשרי משותף לא מניב תוצאות או תוצאת החיפוש היא מערכת מסובכת או בלתי-מתאימה.

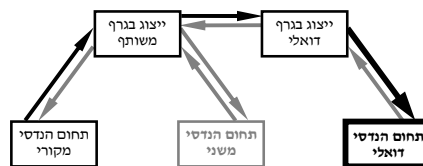
שלב 4. טרנספורמציה מייצוג בגרף משותף לייצוג בגרף דואלי



איור 3.13 טרנספורמציה מהייצוג המשותף (זרימה), לייצוג הדואלי (פוטנציאל).

על מנת להרחיב את שדה הפתרונות האפשריים, מבוצעת טרנספורמציה של דרישות התכן לייצוג הדואלי. הבעיה המקורית שהוגדרה באמצעות משתני זרימה תוגדר מחדש במונחי פוטנציאל בייצוג הדואלי. הפונקציה המתארת את דרישת התכן הופכת לפונקציה להגבלת פוטנציאל.

שלב 5. חיפוש פתרון הנדסי ברמה ההנדסית לבעיה הדואלית



איור 3.14 הגדרת מגביל הפוטנציאל במונחים של התחום הנדסי דואלי וחיפוש פתרון

שלב זה הינו זהה לחלוטין לשלב 3 המתואר בשיטת התכן הקונסטואלי באמצעות הגרף המשותף. המרת משתנה הפוטנציאל (הדואלי) באמצעות טבלה 2.2 לתחומי ההנדסה הדואליים מניבה כמה מערכות הנדסיות שנותנות את הפונקציה הנדרשת.

טרמינולוגיה של תחומים ומשתנים שלהם ברמת ההנדסה				
אלקטרוניקה	הידראוליקה זרימה	מכנית אנגולרית	מכנית ליניארית	טרמינולוגיה ברמת המערכת
זרם	לחץ	מומנט	כוח	משתנה זרימה $F$
מתח	מהירות זרימה	מהירות זוויתית	מהירות/תזוזה	משתנה פוטנציאל $\pi$

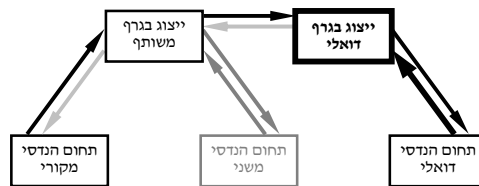
טבלה 2.2 טבלת הגדרת משתנים לפי הייצוג המשותף ורמת ההנדסה

המרת הפוטנציאל למונחי תחומי הנדסה שונים.

תחום הנדסי דואלי	המערכת ההנדסית
הנדסת אלקטרוניקה	<p>מעגלי הגנה אשר קוטמים ומגבילים מתח ממקור מתח מתחלף במעגל.</p>
הנדסה מכנית	<p>מנגנוני שדכן אשר מגבילים תזוזה של מנגנון הזנת סיכות במחסנית השדכן.</p>

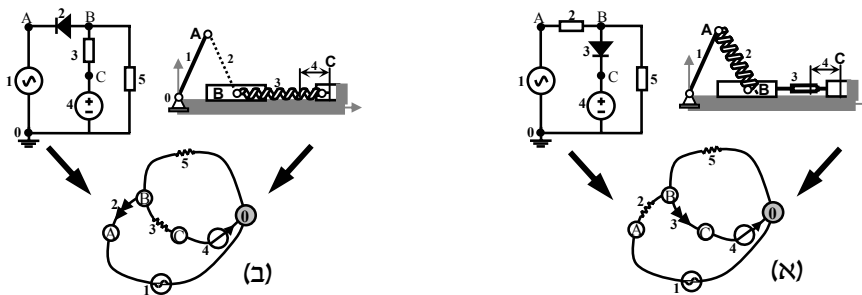
איור 3.15 הפתרונות שהתקבלו מתחומי ההנדסה הדואליים

שלב 6. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג הדואלי



איור 3.16 בנייה של ייצוג איזומורפי למעגלים האלקטרוניים/מנגנוניים מכנים

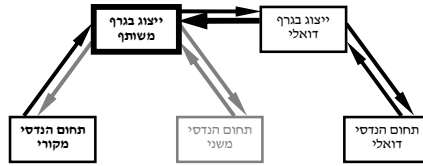
הפתרון שנמצא בשלב הקודם הוא פתרון שעונה על דרישת התכן (פונקציה) במונחים הדואליים. בשלב זה, נדרש שוב להמיר את הפתרון מהתחום ההנדסי הדואלי לייצוג איזומורפי בגרף המתאים. הגרפים המתקבלים הם מסוג PGR מכיוון ששדה הפתרונות התקבל בתחום הדואלי עם משתני פוטנציאל והם ייצוג מדויק של הפתרונות ההנדסיים המתארים את המבנה והתנהגות של המערכות ההנדסיות.



איור 3.17 מערכות הנדסיות והגרפים האיזומורפיים שלהם

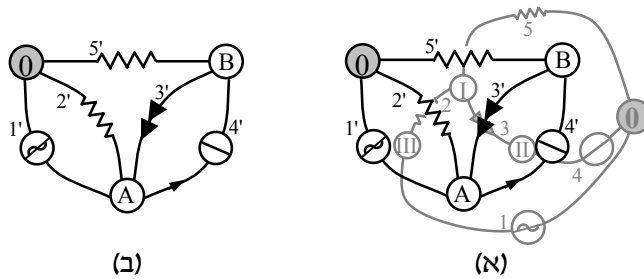
היות והמשתנים ההנדסיים כוללים תזוזה ומתח הגרפים הינם מסוג PGR (א, ב). מספר הגרפים הסופי המתקבל גם מעיד על תכונת מספר הקונספטים שתורחב בהמשך.

**שלב 7. טרנספורמציה מייצוג בגרף דואלי לייצוג בגרף משותף**



**איור 3.18** טרנספורמציה של הגרפים שהתקבלו מהייצוג הדואלי לייצוג המשותף

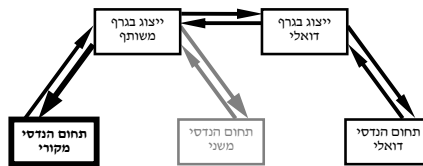
שלב זה הוא שלב 4 המבוצע בכיוון הפוך כאשר ממירים את הגרף הדואלי חזרה לגרף משותף שהינו איזומורפי לתחום ההנדסי המקורי. בניית הגרף הדואלי היא תהליך שיטתי לפי החוקים של תורת הגרפים.



**איור 3.19** בניית הגרף דואלי על בסיס הגרף שנבנה בשלב הקודם


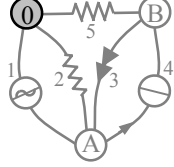

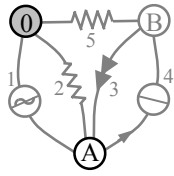
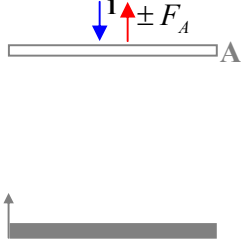
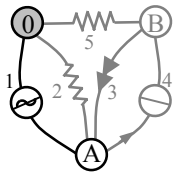
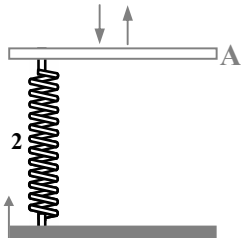
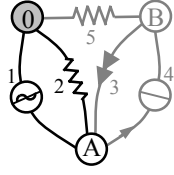
על ה-PGR (א-באפור) נבנה גרף ה-FGR (ב-שחור). גרף זה מחזיר את הבעיה לייצוג המשותף לתחום ההנדסי המקורי.

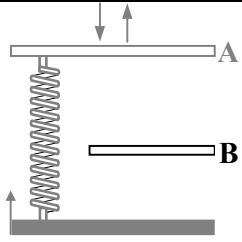
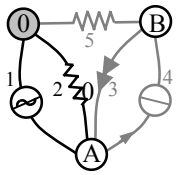
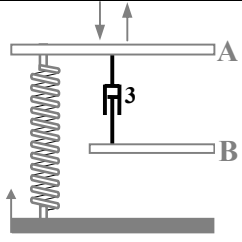
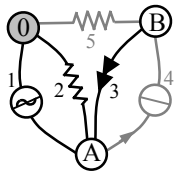

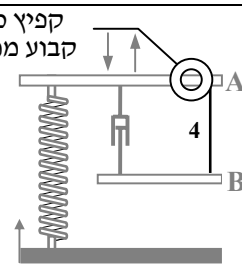
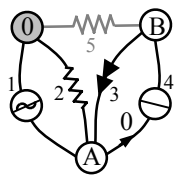
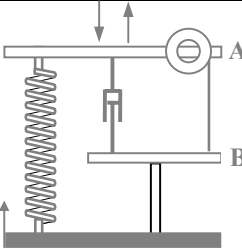
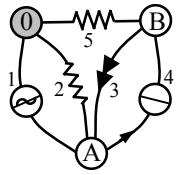
**שלב 8. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**



**איור 3.20** בניית התכן בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג המשותף

בניית המערכת מתבצעת באמצעות העברת ידע באופן שיטתי מגרף ה-FGR לתחום המכניקה. ההעברה המתבצעת היא העברת מבנה הגרף למבנה מכני שהתנהגותו תואמת את התנהגות הזרימה בגרף. שלבי הבנייה הם שלבים דטרמיניסטיים.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
הוספה של אלמנט אדמה.		הוספת צומת 0.	
רכיב - אלמנט קשיח A הממוקם אקראית עליו סה"כ הכוחות יהיו בשווי משקל: $\sum F_A = 0$		הוספת צומת A עליה מופעלים זרימות המקיימות: $\sum F_A = 0$	
הפעלת כוח מתחלף על רכיב A: $F = \pm F_A$		הוספת מקור זרימה מתחלף על צומת A. $F = \pm F_A$ הזרימה מופעלת ביחס לצומת הייחוס.	
הוספה של אלמנט קפיץ בין A (הנקודה עליה מופעל הכוח) לבין האדמה. קפיץ זה מהווה אלמנט הסופג את הפרש הכוח המופעל על A. $F = F_r$		הוספה של קשת התנגדות <A,0> בין צומת A לאדמה בה זורמת זרימה: $F = F_r$	

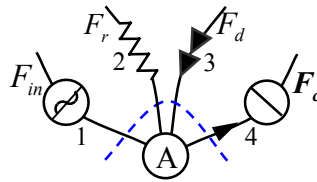
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב – אלמנט קשיח B הממוקם אקראית עליו סה"כ הכוחות יהיו בשווי משקל:</p> $\sum F_B = 0$		<p>הוספת צומת B עליה מופעלים זרימות המקיימות:</p> $\sum F_B = 0$	
<p>רכיב תומך (strut) בין אלמנטים A ו-B, המאפשר לרכיב B להפעיל כוח חיובי בלבד על אלמנט A.</p>		<p>הוספה של קשת זרימה &lt;A,B&gt; חד-כיוונית המאפשרת מעבר זרימה חיובית מצומת B לצומת A בלבד.</p>	
<p>הוספה של כח קבוע <math>F_{c(A \rightarrow B)}</math> המאפשר העברה של כוח חיובי מ-A ל-B וקובע את ערך הסף. הרכיב הנבחר הוא קפיץ כוח קבוע שבעת פתיחתו מפעיל כוח קבוע.</p> 	<p>קפיץ כוח קבוע ממבט</p> 	<p>הוספה של קשת מקור זרימה קבוע &lt;A,B&gt; מצומת A לצומת B כך ש-A מפעיל זרימה חיובית על B. מקור הזרימה הקבוע מהווה את ערך הסף בו יתבצע קיטום של הזרימה.</p>	
<p>חיבור קשיח בין אלמנט B לאדמה. מדידת הכח המופעל תתבצע על חיבור זה.</p>		<p>הוספה של קשת בעלת התנגדות נמוכה &lt;0,B&gt; המאפשרת למדוד את הזרימה בין צומת B לצומת האדמה.</p>	



### שלב 9. בדיקה התנהגותית של המערכת שהתקבלה

בשלב זה, שזהו אחד המאפיינים העיקריים של השיטה המוצעת, תופעל המערכת על מנת לוודא התנהגות תקינה. פעולת המערכת מתוארת כאשר יש השוואה מתמדת בין התנהגות הזרימה בגרף ה-FGR לבין התנהגות הכוחות הפועלים במערכת המתוכנת. את פעולת המערכת ניתן לתאר בשלושה שלבים עיקריים במהלך הפונקציה.

#### התנהגות הזרימה ברמת המערכת



איור 3.21 חתך A בייצוג FGR של מערכת להגבלת זרימה

על מנת לנתח את התנהגות המערכת תנתח הזרימה על חתך A כפי שמוצג באיור 3.21. כאשר זרימה הנכנסת לחתך תוגדר זרימה חיובית וזרימה היוצאת מהחתך הינה זרימה שלילית. מתוך נספח שלבי בנייה דטרמיניסטיים מוגדרת פעולת הקשת החד-כיוונית כך:

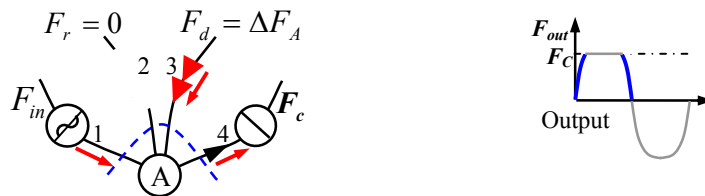
זרימה בקשת חד-כיוונית  $F_d$  מסוגלת לזרום מצומת B לצומת A בלבד. פעולתה נקבעת לפי סה"כ הזרימה בחתך A ( $\Delta F_A$ ) של קשתות זרימה מאולצות (קשתות בעלות מקורות זרימה או זרימה עם כיוון מאולץ):

$$1. \quad F_d = \Delta F_A \leftarrow \Delta F_A < 0 \quad \text{- קשת זרימה קיימת בין B ל-A.}$$

$$2. \quad F_d = 0 \leftarrow \Delta F_A \geq 0 \quad \text{- קשת זרימה אינה קיימת בין B ל-A.}$$

הקשת החד-כיוונית אינה מאפשרת זרימה היוצאת מצומת A. כאשר יש זרימה הנכנסת לצומת A אז כל הזרימה תעבור דרך הקשת החד-כיוונית.

$$1. \quad F_{in} < F_c \quad \blacksquare$$



איור 3.22 זרימות בחתך A כאשר הזרם במקור  $F_{in}$  נמוך מהזרם הקבוע  $F_c$

### התנהגות הזרימה ברמת הייצוג

כאשר הזרימה החיובית במקור הזרימה  $F_{in}$  קטנה ממקור הזרימה הפנימי הקבוע  $F_c$  (ערך סף):

$$(3.1) \quad F_{in} - F_c = \Delta F_A < 0$$

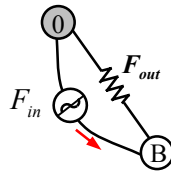
יש יותר זרימה שיוצאת מהחתך מאשר נכנסת לכן שאר הקשתות ישאפו להשלימה. תנאי זרימה בקשת חד כיוונית:

$$(3.2) \quad F_d = \Delta F \leftarrow \Delta F_A < 0$$

לפי חוק הזרימות על החתך בצומת A:

$$(3.3) \quad \begin{aligned} \sum \vec{F}_A &= 0 \\ \underbrace{F_{in} - F_c}_{-\Delta F_A} + F_r + F_d &= 0 \\ -\Delta F_A + F_r + \Delta F_A &= 0 \\ \therefore F_r &= 0 \end{aligned}$$

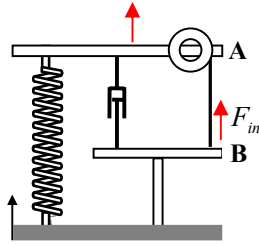
מכיוון ש-  $F_r$  ו-  $F_d$  זורמים לתוך החתך והוגדר שכאשר הזרימה גדולה שווה לאפס אזי כל הזרימה המשלימה תעבור דרך הקשת החד-כיוונית. התנהגות הזרימה ברמת הייצוג מראה שכל זרימת העודף ממקור הזרימה הקבוע עוברת דרך הקשת החד-כיוונית מ-B לכיוון צומת A ולכן צומת A מקוצרת לצומת B כפי שניתן לראות באיור 3.23.



### איור 3.23 צומת B מקוצרת לצומת A

הזרימה נמדדת בקשת  $\langle 0, B \rangle$  תהיה זרימה השווה בגודלה למקור הזרימה המתחלף  $F_{out} = F_{in}$ .

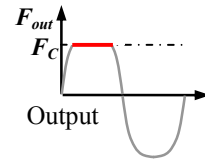
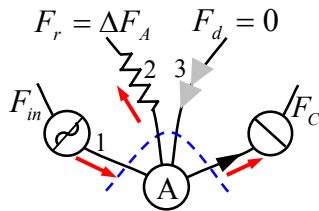
התנהגות הכוחות ברמה ההנדסית



איור 3.24 המנגנון מעביר כוח חיובי מרכיב A לרכיב B

כאשר הכוח החיובי המופעל על רכיב A קטן מכוח ערך הסף שנקבע על ידי קפיץ הכח הקבוע, משוואות הכוחות הן אותן משוואות זרימה, שפותחו ברמת הייצוג ומאפיינות גם את התנהגות המערכת המכנית שהתקבלה. הכוח שמופעל על A עובר דרך התומך והקפיץ הקבוע ל-B. הקפיץ המחובר בין A לאדמה נשאר רפוי ולכן אינו מפעיל כוח.

$$F_{in} \geq F_c \quad \blacksquare \quad 2.$$



איור 3.25 זרימות בחתך A כאשר הזרם במקור  $F_{in}$  גבוה מהזרם הקבוע  $F_c$

התנהגות הזרימה ברמת הייצוג

כאשר הזרימה החיובית במקור הזרימה  $F_{in}$  גדולה/שווה למקור הזרימה הפנימי הקבוע  $F_c$  (ערך סף):

$$(3.4) \quad F_{in} - F_c = \Delta F_A \geq 0$$

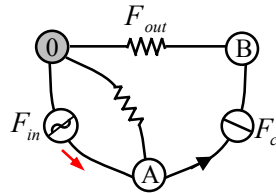
יש יותר זרימה שנכנסת לחתך מאשר יוצאת לכן שאר הקשתות ישאפו לפרוק את העודף. תנאי זרימה בקשת חד כיוונית:

$$(3.5) \quad F_d = 0 \leftarrow \Delta F_A \geq 0$$

לפי חוק הזרימות על החתך בצומת A:

$$(3.6) \quad \begin{aligned} \sum \vec{F}_A &= 0 \\ \underbrace{F_{in} - F_c}_{\Delta F_A} + F_r + F_d &= 0 \\ \Delta F_A + F_r + 0 &= 0 \\ \therefore F_r &= -\Delta F_A \end{aligned}$$

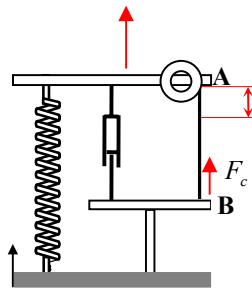
מכיוון ש-  $F_r$  ו-  $F_d$  זורמים מהחתך החוצה והוגדר שזהו כיוון מנוגד לכיוון הקשת החד-כיוונית, כל זרימת העודף ממקור הזרימה הקבוע עוברת דרך קשת ההתנגדות מצומת A לצומת 0 והקשת החד-כיוונית אינה קיימת מבחינת המערכת כפי שניתן לראות באיור 3.26.



**איור 3.26** עודף זרימה מצומת A חוזר לאדמה דרך קשת ההתנגדות

הזרימה הנמדדת בקשת  $\langle 0, B \rangle$  תהיה זרימה השווה בגודלה למקור הזרימה הקבוע  $F_c = F_{out}$ .

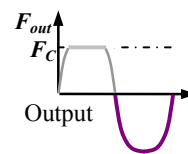
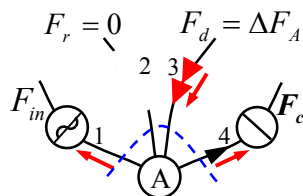
**התנהגות הכוחות ברמה ההנדסית**



**איור 3.27** התנהגות המנגנון תחת העמסת יתר

כאשר הכוח החיובי המופעל על רכיב A גדול מכוח ערך הסף שנקבע על ידי קפיץ הכח הקבוע, משוואות הכוחות הן אותן משוואות זרימה שפותחו ברמת ומאפיינות גם את התנהגות המערכת המכנית שהתקבלה. בפועל, הכוח שמופעל על A מותח את הקפיץ הקבוע שפתיחתו מפעילה כוח חיובי קבוע על B. התומך, כמו הקשת החד-כיוונית מתנתק, נפתח ואינו משפיעה על המערכת. כל הכוח העודף שיופעל על A יעבור ישירות דרך הקפיץ חזרה לאדמה.

3. ■  $F_{in} < 0$



**איור 3.28** זרימות בחתך A כאשר הזרם במקור  $F_{in}$  זורם מחוץ לחתך

### התנהגות הזרימה ברמת הייצוג

כאשר מקור הזרימה  $-F_{in}$  מפעיל זרימה שלילית אין חשיבות לגודל מקור הזרימה הפנימי הקבוע  $F_c$  (ערך סף):

$$(3.7) \quad -F_{in} - F_c = \Delta F_A < 0$$

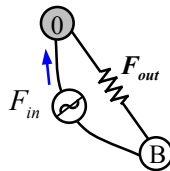
יש יותר זרימה שיוצאת מהחתך מאשר נכנסת לכן שאר הקשתות ישאפו להשלימה. תנאי זרימה בקשת חד כיוונית:

$$(3.8) \quad F_d = \Delta F \leftarrow \Delta F_A < 0$$

לפי חוק הזרימות על החתך בצומת A:

$$(3.9) \quad \begin{aligned} \sum \vec{F}_A &= 0 \\ -F_{in} - F_c + F_r + F_d &= 0 \\ -\Delta F_A + F_r + \Delta F_A &= 0 \\ \therefore F_r &= 0 \end{aligned}$$

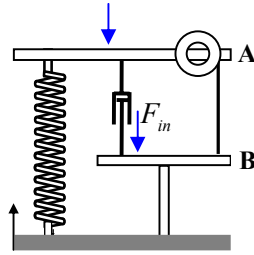
מכיוון ש-  $F_r$  ו-  $F_d$  זורמים לתוך החתך והוגדר שכאשר הזרימה גדולה שווה לאפס אזי כל הזרימה המשלימה תעבור דרך הקשת החד-כיוונית ולכן התנהגות הזרימה ברמת המערכת מראה שכל זרימת העודף ממקור הזרימה הקבוע עוברת דרך הקשת החד-כיוונית מ-B לכיוון צומת A. לכן צומת A מקוצרת לצומת B כפי שניתן לראות באיור 3.29.



**איור 3.29** צומת B מקוצרת לצומת A

הזרימה נמדדת בקשת  $\langle 0, B \rangle$  תהיה זרימה השווה בגודלה למקור הזרימה המתחלף  $F_{out} = F_{in}$  אבל בכיוון השלילי.

**התנהגות הכוחות ברמה ההנדסית**



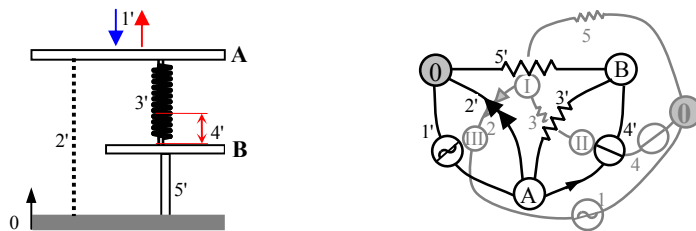
**איור 3.30** התנהגות המנגנון תחת עומס שלילי

כאשר כוח שלילי מופעל על רכיב A, אין יותר משמעות לערך הסף שנקבע על ידי קפיץ הכח הקבוע, כפי שניתן לראות ממשוואות זרימה שפותחו ומאפיינות גם את התנהגות המערכת המכנית שהתקבלה. הכוח שמופעל על A מועבר ישירות ל-B דרך התומך המהווה חיבור קשיח במצב לחיצה. שאר הרכיבים אינם משפיעים על B.

ניתן לראות כי המערכת המתקבלת הינה חוקית, והיא עומדת בדרישות התכן. כמו כן, בהשוואה בין המערכת המכנית לבין הגרף והמעגל החשמלי ניתן לראות התאמה של ההתנהגות הן ברמה ההנדסית והן ברמת הייצוג בגרף.

**3.3.2 מנגנון נוסף להגבלת כוח**

באותו אופן שנבנה הייצוג שהתקבל ממנגנון השדכן/מעגל קטימה, נבנה הגרף השני בתחום המכניקה (איור 3.17 (ב)). הייצוג של המעגל האלקטרוני השני עובר את אותם צעדים שעבר הייצוג הראשון. הוא עובר טרנספורמציה מייצוג דואלי חזרה למשותף ונבנה באותה צורה שיטתית. המנגנון שמתקבל אומנם מבצע את אותה פעולה (אותה פונקציה) אך המבנה והתנהגות שלו שונה. המנגנון המתקבל כולל כבל וקפיץ אשר עבר מתיחה לפני חיבורו ל-B כפי שניתן לראות באיור 3.31.

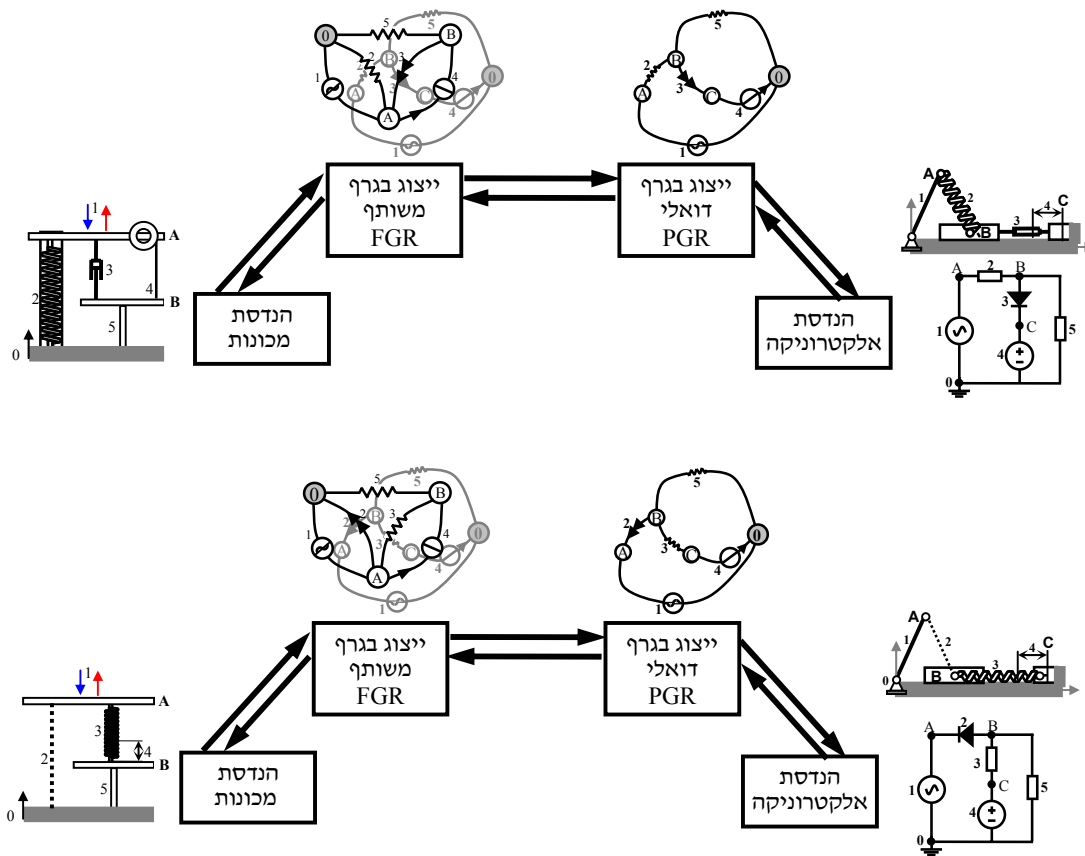


**איור 3.31** בניית מנגנון נוסף להגבלת כוח

טרנספורמציה מדואלי לגרף המשותף עבור הפתרון השני שנמצא והמנגנון המתקבל ממנו.

### 3.3.3 סיכום תכן מנגנונים מגבילי כוח

הייצוג הדואלי מסוג גרף פוטנציאלים (PGR), אפשר להעביר ידע לתחום המקורי אשר הוגדר על ידי ייצוג FGR. ידע הועבר מתחום האלקטרוניקה והמכניקה, אשר פעלו לפי מתחים ותזוזות, לתחום המכניקה וכוחות ליצירת מנגנונים עם אפליקציות ידועות לתעשייה. התהליך היה ברובו שיטתי, כאשר המיקוד היה בהעברת ידע מבני וטופולוגי באמצעות הייצוג וטרנספורמציה לייצוג הדואלי שלו. אנליזה של ההתנהגות בוצעה רק בסופו של תהליך התכן. ניתן לסכם את הדוגמה באיור 3.32.



איור 3.32 שיטת התכן באמצעות הייצוג הדואלי והקונספטים שהתקבלו על ידי העברת הידע

### 3.4 המרת מגביל הכוח הליניארי לאנגולרי באמצעות הגרף המשותף

בחלק הקודם פותחו מנגנונים ליניאריים המגבילים כוח ומונעים עומס יתר. בחלק זה, נעשה שימוש בייצוג המשותף על מנת לבצע טרנספורמציה ממנגנונים ליניאריים להגבלת כוח, למנגנונים אנגולריים הנקראים מגבילי מומנט. כפי שפורט בפרק השני, חלק 2.3, תכן ליניארי לאנגולרי מאפשר להגדיל את הקונספטים המתקבלים מהשיטה וגם מהווה צעד ביניים המקל על תהליך התכן.

מכיוון שהייצוג המשותף במקרה זה הינו גרף זרימות FGR, דרוש להתאים את הייצוג למעבר לאנגולרי. בייצוג מסוג FGR, כפי שהוגדר בפרק המבוא, כל צומת מהווה חתך המקיים את חוק הזרימות וכל קשת מייצגת וקטור זרימה ( $F$ ). בעת ביצוע הטרנספורמציה מהייצוג למערכת ההנדסית האיזומורפית (מכניקה ליניארית), משתנים אלו הופכים לרכיבים עליהם מתקיים שיווי משקל, וכוחות או רכיבים המעבירים כוחות. את הייצוג והטרנספורמציה ניתן לראות באיור 3.33.

ייצוג	קשת וצמתים בייצוג	הייצוג המכני הליניארי התואם
FGR		

איור 3.33 המרה של קשת מהגרף לאלמנטים מכניים המועמסים בכוח ליניארי

מעבר לייצוג הנדסי אנגולרי הוא בעצם מעבר למערכות בהן פועלים מומנטים, כאשר בדומה למהירות אנגולרית, כוחות הפועלים במרחק מציר ומאונכים אליו מפעילים מומנט סביב ציר זה. על מנת לעבור לייצוג הנדסי אנגולרי, צריך להוסיף את הזרוע בה פועל הכוח יחסית לציר ייחוס. את זרוע זאת ניתן להוסיף לייצוג הגרפי כערך לכל צומת ( $r$ ). שוב, כמו בפרק השני, כל האלמנטים הליניאריים מוסטים אחד מהשני כאשר חוליה בעלת רדיוס מפרידה ביניהם. החוליה ניתנת לייצוג, לפי התכן הדרוש, על ידי כל גוף קשיח המסוגל להעביר מומנטים. את טרנספורמציה זאת ניתן לראות באיור 3.34.

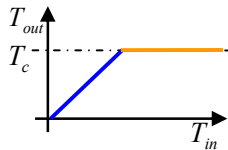
ייצוג	קשת וצמתים בייצוג	הייצוג המכני האנגולרי התואם
FGR		

איור 3.34 המרה של קשת מהגרף לאלמנטים המפעילים מומנטים



### 3.4.1 תכנון מגביל מומנט על בסיס מנגנון להגבלת כוח

על פי דפוס הפעולה המתואר, ניתן לבנות מערכות הנדסיות אנגולריות להעברת מומנט. המנגנונים הליניאריים שפותחו בחלק הקודם מהווים בסיס לקונספטים חדשים. מכיוון שכבר פותח מנגנון להגבלת כוח ליניארי הצעד הבא הוא לפתח מגביל מומנט. מגבילי מומנט נפוצים בתעשייה כאמצעי הגנה למכשור מפני עומס יתר של מומנטים. ניתן לייצג את עבודת מגביל המומנט כפונקציה המראה יחס בין המומנט בכניסה ליציאה כפי שמוצג באיור 3.35.



■ מומנט מועבר ממניע למונע  $T_{out} = T_{in}$

■ המניע מפעיל מומנט קבוע על המונע  $T_{out} = T_c$

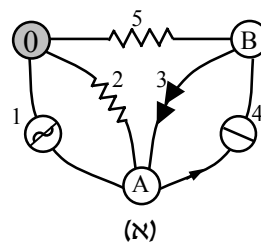
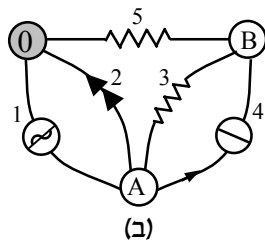
#### איור 3.35 גרף המציג יחס בין מומנט הכניסה למומנט היציאה במגביל מומנט

כל עוד המומנט המופעל קטן מערך הסף, המומנט מועבר ללא הפרעה בין המניע למונע. כאשר המומנט המופעל עובר את ערך הסף הנקבע מראש  $T_c$  יש נתק מכני בין המניע למונע ומאפשר הגברת המומנט של המניע ללא השפעה על המונע אם המומנט של המניע יורד אל מתחת לערך הסף, שוב יתבצע קשר מכני בין חלקי המערכת והמומנט יועבר.

#### בחירת הייצוג המתאים

שיטת התכן שהופעלה ב-3.3 אומנם הניבה שני פתרונות הנדסיים בצורה של שני מנגנונים שנבנו במכניקה, אך הייצוגים הגרפיים גם יכולים להעיד על "מעשיות" של מערכת. כל הייצוגים שנבנים כהלכה הם ייצוגים חוקים שניתן לבנות מהם קונספטים הנדסיים תקפים, אך לפעמים ניתן לזהות כי קונספט הינו פחות מתאים מבחינה הנדסית מעשית.

ניתן לראות זאת משני הייצוגים או קונספטים שעבורם נבנו מערכות הנדסיות בחלק הקודם. הגרף המופיע באיור 3.36 (א) התאים לדרישות התכן, וכפי שאנליזה של התנהגות ברמת הייצוג בחלק 3.2 הראתה, הקשת החד-כיוונית התנתקה בין הצמתים כאשר הזרימה עברה את ערך הסף. התנהגות הייצוג תואמת את תיאור התנהגות מגביל המומנט. לעומתו, אנליזה של הייצוג השני שנמצא כפי שמופיע באיור 3.36 (ב), מצביעה על תופעה אחרת. כאשר מופעלת זרימת יתר, הקשת החד-כיוונית מקצרת את מקור הזרימה המתחלף לאדמה. אין התנתקות מעמיסת יתר, אלה עצירה של מקור הזרימה. התנהגות זאת, אומנם ניתנת לבנייה, אך אינה מעשית במגביל המומנט מכיוון שהייצוג מעיד על עצירה פיזית של מקור המומנט, דבר העלול לגרום לנזק למקור. לכן הייצוגים במקרה זה מאפשרים ראייה קדימה, לבחירת הייצוג שייניב את הקונספט היעיל ביותר.

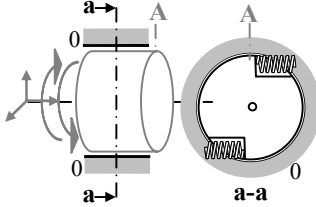
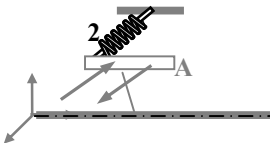
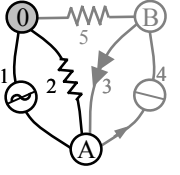
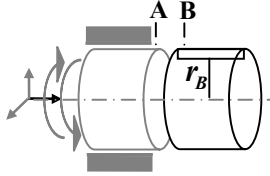
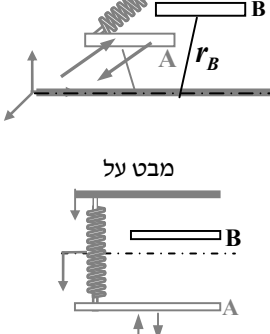
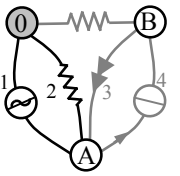
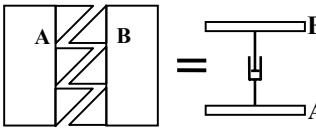
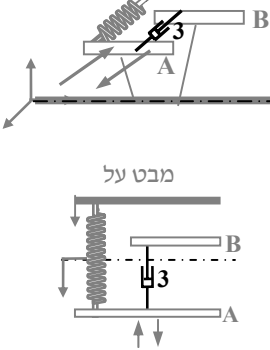
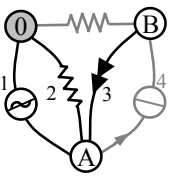


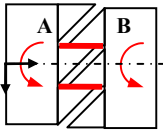
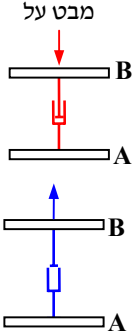
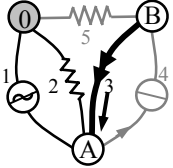
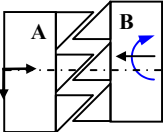
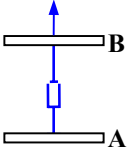
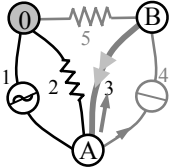
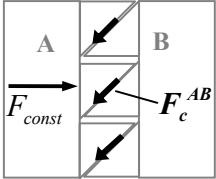
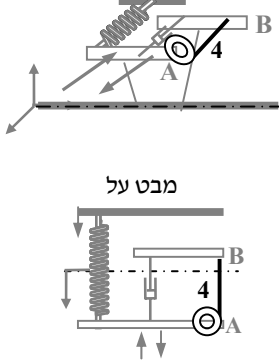
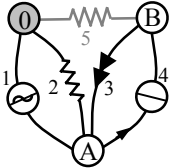
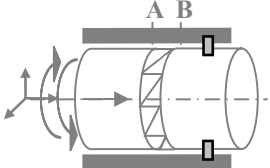
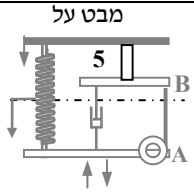
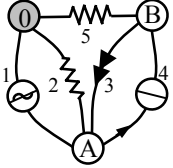
איור 3.36 שני ייצוגי FGR שהתקבלו כפתרון להגבלת הזרימה. הפתרון המעשי הינו ייצוג (א)

**שלב 8. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**

אחרי שנבחר הייצוג המתאים להעברת ידע מאיור 3.36 (א), וכבר נבנתה המערכת המכנית הליניארית שלו, ניתן להמירו למגביל מומנט. בניית המערכת תתבצע בטבלה כאשר מתווספת עמודה המתארת את שלבי הביניים של טרנספורמציה של המערכת הליניארית לאנגולרית.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג אנגולרי ברמה ההנדסית	ייצוג ליניארי ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
ציר ייחוס/אדמה של המערכת המכנית.			הוספת צומת 0.	
רכיב A מקבל רדיוס $r_A$ כך שעליו ניתן להפעיל כוחות סביב ציר הייחוס וסה"כ הכוחות יהיו בשווי משקל: $\sum F_A = 0$ רכיב מתאים יותר להעברת מומנטים יהיה גלילי.			הוספת צומת A עליה מופעלים זרימות המקיימות $\sum F_A = 0$	
הפעלת כוח מתחלף על שפת רכיב A: $F = \pm F_A$ כתוצאה מהכוח הפועל ברדיוס סביב הציר מופעל מומנט מתחלף על רכיב A: $T_0 = \pm F_A \times r_A$			הוספת קשת (1) מקור זרימה מתחלף על צומת A. $F = \pm F_A$ הזרימה מופעלת ביחס לצומת ייחוס.	

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג אנגולרי ברמה ההנדסית	ייצוג ליניארי ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>הוספה של רכיב קפיץ בין A (הנקודה עליה מופעל הכוח) לבין האדמה. קפיץ זה סופג את הפרש הכוח המופעל על A מהמומנט המופעל.</p> $F = F_r$			<p>הוספה של קשת התנגדות (2) בין צומת A לאדמה בה זורמת זרימה:</p> $F = F_r$	
<p>רכיב B מקבל רדיוס <math>r_B</math> כך שעליו ניתן להפעיל כוחות סביב ציר הייחוס וסה"כ הכוחות יהיו בשווי משקל:</p> $\sum F_B = 0$ <p>רכיב מתאים יותר להעברת מומנטים יהיה גלילי.</p>			<p>הוספת צומת B עליה מופעלים זרימות המקיימות:</p> $\sum F_B = 0$	
<p>הוספה של רכיב בין אלמנטים A ו-B, כאשר רכיב B מתוכנן להעביר כוח חיובי בלבד לאלמנט A.</p> <p>הפעלת ידע הנדסי על מנת לתכנן אלמנט משונן המעביר מומנט בכיוון אחד בלבד.</p>			<p>הוספה של קשת זרימה חד-כיוונית (3) המאפשרת מעבר זרימה חיובית בלבד מצומת A לצומת B.</p>	

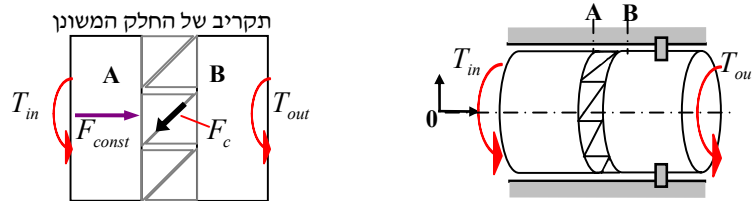
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג אנגולרי ברמה ההנדסית	ייצוג ליניארי ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>כוח חיובי על אלמנט B מעביר מומנט חיובי ל-A.</p>		<p>מבט על</p> 	<p>בקשת (3) עוברת רק זרימה חיובית, לכן הזרימה הנכנסת לצומת A הינה חיובית בלבד.</p>	
<p>כוח שלילי על אלמנט B אינו מעביר מומנט (מחליק) ל-A.</p>			<p>זרימה שלילית בקשת (3) אינה עוברת מ-B ל-A.</p>	
<p>הוספה של כח קבוע <math>F_c^{AB}</math> המאפשר העברה של מומנט חיצוני מ-A ל-B וקובע את ערך הסף.</p> <p>חיכוך סטטי <math>F_s</math> הנקבע על ידי כוח הצמדה <math>F_{const}</math> יהווה כוח קבוע בין A ל-B.</p> $F_c^{AB} = F_s$ $F_c^{AB} \approx F_{const}$			<p>הוספה של קשת מקור זרימה קבוע (4) מצומת A לצומת B. מפעיל זרימה חיובית על B. מקור הזרימה הקבוע מהווה את ערך הסף בו תבוצע הגבלת הזרימה.</p> $F_{A \rightarrow B} = F_c^{AB}$	
<p>חיבור קשיח בין אלמנט B לאדמה. מדידת הכח המופעל על חיבור זה מוכפל בזרוע מאפשר למדוד את המומנט המופעל בין B לאדמה.</p>		<p>מבט על</p> 	<p>הוספה של קשת בעלת התנגדות נמוכה (5) המאפשרת למדוד את הזרימה בין צומת B לצומת האדמה.</p>	

## שלב 9. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת

כפי שהתבצעה במגביל הכוח, מופעלת המערכת הכוללת על מנת לוודא התנהגות תקינה של מגביל המומנט. בגלל שגם מגביל המומנט וגם מגביל הכוח התקבלו מאותו גרף משותף, ניתן להשוואת בין התנהגות הזרימה בגרף ה-FGR כפי שמתואר בחלק 3.3, לבין התנהגות הכוחות והמומנטים הפועלים במערכת המכנית המתקבלת.

### התנהגות המומנטים ברמה ההנדסית

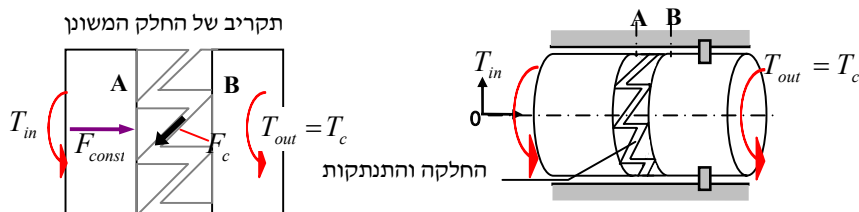
$$1. F_{in} < F_c$$



**איור 3.37** מגביל המומנט הפועל תחת העמסה  $T_{in} = T_{out}$

רכיב הכוח  $F_{in}$  של המומנט המופעל  $T_{in}$  קטן מערך הסף  $F_c$ , הנקבע על ידי  $F_{const}$ . כתוצאה מכך, אין מספיק כוח להתגבר על הכוח הקבוע שנקבע  $F_c$  ואין החלקה בין A ל-B. החיבור המשונן המייצג זרימה חד-כיוונית מכנית הוא בקצר או במילים אחרות, המומנט המופעל על A מועבר ישירות ל-B.

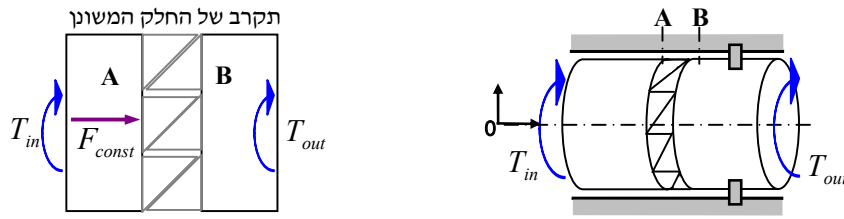
$$2. F_{in} \geq F_c$$



**איור 3.38** מגביל המומנט תחת העמסה  $T_{in} = T_c$

רכיב הכוח  $F_{in}$  של המומנט המופעל  $T_{in}$  גדול מערך הסף  $F_c$ , הנקבע על ידי  $F_{const}$ . כתוצאה מכך, הכוח המופעל מתגבר על הכוח הקבוע שנקבע  $F_c$  וקיימת החלקה בין A ל-B. החיבור המשונן המייצג זרימה חד-כיוונית מכנית הוא בנתק או במילים אחרות, המומנט המופעל על A מועבר ישירות ל-B רק בערך של  $T_c$ . ערך נמוך מערך זה, יגרום להשתלבות מחודשת בין החלקים.

$$F_{in} < 0 \quad 3.$$

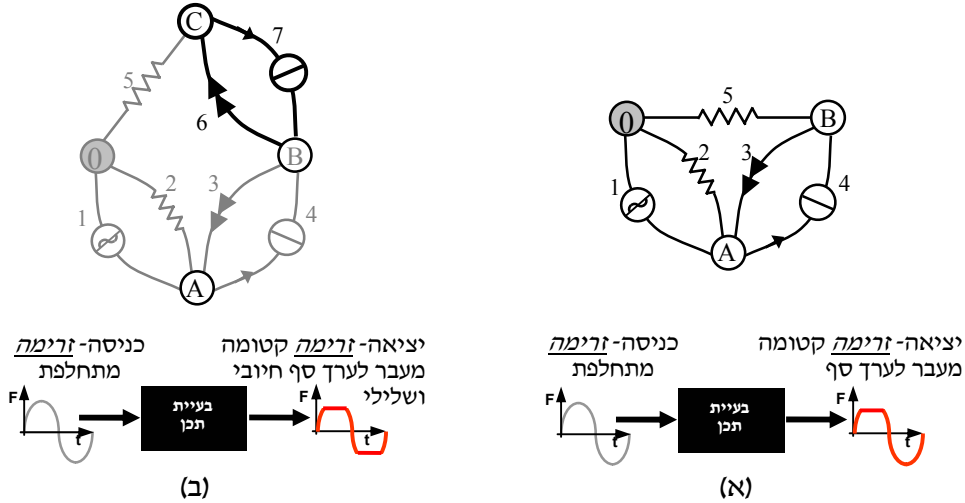


**איור 3.39** מגביל המומנט תחת העמסה  $T_{in} = T_{out}$

החיבור המשונן המייצג זרימה חד-כיוונית מכנית תוכנן כך שכאשר מופעל מומנט שלילי על רכיב A, הוא יעובר במלאו לרכיב B ויהיה בלתי-תלוי בגודל המומנט המופעל או גודל ערך הסף  $F_c$ . המומנט המופעל על A מועבר ישירות ל-B.

### 3.4.2 תכנון מגביל מומנט דו-כיווני

בחלק הראשון פותח מגביל מומנט חד-כיווני אבל ניתן גם לפתח מצמידים להגבלת מומנט דו-כיווניים שהינם נפוצים יותר ביישומים תעשייתיים. אין צורך בפיתוח מחדש, מכיוון שמצמד דו-כיווני מבוסס על ייצוג בגרף שהוא הרחבה של הייצוג החד-כיווני, ודרוש רק להמשיך את תהליך הבנייה תוך התחשבות בחלק בייצוג הדואלי שהתווסף לייצוג ה-FGR.

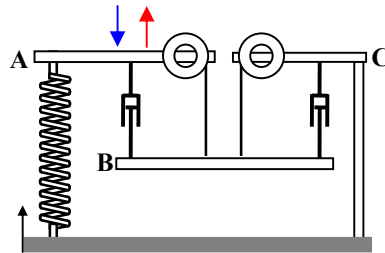


**איור 3.40** ייצוג גרפי ופונקציה של מגביל זרימה חד-כיווני ודו-כיווני

תוספת סימטרית של קשת חד-כיוונית ומקור זרימה קבוע למגביל (א), מוביל לקבלת ייצוג הדו-כיווני (ב) המאפשר הגבלת זרימה גם מעבר לערך סף שלילי.

**שלב 8. בניית המערכת הליניארית בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**

הרחבה לבניית המערכת מתבצעת באמצעות העברת ידע באופן שיטתי מגרף זרימות FGR למערכת מכנית. בחלק זה רק יתווספו איברי הייצוג הגרפי הדו-כיווני. בניית המערכת התבצעה תחילה כפי שנעשה החלק 3.3, במערכת חד-ממדית לפי אותה שיטה והתקבל מגביל כוח דו-כיווני כפי שמוצג באיור 3.41.

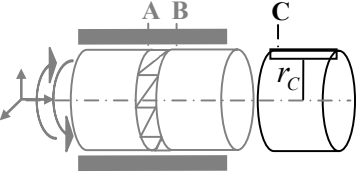
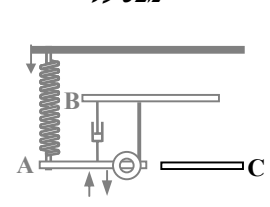
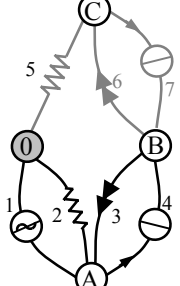
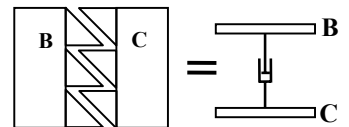
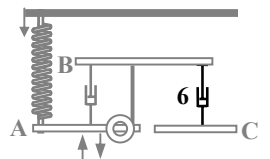
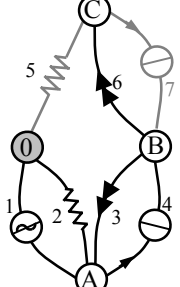
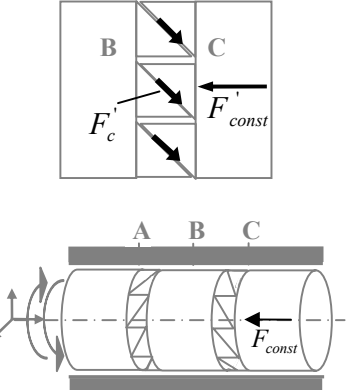
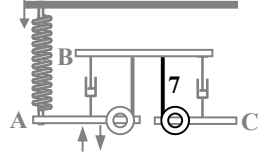
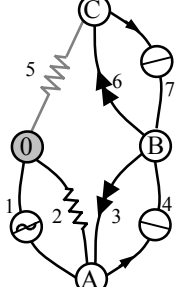


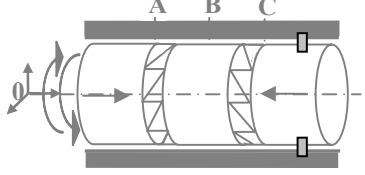
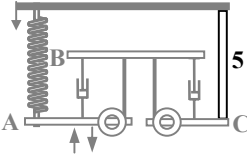
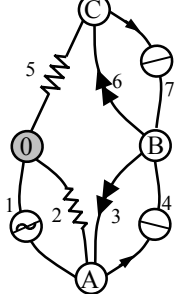
**איור 3.41** מנגנון להגבלת כוח דו-כיווני

**שלב 8. בניית המערכת האנגולרית בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף**

אחרי שנבנתה המערכת המכנית הליניארית שלו, ניתן להמיר את הייצוג למגביל מומנט דו-כיווני. בניית המערכת תתבצע בטבלה כאשר מתווספים רק השלבים התואמים את הקשתות והצמתים שהתווספו לייצוג.

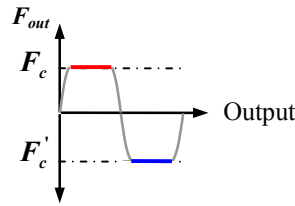


תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג אנגולרי ברמה ההנדסית	ייצוג ליניארי ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב C מקבל רדיוס <math>r_C</math> כך שעליו ניתן להפעיל כוחות סביב ציר הייחוס וסה"כ הכוחות יהיו בשווי משקל:</p> $\sum F_C = 0$ <p>רכיב מתאים יותר להעברת מומנטים יהיה גלילי.</p>		<p>מבט על</p> 	<p>הוספת צומת C עליה מופעלים המקיימות:</p> $\sum F_C = 0$	
<p>הוספה של רכיב בין אלמנטים B ו-C, כאשר רכיב B מתוכנן להעביר כוח חיובי בלבד לאלמנט C.</p> <p>חזרה על השלב הקודם בו התווסף רכיב חד-כיווני.</p>		<p>מבט על</p> 	<p>הוספה של קשת זרימה חד-כיוונית (3) המאפשרת מעבר זרימה חיובית בלבד מצומת B לצומת A.</p>	
<p>חזרה על השלב הקודם בו התווסף רכיב כוח קבוע.</p> <p>ניתן גם לקבוע ערך סף שונה לכל כיוון:</p> $F_c \neq F'_c$		<p>מבט על</p> 	<p>הוספה של קשת מקור זרימה קבוע (7) מצומת C לצומת B כך ש-C מפעיל זרימה חיובית על B. מקור הזרימה הקבוע מהווה את ערך הסף בו יתבצע הגבלת הזרימה.</p> $F_{C \rightarrow B} = F'_c$	

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג אנגולרי ברמה ההנדסית	ייצוג ליניארי ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>חיבור קשיח בין אלמנט C לאדמה. מדידת הכח המופעל על חיבור זה מוכפל בזרוע מאפשר למדוד את המומנט המופעל בין C לאדמה.</p>		<p>מבט על</p> 	<p>הוספה של קשת בעלת התנגדות נמוכה (5) המאפשרת למדוד את הזרימה בין צומת C לצומת האדמה.</p>	

**שלב 9. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת**

הבדיקה כאן נעשית כמו שנעשתה במגביל מומנט החד-כיווני כאשר כאן ההתמקדות היא במצבים הקריטיים – המצבים בה מתבצעת הגבלת הזרימה. מכיוון ש-A הינו הרכיב המניע, הזרימה מעוברת לפי הסדר  $A \rightarrow B \rightarrow C$  ולכן  $F_c' = -F_c$ .

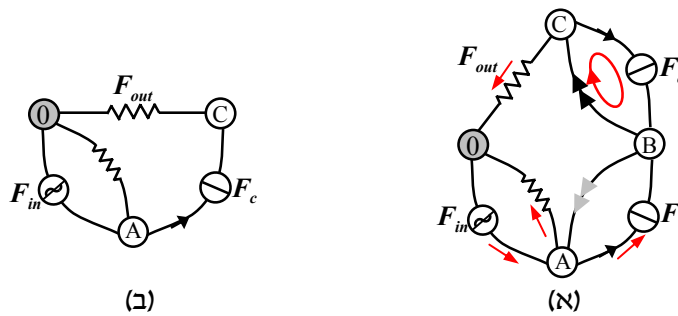


**איור 3.42** פונקצית זרימה מוגבלת דו-כיוונית  $|F_{in}| \geq |F_c|$

**1.  $F_{in} \geq F_c$**

**התנהגות הזרימה ברמת המערכת**

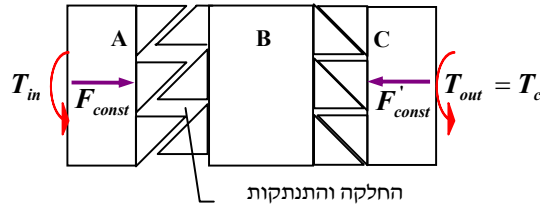
כאשר הזרימה החיובית במקור הזרימה  $F_{in}$  גדולה/שווה למקור הזרימה הפנימי הקבוע  $F_c$  (ערך סף), הקשת החד-כיוונית  $\langle A, B \rangle$  נמצאת בנתק, ועודף זרימה חוזר דרך קשת ההתנגדות לאדמה. במקור הזרימה הקבוע  $F_c'$  אין לאן לזרום אלא חזרה דרך הקשת החד-כיוונית  $\langle B, C \rangle$  ולכן צומת B מקוצרת לצומת C ועל קשת  $\langle 0, C \rangle$  זורם המקור הקבוע  $F_c$ .



**איור 3.43** התנהגות הייצוג תחת זרימת יתר בכיוון חיובי

צומת B מקוצרת לצומת C וקשת  $\langle A, B \rangle$  החד כיוונית בנתק (א). כתוצאה מכך, הזרימה הנמדדת בקשת  $\langle 0, C \rangle$  תהיה זרימה השווה בגודלה למקור הזרימה הקבוע  $F_c$  (ב).

**התנהגות המומנטים ברמת ההנדסית**



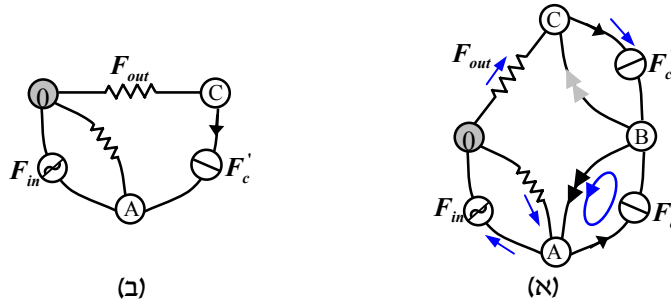
**איור 3.44 התנהגות המגביל תחת העמסת יתר בכיוון חיובי**

המומנט שמפעיל A על B מנותק כאשר המומנט עובר את ערך הסף שנקבע על ידי הכח הקבוע  $F_{const}$ . במקרה זה, A מסוגל להעביר מומנט בגודל  $T_c$  בלבד. לעומתו, החיבור המשונן השני מופעל בכיוון בו הוא תמיד מעביר מומנט חיובי ובלתי-תלוי במומנט ערך הסף בין B ל-C. המומנט המופעל על B מועבר ישירות ל-C.

$$F_{in} \leq F'_c \cdot 2$$

**התנהגות הזרימה ברמת המערכת**

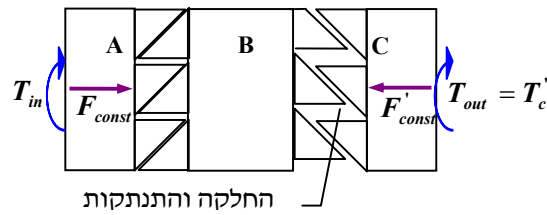
כאשר הזרימה השלילית במקור הזרימה  $F_{in}$  קטנה/שווה לממקור הזרימה הפנימי הקבוע  $F'_c$  (ערך סף), הקשת החד-כיוונית  $\langle C, B \rangle$  נמצאת בנתק ועודף זרימה מוחזר ל-A מהאשמה דרך קשת ההתנגדות. למקור הזרימה הקבוע  $F'_c$  אין לאן לזרום אלא חזרה דרך הקשת החד-כיוונית  $\langle B, A \rangle$  ולכן צומת B מקוצרת לצומת A ועל קשת  $\langle 0, C \rangle$  זורם המקור הקבוע  $F'_c$ .



**איור 3.45 התנהגות הייצוג תחת זרימת יתר בכיוון שלילי**

צומת B מקוצרת לצומת A וקשת  $\langle B, C \rangle$  החד כיוונית בנתק (א). כתוצאה מכך, הזרימה הנמדדת בקשת  $\langle 0, C \rangle$  תהיה זרימה השווה בגודלה למקור הזרימה הקבוע  $F'_c$  (ב).

### התנהגות הזרימה ברמת ההנדסית

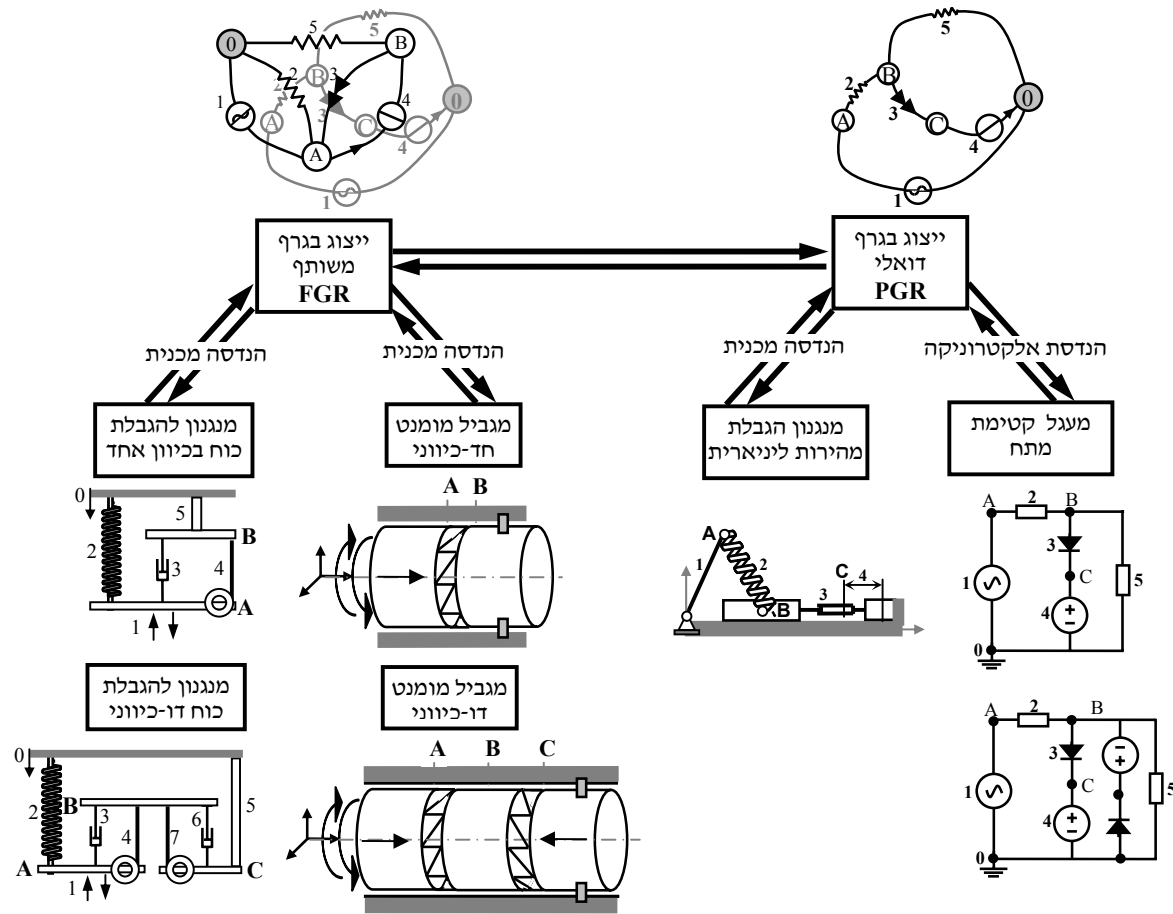


#### איור 3.46 התנהגות המגביל תחת העמסת יתר בכיוון שלילי

המומנט שמפעיל A, הינו בכיוון בו הוא תמיד מעביר מומנט שלילי ובלתי-תלוי במומנט ערך הסף בין A ל-B. לעומתו, החיבור המשונן השני מופעל כאשר המומנט עבר את ערך הסף שנקבע על ידי הכח הקבוע  $F'_{const}$ . במקרה זה, B מסוגל להעביר מומנט בגודל  $T_c'$  בלבד ל-C.

#### 3.4.3 סיכום - תכן מגבילי מומנט

הייצוג המשותף מסוג FGR מאפשר לא רק להעביר ידע בין תחומים שונים, אלא גם להמשיך בתחום המכניקה ולתכן מנגנוני כוח אנגולריים. התהליך ניצל את אותם ייצוגים שכבר נמצאו בחלק 3.3 לקבלת קונספטים שהינם שונים לחלוטין מבנית, אך זהים התנהגותית. התהליך דומה מאוד לתהליך המעבר מליניארי לאנגולרי באמצעות ייצוג משותף PGR אשר נידון בחלק 2.5. המעבר מליניארי לאנגולרי הניב שתי מערכות אשר מתועדות בספרות מקצועית. את כל תהליך התכן שכלל העברת הידע דרך הייצוג הדואלי של מגבילי הכוח, והמעבר מליניארי לאנגולרי לבניית מגבילי המומנט ניתן לסכם באיור 3.47.



איור 3.47 העברת הידע והקונספטים הליניאריים ואנגולריים שהתקבלו

### 3.5 תכנ קונספטואלי ממכניקה למכניקה באמצעות הגרף הדואלי

בחלקים הקודמים של עבודה זו, הוצגו השיטות השונות של ייצוג גרפי ונעשה בהם שימוש לצורכי תכנ מכני. רוב המקרים שהוצגו, התבססו על מציאת פתרונות בעלי ייצוג משותף או דואלי מהנדסת אלקטרוניקה. במקרה של מנגנוני הגבלת כוח ומומנט, היה ניתן גם לתכנן על בסיס הייצוג הדואלי של מנגנוני שדכנים, ובכך לעשות טרנספורמציה ממכניקה למכניקה. מכיוון שמנגנוני השדכנים גם פותחו מהאלקטרוניקה, לא היה זה מעבר מכני טהור. בחלק זה של העבודה תוצג הדואליות כמעבר ממכניקה למכניקה ללא שום התבססות על מעגלים אלקטרוניים.

הדואליות בין מסבכים למכניזמים (Shai,2001) תהווה בסיס לחלק זה ותאפשר לעבוד עם שני תחומים מכנים על מנת לתכנן מערכת חדשה. העיקרון הוא כך: לכל מכניזם הפועל עם מהירויות קיים מסבך דואלי בו פועלים כוחות במוטות המתאימים, שהינם שווי-ערך למהירויות במכניזם ולהפך. דבר זה הינו חשוב ביותר מכיוון שכל מנגנון מכני בעל תכונות מעניינות (יחס מהירויות, כיוון מהירות...), ניתן להעברה למסבך השומר על תכונות מיוחדות אלו. חשוב לציין כי התהליך של טרנספורמציה והעברת הידע בין שני תחומים אלו הוא מבני (structural) לחלוטין ואינו מצריך שיקולי התנהגות (behavior).

#### 3.5.1 תכנ קונספטואלי של מערכת הגבר כוח גדול

הדואליות בין מסבכים למכניזמים תנוצל לתכנון מנגנון בעל יתרון מכני גדול והפעלת כוח באופן הדרגתי. קיימות מערכות הנדסיות בהם נדרש הפעלת כוח ליניארי וקבלת הגבר הדרגתי של הכוח עד ליחס עומס מקסימאלי שניתן להפעיל.

#### שלב 1. הגדרת הבעיה במושגים של התחום ההנדסי המקורי



איור 3.48 הגדרת מערכת המתוכננת להפיק יתרון מכני גדול

התחום ההנדסי המקורי בו מוגדרת הבעיה הוא תחום המכניקה הליניארית כאשר הבעיה תוארה לפי Black Box Function.

#### שלב 2. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג המשותף



איור 3.49 משתני הכוח בפונקציה ההגבר מנוסחים כמשתני זרימה

כפי שנעשה בחלקים קודמים, מגדירים מחדש את המשתנים ההנדסיים (כוחות) כמשתנה משותף (זרימה).

### שלב 3. חיפוש פתרון אפשרי ברמה ההנדסית

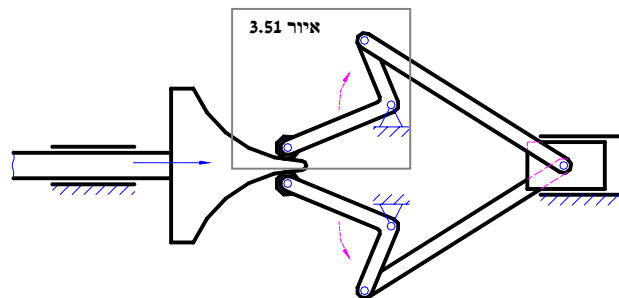
דרישות התכן נוסחו עבור תחומי הנדסה שונים. במקרה זה חיפוש בתחומים אחרים מניב תוצאות, אך מכיוון שידועים ומדווחים הרבה מכניזמים (Chironis, 2001), המגבירים מהירות ויותר קל לתכנן ולבצע אנליזה למערכות הנדסיות המגבירות מהירות, הוחלט לעבור לתחום זה שהינו דואלי לתחום הכוחות.

### שלב 4. טרנספורמציה מייצוג בגרף משותף לייצוג בגרף דואלי

על מנת להרחיב את שדה הפתרונות האפשריים בתחום המכניזמים, מבוצעת טרנספורמציה של דרישות התכן לתחום הדואלי. הבעיה שהוגדרה ברמת הייצוג באמצעות משתני זרימה, תוגדר מחדש במונחי פוטנציאל בייצוג הדואלי. הפונקציה המתארת את דרישת התכן הופכת לפונקציה להגברת פוטנציאל.

### שלב 5. חיפוש פתרון הנדסי ברמה ההנדסית הדואלית

בשלב זה, משתנה הפוטנציאל (הדואלי) עובר המרה באמצעות טבלה 3.3, לתחומי ההנדסה הדואליים. אחד מתחומים אלו, בו קיימים המון פתרונות בספרות המקצועית, הוא תחום מנגנונים להגברת מהירות. מתוך כמה מערכות להגברת מהירות שהתקבלו, נבחרה מערכת מכנית אחת כפיתרון אפשרי היות והכניסה והיציאה של המערכת ליניאריים ופועלים לאורך קו ישר. המערכת מורכבת מפיקה המניעה שני עוקבים המחוברים למכניזם ארבע חוליות. מכניזם זה מאיץ את המחליק בקצות המהלך שלו. המכניזם מופיע באיור 3.50. בבואת המהירות של המכניזם מגלה כי יחס המהירות הכי גדול מתקבל כאשר המחליק מניע והפיקה מונעת.



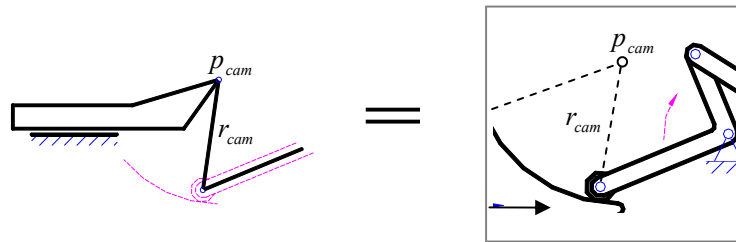
איור 3.50 מכניזם להגברת מהירות (Chironis)

### שלב 6. המרת הפתרון הנבחר מהרמה ההנדסית לרמת המערכת

הפתרון שנמצא בשלב הקודם הוא פתרון שעונה על דרישת התכן במונחים הדואליים. בשלב זה, נדרש שוב להמיר את הפתרון מהתחום ההנדסי הדואלי לייצוג איזומורפי בגרף המתאים. על מנת לבנות ייצוג מסוג גרף פוטנציאל PGR מתאים, צריך קודם להמיר את העוקב והפיקה לרכיבים אקווילנטים מכיוון שקשה

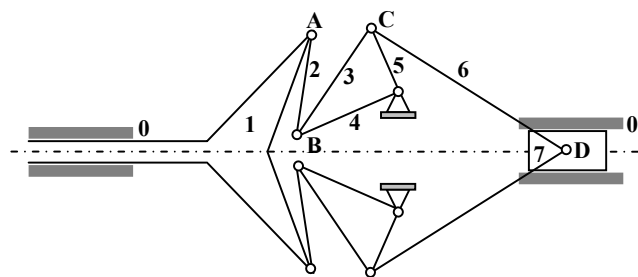


למדל את המהירות שנגרמת על ידי הצורה הגיאומטרית של העוקב והפיקה. המרה זאת מתבצעת עוד בתחום המכניזם ודורשת ידע ספציפי למכניזם. הרכיבים המתקבלים הינם מחליק וחוליה.



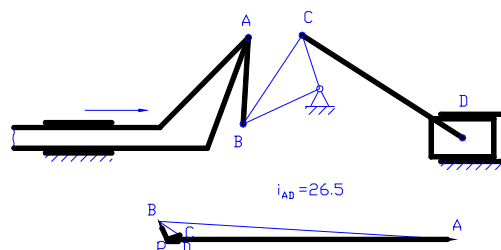
### איור 3.51 החלפת העוקב והפיקה בחוליה ומחליק אקוולנטים

החוליה האקוולנטית מתקבלת מרדיוס עקמומיות של הפיקה והחוליה המחליקה מתנועת הפיקה.



### איור 3.52 מכניזם להגברת מהירות לאחר החלפת העוקב והפיקה

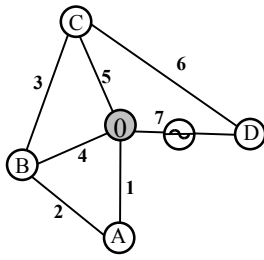
עקב סימטריה של המכניזם, ניתן למדל רק החצי מכניזם ב-PGR ולהוסיף את החלק הסימטרי לאחר בנייה של המערכת ההנדסית. דבר זה נכון לעשות מכיוון שקיימים צמתים בחלק הסימטרי עם אותה מהירות ובמידול דבר זה מתבטא באותו פוטנציאל. עבור מקרה של הגבר מקסימאלי בקירוב, חולית המחליק מניעה והמכניזם נמצא במצב כפי שמתואר באיור 3.53.



### איור 3.53 המכניזם ובבואת המהירות שלו קרוב לנקודת הגבר מהירות מקסימאלית

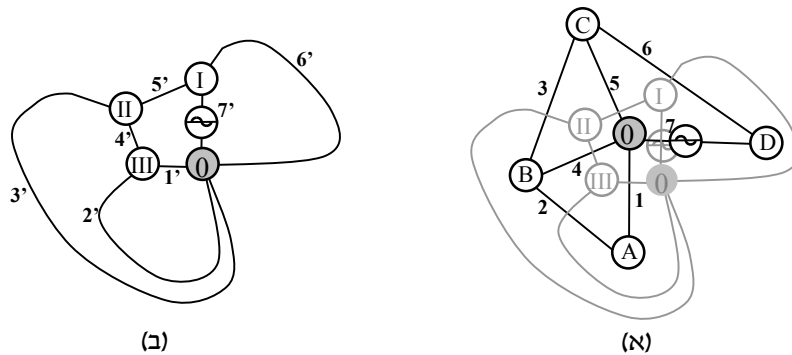
במצב זה הוא נמצא בהגבר של  $i_{AD} = 26.5$ , וכאשר A ימצא ישירות מעל B, יחס זה ישאף לאינסוף.

הגרף המתקבל באיור 3.54 הוא ייצוג מדויק של הפתרון ההנדסי המתאר את מבנה והתנהגות הפתרון במונחים מערכתיים ומשמר את תכונותיו.



איור 3.54 ייצוג PGR איזומורפי לחלק הסימטרי של המכניזם

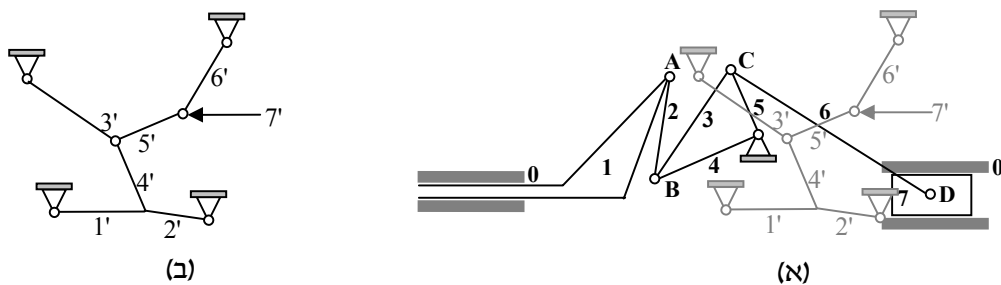
שלב 7. טרנספורמציה מייצוג בגרף דואלי לייצוג בגרף משותף



איור 3.55 בניית הייצוג הדואלי על גבי הייצוג המקורי

שלב 8. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג המשותף

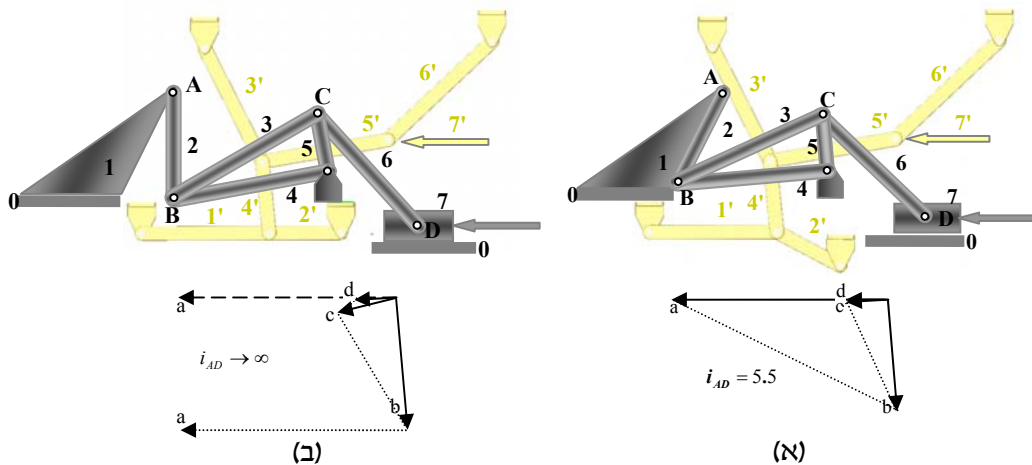
בניית המערכת לפי כפי שתואר במאמרו של (Shai, 2001) המציג את הבנייה של גרף דואלי. כתוצאה מתקבל מסבך כאשר הטופולוגיה וגיאומטריה שלו מתקבלים ממצב רגעי של המכניזם (איור 3.56). מצב רגעי זה, יקרה במונחים דואליים, כאשר הפרש המהירות בין החוליה המניעה לחולית היציאה יהיה הכי גדול (הגברי מקסימאלי).



איור 3.56 בניית המסבך הדואלי על גבי המכניזם

הבנייה מתבצעת ישירות על גבי המכניזם ועל פי הייצוג הדואלי (א) והמסבך המתקבל תואם את התחום ההנדסי המקורי (ב). כאשר 1' ו-2' נמצאים על אותו ישר, הגבר הכוח הוא אינסופי.

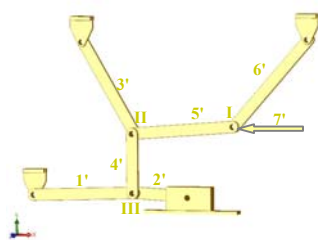
המסבך המתקבל בפיתרון מתאים רגעית למצב בו ההגבר מאד גדול. על מנת לבדוק אם הגברת הכוח הדרגתית, ניתן לבדוק את יחסי המהירות באמצעות בבואת מהירות בשני מצבים במכניזם הדואלי. מכיוון שמהירות היא דואלית לכוח, בבואת המהירות של המכניזם תהיה זהה לדיאגרמת הכוחות של המסבך. שני המצבים, כאשר הם מוצגים על גבי המסבך הדואלי, יאפשרו לאפיין את פעולת מגביר הכוח. שני מצבים אלו מוצגים באיור 3.57.



**איור 3.57 שני מצבי הגבר במכניזם ובמסבך הדואלי**

(א) יחס מהירויות קטן (הגבר כוח נמוך). (ב) יחס מהירויות אינסופי (הגבר כוח אינסופי).

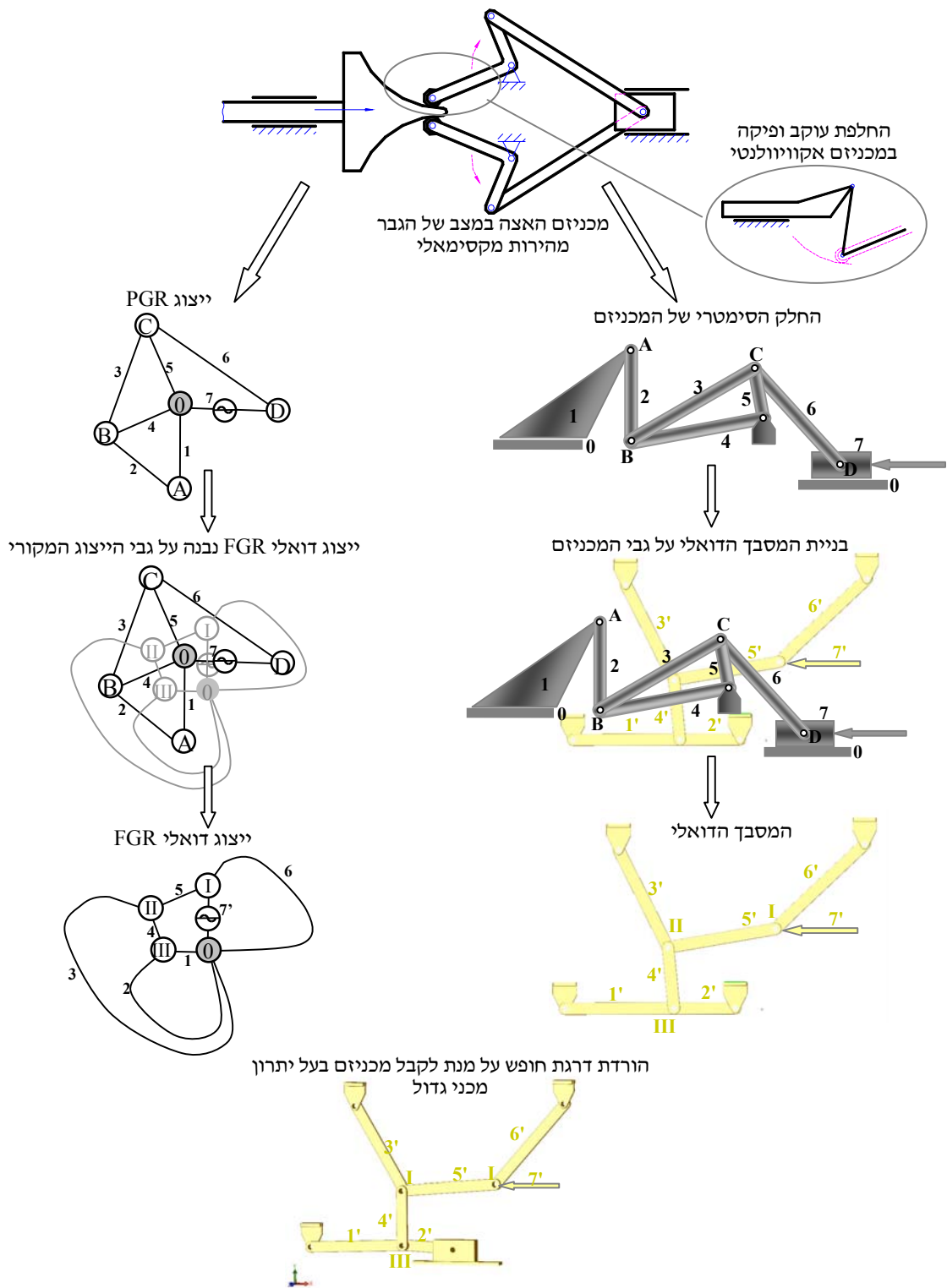
אם ברצון המתכנן לנצל את המסבך על מנת להפעיל כוח בהדרגה, יש להפוך את המסבך למכניזם. צעד זה הוא צעד הדורש שיקול הנדסי ופתרון מתאים הוא להוסיף למסבך דרגת חופש באמצעות החלפת אחד מהסמכים במחליק. מחליק זה גם משמש כרכיב עליו מופעל הכוח המוגבר המכניזם להגברת כוח, השייך למשפחת מכניזמים מסוג Toggle מוצג באיור 3.58.



**איור 3.58 מכניזם להגבר כוח גדול המתקבל לאחר הוספת מחליק**

### 3.5.2 סיכום - תכן קונספטואלי ממכניקה למכניקה

הייצוג הדואלי מאפשר העברת ידע בין תחומים שונים במכניקה גם כאשר הקשר ביין תחומים אלו אינו ברור ומיידי. התהליך ניצל מנגנון קיים וידוע בספרות על מנת ליצור מערכת חדשה שאינה דומה כלל למנגנון המקורי אך שומרת על התכונות שלו במונחים דואליים. תהליך התכן לא דרש הפעלת שיקולים הנדסיים והתנהגותיים והסתמך כולו על טרנספורמציה מבנית. שלבי התכן מסוכמים באיור 3.59.



איור 3.59 שלבי בניית מנגנון להגבר כוח גדול המוצגים במקביל בתחום ההנדסי ובייצוג הגרפי

### 3.6 תכן קונספטואלי של מעגל משולב באמצעות ייצוג בגרף

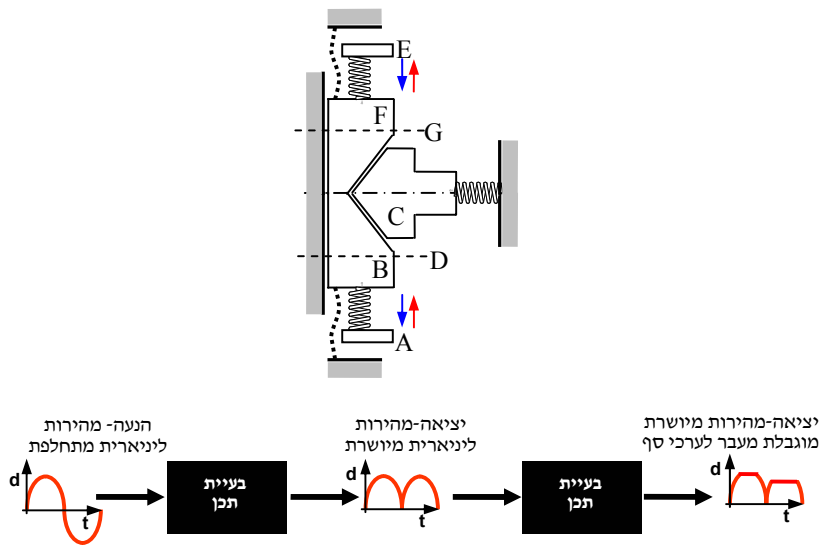
באמצעות שיטות התכן הוצג העברת ידע מתחום הנדסת האלקטרוניקה למכניקה, ממכניקה למכניקה והעברת ידע בתוך המכניקה בכול הנוגע למעבר מתכן ליניארי לתכן אנגולרי. כל השיטות הנ"ל הדגימו את העברת הידע ליצירת תכן קונספטואלי במכניקה. באותו אופן בו ידע מתחומים אחרים הועבר למכניקה, ניתן גם להיעזר במכניקה כבסיס לתכן קונספטואלי בתחומי הנדסה אחרים. בחלק הבא, תופעלנה השיטות שנסקרו עד כה על מנת לאפשר להעביר ידע ממכניקה לאלקטרוניקה.

העברת ידע מתחום המכניקה לתחום האלקטרוניקה דורשת בהרבה מקרים ירידה במימדים, זאת אומרת מעבר מייצוג דו-מימדי לייצוג חד-מימדי התואם את האלקטרוניקה. דבר זה אינו דבר פשוט, אך התוצאות המתקבלות הינם מעניינות והמעבר בין המימדים מאפשר שילוב של מערכות שלא היה מתקבל לפי שיטות התכנון האלקטרוני הסטנדרטי.

#### 3.6.1 בניית מעגל קטימה ויישור ממכניקה

בדוגמה הבאה, תילקח מערכת מכנית ידועה, ותעבור טרנספורמציה לייצוג הגרפי שלה וגם לייצוג הדואלי לקבלת קונספטים חדשים באלקטרוניקה ובמכניקה.

שלב 5. חיפוש פתרון הנדסי ברמה ההנדסית הדואלית

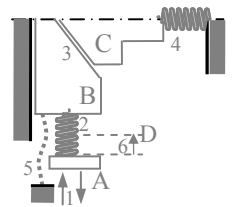
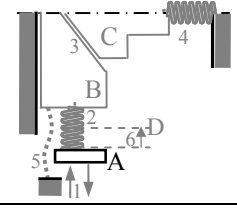
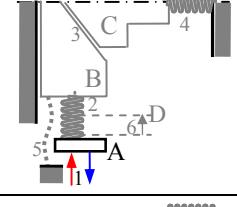
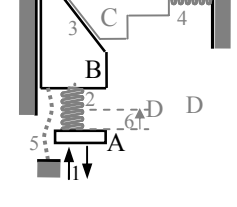


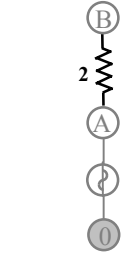
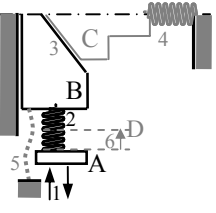
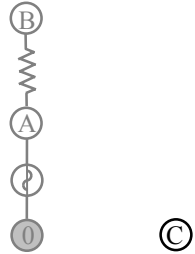
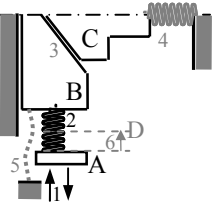
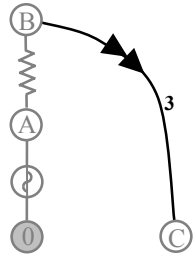
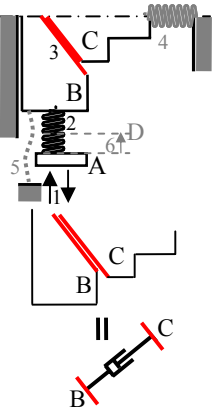
איור 3.60 המערכת ההנדסית הדואלית והפונקציה המורכבת שהיא מבצעת

באופן שונה ממקרים קודמים, כאן נבחרה מערכת מכנית בעלת כמה תכונות מיוחדות, המשלבת כמה פונקציות בסיסיות שאף הופיעו בחלקים קודמים במהלך עבודה זו (איור 3.60). יש לצאת מנקודת הנחה כי כבר נמצאה או נבחרה מערכת בעלת פונקציה רצויה וקיים צורך לנצלה לתכן קונספטואלי. התחום ההנדסי המקורי בו מוגדרת הבעיה הוא תחום האלקטרוניקה כאשר הבעיה תאורה לפי Black Box Function כאשר הפונקציה המורכבת חולקה לפונקציות פשוטות יותר. המערכת המכנית מבצעת יישור והגבלה של תזוזות.

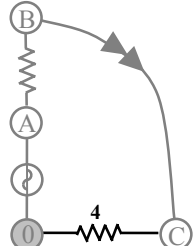
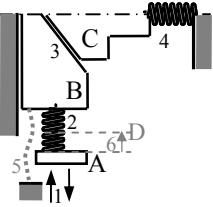
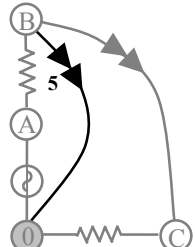
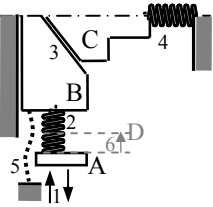
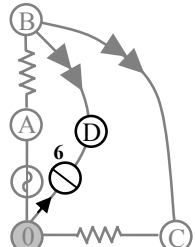
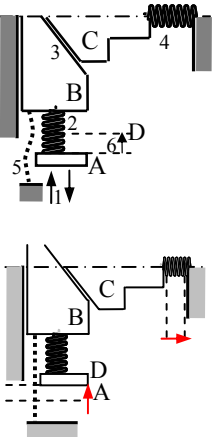
### **שלב 6. המרת הפונקציה מהרמה ההנדסית לרמת הייצוג הדואלי**

בניית הייצוג נעשית באופן שונה מפעמים קודמות. בטרנספורמציה מאלקטרוניקה למכניקה, המעבר היה מייצוג של מימד אחד לייצוג דו-מימדי ועכשיו יש צורך בפעולה הפוכה – מדו-מימדי למימד אחד. בבנייה עצמה, משתמשים באותם שלבים דטרמיניסטים שאיתם נבנו המערכות הקודמות. מכיוון שהמשתנים במערכת ההנדסית הם תזוזות, המעבר הנבחר יהיה לייצוג בגרף פוטנציאל (PGR). עקב סימטריה של המכניזם, יבנה ייצוג גרפי של חצי מכניזם כאשר בסוף זה יושלם על ידי שיקוף.

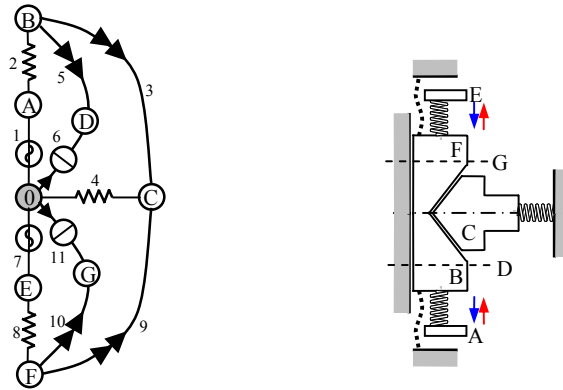
תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף	תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית
הוספת צומת 0 בעלת פוטנציאל: $\pi = 0$	⊙	הוספת אדמה – חסרת הזזות: $d = 0$	
צומת בעלת פוטנציאל: $\pi = \pi_A$	⊙ ⊙ <sup>A</sup>	הוספת משטח A עליו מופעלים הזזות: $d = d_A$	
קשת מקור הפרש פוטנציאלים (1) המפעילה פוטנציאל מתחלף על צומת A: $\pi = \pm \pi_A$	⊙ <sup>A</sup> ⊙ <sup>1</sup> ⊙	הפעלת הזזות ליניאריות (1) דו- כיווניות: $d = \pm d_A$	
צומת בעלת פוטנציאל: $\pi = \pi_B$	⊙ <sup>B</sup> ⊙ <sup>A</sup> ⊙ <sup>1</sup> ⊙	הוספת רכיב B עליו מופעלים הזזות: $d = d_B$	

תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף	תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית
<p>קשת התנגדות (2) השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים B ל-A:</p> $\Delta_{BA} = \pi_B - \pi_A$		<p>רכיב - קפיץ ליניארי (2) עליו ניתן למדוד הפרש תזוזות:</p> $\Delta_{BA} = d_B - d_A$	
<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$		<p>הוספת רכיב C עליו מופעלים הזזות:</p> $d = d_C$	
<p>קשת חד-כיוונית (3) השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_C \geq \pi_B$		<p>חלק B יכול להעביר תזוזה לחלק C רק כאשר נמצא בתנועה כלפי מעלה. החיבור ביניהם (3) דומה לחיבור של תומך (strut) בין החלקים.</p> <p>לחלק C יש תזוזה גדולה-שווה (סקלרית) מחלק B:</p> $ d_C  \geq  d_B $ <p>התומך הינו ייצוג חד מימדי של הממשק בין B ל-C.</p>	



תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף	תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית
<p>קשת התנגדות (4) השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים C ל-0:</p> $\Delta_C = \pi_C - \pi_0$		<p>רכיב - קפיץ ליניארי (4) עליו ניתן למדוד הפרש תזוזות:</p> $\Delta_C = d_C - d_0$	
<p>קשת חד-כיוונית (5) השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_0 \geq \pi_B$		<p>רכיב כבל (5) מחבר בין אדמה לחלק B המאפשר להגביל את תנועת החלק כלפי מעלה.</p> $d_0 \geq d_B$	
<p>צומת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_D$ <p>כאשר פוטנציאל הצומת נקבע על ידי קשת מקור ה"פ קבוע (6):</p> $\Delta_D = \pi_0 - \pi_D$		<p>כאשר המערכת מופעלת, רכיב B מגיע לנקודה D כאשר תזוזה זאת נקבעת על ידי הכבל הנמתח (6) העוצר את הרכיב. הגבלת התזוזה מתבצעת כאשר:</p> $d = d_D$	

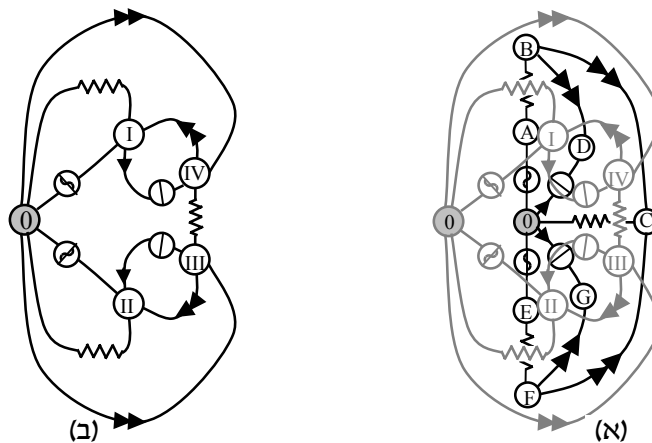
השלב האחרון בתהליך הבנייה הינו שיקוף והשלמה של המערכת ההנדסית סביב קו הסימטריה. מכיוון שהמנגנון סימטרי, גם הייצוג הגרפי סימטרי, וניתן לשיקוף סביב ציר הסימטריה כפי שניתן לראות באיור 3.61.



**איור 3.61** המערכת ההנדסית והייצוג הגרפי האיזומורפי הנבנה ממנה

**שלב 7. טרנספורמציה מייצוג בגרף דואלי לייצוג בגרף משותף**

הייצוג הגרפי מסוג פוטנציאל (PGR) שהתקבל בשלב הקודם הינו איזומורפי למערכת המכנית מבחינת מידול התזוזות שלה. הייצוג יכול לשמש עכשיו הן לייצוג משותף והן לייצוג דואלי למכניקה ואלקטרוניקה. אפשרות אחת כוללת לבחור את ייצוג ה-PGR המתקבל לבנות מעגל הפועל על מתחים. ניתן גם להמיר את הייצוג, על ידי ביצוע פעולת הדואליות, לייצוג משותף מסוג זרימה (FGR). המערכת המקורית שהייצוג שלה הוגדר באמצעות משתני פוטנציאל תוגדר מחדש במונחי זרימה בייצוג המשותף.

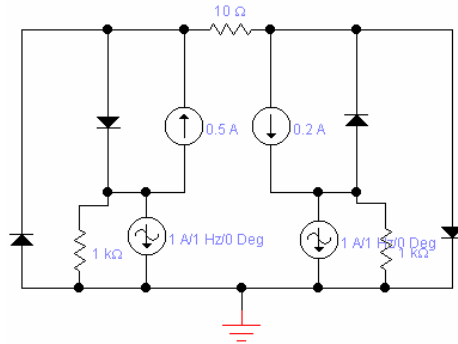


**איור 3.62** בניית הגרף הדואלי לייצוג שנבנה עבור המערכת המשולבת

עבור ה-PGR (באפור) נבנה דואלי (א), ומתקבל גרף FGR (שחור) (ב). גרף זה מחזיר את הבעיה לייצוג המשותף ומאפשר לעבור לשלב בניית המערכת בתחום ההנדסי הרצוי.

### שלב 8. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף

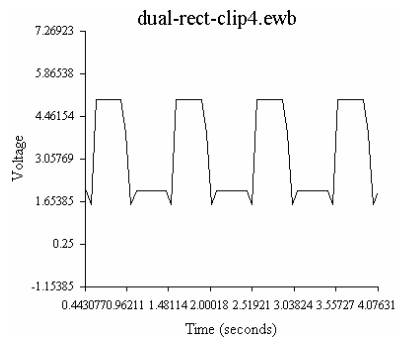
בניית המעגל האלקטרוני מתבצעת לפי שלבים דטרמיניסטיים המוגדרים בנספח בנייה.



איור 3.63 מעגל אלקטרוני שנבנה על-פי ייצוג הזרימות

### שלב 9. בדיקה התנהגותית של המערכת המתקבלת

על מנת לבדוק את המעגל, הוא הוכנס לתוכנה (electronics workbench), על מנת למדוד את המתח על הנגד ביציאה וכך לקבל את הזרם במעגל. ביציאה נמדד המתח לאורך זמן והתקבלה האות המוצגת באיור 3.64. ניתן לראות כי האות החשמלית תואמת לחלוטין את הפונקציה שהוגדרה בהתחלה ואת פעולת המנגנון עליו הוא מבוסס.

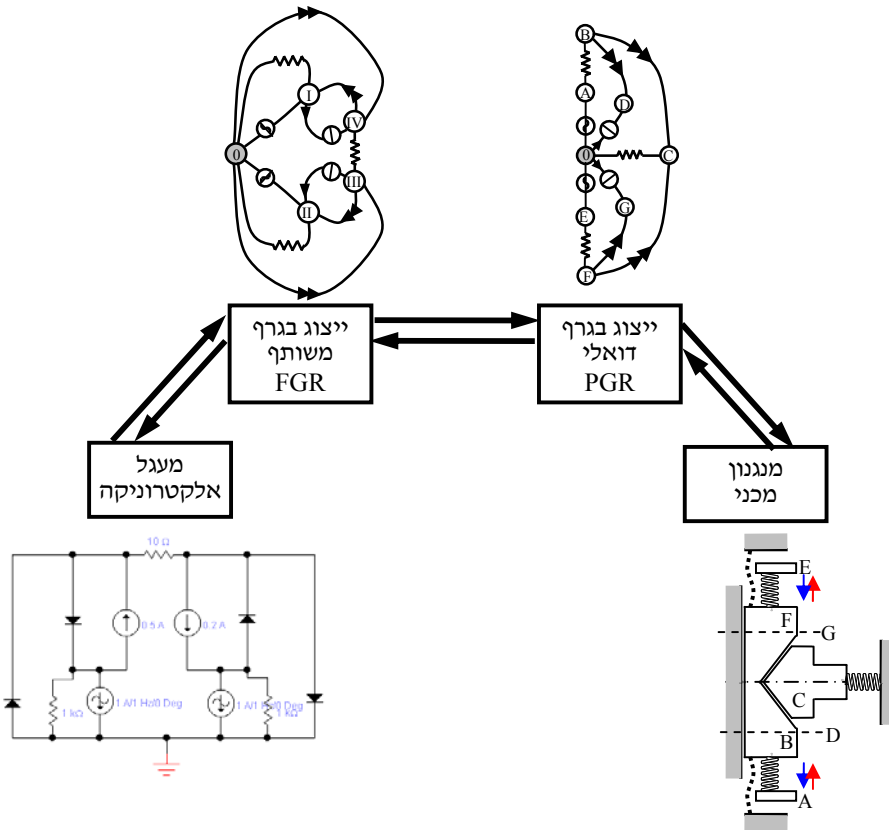


איור 3.64 האות החשמלית הנמדדת ביציאה של המעגל

האות המתקבלת הינה מיושרת ונקטמת לפי שני הערכים השונים של מקורות הזרם הקבועים.

### 3.6.2 סיכום תכן מעגל משולב

בחלק זה הוצגה שיטת התכן באמצעות הייצוג הדואלי, כשיטה היכולה גם להעביר ידע הקיים במכניקה על מנת לבנות מעגלים באלקטרוניקה. בניית ייצוג חד-מימדי ממכניזם דו-מימדי הניב שילוב של המערכות בתחום ההנדסי של אלקטרוניקה. ייתכן והעברה ממכניקה לאלקטרוניקה דרך הייצוג מאפשרת שילוב לא שיגרתי של רכיבים באופן שונה מחיבור טורי של מעגלים בסיסיים באלקטרוניקה. באופן דומה למעבר ההפוך (מאלקטרוניקה למכניקה), רוב התהליך כולל ייצוג מבני-גרפי של המכניזם ללא צורך בשיקולי התנהגות.



איור 3.65 תהליך העברת הידע מהמכניקה לייצוג, דרך הייצוג הדואלי, וקבלת מעגל אלקטרוני

## 4. תחום הקונספטים (Domain of Concepts)

### 4.1 הקדמה

מונח זה הינו מונח ידוע בעולם התכן והוא בעצם מתקשר לשדה הפתרונות האפשריים המתקבלים מאותו ייצוג גרפי, בעט ביצוע שלב העברת הידע מתחום הייצוג לתחום ההנדסי בו נבנה הפתרון. כפי שפורט בפרקים הקודמים, הייצוגים בהם נעשה שימוש ממדלים את הטופולוגיה המבנית של המערכות אותם הם מייצגים, הם גם ממדלים את התנהגות המערכות ומשמרים את תכונותיהם. בחלק זה של התיזה תוצגנה תכונות מיוחדות אשר ניתנות לזיהוי ברמת הייצוג בלבד ומאפשרות גישות חדשות בתכן.

כאשר מעבר מתבצע בין הייצוגים לתחום ההנדסי, ייצוג אלמנט של גרף במערכת ההנדסית נקבע לפי הגרף מבחינה טופולוגית והתנהגותית אך לא מבחינה מבנית – הייצוג ההנדסי המבני המתקבל מגרף אינו חד-ערכי. במילים אחרות, קשת אשר שומרת על זרימה או הפרש פוטנציאליים כלשהו בייצוג הגרפי, ניתנת לייצוג במערכת ההנדסית על ידי כל רכיב הנדסי שמשמר את ההתנהגות של הקשת ואת קשריה לשאר הרכיבים. בכל שלב דטרמיניסטי בבנייה בו נדרש לייצג אלמנט מהגרף בתחום ההנדסי, ניתן לייצגו על ידי כמה מבנים שונים אשר שקולים בהתנהגותם. גם כאשר נדרש להפעיל שיקול הנדסי על מנת שיהיה תיאום בין הייצוגים להנדסה, שיקולים הנדסיים שונים יכולים להניב צורות או מבנים שונים כל עוד הם ישמרו על הקשר הטופולוגי של הייצוג.

#### 4.1.1 דוגמה לתחום פתרונות אפשריים

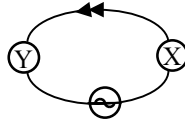
את עיקרון תחום הפתרונות ניתן להסביר על ידי דוגמה פשוטה שתסייע בהבנת המעבר מהייצוג לקבלת פתרון הנדסי:

סבל  $X$  צריך להזיז ארגז  $Y$  אחריו (איור 4.1). מכיוון שהוא מחובר לארגז ברמתה, הוא אינו מעוניין בפתרון שאינו מאפשר חופש ללכת אחורה. ולבדוק אם הארגז לא מתפרק בזמן התנועה.



איור 4.1 בעיית סבל וארגז

ייצוג הבעיה של הסבל והארגז בתור גרף זרימות יסייע בפתרון הבעיה. האדם יהווה צומת  $X$  בגרף והארגז צומת  $Y$ . הייצוג הנבחר הינו גרף פוטנציאליים (PGR), בו ניתן לייצג את ההזזות המופעלות במערכת. מכיוון שהסבל יכול להפעיל הזזה בשני כיוונים (קדימה ואחורה), את הקשר שלו עם הארגז ניתן לייצג על ידי מקור הפרש פוטנציאליים מתחלף. כמו כן, הסבל מעוניין רק בהפעלת הזזה בכיוון חיובי של הארגז ולא בכיוון השלילי כאשר הוא ניגש אחורה לבדוק אותו. בגרף ניתן לייצג זאת כקשת חד-כיוונית כאשר צומת  $X$  בעלת פוטנציאל קטן שווה לזה של  $Y$ . ייצוג הבעיה כגרף מוצג באיור 4.2.

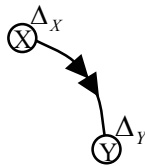


**איור 4.2** ייצוג גרפי של בעיית הסבל והארגז

עד כה, הבעיה טופלה בעצם בשיטת הגרף המשותף. שלבים של ניסוח הבעיה והעברתה לגרף כאשר הייצוג יכול להיות משותף לכמה תחומים. הבעיה שנבחרה פשוטה ולכן אין צורך לפרק את התהליך לשלבים וניתן להגיע לגרף הפתרון ישירות מהתחום המקורי של הבעיה.

השלב המעניין באמת, הינו שלב הבנייה בתהליך התכנן. יש צורך לבנות מערכת מכנית אקוילנטית לגרף. ניתן לייצג כל קשת בגרף כאלמנט מבני שונה במערכת המתוכנת כל עוד ישמור על טופולוגיה והתנהגות של הגרף. לצורך הדוגמה, מקור הפרש הפוטנציאליים יבחר כתנועתו של הסבל ללא שום עזרים או מנועים חיצוניים. ההתמקדות תהיה בקשת החד כיוונית.

בנספח שלבי הבנייה הדטרמיניסטים של ייצוג PGR, קשת חד-כיוונית מוגדרת כך :



**איור 4.3** ייצוג גרפי של קשת חד-כיוונית

$$1. \Delta_Y \leq \Delta_X \rightarrow \Delta_Y = \Delta_X \text{ - קשת קיימת בין } X \text{ ל-} Y.$$

$$2. \Delta_Y > \Delta_X \text{ - קשת אינה קיימת בין } X \text{ ל-} Y.$$

עבור ההגדרה הזאת מוצעים כמה רכיבים בסיסיים בהם נעשה שימוש בעבודה זו ובתעשייה כמו (כבל) cable ותומך (strut), מסב חד-כיווני ועוד אך יש עוד חלופות קיימות וגם ניתן לתכנן רכיבים בעלי מבנה שונה, כל עוד הם שומרים על החוקיות הנ"ל. בחזרה לבעיה הנוכחית: ניתן לחבר את הארגז לסבל בכמה אופנים, אך כולם נובעים מאותו הגרף ומוצגים באיור 4.4.

התנהגות	מבנה
	<b>כבל (cable)</b> 
	<b>מנגנון חד-כיווני</b> 
	<b>מנגנון אזיקון</b> 

#### איור 4.4 פתרונות אפשריים השונים מבנית אך זהים התנהגותית

הפתרונות צוירו בחוסר פרופורציה על מנת להדגישם.

ישנם עוד הרבה פתרונות אפשריים עבור בעיה זאת כי ההתמקדות הייתה באלמנט גרף יחיד וייצוגו במערכת ההנדסית. במערכת יותר מורכבת, ניתן לבצע את האופציות המבניות עבור כל אלמנט בגרף, כפי שנעשה עבור הקשת החד-כיוונית בדוגמה. תכונה זו מאפשרת חופש פעולה בתכן ומונעת חפיפה עם פטנטים קיימים.

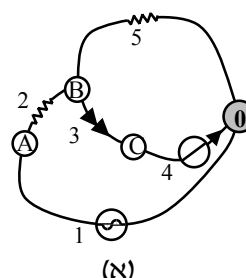
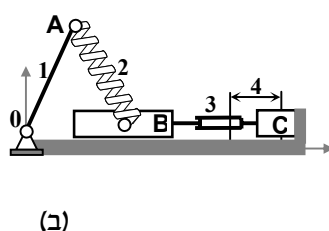
הדבר שנובע מהדוגמה הנ"ל הוא כי כל שדה הפתרונות הגיעו מאותו גרף. במילים אחרות, הגרף מהווה קונספט אחד ויחיד אשר ניתן לבנות אותו במגוון דרכים, אך כולם מבוססים על אותו הקונספט. עובדה זאת מקנה יתרון בתהליך התכן, מכיוון שברגע שנבנה פתרון אחד מהייצוג הגרפי, ניתן לבנות אותו מחדש עם שינויים קטנים או גדולים ולהתאימו בצורה טובה יותר לדרישות התכן. כמובן, דבר חשוב בתעשייה הינו סקר פטנטים ומספר הקונספטים הקיימים. מתוך הייצוג הגרפי של מספר מערכות הנדסיות בעלות אותה פונקציה, מסתמנת מגמה בה ניתן לזהות מספר סופי של גרפים כאשר מערכות אלו חולקות גרף משותף. מהנדס יכול לנצל את הייצוג על מנת לתכן מערכת חדשה המבוססת על אותו קונספט אבל לייצג חלק מאלמנטי הייצוג בגרף באופן בו הוא אינו חוזר על פתרון ידוע ולקבל מבנה חדש שהינו חוקי לחלוטין.

בהמשך יוצגו מספר קונספטים והמערכות המתקבלות מהם ויודגש הקשר בינם לבין הייצוגים הגרפיים שלהם ואיך ניתן להגיע מתכן אחד לשני באמצעות הייצוגים הגרפיים.

## 4.2 תחום הקונספטים של שדכנים ידניים

השדכנים הידניים אשר נידונו בתחילת הפרק השני, בעצם היוו בסיס למחקר תחום הקונספטים. מכיוון שנמצאו שני מעגלי קטימה בהנדסת חשמל המספקים את פונקצית הקטימה, מעגלים אלו היוו את תחום הקונספטים עבור שדכנים. במחקר ראשוני של מנגנוני שדכנים ידניים, ניתן לזהות כי כאשר מייצגים את הרוב המוחלט של שדכנים בייצוג גרפי, מתקבלים אותם שני ייצוגים שהינם איזומורפיים למעגלי הקטימה החשמליים.

### 4.2.1 מעגל קטימה 1



### איור 4.5 הקונספטים מהייצוג הגרפי של מעגל הקטימה 1

(א) הייצוג המשותף, (ב) מנגנון השדכן שנבנה בחלק 2.3 ושדכן קיים התואם את הקונספט.

מייצוג ה-PGR נבנתה המערכת כפי שמתואר באיור 4.5 והוצג בפרק השני בעבודה זו. ייצוג גרפי זה יכול להיות קונספט ראשון שממנו יתוכננו מערכות נוספות. השינוי במנגנונים בעצם מצטייר לראשונה בשלב הבנייה בו ניתן לייצג את חלק מהקשתות באמצעות מבנים הנדסיים שווי ערך. בשלב הבא, תתבצע חזרה על שלב בתוך תהליך הבנייה בה ניתן לשנות את הייצוג המכני ולכן לקבל תכן שונה מבנית אך זהה התנהגותית ופונקציונאלית. חשוב להדגיש כי אין צורך בחזרה על כל תהליך הבנייה, אלא רק על שלב בודד.

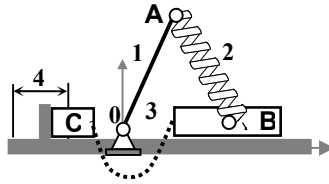
### שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף

שלבי הבנייה של המנגנון הם אותם שלבים שבוצעו במהלך תיכון מנגנון 1, עם שלב אחד יוצא דופן. במנגנון זה, במקום להשתמש ברכיב תומך לייצוג מבני של הקשת החד-כיוונית, נעשה שימוש ברכיב כבל. עקב הטופולוגיה של הייצוג, המבנה משתנה כאשר מוסיפים את הרכיב החלופי.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
רכיב – תומך חד-כיווני ליניארי הנותן יחס הזזות: $d_C \geq d_B$		קשת חד-כיוונית (3) השומרת על יחס פוטנציאלים: $\pi_C \geq \pi_B$	

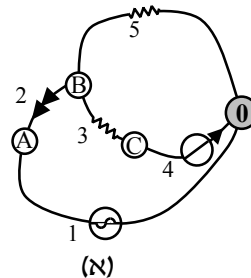
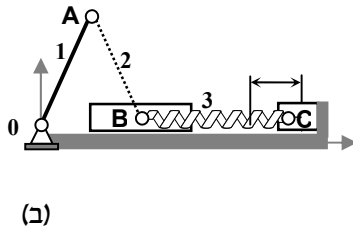


מכאן והלאה, שאר השלבים הם אותם שלבים בבניה המקורית של המנגנון. המכניזם המתקבל הינו בעל התנהגות שוות ערך למנגנון 1. ניתן לקרוא למנגנון שנבנה (איור 4.6) מנגנון 1' והוא מהווה תכן נוסף התחום על ידי הקונספט של מעגל קטימה 1.



איור 4.6 מנגנון 1' המתקבל הינו עוד תכן המבוסס על הקונספט של מעגל 1

4.2.2 מעגל קטימה 2



איור 4.7 הקונספטים מהייצוג הגרפי של מעגל הקטימה 2

(א) הייצוג המשותף, (ב) מנגנון השדכן שהוצג בחלק 2.3 ושדכן קיים התואם את הקונספט.

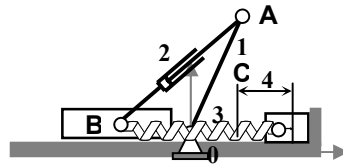
באופן דומה לסעיף הקודם, נלקח ייצוג ה-PGR (איור 4.7) מהפרק השני בעבודה זו, כקונספט השני שממנו יתוכנו מערכות נוספות. שוב, מבוצעת חזרה על שלב בתוך תהליך הבנייה בה ניתן לשנות את הייצוג המכני ולכן לקבל תכן שונה מבנית אך זהה התנהגותית.

שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף

במנגנון זה, במקום להשתמש ברכיב כבל לייצוג מבני של הקשת החד-כיוונית, נעשה שימוש ברכיב תומך (strut). עקב הטופולוגיה של הייצוג, המבנה משתנה כאשר מוסיפים את הרכיב החלופי.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
רכיב – תומך חד-כיווני ליניארי הנותן יחס הזזות: $d_A \geq d_B$		קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים: $\pi_A \geq \pi_B$	

המכניזם המתקבל הינו בעל התנהגות שוות ערך למנגנון 2. ניתן לקרוא למנגנון שנבנה (איור 4.6) מנגנון 2' והוא מהווה תכן נוסף התחום על ידי הקונספט של מעגל קטימה 2.



איור 4.8 מנגנון 2' המתקבל הינו עוד תכן המבוסס על הקונספט של מעגל 2

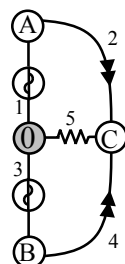
### 4.3 תחום קונספטים לפי גרף משותף עבור תמסורות חד-כיווניות

בפרק השני תוכנו כמה סוגים של מערכות חד-כיווניות שכללו מערכות ליניאריות ותמסורות באמצעות הייצוגים הגרפיים. מחקר מעמיק יותר בספרות המקצועית הניב תוצאות מעניינות. מתוך אטלס מכניזמים ידוע (Chironis, 2001), נאספו תמסורות מגוונות שמוינו באטלס לפי הפונקציה שלהם, כתמסורות חד-כיווניות. לאחר ניתוח המערכות וייצוגם בגרפים, זוהו שתי תופעות:

1. את כל התמסורות ניתן לייצג על ידי שני הגרפים של יישור (מיישר גל שלם וגשר דיודות).
2. ניתן לקשר בין התמסורות החולקות גרף משותף ולאחר שלבי תכן בהם הופעלו ייצוגים מבניים שונים או שיקולים הנדסיים שגרמו לשינוי מבני בתמסורת המתוכננת.

תופעות אלו לא רק מסייעות בהבנת המערכות, אלא מקנות ידע לעבור מתכן אחד לתכן שונה באמצעות הייצוג הגרפי לקבלת כמה פתרונות כאשר הגרף המשותף עומד מאחורי אלו כקונספט המרכזי. בעמודים הבאים יוצגו שני הקונספטים, כאשר תחילה יוצג הקונספט ההנדסי המרכזי ולאחר מכן, יוצגו שאר המערכות עם שלבי מעבר בין הקונספט המרכזי לשאר באמצעות הגרף.

#### 4.3.1 מיישר גל שלם

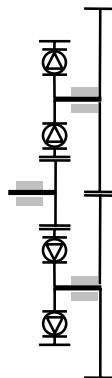


איור 4.9 הייצוג הגרפי של מיישר הגל השלם

ממיישר זה מקבלים גרף PGR שממנו נבנו שתי מערכות בפרק השני: מכניזם מיישר ליניארי ותמסורת חד-כיוונית. גרף זה מהווה את הקונספט הראשון שממנו תוכננו התמסורות. התמסורת החד-כיוונית שתוכנה

בפרק השני תהווה את הקונספט ההנדסי להשוואה בגלל ששלבי הבניה שלה פורטו וקל להתייחס לשלבים אלו. חוץ מתמסורות שתוכנו במהלך התיזה, כל התמסורות נלקחו מאטלס המכניזמים של Chironis.

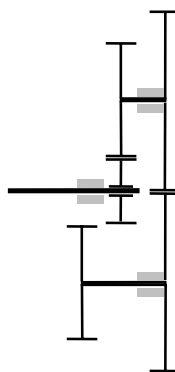
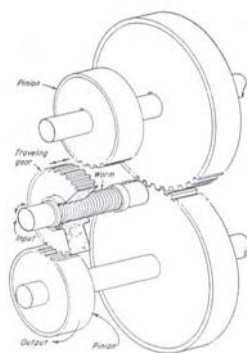
## תמסורת 1



**איור 4.10** חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית כפי שפותחה בפרק השני

התמסורת 1 כפי שנבנתה בפרק השני, היא התמסורת הראשונה המבוססת על קונספט הגל השלם, והיא מהווה בסיס להשוואה ובנייה של שאר התמסורות.

## תמסורת 2



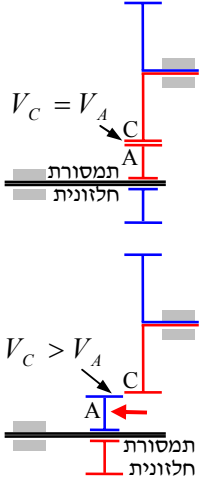
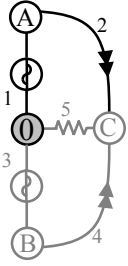
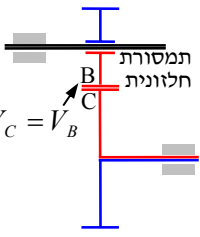
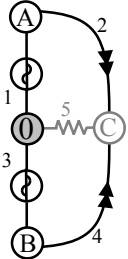
**איור 4.11** חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 2

### פעולת התמסורת

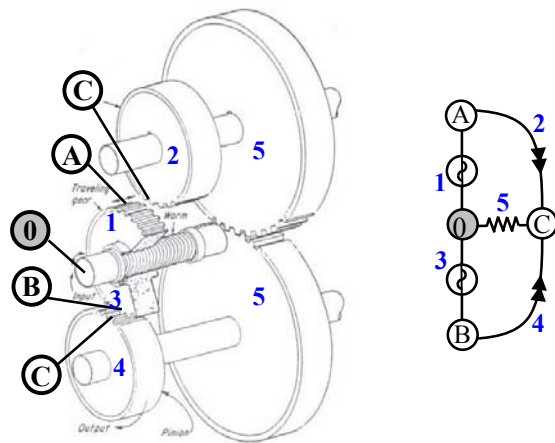
גלגל שיניים נייד מבצע מהלך לאורך מניע מסוג חילזון. במצב הנעה רגיל, השמש הפנימית מניעה רק את אחד הלוחיינים. כאשר החילזון משנה את כיוון הסיבוב, גלגל השיניים המרכזי (השמש) מנתק מגע מהלוחיין המונע ומתחיל לנוע בכיוון הפוך לאורך הציר, עד השתלבות עם הלוחיין השני. הפרדה זאת מאפשרת הנעה חד-כיוונית.

**שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף.**

שלבי הבנייה של התמסורת הם אותם שלבים שבוצעו במהלך תכנון תמסורת 1 עם שני שלבים יוצאי דופן אשר מחליפים את השלבים בתכן המקורי. במערכת זאת, במקום להשתמש במצמדים חד-כיוונים, נעשה שימוש במערכת בעלת גלגל שיניים המתנייע על גבי הנעה חלזונית שהתנהגותה שוות ערך להתנהגות המסבים בתמסורת המקורית:

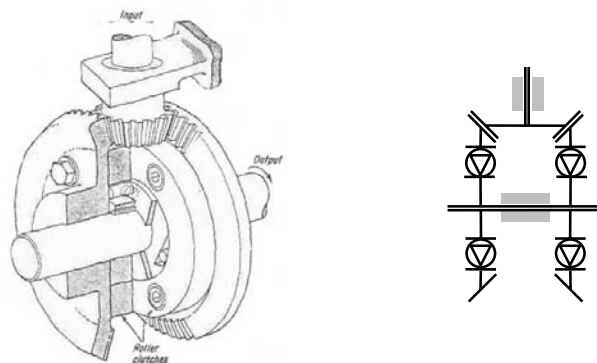
תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>רכיב – תמסורת חלזונית המעבירה מהירות לגייש C כל עוד:</p> $V_C \geq V_A$		<p>קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_C \geq \pi_A$	
<p>רכיב – תמסורת חלזונית המעבירה מהירות לגייש C כל עוד:</p> $V_C \geq V_B$		<p>באותו אופן שנוספה קשת חד-כיוונית בין C ל-A: נוספת קשת חד-כיוונית השומרת על יחס פוטנציאלים:</p> $\pi_C \geq \pi_B$	

הכנסת שלבים אלו במקום השלבים בתמסורת המופיעה בפיתוח בפרק 2, תאפשר קבלת מערכת זאת. גם סימון המהירויות התואמות לפוטנציאלים ולה"פ בגרף על גבי התמסורת מאפשרות לזהות כי הגרף מהווה את הקונספט למערכת.



איור 4.12 אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 2

### תמסורת 3



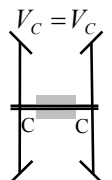
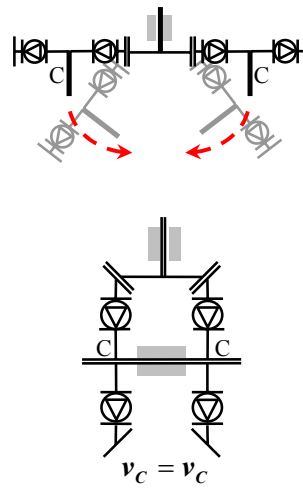
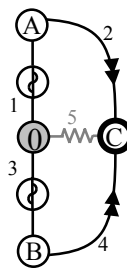
איור 4.13 חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 3

### פעולת התמסורת

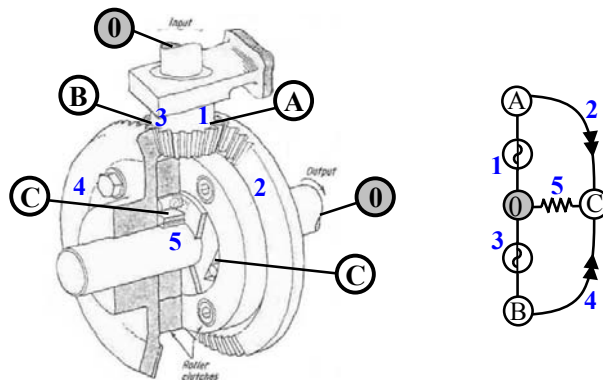
גלגל שיניים קוני מבצע הנעה מתחלפת המניע שני גלגלי שיניים קונים. בתוך הגג"שים המונעים נמצאים מצמדים חד כיווניים כאשר אחד נצמד השני מחליק ולהפך. התנועה המיושרת מתקבלת על ציר משותף המחובר בין המצמדים.

### שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף.

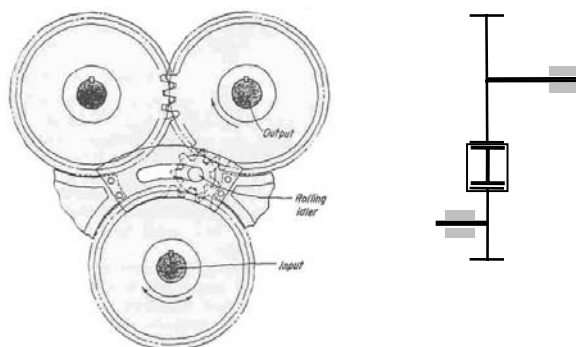
שלבי הבנייה של התמסורת הם אותם שלבים שבוצעו במהלך תיכון תמסורת 1 עם שלב אחד יוצא דופן אשר מחליף שלב בתכן המקורי. שלב זה מחליף את שלב הפעלת שיקול הנדסי זהה, כאשר הוא מבוסס על ייצוג מבני שונה.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>שלב הפעלת שיקול הנדסי קיימים שני רכיבים בעלי מהירויות זהות:</p> $V = V_C$ <p>על מנת לוודא שיחס זה מתקיים יש לחבר ביניהם גוף קשיח השומר על יחס זה. ניתן לחבר שתי גג"שים לציר משותף ולהפוך את הגג"שים לקוניים.</p> 		<p>שלב הפעלת שיקול לתיאום בין הגרף להנדסה</p> <p>קיימת רק צומת C אחת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	

ההבדל היחידי בין תמסורת זאת לתמסורת המקורית שתוכננה (מערכת 1) הוא הפעלת שלב שיקול הנדסי מבני שונה. גם סימון המהירויות התואמות לפוטנציאלים ולה"פ בגרף על גבי התמסורת מאפשרות לזהות כי הגרף מהווה את הקונספט למערכת.



איור 4.14 אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 3



איור 4.15 חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 4

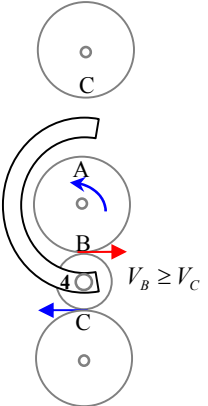
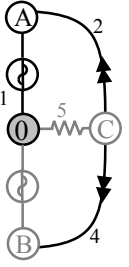
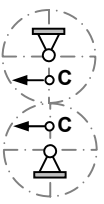
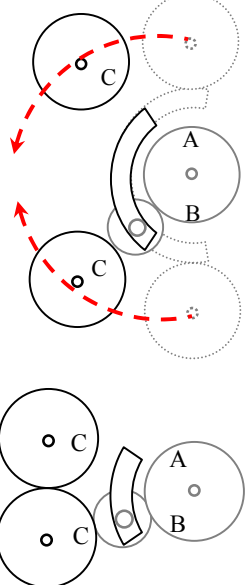
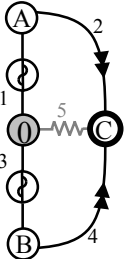
**פעולת התמסורת**

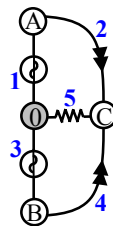
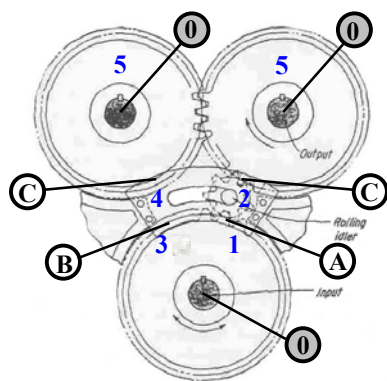
גלגל שיניים נייד שצירו מחליק בתוך מסילה סביב הגלגל המניע, מבצע הנעה מתחלפת המניע שני גלגלי שיניים. כאשר המניע פועל באחד הכיוונים, הוא גורם לגג"ש הנייד להחליק לאורך המסילה בכיוון המהירות הטנגנציאלית עד להשתלבותו בין הגג"ש לבין המניע.

**שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף.**

שלבי הבנייה של התמסורת הם אותם שלבים שבוצעו במהלך תיכון תמסורת 1 עם שלושה שלבים יוצא דופן אשר מחליפים את השלבים בתכן המקורי. במערכת זאת, במקום להשתמש במצמדים חד-כיוונים, נעשה שימוש בגלגל שיניים המתניע על מסילה סביב הגלגל המניע וכתוצאה מכך מניע את שני הגג"שים המונעים בצורה שוות-ערך למערכת המקורית. חוץ מהחלפת המצמדים שלה, מופעל שיקול הנדסי כאשר הוא מבוסס על מבנה שונה. מעניין לציין כי במקרה זה, הייצוג כולל קשתות חד-כיווניות אשר פועלות בכיוון הפוך. מקרה זה אינו מישר חדש אלה עוד קונפיגורציה אפשרית של מיישר גל שלם.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
רכיב – תמסורת גלגל שיניים נייד ומסילה. הגג"ש נצמד לקצה המסילה ומעביר מהירות לגג"ש C כל עוד: $V_A \geq V_C$		קשת חד-כיוונית (2) השומרת על יחס פוטנציאלים: $\pi_A \geq \pi_C$	
במקרה של שינוי כיוון או עצירה, הגלגל בתמסורת עם המניע בלבד, ולכן מהירותו שווה בקירוב למהירות המניע.			

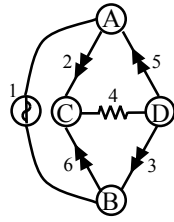
<p>באופן זהה לשלב הקודם, מתווספת מסילה וגלגל שיניים נידד כאשר אלו מאפשרים יחס מהירות:</p> $V_B \geq V_C$		<p>קשת חד-כיוונית (4) השומרת על יחס פוטנציאליים:</p> $\pi_B \geq \pi_C$	
<p><b>שלב הפעלת שיקול הנדסי</b> קיימים שני רכיבים בעלי מהירויות זהות: <math>V = V_C</math> חיבור ביניהם באמצעות תשובת של שני גלגלי שיניים מקיים יחס זה.</p> 		<p><b>שלב הפעלת שיקול לתיאום בין הגרף להנדסה</b> קיימת רק צומת C אחת בעלת פוטנציאל:</p> $\pi = \pi_C$	



איור 4.16 אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 4



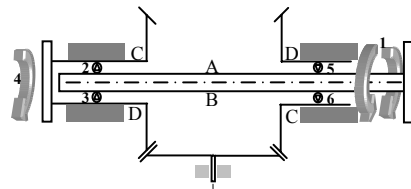
### 4.3.2 מיישר גשר דיודות



איור 4.17 הייצוג של מיישר גשר דיודות

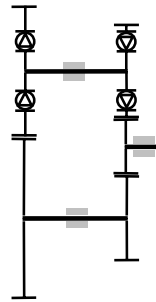
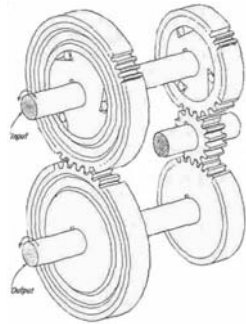
גם עבור מיישר זה מקבלים גרף PGR שממנו נבנו שתי מערכות בפרק השני: מכניזם מיישר ליניארי ותמסורת חד-כיוונית. גרף זה מהווה את הקונספט השני. התמסורת החד-כיוונית שתוכנה תהווה את הקונספט ההנדסי להשוואה בגלל ששלבי הבניה שלה תועדו במאמר (Shai,2003).

#### תמסורת 1



איור 4.18 חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית כפי שתאורה בפרק השני

#### תמסורת 2



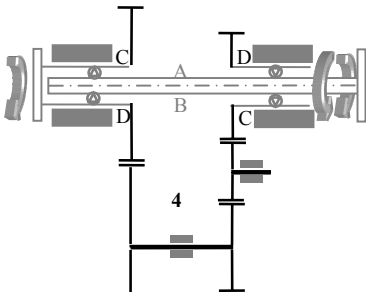
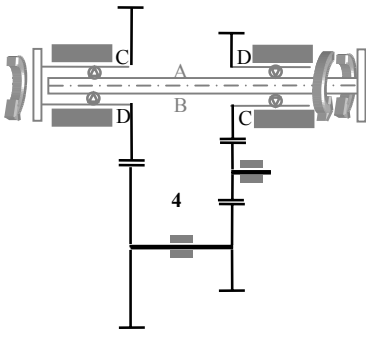
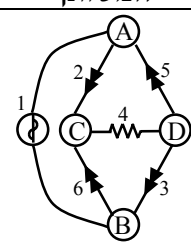
איור 4.19 חתך ודגם של התמסורת החד-כיוונית 5

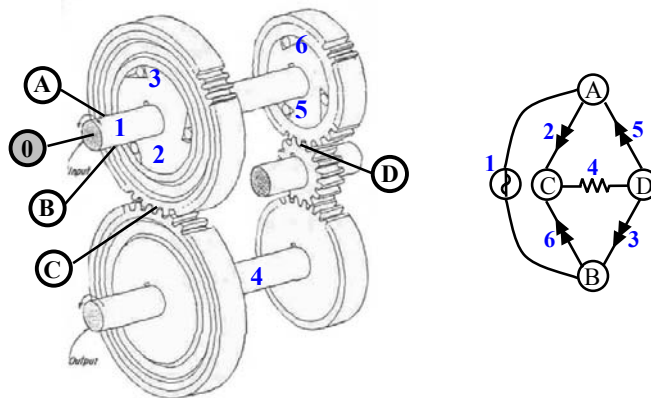
#### פעולת התמסורת

הציר העליון של התמסורת מפעיל מהירות זוויתית מתחלפת. בשני גלגלי השיניים העליונים מורכבים מסבים חד-כיווניים כאשר כל אחד מעביר תנועה בכיוון אחר. מכיוון שכול גג"ש פועל לכיוון אחר, נוסף לאחד מהם גלגל תמסורת ביניים על מנת להפוך את כיוונו. גלגל זה מאפשר להפוך את הכיוון לכיוון זהה לזה המתקבל על ידי הגג"ש השני. כתוצאה מכך, הציר התחתון תמיד יסתובב באותו כיוון.

**שלב 5. בניית המערכת בתחום ההנדסי המקורי על פי הייצוג בגרף המשותף.**

שלבי הבנייה של התמסורת הם אותם שלבים שבוצעו במהלך תיכון תמסורת גשר הזיודות המתוארת אך שלב השיקול ההנדסי הינו יוצא דופן. במקום גלגלי שיניים קונים בתמסורת המקורית, נעשה שימוש בגלגלי שיניים סטנדרטים בתוספת גלגל ביניים לקבלת אותו אפקט.

תיאור ברמה ההנדסית	ייצוג ברמה ההנדסית	תיאור ברמת הגרף	ייצוג בגרף המשותף
<p>תמסורת תחבר בין C ו- D ותבטיח מהירות הפוכות בכיוון. נבחרה תמסורת שוות ערך לגישים קוניים בהם נעשה שימוש בתמסורת 1 המאפשרת זאת.</p> 		<p>קשת התנגדות (4) השומרת על הפרש פוטנציאלים בין צמתים C ל- D:</p> $\Delta_{CD} = \pi_C - \pi_D$ <p>C ו- D בעלי פוטנציאל הפוכים ושווים.</p>	



**איור 4.20 אלמנטים בייצוג מסומנים על גבי תמסורת חד-כיוונית 5**

**4.3.3 סיכום**

בחלק זה הודגש הקשר בין הייצוג המשותף של מיישרים אשר הוצג בהקשר התכנון בפרק השני, לבין הקונספטים הקיימים בתעשייה. חזרה על שלבי בנייה דטרמיניסטיים, תוך כדי הפעלת שיקולים מבניים/הנדסיים אפשרו לבנות את הקונספטים ההנדסיים הקיימים בספרות המקצועית. את הקונספטים ההנדסיים ניתן לבסס על שני הייצוגים המוכרים כאשר אלו סיפקו את התחום של הקונספטים האפשריים. בהמשך, יוצג גם תחום הקונספטים עבור מערכות שנבנו באמצעות הייצוג הדואלי.

## 4.4 תחום הקונספטים לפי גרף משותף עבור מגבילי מומנט (Torque Limiters)

בפרק השלישי תוכננו שני סוגים של מגבילי מומנט שכללו מגביל מומנט חד-כיווני ודו-כיווני כאשר אלה תוכננו לפי שיטת הגרף הדואלי. כפי שנעשה בתמסורות חד-כיווניות, גם מגבילי המומנט, נמצאו כמבוססים על גרף זהה. בחלק זה תימשך החקירה של תכונות תחום הקונספטים כאשר כאן הקונספטים התקבלו מהייצוג הדואלי.

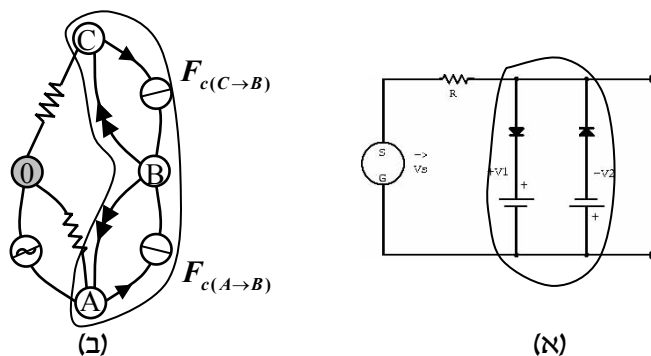
בבדיקה של מגבילי המומנט מתוך אטלס המכניזמים (Chironis, 2001) נמצא כי:

1. את כל מגבילי המומנט שנמצאו ניתן לייצג על ידי גרף אחד של הגבלת זרימה דו-כיוונית.
2. מגבילי המומנט הדו-כיווניים התבססו על הפשטה של הייצוג הסימטרי של הגרף על ידי שלב תכן הנדסי שהמיר את חלק זה בגרף למבנים הנדסיים שונים בעל התנהגות זהה.

זיהוי האלמנטים האחראים על הגבלת המומנט מתוך ייצוג ה-FGR, מאפשר לעמוד על עיקרון הפעולה של רכיבים אלו. דבר זה מקנה ידע לעבור מתכן אחד לתכן שונה באמצעות הגרף, ולקבלת כמה פתרונות, כאשר הגרף המשותף עומד מאחורי אלו כקונספט המרכזי.

### 4.4.1 צמצום אלמנטים בייצוג הנדסי של מגביל המומנטים הדו-כיווני

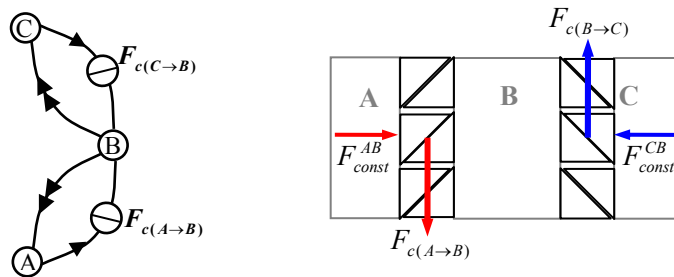
כאשר הועבר ידע מהנדסת אלקטרוניקה להנדסה מכנית באמצעות שיטת הגרף הדואלי, החלק של המעגל החשמלי שהיה אחראי על הגבלת הפוטנציאל הפך אחרי פעולת הדואליות מייצוג אנטי-סימטרי, כפי שניתן לראות באיור 4.21 (א) לייצוג סימטרי (ב). חלק זה של הייצוג הינו מבנה סימטרי, אך עקב האפשרות לקבוע ערכים שונים למקורות הזרימה הקבועים, סימטריות זו לא באה לידי ביטוי. ניתן להבחין בתופעה זו, במגביל המומנט הדו-כיווני שנבנה בפרק השלישי ובו נבנו שני ממשקים משוננים למגביל.



איור 4.21 חלק ממגביל פוטנציאל דו-כיווני וייצוגו הדואלי

במעגל המקורי (א), סידור הרכיבים המסומנים הינו אנטי-סימטרי. בייצוג הדואלי (ב), הופך חלק זה לחלק סימטרי.

מגביל המומנט שפותח, כלל שני ערכי סף שונים אשר נקבעו לפי שני כוחות הצמדה שונים כפי שמתואר איור 4.22. כל מומנט אשר רכיב הכוח שלו גדול מערכי הסף הנקבעים לכל כיוון, יגרום להתנתקות בחיבור הרלוונטי.



#### איור 4.22 החיבור ההנדסי האחראי על הגבלת המומנט וחלק הגרף עליו הוא מבוסס

מקרה פרטי של חלק הגבלת הזרימה הדו-כיוונית הוא מקרה בו שני מקורות הזרימה זהים בגודלם:

$$(4.2.1) \quad |F_{c(A \to B)}| = |F_{c(B \to C)}| = F_c$$

כאשר:

$$(4.2.1a) \quad F_{c(B \to C)} = -F_{c(C \to B)}$$

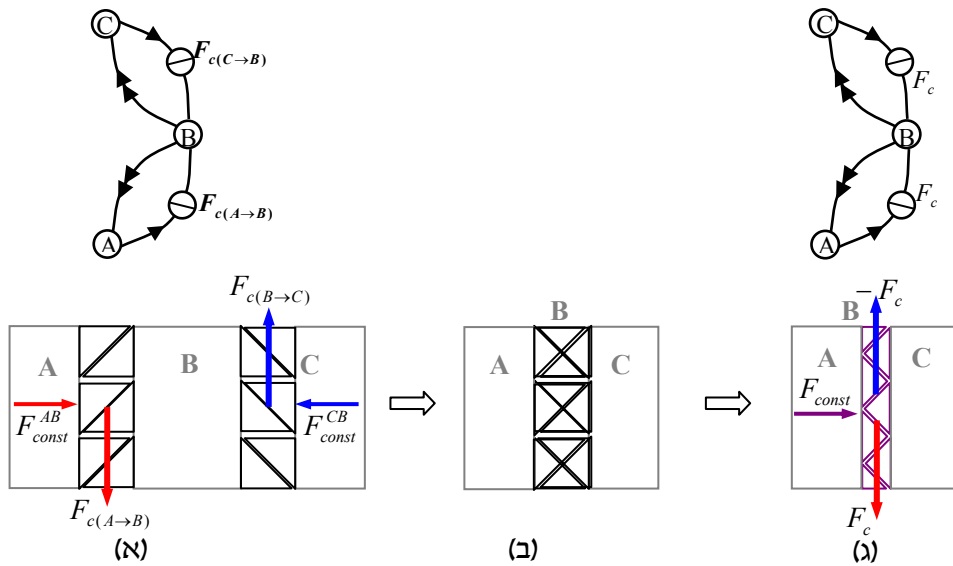
במקרה זה, קיים ערך סף אחד שהינו זהה לשני כיווני הפעלת המומנטים. הפעלת שיקול הנדסי מבני על מגביל המומנט מאפשר צמצום רכיבים הנדסיים מכיוון שאין צורך להפריד בין ההגבלות לשני הכיוונים. לאחר ניתוח של המומנטים והכוחות המופעלים בחלק של מגביל המומנט התואם בייצוג הגרפי את החלק המגביל את הזרימה, ניתן לראות כי ישנם מבנים פשוטים יותר שהתנהגותם שוות ערך לחלק המגביל בייצוג הגרפי. שינוי מבני מאפשר לבנות מגביל מומנט פשוט יותר על ידי צמצום רכיבים או שילובם ברכיבים האחריים במערכת ההנדסית.

מתוך משוואה (4.2.1) ניתן לקבוע כי גם כוחות הצמדה הפועלים על הרכיבים שווים:

$$(4.2.2) \quad F_{const}^{AB} = F_{const}^{CB} = F_{const}$$

כתוצאה מכך, אין צורך בשני כוחות הצמדה שונים לקביעת ערך הסף ומספיק כוח אחד לקביעת ערך-סף יחיד. כתוצאה מקביעת הערכים הזהים במקורות זרימה, החלק האחראי להגבלת זרימה הופך להיות סימטרי וכן גם הייצוג המבני צריך להיות סימטרי.

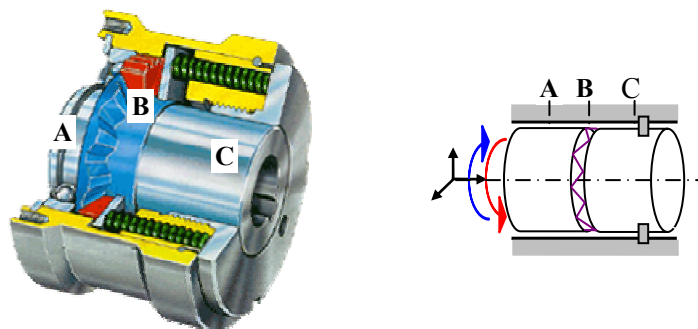
צומת B מהווה צומת בה נשמר שיווי משקל של הזרימות והיא שומרת על ממשק זהה עם צמתים A ו-C. ייצוג אפשרי הנדסי של מצב זה בגרף הוא שילוב של חיבור B-A עם חיבור B-C ליצירת חיבור סימטרי כמתואר באיור 4.23. יש לשים לב כי חיבור זה פשוט יותר והופך את B רכיב קומפקטי יותר.



#### איור 4.23 המרה וצמצום של מגביל המומנט הדו-כיווני

המרת חיבורים A-B ו-C-B במגביל המומנט (א) לחיבור אחד משותף הנובע מחפיפת החיבורים (ב) וקבלת חיבור סימטרי התואם את המגביל עם ערכי סף זהים וכוח הצמדה יחיד (ג).

מגביל המומנט החדש (איור 4.24), התקבל על ידי הפעלת שיקול הנדסי למציאת מבנה אחר שהתנהגותו תהיה זהה לשני החיבורים במגביל המקורי. בייצוג הגרפי, חוץ מלשנות את ערכי מקורות הזרימה לערכים זהים, לא שונה כלום ולכן ניתן לראות כי התבצע צמצום רכיבים בייצוג המכני האקויוולנטי. ניתן היה למצוא מבנה סימטרי אחר המקיים את התנהגות המערכת ולהגיע לפתרונות הנדסיים אחרים.

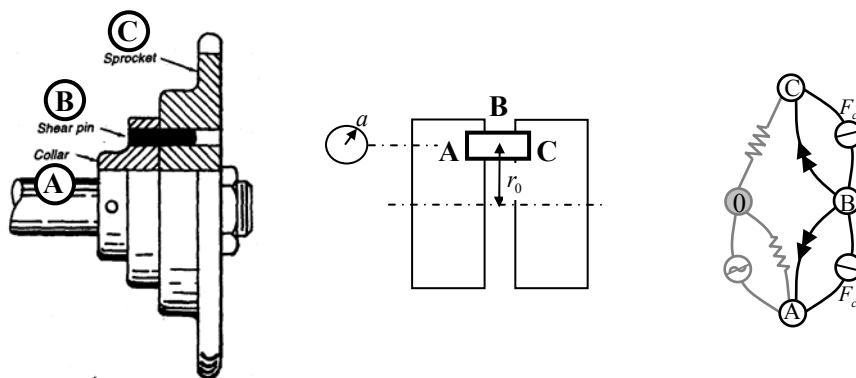


#### איור 4.24 מגביל מומנט דו-כיווני שהתקבל ומגביל תעשייתי

## 4.4.2 קונספטים נוספים של מגביל מומנט

בחלק הקודם, ניתן לראות כי שינוי מבני הביא לקבלת קונספט חדש למגביל המומנט. קונספט זה התבסס על שינוי מבני של המבנה המקורי שהתקבל מהייצוג. שינוי זה התבצע לפי שיקול דעת הנדסי ולכן, ניתן לקבל פתרונות נוספים עבור החלק הסימטרי של הייצוג בגרף. מבנים שונים, חומרים שונים וקביעת כוחות שונים, כולם יאפשרו לקבל תחום קונספטים מגוון המבוסס על הייצוג הגרפי היחיד.

### מגביל מומנט 1



איור 4.25 מגביל מומנט דו-כיווני בעל בורג גזירה

ייצוג, איור חתך של מגביל מומנט וחתך של מגביל תעשייתי עם בורג גזירה.

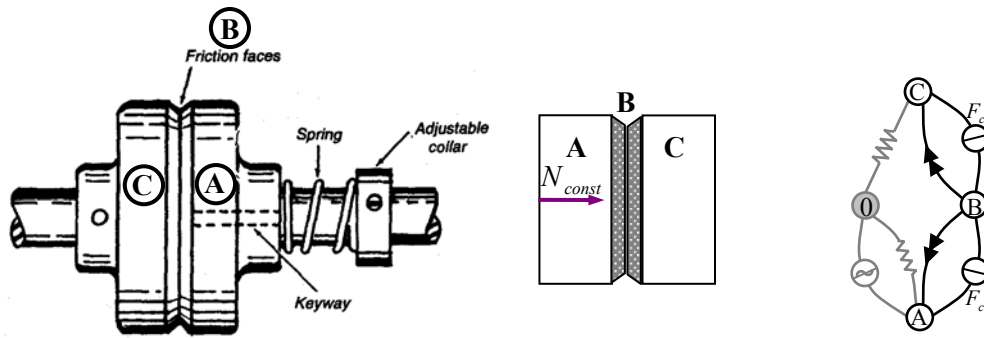
### פעולת המגביל

בורג גזירה פשוט מחבר בין שני החלקים והוא אחראי להעברת המומנט. כאשר המומנט המופעל גדול מדי, הבורג נשבר והמומנט בין שני החלקים מנותק.

### צמצום אלמנטים בייצוג הנדסי של מגביל המומנטים הדו-כיווני

בחירת מקורות זרימה קבועים  $F_c$ , המהווים חלק סימטרי בייצוג הגרפי וקובעים את כוח ערך סף במגביל המומנט. ייצוג הנדסי אפשרי הוא לייצג את B כרכיב סימטרי (בורג) העומד במאמץ גזירה מקסימאלי (4.2.3). אם רכיב הכוח של המומנט המופעל ייצור מאמץ גזירה גדול ממאמץ הגזירה המקסימאלי, רכיב B יכשל ויווצר נתק בין רכיב C לרכיב A. יש לציין שזהו מקרה הרסני עקב שבירת הבורג, ואינו תואם לחלוטין את התנהגות הגרף אשר מתאים למצב קבוע. ניתן להתייחס למקרה בגרף כייצוג רגעי בלבד ברגע הפעלת מקור הזרימה הקבוע.

$$(4.2.3) \quad \begin{aligned} F_c &= \tau_{\max} A \\ \tau_{\max} &= \frac{T_{\max}}{n \pi a^2 r_0} \end{aligned}$$



איור 4.26 מגביל מומנט דו-כיווני בעל משטחי הצמדה

ייצוג, איור חתך של מגביל מומנט וחתך של מגביל תעשייתי עם משטחי הצמדה.

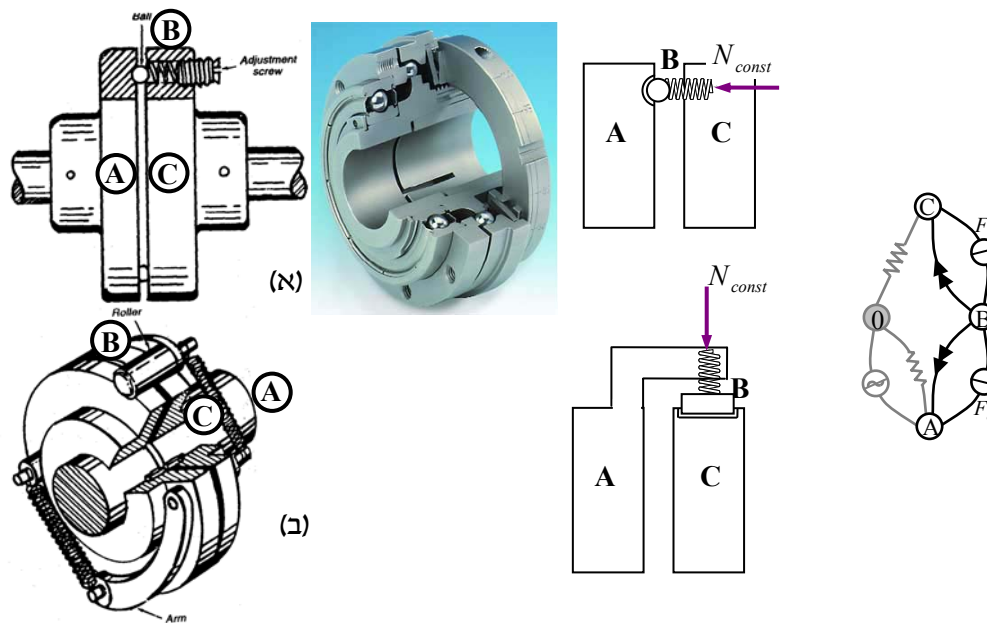
### פעולת המגביל

מצמד חיכוך בו משטחי חיכוך מהווים חיבור האחראי להעברת המומנט. כאשר המומנט המופעל גדול מדי, המשטח מחליק עד ירידת המומנט מתחת לערך הסף. כוח החיכוך נקבע על ידי הידוק של נורמאל למשטחים.

### צמצום אלמנטים בייצוג ההנדסי של מגביל המומנטים הדו-כיווני

בחירת מקורות זרימה קבועים  $F_c$ , המהווים חלק סימטרי בייצוג הגרפי וקובעים את כוח ערך סף במגביל המומנט. ייצוג הנדסי אפשרי הוא לייצג את B והקשתות המחוברות אליו, כרכיב סימטרי (משטחי חיכוך) המוצמדים אחד לשני כך שביניהם פועל כוח חיכוך סטטי (4.2.4). החיכוך הסטטי מעביר מומנט מרכיב A לרכיב C. הגבלת המומנט מתבצעת במידה ורכיב הכוח של המומנט המופעל יהיה גדול מכוח החיכוך הסטטי בין המשטחים. כוח הצמדה בצורה של נורמאל קבוע ( $N_{const}$ ) יקבע את כוח החיכוך הסטטי בין המשטחים (4.2.4).

$$(4.2.4) \quad \begin{aligned} F_c &= F_s \\ F_s &= \mu_s N_{const} \end{aligned}$$



איור 4.27 מגביל מומנט דו-כיווני בעל מסבי הצמדה

ייצוג, איור חתכים של מגבילי מומנט וחתכים של מגבילים תעשייתיים עם בשתי תצורות אפשריות: (א) הצמדה באמצעות מסב, (ב) הצמדה באמצעות גליל.

**פעולת המגביל**

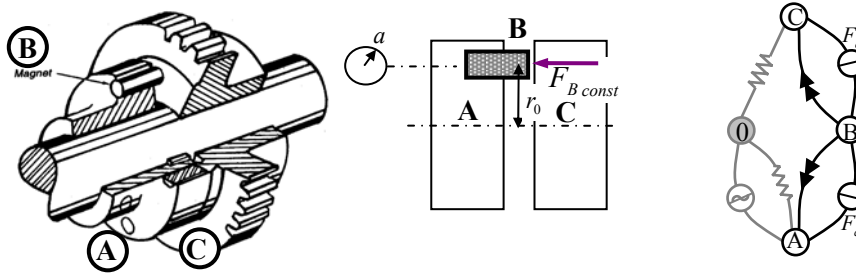
מצמד בעל מנגנון שקע כדורי/גלילי ומסב כדורי/גלילי אשר מהווה חיבור האחראי להעברת המומנט. כאשר המומנט המופעל גדול מדי, מסב הכדור/גלילי מחליק ויוצא מהשקע עד ירידת המומנט מתחת לערך הסף. כוח החיכוך בין הכדור/גליל לשקע נקבע מראש על די קפיץ ובורג.

**צמצום אלמנטים בייצוג ההנדסי של מגביל המומנטים הדו-כיווני**

בחירת מקורות זרימה קבועים  $F_c$ , המהווים חלק סימטרי בייצוג הגרפי וקובעים את כוח ערך סף במגביל המומנט. ייצוג הנדסי אפשרי הוא לייצג את B והקשתות המחוברות אליו, כרכיב סימטרי כגון מסב כדורי או גלילי ושקע תואם, המוצמדים אחד לשני כך שביניהם פועל כוח חיכוך סטטי (4.2.4). החיכוך הסטטי מאפשר העברת המומנט מרכיב A לרכיב C. הגבלת המומנט מתבצעת במידה ורכיב הכוח של המומנט המופעל יהיה גדול מכוח החיכוך הסטטי בין המסב/גליל לשקע שלו. במקרה זה, המיסב/גליל יחליק החוצה מהשקע ורק יחזור אליו להעביר מומנט כאשר המומנט המופעל ירד מתחת לערך הסף הנקבע. כוח ההצמדה בצורה של נורמאל קבוע ( $N_{const}$ ) יקבע את כוח החיכוך הסטטי בין המיסב/גליל לשקע בו הוא נמצא (4.2.5).

$$(4.2.4) \quad \begin{aligned} F_c &= F_s \\ F_s &= \mu_s N_{const} \end{aligned}$$





איור 4.28 מגביל מומנט דו-כיווני בעל מצמדים מגנטיים

ייצוג, איור חתך של מגביל מומנט וחתך של מגביל תעשייתי עם משטחי הצמדה מסוג מגנט.

**פעולת המגביל**

מגביל מומנט המשתמש במגנטים להעביר מומנט כאשר המומנט המקסימאלי שניתן להעברה נקבע לפי מספר המגנטים וגודלם. במקרה של מומנט יתר, הכוח המגנטי אינו מצליח להצמיד את שני החלקים ונוצרת החלקה.

**צמצום אלמנטים בייצוג ההנדסי של מגביל המומנטים הדו-כיווני**

בחירת מקורות זרימה קבועים  $F_c$ , המהווים חלק סימטרי בייצוג הגרפי וקובעים את כוח ערך-הסף במגביל המומנט. ייצוג הנדסי אפשרי הוא לייצג את B והקשתות המחוברות אליו, כרכיב סימטרי בעל יכולת להעביר מומנט בצורה שווה לשני כיוונים. ניתן לייצג את B במערכת ההנדסית כמגנט שמחובר רכיב A ומצמיד את רכיב C (חומר פרומגנטי) באמצעות כוח מגנטי קבוע (4.2.5). הכוח של המגנט מאפשר הצמדה והעברה של המומנט מרכיב A לרכיב C. הגבלת המומנט מתבצעת במידה ורכיב הכוח של המומנט המופעל יהיה גדול מכוח ההצמדה המופעל בין המגנט לרכיב C. במקרה זה, המגע בין המגנט B לרכיב C יינתק ורק יחזור להעביר מומנט כאשר המומנט המופעל ירד מתחת לערך הסף הנקבע. כוח ההצמדה בצורה של שדה מגנטי קבוע יקבע את ההצמדה בין הרכיבים (4.2.5).

$$(4.2.5) \quad \begin{aligned} F_c &= F_B \\ F_B &= \frac{\pi a^2 B^2}{2\mu_0} \end{aligned}$$

## 5. סיכום, מסקנות, והמשך מחקר

### 5.1 סיכום

*בעבודה שהוצגה כאן, פותחו שתי שיטות המסייעות בתכנן הקונספטואלי המבוססות על עקרון העברת מערכות קיימות מתחומים אחרים דרך ייצוגים מתמטיים – תורת הגרפים, המאפשרים להעביר ידע מבני וטופולוגי הנדסי כאשר ההתנהגות עוברת באופן לא מפורש.*

#### 5.1.1 הבעיות שטופלו במסגרת העבודה

הבעיות המרכזיות במחקר כללו את העברת הידע מהייצוג לתחום ההנדסה, והפרדה בין שלושת המאפיינים של תכן: פונקציה, התנהגות ומבנה. העברת הידע הייתה המכשול הגדול כאשר היה צורך לפתח מערכות הנדסיות מייצוגים גרפים שעל פניהם, לא נראו דומים כלל למערכות ההנדסיות. השיטה הייתה חייבת לכלול שיקולים דומים בהעברת הידע על מנת להתאים לכמה שיותר מקרים וייצוגים ועל מנת להימנע משיטה מוגבלת מדי. כל השלבים היו צריכים להיות מוגדרים מראש ופשוטים מספיק על מנת ליצור קונספטים מבניים פשוטים אך מובנים, היכולים להוות בסיס לתכן מדויק. כמו כן, היה צורך להפריד בין מאפייני התכן בהתאם לשלבים המבוצעים על מנת לחסוך סרבול של השיטות.

בתיזה פותחו שתי שיטות המאפשרות שלבי בנייה דטרמיניסטיים. כל העברת ידע עקבה אלמנט-אלמנט אחרי מבנה הייצוג והוסיפה בהדרגתיות רכיבים ובהתאם, את הרכיבים הנדסיים המתאימים מבסיס נתונים. כאשר היה צורך בכל זאת, בהפעלת שיקולים הנדסיים של המתכנן, הוצאו פתרונות מוכרים תוך התבססות על תכונות הייצוג. הבעיה השנייה טופלה על ידי הגדרת הפונקציה של התכן כמפתח לחיפוש הפתרון, הגדרת המבנה וקשריו הטופולוגיים כאמצעי להעברת הידע ואילו ההתנהגות הועברה באמצעות בחירת הייצוג המתאים. דבר זה חשוב, מכיוון שקושי רב טמון בשימוש של התנהגות ומבנה בו-זמנית בתהליך התכן (Fenves, 2001). בשתי השיטות שפותחו אין צורך בהפעלת שיקולי התנהגות בעת בניית המערכת ההנדסית הודות לתכונות הייצוג. ההפרדה בין ההתנהגות למבנה הקלה מאד על תהליך התכן ואפשרה לו להיות שיטתי יותר.

#### 5.1.2 עיקרי התוצאות שהתקבלו בעבודה

מחקר זה כפי שהוזכר, עסק בתכנן קונספטואלי שהתבסס על ייצוגים גרפים המעבירים ידע ממערכות קיימות ליצירת מערכות חדשות. דוגמאות פותחו וקושרו אחת לשנייה על מנת להבטיח ראייה כוללת של השיטות. העבודה כללה כמה חלקים עיקריים בהם נעשה שימוש, ולהלן עיקרי התוצאות:

1. התקבלו שיטות מסודרות ודטרמיניסטיות המאפשרות העברת מערכות קיימות מתחום אחד לשני באופן מסודר ושיטתי.
2. הפרדה בין המבנה להתנהגות בשלבי בניית המערכת ההנדסית מהייצוג על מנת לבצע תכן קונספטואלי ללא שיקולי התנהגות.

3. שימוש באותו ייצוג משותף לתכן של מערכות מכניות ליניאריות ולאחר מכן בהעברתן באופן מסודר למערכות אנגולריות.
4. שימוש בקשרים והיחסים בין הייצוגים השונים על מנת לנצלם לתכן הקונספטואלי.
5. שימוש בתכונת הדואליות בין מסבכים למכניזם לתכן קונספטואלי אפשר העברת מערכות מסטטיקה לקינמטיקה ולהיפך.
6. הצגה וקישור של המערכות שפותחו באמצעות השיטות לפתרונות הנדסיים ידועים בתעשייה. קשר זה הורחב לתחום חדש יחסית של קבלת תחום הקונספטים על פי הייצוג הגרפי.

## 5.2 מסקנות

המסקנות העיקריות שהתקבלו ממחקר זה הן :

1. ייצוגים גרפיים מהווים דרך נוחה ופשוטה לייצוג התנהגות ומבנה של מערכות לצורכי תכן.
2. הפרדה ברורה בין מבנה המערכת ההנדסית להתנהגותה, תורמת הרבה להקלה על בניית המערכת ברמה ההנדסית.
3. תיכון של מערכת מכנית ליניארית ולאחר מכן מערכת הנדסית אנגולרית על בסיס אותו הייצוג תורמת ברוב המקרים לפתרון קל יותר.
4. מעבר לייצוג דואלי מאפשר תכן שיטתי מבני לחלוטין אשר מאפשר להגיע לתחומי הנדסה שעד כה לא היו נגישים למהנדס העובד בתחום מסוים
5. קיים יתרון במעבר ממערכת הנדסית דו-מימדית לייצוג חד-מימדי שלה. יתרון זה מתבטא בשילוב המערכות באופן קומפקטי יותר.
6. בגישה שפותחה בתיזה ניתן להגיע לכמה מערכות הנדסיות השונות מבנית אך זהות התנהגותית. מתברר כי שימוש בגישה המוצעת מאפשר לקבל מידע על מרחב הפתרונות הקונספטואלי האפשרי הנקרא (Domain of Concepts). דהיינו, יכול לתת אומדן לכמות הפתרונות האפשריים שיש לצפות עבור בעית תכן נתונה.
7. בנושא המחשוב, תכן קונספטואלי על בסיס הייצוגים הגרפיים יכול להוות אחד מפריצות הדרך בתחום התכן ההנדסי. הייצוגים עליו התבסס המחקר הם ייצוגים מתמטיים ידועים, שקיימים עבורם אלגוריתמים רבים בעולם מדעי המחשב, וניתן לנצלם ולשלב את הנושא בתוכנות תיב"מ בעתיד.

## 5.3 המשך מחקר

כל הדברים שהוצגו במחקר זה רק פותחים דלתות חדשות וצורך העמקה בנושאים שרק נגעו בהם. עוד קיימים הרבה נושאים מעניינים אשר מבוססים על השילוב של ייצוגים גרפיים ותכן קונספטואלי כאשר כמה הצעות להמשך מצוינות כאן :

1. העמקה והרחבה של בסיס נתונים (data base) לתכן. אומנם בעבודה זו נעשה שימוש בכמה רכיבים שונים, אך מכיוון שבסופו של דבר התהליך הינו תהליך של העברת ידע, עדיין צריך להרחיב ולבנות ולהעשיר את "השפה" הזאת. הצעות כוללות הוספת רכיבים מורכבים יותר וייצוגם הגרפי לבסיס הנתונים על מנת לאפשר התמודדות עם ייצוגים מורכבים יותר.
  2. שימוש בייצוגים שונים. מחקר זה דן בעיקר בשני ייצוגים, אך קיימים עוד ייצוגים וגם ישנם ייצוגים גרפים בפיתוח. כאשר יוכנסו עוד ייצוגים והקשר ביניהם באופן מסודר, שדה הפתרונות ותחומי ההנדסה היכולים להוות בסיס להעברת ידע יתרחבו כן גם הפתרונות הקונספטואליים.
  3. הדבר האחרון ואולי הכי חשוב הוא נושא המיחשוב. עקב העובדה שהייצוגים מבוססים על תורת הגרפים, אחד הענפים החשובים בתחום מדעי המחשוב, הופכת אותם לברי-מחשוב. הכנסת בסיס הנתונים ושיטות התכן הקונספטואלי באמצעות הייצוגים לתוכנה, יכולים לשמש עזר יקר ערך למהנדסים בזמן הפיתוח. השיא של תכן שיטתי הוא בעצם תכן ממוחשב היכול למשל להשתלב בתוכנות תכנון כגון תוכנות תיב"מ, ובעצם לעדכן ולהציע פתרונות ב-real time המבוססים על ייצוגים הנמצאים בבסיס הנתונים. נושא זה שלעצמו, הוא נושא להמון מחקרים ופיתוח.
- השיטות לתכן קונספטואלי הם נושא כל-כך מעניין ורובם רק בתחילת הדרך ויש עוד המון לחקור בנושא. המחבר רק יכול לחלום שיום אחד המצאת קונספטים תהיה עוד מקש על מקלדת המחשב, ומקווה שעבודה זו אכן תתרום לכיוון זה.

## מקורות

1. Al-Hakim L, Shrivastava A., "Application of graph theory for structural enumeration and presentation of mechanisms". *Eight World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*. Prague, p. 26-31, 1991.
2. Altshuller, H., *The Art of Inventing (And Suddenly the Inventor Appeared)*. Worcester, MA: Technical Innovation Center, 1994.
3. Artobolevsky II, *Mechanisms in Modern Engineering Design*. MIR Publishers, Moscow, 1986.
4. Chiou S.J., "Conceptual Design of Mechanisms Using Kinematic Building Blocks" *A Computational Approach, Ph.D. Dissertation*, University of Michigan, Ann Arbor, 1994.
5. Chironis N., Sclater N., *Mechanisms, Linkages and Mechanical Controls*. McGraw Hill, New York, 2001.
6. Cormen, T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., *Introduction to Algorithms*. MIT Press., 1990.
7. Crossley F.R.E., "The Permutations of Kinematic Chains of Eight Members or Less from the Graph-theoretic Viewpoint." *Developments in Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 2*, Pergamon Press, Oxford, pp. 467-486, 1965.
8. Chakrabarti, A., Bligh, T.P., "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.
9. Chakrabarti, A., Bligh, T.P., "An approach to functional synthesis of solutions in mechanical conceptual design. Part II: kind synthesis", *Research in Engineering Design*, Vol. 8, pp. 52-62, 1996a.
10. Chakrabarti, A., Bligh, T.P., "An approach to functional synthesis of solutions in mechanical conceptual design. Part III: spatial configuration", *Research in Engineering Design 2*, pp. 116-124, 1996b.
11. Dobrjanskyj L, Freudenstein J., "Some application of graph theory to the structural analysis of mechanisms", *Journal of Engineering for Industry*, pp. 153-158, 1967.
12. Dobrjanskyj L., "Application of Graph Theory to the Structural Classification of Mechanisms". *PhD dissertation*, Columbia University, 1966.
13. Erdman A.G., Thompson T.R., Riley D.R., "Type Selection of Robot and Gripper Kinematic Topology Using Expert Systems," *International Journal of Robotics Research*, Summer 1986.
14. Fenves S. J., Shooter, S. B., Keirouz, W., Szykman, S., "A Model for the Flow of Design Information in Product Development," *Engineering With Computers*, Vol. 16, No. 3-4, pp. 178-194, 2001.
15. Finger, S., Rinderle, J. R., "A Transformational Approach to Mechanical Design Using a Bond Graph Grammar", *Design Theory and Methodology - DTM '89*, DE-Vol. 17., pp. 107-116. ASME, 1989.
16. Fingers S., Dixon J.R., "A Review of Research in Mechanical Engineering Design, Part I: Descriptive, Prescriptive, and Computer-Based Models of Design Processes", *Research in Engineering Design*, Vol. 1,1, pp. 51-68, 1989.
17. Freudenstein F., Dobrjanskyj L., "On a theory for the type synthesis of mechanisms", *Proceedings of the Eleventh International Conference of Applied Mechanics*, pp.420-428, 1964.
18. Freudenstein F., "The Basic Concepts of Polya's Theory of Enumeration with Application to the Structural Classification of Mechanisms," *Journal of Mechanisms*, Volume 3, pp. 275-290, 1967.

19. Freudenstein F., Maki E.R., "The creation of mechanisms according to kinematic structure and function", *Environment and Planning*, Vol. 6, pp. 375-391, 1979.
20. Gero, J. S., Kazakov, V., "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.
21. Goldberg, D., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
22. Goodman, E.D., Rosenberg, R.C., Seo, K., Fan Z., Hu, J., "Toward a Unified and Automated Design Methodology for Multi-Domain Dynamic Systems Using Bond Graphs and Genetic Programming," *Mechatronics*, Vol. 13(8-9), pp. 851-885, 2003.
23. Hinrichs, T.R., "Some Limitations of Feature-Based Recognition in Case-Based Design". *International Conference on Case Based Reasoning*, pp. 471-480, 1995.
24. Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
25. Jensen P. W., "Systematic Mechanism Design", *Design Engineering Conference N.Y.*, ASME Press, pp.1-15, 1965.
26. Jones F. D., Horton H. L., Newell J. A., *Ingenious Mechanisms for Designers and Inventors*, Vols. 1 - 4, Industrial Press, 1930-67.
27. Joskowicz, L, Sacks E., 1988, "From Kinematics to Shape: An Approach to Innovation Design," *Proceedings of the AAAI*, pp. 347-352, 1988.
28. Kannapan S.M., Marshek K.M., "An algebraic and predicate logic approach to representation and reasoning in machine design", *Mechanisms and Machine Theory* Vol. 25 (3), pp. 335 – 353, 1990.
29. Karnopp, D. C., Margolis, D. L., Rosenberg, R. C. *System Dynamics - A Unified Approach*. Wiley Interscience, New York, 2nd edition, 1990.
30. Kota S., Chiou S.J., "Conceptual design of mechanisms based on computational synthesis and simulation of kinematic building blocks", *Research in Engineering Design*, Vol. 4, pp. 75 –87, 1992.
31. Koza, J.R., Bennett, F.H., Andre, D., Keane, M.A., Dunlap, F., "Automated Synthesis of Analog Electrical Circuits by Means of Genetic Programming," *IEEE Trans. Evol. Computation*, 1(2), pp.109-128, 1997.
32. Li. C.L., Tan. S.T., Chan. K.W., "A Qualitative and Heuristic Approach to the Conceptual Design of Mechanisms", *Engineering Applications in Artificial Intelligence*, Vol. 9, No. 1, pp. 17-31, 1996.
33. Madhusudan T.N., "A Review of Bond-graph representation based design methodologies" *tech. report CMU-RI-TR-95-28*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, July 1995.
34. Maher, M., Fenves S., "HI-RISE: An Expert System for the Preliminary Structural Design of High Rise Buildings", *Knowledge Engineering in Computer Aided Design*, pp. 125-135, 1985.
35. 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.
36. Moore, C.J., "Complementary Innovative Computer Systems for Bridge Design", *EG-SEA-AI Workshop: Application of Artificial Intelligence in Structural Engineering*, Lausanne, Switzerland, pp. 2-14, 1993.
37. Navinchandra, D., *Exploration and Innovation in Design*. Springer-Verlag, New York, 1991.
38. Norton R. L., *Design of Machinery*, McGraw-Hill, 1992.
39. Olson D.G., "A comprehensive graph theory representation for computer aided design of complex planar mechanisms", *PhD dissertation*, University of Minnesota, 1988.

40. Pahl, G., Wallace, K.M., "Using the concept of functions to help synthesise solutions", *Engineering design synthesis. Understanding, approaches and tools*, pp. 109-119, 2002.
41. Pahl, G. and Beitz, W., *Engineering Design – A Systematic Approach*, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag, 1996.
42. Paynter, H. M., *Analysis and Design of Engineering Systems*, MIT Press, Cambridge MA, 1961.
43. Prabhu, D.R., Taylor, D.L., "Synthesis of systems from specifications containing orientations and positions associated with flow variables", *Proceedings of the 1989 ASME Design Automation Conference*, Montreal, ASME, pp. 273-280, 1989.
44. Pryor R.F., Dhande S.G., Sandor G.N., "On the classification and enumeration of six-link and eight-link cam-modulated linkages", *Proceedings of the Fifth World Congress on the Theory of Machines and Mechanics*, Montreal, pp. 1315-21, 1979.
45. Qian, L., Gero, J.S., "A Design Support System Using Analogy", *Artificial Intelligence in Design*, 1992.
46. Redfield, R. C., "Bond Graphs in Dynamic System Design: Concepts for a Continuously Variable Transmission," *1999 International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM '99)*, The Society for Computer Simulation, pp.90-95, 1999.
47. Redfield, R. C., Krishnan, S., "Towards Automated Conceptual Design of Physical Dynamic Systems", *Journal of Engineering Design*, Vol. 3, No. 3, pp. 187-204, 1992.
48. Rivard, H., Fenves, S.J., "SEED-Config: A Case-Based Reasoning System for Conceptual Building Design", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2000.
49. Shai O., "The Duality Relation between Mechanisms and Trusses", *Journal of Mechanism and Machine Theory*, 36(3), pp. 343-369, 2001a.
50. 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, 2001b.
51. Shai O., "Utilization of the Dualism between Determinate Trusses and Mechanisms", *Mechanism and Machine Theory*, Vol 37, No. 11, pp. 1307-1323, 2002a.
52. Shai O., "Design through Common Graph Representations", *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Chicago, September 2-6, 2003.
53. Simon, H. A., *The Sciences of the Artificial*, 2<sup>nd</sup> Ed., MIT Press, Cambridge, 1981.
54. Sohn W, Freudenstein F., "An application of dual graphs to the automatic generation of the kinematic structures of mechanisms", *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*; Vol. 108, pp. 392-398, 1986.
55. Soni A.H., Dado M., Weng Y., "An automated procedure for intelligent mechanism selection and dimensional synthesis", *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, pp.130-137, 1988.
56. Suh, N.P., *The Principles of Design*, Oxford University Press, 1990.
57. Swamy M.N.S., Thulasiraman K., *Graphs, Networks, and Algorithms*, John Wiley & sons Inc., New York, 1981.
58. Ulrich, K.T., Seering, W.P., "Synthesis of Schematic Descriptions in Mechanical Design", *Research in Engineering Design*, Vol. 1, pp.3-18, 1989.
59. Ulrich, K.T., Seering W.P., "Function Sharing in Mechanical Design", *Artificial Intelligence in Engineering Design*, Vol. 2, Academic Press, pp. 185-213, 1992.
60. Yan H.S., *Creative design of mechanical devices*, Springer-Verlag, Singapore, 1998.

## נספח

### שלבים דטרמיניסטיים לבניית מערכות הנדסיות מהייצוג בגרפים

השלבים הדטרמיניסטיים לתכן מכילים מגוון פתרונות תכן עבור ייצוגים בגרף. שימוש בשלבים אלו שייך לבניית המערכת השייכת לתחום ההנדסי של הבעיה על פי הייצוג בגרף, כאשר זהו השלב הבעייתי ביותר בשיטת התכן. בתהליך תכן רגיל, מהנדס ימצא עצמו מחפש בקטלוגים עבור רכיבים או מערכות המתאימים ליישום הרצוי.

בשיטת התכן באמצעות גרפים, הגרף והטופולוגיה שלו כבר מייצגים את הפתרון הנדרש הן מבחינה מבנית והן מבחינה התנהגותית ולכן השלב האחרון הוא להעביר את המידע הנצור בגרף ולבנות מערכת הנדסית שוות ערך. יש לשים לב כי המונח שמתאר את התהליך הוא "לבנות". שימוש במונח זה אינו מקרי מכיוון שככל שתהליך התכן מתעסק בייצוג הפיסיקלי והמבני ולא ההתנהגותי של המערכת, התהליך הופך להיות יותר שיטתי. הסיבה לכך היא שמתכנן המפעיל שיקולי התנהגות, נדרש גם להפעיל הבנה ותהליך זה מקשה על פתרון שיטתי של בעיה. המצב הרצוי בשיטת התכן היא הפעלת השיטה לבניית המערכת ללא צורך בהבנת פעולתה. לאחר הבנייה, תהליך אנליזה על הגרף והמערכת המתקבלת תביא לבדיקה והבנה של המערכת שנבנתה.

שלבי הבנייה המוצאים יש להדגיש, אינם הופכים את התהליך לבנייה והעברת ידע מבנית טהורה. עדיין יש צורך להפעיל שיקולי התנהגות במקרים מסוימים, אבל הקטלוג עדיין עוזר בהפחתת שיקולים אלו תוך כדי תהליך התכן.

שלבי הבנייה מותאמים ספציפית לסוג הייצוג וכמובן לסוג המערכת והתחום ההנדסי בו היא נבנית. השלבים ניתנים להרחבה כבסיס נתונים המאפשר, במידת הצורך, לאתר כמה אפשרויות לייצוג הנדסי של רכיבי הגרף. ככל שבסיס נתונים זה רחב יותר, כך קיימים יותר פתרונות הנדסיים אפשריים לייצוג בגרף.

### טבלאות בנייה

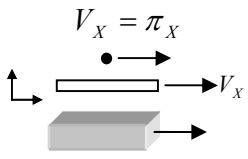
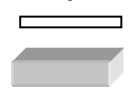
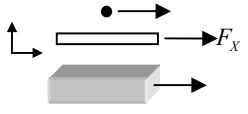
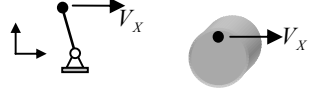
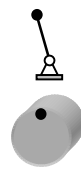
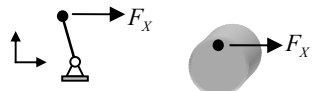
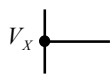

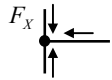
טבלאות הבנייה המתארים את שלבי הבנייה הדטרמיניסטיים כוללים עבור כל שלב ושלב את הנתונים הבאים:

1. התיאור הגרפי של האלמנט בגרף והתנהגות המשתנים לפי סוג הגרף.
2. התחום ההנדסי המקורי בו נבנה התכן או התחום ההנדסי ממנו מעובר מידע לייצוג בגרף.
3. המבנה/מבנים המוצאים כייצוג הנדסי אפשרי של האלמנט בגרף.
4. התנהגות המבנה ההנדסי המוצא ומשתניו.

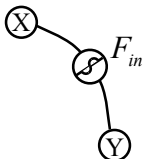
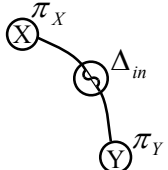



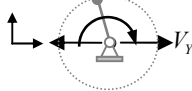

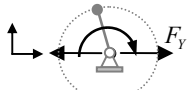
צומת בגרף

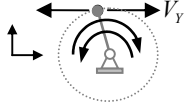

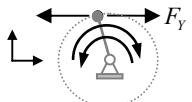




<b>ייצוג FGR</b>	<b>ייצוג PGR</b>
$\otimes$	$\otimes \pi_x$
צומת עליה מופעלים זרימות	צומת בעלת פוטנציאל

התנהגות	מבנה	תחום
<p>מהירות ליניארית או מיקום במערכת הצירים לאורך ציר:</p> $V_x = \pi_x$ 	<p>נקודה, רמה או רכיב</p> 	<p><b>מכני ליניארי PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה</p>
<p>רכיב במערכת הצירים עליו מופעלים כוחות לאורך ציר כך שסה"כ הכוחות: <math>\sum F_x = 0</math></p> 		<p><b>מכני ליניארי FGR</b> זרימה = כוח</p>
<p>מהירות ליניארית או היטל של רדיוס הפעולה r על מערכת הצירים לאורך ציר: <math>V_x = \pi_x</math></p> 	<p>נקודה ברדיוס r על רכיב.</p> 	<p><b>מכני אנגולרי PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה משיקית או זוויתית</p>
<p>כוח ליניארי או היטל של רדיוס הפעולה r על מערכת הצירים לאורך ציר: <math>F_x = F_x</math></p> 		<p><b>מכני אנגולרי FGR</b> זרימה = כוח משיקי (מומנט)</p>
<p>צומת בעלת פוטנציאל: <math>V_x = \pi_x</math></p> 	<p>צומת במעגל החשמלי</p> 	<p><b>חשמל PGR</b> פוטנציאל = מתח</p>
<p>צומת עליו סה"כ הזרימה שווה 0: <math>\sum F_x = 0</math></p> 		<p><b>חשמל PGR</b> זרימה = זרם</p>

קשת עם מקור מתחלף

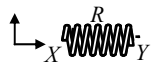
ייצוג FGR	ייצוג PGR
	
<p>קשת מקור זרימה מתחלפת כאשר המקור משנה את קוטביות הקשת בתדירות הנקבעת ומפעיל זרימה משתנה על הצמתים: <math>F_{in} = \pm F</math>.</p>	<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים כאשר המקור משנה את קוטביות הקשת בתדירות הנקבעת ומפעיל פוטנציאל משתנה על הצמתים: <math>\Delta_{in} = \pm(\pi_Y - \pi_X)</math>.</p>

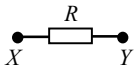
התנהגות	מבנה	תחום
<p>הפעלת מהירות/תזוזה ליניארית מתחלפת לאורך ציר במערכת צירים. הנעה הינה ביחס לאדמה ולכן <math>V_x = \pi_x = 0</math>.</p> $V_Y = \pm \Delta_{in}$	<p>רכיב מכני</p> 	<p><b>מכני ליניארי PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה</p>
<p>הפעלת כוח ליניארי מתחלף לאורך ציר במערכת צירים. הפעלה הינה ביחס לאדמה ולכן <math>F_x = 0</math>.</p> $F_Y = \pm F_{in}$		<p><b>מכני ליניארי FGR</b> זרימה = כוח</p>
<p>הפעלת מהירות/תזוזה ליניארית בצורת היטל של הנעה אנגולרית לאורך ציר במערכת צירים. הנעה הינה ביחס לציר ולכן <math>V_x = \pi_x = 0</math>.</p> $V_Y = \pm \Delta_{in}$ 	<p>היטל של מערכת אנגולרית לאורך ציר.</p> 	<p><b>מכני ליניארי PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה</p>
<p>הפעלת כוח ליניארי בצורת היטל של מומנט לאורך ציר במערכת צירים. הפעלה הינה ביחס לציר ולכן <math>F_x = 0</math>.</p> $F_Y = \pm F_{in}$ 		<p><b>מכני ליניארי FGR</b> זרימה = כוח</p>

<p>הפעלת מהירות/תזוזה אנגולרית מתחלפת סביב ציר במערכת צירים. הנעה הינה ביחס לאדמה: <math>V_Y = \pm \Delta_{in}</math></p> 	<p>הנעה או הפעלת מערכת אנגולרית מתחלפת סביב ציר אדמה.</p> 	<p><b>מכני אנגולרי PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה משיקית או זוויתית</p>
<p>הפעלת כוח משיקי הגורם למומנט מתחלף סביב ציר במערכת צירים. הנעה הינה ביחס לאדמה: <math>F_Y = \pm F_{in}</math></p> 		<p><b>מכני אנגולרי FGR</b> זרימה = כוח משיקי</p>
<p>הפעלת מתח על צומת: <math>V_Y = \pm \Delta_{in}</math></p> 	<p>מקור מתח מתחלף</p> 	<p><b>חשמל PGR</b> פוטנציאל = מתח</p>
<p>הפעלת זרם על צומת: <math>F_Y = \pm F_{in}</math></p> 	<p>מקור זרם מתחלף</p> 	<p><b>חשמל FGR</b> זרימה = זרם</p>

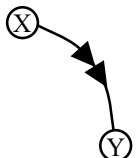
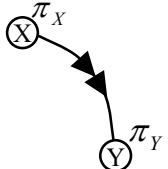
קשת התנגדות בגרף

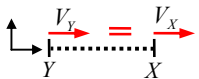
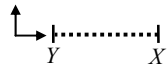
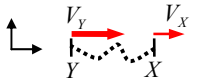
<p><b>ייצוג FGR</b></p>	<p><b>ייצוג PGR</b></p>
	
<p>קשת שדרכה עובר זרם: <math>F_R</math></p>	<p>קשת שעליה נופל הפרש פוטנציאליים הנקבע על ידי: <math>\Delta_R = \pi_X - \pi_Y</math></p>

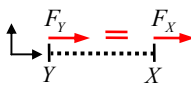
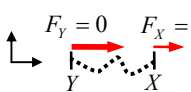
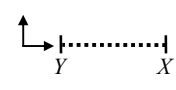
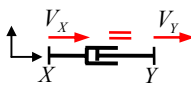
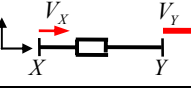
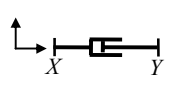
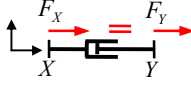
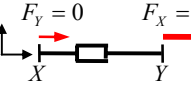
<p><b>התנהגות</b></p>	<p><b>מבנה</b></p>	<p><b>תחום</b></p>
<p>סוג מהירות/תזוזה בין הקצוות X לקצה Y: <math>\Delta_l = \pi_X - \pi_Y = F \cdot \frac{1}{k}</math></p>	<p>קפיץ</p>  <p><math>R = \frac{1}{k}</math></p>	<p><b>מכני ליניארי PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה</p>

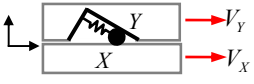

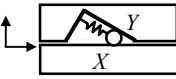
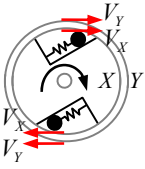
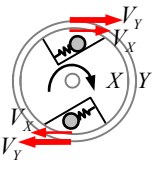

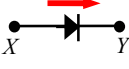

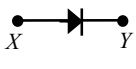
סופג כוח הנוצר כתוצאה מכיווץ/מתיחה: $F_R = \Delta_l \cdot k$ : קצה $X$ לקצה $Y$		<b>מכני ליניארי</b> <b>FGR</b> זרימה = כוח
סופג הפרש מתחים בין צמתים: $\Delta_R = V_X - V_Y = IR$	נגד 	<b>חשמל</b> <b>PGR</b> פוטנציאל = מתח
מעביר זרם בין צמתים: $I_R = \frac{\Delta_R}{R}$		<b>חשמל</b> <b>FGR</b> זרימה = כוח

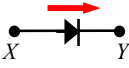
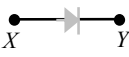
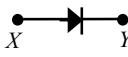
קשת חד-כיוונית בגרף

ייצוג FGR	ייצוג PGR
	
קשת דרכה עובר זרם הנקבע על ידי החוקים הבאים: 1. $\pi_X \rightarrow \pi_Y$ : זרימה חיובית מ- $X$ ל- $Y$ - קשת קיימת בין $X$ ל- $Y$ . 2. $\pi_Y \rightarrow \pi_X$ : זרימה שלילית - קשת אינה קיימת בין $X$ ל- $Y$ .	קשת שעליה נופל הפרש פוטנציאליים הנקבע על ידי החוקים הבאים: 1. $\pi_Y \leq \pi_X \rightarrow \pi_Y = \pi_X$ : קשת קיימת בין $X$ ל- $Y$ . 2. $\pi_Y > \pi_X$ - קשת אינה קיימת בין $X$ ל- $Y$ .

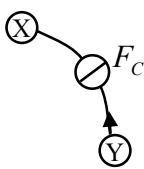
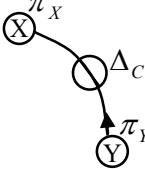
התנהגות	מבנה	תחום
$V_Y \leq V_X$ : $X$ ל- $Y$ בעל מהירות קטנה שווה הכבל נמצא במתיחה ולכן $X$ מושך את $Y$ והם נעים באותה במהירות : $V_Y = V_X$ 	כבל (cable) 	<b>מכני ליניארי</b> <b>PGR</b> פוטנציאל = מהירות/תזוזה
$V_Y > V_X$ : $X$ ל- $Y$ בעל מהירות גדולה רפוי ולכן $X$ ו- $Y$ נעים כל אחד במהירות שלו כך שהמערכת המכנית אינה מרגישה בכבל. 		

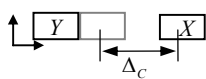
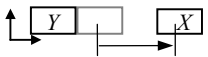
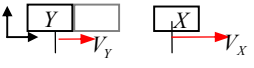

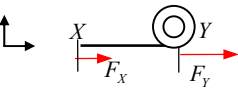
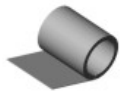
התנהגות	מבנה	תחום
<p>על <math>Y</math> מופעל כוח קטן שווה ל-<math>X</math>: <math>F_Y \leq F_X</math>  הכבל נמצא במתיחה ולכן <math>X</math> מושך את <math>Y</math> והם והכוח עובר בכבל:</p>  <p>על <math>Y</math> מופעל כוח גדול מ-<math>X</math>: <math>F_Y &gt; F_X</math>  הכבל רפוי ואין שום העברה של כוח עקב התנועה היחסית.</p> 	<p>כבל (cable)</p> 	<p>מכני ליניארי  <b>FGR</b>  זרימה = כוח</p>
<p><math>Y</math> בעל מהירות קטנה שווה ל-<math>X</math>: <math>V_Y \leq V_X</math>  התומך נמצא בלחיצה ולכן <math>X</math> דוחף את <math>Y</math> והם נעים באותה במהירות: <math>V_Y = V_X</math></p>  <p><math>Y</math> בעל מהירות גדולה מ-<math>X</math>: <math>V_Y &gt; V_X</math>  התומך נפתח ולכן <math>X</math> ו-<math>Y</math> נעים כל אחד במהירות שלו כך שהמערכת המכנית אינה מרגישה ב-strut.</p> 	<p>תומך (strut)</p> 	<p>מכני ליניארי  <b>PGR</b>  = פוטנציאל = מהירות/תזוזה</p>
<p>על <math>Y</math> מופעל כוח קטן שווה ל-<math>X</math>: <math>F_Y \leq F_X</math>  התומך נמצא בלחיצה ולכן <math>X</math> דוחף את <math>Y</math> והם והכוח בכבל הוא סכום וקטורי של שני הכוחות:</p>  <p>על <math>Y</math> מופעל כוח גדול מ-<math>X</math>: <math>F_Y &gt; F_X</math>  התומך נפתח ואין שום העברה של כוח עקב התנועה היחסית.</p> 		<p>מכני ליניארי  <b>FGR</b>  זרימה = כוח</p>

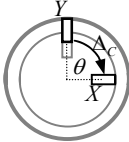
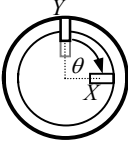
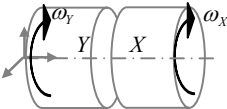
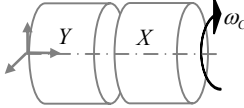
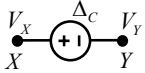

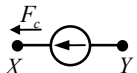

התנהגות	מבנה	תחום
<p><math>V_Y \leq V_X</math>: בעל מהירות קטנה שווה ל-<math>X</math>: המסב <b>מוצמד</b> ולכן <math>X</math> <b>מצמיד</b> את <math>Y</math> והם נעים באותה במהירות: <math>V_Y = V_X</math></p>  <p><math>V_Y &gt; V_X</math>: בעל מהירות גדולה מ-<math>X</math>: נדחף אחורה ואין הצמדה. <math>X</math> ו-<math>Y</math> נעים כל אחד במהירות שלו כך שהמערכת המכנית אינה מרגישה במצמד.</p> 	<p>מסב/מצמד חד-כיווני ליניארי</p> 	<p><b>מכני ליניארי</b> <b>PGR</b> = פוטנציאל = מהירות/תזוזה</p>
<p><math>V_Y \leq V_X</math>: בעל מהירות משיקית קטנה שווה ל-<math>X</math>: <math>X</math> טבעת <b>מוצמד</b> ולכן טבעת <math>Y</math> והם נעים באותה במהירות: <math>V_Y = V_X</math></p>  <p><math>V_Y &gt; V_X</math>: בעל מהירות גדולה מ-<math>X</math>: נדחף אחורה ואין הצמדה בין הטבעות. <math>X</math> ו-<math>Y</math> נעים כל אחד במהירות שלו כך שהמערכת המכנית אינה מרגישה במצמד.</p> 	<p>מיסב/מצמד חד-כיווני אנגולרי</p> 	<p><b>מכני אנגולרי</b> <b>PGR</b> = פוטנציאל = מהירות/תזוזה או זוויתית</p>
<p><math>V_Y \leq V_X</math>: בעל מתח קטן שווה ל-<math>X</math>: <math>V_Y \leq V_X</math> הדיודה נמצאת <b>בקצה</b> ולכן <math>X</math> ו-<math>Y</math> בעלי מתח זהה: <math>V_Y = V_X</math></p>  <p><math>V_Y &gt; V_X</math>: בעל מתח גדול מ-<math>X</math>: <math>V_Y &gt; V_X</math> הדיודה נמצאת <b>בנתק</b>, ולכן ל-<math>X</math> ו-<math>Y</math> מתחים שונים: <math>\Delta_Y &gt; \Delta_X</math></p> 	<p>דיודה</p> 	<p><b>חשמל</b> <b>PGR</b> = פוטנציאל = מתח</p>

התנהגות	מבנה	תחום
<p>זרם זורם מ-<math>X</math> ל-<math>Y</math>: הדיודה נמצאת <b>בקצה</b>.</p> <p><math>V_Y = V_X</math></p>  <p>זרם זורם מ-<math>Y</math> ל-<math>X</math>: הדיודה נמצאת <b>בנתק</b>.</p> 	<p>דיודה</p> 	<p>חשמל <b>FGR</b> זרימה = זרם</p>

מקור הפרש פוטנציאלים קבוע

ייצוג FGR	ייצוג PGR
	
<p>קשת מקור זרימה כאשר המקור בעל ערך וכיוון קבוע <math>F_C</math>. המקור מפעיל זרימה קבועה על הצומת: <math>F_X = F_C</math></p>	<p>קשת מקור הפרש פוטנציאלים כאשר המקור בעל ערך וכיוון קבוע <math>\Delta_C</math>. המקור מפעיל ה"פ קבוע על הצמתים: <math>\Delta_C = \pi_Y - \pi_X</math></p>

התנהגות	מבנה	תחום
<p>הזזת רכיב <math>X</math> במרחק התחלתי קבוע יחסית ל-<math>Y</math> כך שהמרחק ההתחלתי ביניהם קבוע.</p> <p><math>\Delta_Y - \Delta_X = \Delta_C</math></p> 	<p>הזזת רכיב במרחק קבוע יחסית לרכיב אחר.</p> 	<p>מכני ליניארי <b>PGR</b> פוטנציאל = תזוזה</p>
<p>הנעת רכיב <math>X</math> במהירות התחלתית קבוע יחסית ל-<math>Y</math> כך שהמהירות ההתחלתית ביניהם קבועה: <math>V_Y - V_X = V_C</math></p> 	<p>הנעת רכיב במהירות התחלתית קבוע יחסית לרכיב אחר.</p> 	<p>מכני ליניארי <b>PGR</b> פוטנציאל = מהירות</p>
<p><math>Y</math> מפעיל כוח חיובי קבוע על <math>X</math> עקב פתיחת הקפיץ הקבוע: <math>F_X = F_C</math></p> 	<p>קפיץ כוח קבוע</p> 	<p>מכני ליניארי <b>FGR</b> זרימה = כוח</p>

התנהגות	מבנה	תחום
<p>הזזת רכיב <math>X</math> (טבעת פנימית) בזווית התחלתית קבוע יחסית ל-<math>Y</math> (טבעת חיצונית) כך שהזווית ההתחלתית ביניהם קבועה.</p> $\Delta_{\theta} = \Delta_C$ 	<p>הזזת רכיב בזווית קבועה יחסית לרכיב אחר.</p> 	<p><b>מכני אנגולרי</b> <b>PGR</b> פוטנציאל = תזוזה זוויתית</p>
<p>הנעת רכיב <math>X</math> במהירות זוויתית קבועה יחסית ל-<math>Y</math> כך שהמהירות ההתחלתית היחסית ביניהם קבועה.</p> $\omega_Y - \omega_X = \omega_C$ 	<p>הנעת רכיב במהירות זוויתית קבועה יחסית לרכיב אחר.</p> 	<p><b>מכני אנגולרי</b> <b>PGR</b> פוטנציאל = תזוחה זוויתית</p>
<p>הפעלת מתח התחלתי קבוע על צומת <math>X</math> יחסית ל-<math>Y</math> כך שה"פ ביניהם קבוע: <math>V_Y - V_X = \Delta_C</math></p> 	<p>מקור מתח קבוע</p> 	<p><b>חשמל</b> <b>PGR</b> פוטנציאל = מתח</p>
<p>הפעלת זרם התחלתי קבוע על צומת <math>X</math> יחסית ל-<math>Y</math>: <math>F_X = F_C</math></p> 	<p>מקור זרם קבוע</p> 	<p><b>חשמל</b> <b>FGR</b> זרימה = זרם</p>



# Table of Contents

<b>List of Notations and Nomenclatures</b>	v
<b>List of Figures and Tables</b>	vii
<b>1. Introduction and Scientific Background</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Work Principles of the Method</b>	<b>1</b>
1.2.1 Introduction	1
1.2.2 Knowledge Transfer using Common Graph Representations	2
1.2.3 Knowledge Transfer using Dual Graph Representations	5
1.2.4 Special Properties at the Representation level	8
<b>1.3 Literature Survey</b>	<b>10</b>
1.3.1 Atlases of Mechanisms	10
1.3.2 Structure Based Conceptual Design	10
1.3.3 Function Based Conceptual Design	12
1.3.4 Behavior based Conceptual Design	13
1.3.5 Conceptual Design using Genetic Algorithms	15
1.3.6 Conceptual Design using Analogy	15
1.3.7 Conceptual Design using TRIZ	16
<b>1.4 Graph Theory – Theoretical Background</b>	<b>17</b>
1.4.1 Graph Representation	17
1.4.2 Potential	18
1.4.3 Potential Graph Representation (PGR)	19
1.4.4 Flow	19
1.4.5 Flow Graph Representation (FGR)	20
1.4.6 Dual Graph	21
1.4.7 The Duality Relationship between Potential Graph Representation (PGR) and Flow Graph Representation (FGR)	22
<b>2. Conceptual Design Through Common Graph Representations</b>	
<b>2.1 Introduction</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Conceptual Design Stages of the Common Graph Method</b>	<b>24</b>

<b>2.3 Conceptual Design Through Common Graphs – Using the Method in Stapler Design</b>	<b>30</b>
2.3.1 Design Procedure for Conceptual Design of Stapler Mechanism	30
2.3.2 Existing Stapler	37
2.3.3 Summary of Stapler Design	38
<b>2.4 Conceptual Design of Unidirectional Linear Mechanisms</b>	<b>40</b>
2.4.1 Conceptual Design of Unidirectional Linear Mechanism	40
2.4.2 Conceptual Design of Unidirectional Linear Mechanism – Another Solution	48
2.4.3 Summary of Unidirectional Linear Mechanisms Design	53
<b>2.5 Transformation from Linear to Angular Design Through Common Graph Representations</b>	<b>55</b>
2.5.1 Design of a Unidirectional Gear Train Based on the Full Wave Rectifier	56
2.5.2 Design of a Unidirectional Gear Train Based on the Diode Bridge Rectifier	61
2.5.3 Summary of Unidirectional Gear Train Design	62

### **3. Conceptual Design Through Dual Graph Representations**

<b>3.1 Introduction</b>	<b>63</b>
<b>3.2 Conceptual Design Stages of the Dual Graph Method</b>	<b>63</b>
<b>3.3 Conceptual Design Through Dual Graphs – Using the Method in Force Limiter Design</b>	<b>68</b>
3.3.1 Design of Force Limiter	68
3.3.2 Another Device for Limiting force	80
3.3.3 Summary of Force Limiting Devices Design	81
<b>3.4 Transformation of Force Limiter from Linear to Angular Through Common Graph Representations</b>	<b>82</b>
3.4.1 Design of Torque Limiter Based on the Force Limiting Device	83
3.4.2 Bi-directional Torque Limiter	89
3.4.3 Summary of Torque Limiter Design	95
<b>3.5 Conceptual Design from one Mechanical Domain to Another Through Dual Graphs</b>	<b>97</b>
3.5.1 Conceptual Design of High Mechanical Advantage Device	97
3.5.2 Summary of Mechanical to Mechanical Design	101

<b>3.6 Conceptual Design of Combined Electronic Network Through Dual Graphs.</b>	<b>103</b>
3.6.1 Design of a Rectifier-Clipper Circuit from Mechanics	103
3.6.2 Summary of Combined electronic Network design	110
<b>4. Domain of Concepts</b>	
<b>4.1 Introduction</b>	<b>111</b>
4.1.1 Example of a Possible Domain of Concepts	111
<b>4.2 Domain of Concepts for Hand-Held Staplers</b>	<b>114</b>
4.2.1 Clipping Circuit 1	114
4.2.2 Clipping Circuit 2	115
<b>4.2 Domain of Concepts for Unidirectional Gear Trains</b>	<b>116</b>
4.3.1 Full Wave Rectifier	116
4.3.2 Diode bridge Rectifier	123
4.3.1 Summary	124
<b>4.3 Domain of Concepts for Torque Limiters</b>	<b>125</b>
4.4.1 Reduction of Elements in Bi-directional Torque Limiter	125
4.4.2 Additional Torque Limiter Concepts	128
<b>5. Summary, Conclusions and Further Research</b>	
<b>5.1 Conclusion</b>	<b>132</b>
5.1.1 The Problems Confronted Within the Research Framework	132
5.1.2 Main Results Obtained in this Work	132
<b>5.2 Conclusions</b>	<b>133</b>
<b>5.3 Further Research</b>	<b>133</b>
<b>References</b>	<b>135</b>
<b>Appendix</b>	
<b>Deterministic Building Steps for Engineering Devices from the Graph representations</b>	<b>a</b>

## Abstract

In this thesis, function based conceptual design methods have been developed enabling to construct devices based on transforming the structure and behavior of functionally compliant systems that exist in other domains, all through discrete mathematical representations termed, graph representations. Employing these representations enables the behavior to be transferred implicitly, and is therefore not actively involved in the design process.

Graph representations were used as the discrete mathematical representations to model and transfer knowledge between the different engineering domains. The two methods that have been developed are the Common Graph and the Dual Graph design methods. The common graph deals with the possibility of two engineering domains able to share knowledge as a result of a common graph representation. The second deals with domains which are not directly connected, but through a graph duality relationship knowledge transformation is enabled. Both methods can be used simultaneously and one is an extension of the other, allowing wider coverage of engineering domains. Furthermore, the common graph obtained can be used to transfer knowledge inside an engineering domain, that is, morph one design into another whilst expanding the dimension of the design. The two design methods also allow identification of concepts according to graph and to morph one design into another structurally while preserving the same function. The graph representations enable one to define and identify concepts at the representation level which are functionally equivalent and to identify a finite number of concepts allowing mapping of the design domain.

The design methods were used in order to develop both well known applications such as staplers, unidirectional gears and torque-limiters and to branch out new designs such as high mechanical advantage mechanisms and an electronic network. All these were developed in systematic design steps that also allowed cover of well known industrial concepts, and reveal the relationships between them.

On the basis of the primary results of this research, it is concluded that the design process is made systematic by using the graph representations to transfer structural knowledge between domains and allowing behavior to be transferred via the graph representation topology. Furthermore, since the mathematics underlying the representation is graph theory, one of the main branches of discrete mathematics and the mathematical foundation of computer science, it opens a possibility to computerize the process developed in the thesis. This will allow the development of software to aid the conceptual design process.

**TEL-AVIV UNIVERSITY**

The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering

**SYSTEMATIC CONCEPTUAL ENGINEERING  
DESIGN USING GRAPH REPRESENTATIONS**

A thesis submitted toward the degree of  
Master of Science in Mechanical Engineering

by

**Nimrod Dagani**

October 2004

**TEL-AVIV UNIVERSITY**

The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering

**SYSTEMATIC CONCEPTUAL ENGINEERING  
DESIGN USING GRAPH REPRESENTATIONS**

A thesis submitted toward the degree of  
Master of Science in Mechanical Engineering

by

**Nimrod Dagani**

This research was carried out in the Department of  
Solid Mechanics, Materials and Systems under the supervision of  
Dr. Offer Shai

October 2004