

עזרתון במעגלים ספרתיים

רון בנימין

1 ביולי 2026

זכויות יוצרים

מעגלים ספרתיים

כל הזכויות שמורות.

חוברת זו נכתבה ונערכה במיוחד עבור סטודנטים הלומדים את העזרתון במעגלים ספרתיים. החוברת כוללת הסברים תמציתיים, דוגמאות, תרגילים פתורים, וידע שנאסף ממגוון מקורות כולל הרצאות, תרגולים, ומסמכים רשמיים של הקורס.

אין להעתיק, לשכפל, להפיץ, לתרגם, להציג בפומבי, או לעשות כל שימוש מסחרי בתכני החוברת, כולם או חלקם, ללא קבלת רשות מפורשת מראש ובכתב מהיוצר.

השימוש בחוברת מותר לסטודנטים לצורכי לימוד אישי בלבד. הכותב אינו אחראי לשגיאות, אי-דיוקים, או תוצאות הנובעות משימוש במידע המופיע בה.

נכתב וערוך על ידי:

רון בנימין

תוכן העניינים

11	1	אנלוגי מול דיגיטלי
11	1.1	הגדרות בסיסיות
11	1.2	שימושים בעיבוד אותות אנלוגי וספרתי
11	1.3	השוואה: יתרונות וחסרונות
12	1.4	רעש (Noise) ומרווחי רעש (Noise Margins)
13	1.5	הגדרת דיסציפלינה לוגית ומרווחי מתח תקינים
14	1.6	הגדרת מרווחי רעש (Noise Margins)
15	1.7	דרישות משער לוגי ספרתי
15	2	מיתוג (Switching Concept)
15	2.1	מימוש לוגיקה באמצעות מפסקים
16	2.2	שער NOT (Inverter)
16	2.3	רשתות Pull-Up ו-Pull-Down
17	3	מדדים סטטיים (Static Metrics)
17	3.1	פעולה סטטית מול דינמית
17	3.2	אופיין העברה VTC – Voltage Transfer Characteristics
18	3.3	הגדרת רמות מתח נומינליות במהפך מציאותי
20	3.4	תכונת חידוש האות (Regenerative Property)
20	3.5	Fan-In ו-Fan-Out
21	4	מדדים דינמיים (Dynamic Metrics)
21	4.1	השהיית התפשטות (Propagation Delay)
22	4.2	זמן עלייה וזמן ירידה (Rise Time, Fall Time)
22	4.3	מודל RC מסדר ראשון
23	5	צריכת הספק (Power Consumption)
23	5.1	חשיבות צריכת ההספק
23	5.2	הספק ממוצע והספק שיא
23	5.3	הספק סטטי והספק דינמי
23	5.4	הספק מול אנרגיה
24	5.5	מדדי איכות: PDP ו-EDP
25	5.6	שאלה
25	6	פתרון
25	6.1	הספק סטטי
25	6.2	הספק דינמי
26	7	מסקנה
26	7.1	שאלה
26	8	פתרון

30	9 מבוא למבנה ולפיזיקה של קבל MOS
30	9.1 מוליך-למחצה אינטרינזי וזיהום
31	9.2 מבנה קבל MOS והגדרות בסיסיות
31	9.3 פוטנציאל פני-השדה וכיפוף הפסים
32	9.4 כללים בסיסיים ופוטנציאל פני-שטח
33	10 מצבי פעולה של קבל MOS
33	10.1 שיווי משקל
33	10.2 הצטברות
34	10.3 מחסור
34	10.4 היפוך חזק
35	11 קיבול קבל MOS
35	12 מתח סף במבנה MOS
35	12.1 הגדרה פיזיקלית
35	12.2 מתח סף אידיאלי
36	12.3 מתח סף במבנה מציאותי
37	12.4 קבל MOS כקבל מבוקר מתח
38	12.5 קשר בין קבל MOS לבין היווצרות טרנזיסטור
38	13 מקבל MOS לטרנזיסטור MOSFET
38	13.1 הרעיון האינטואיטיבי
39	13.2 בעיות ופתרון: הוספת אזורי n^+
40	13.3 מבנה ה-MOSFET והדק רביעי (Body)
40	13.4 חזרה: קיבוליות השער (Gate Capacitance)
41	14 סוגי טרנזיסטורים: nMOS ו-pMOS
41	14.1 הגדרות וסימולים
42	14.2 מבנה פיזי וייצור (Fabrication)
43	15 אזורי הפעולה של ה-MOSFET
43	15.1 מצב 0: Zero Biasing
43	15.2 מצב 1: אינוורסיה חלשה (Weak Inversion)
44	15.3 מצב 2: אינוורסיה חזקה (Strong Inversion) ומתח סף
45	15.4 מצב 3: האזור הלינארי / התנגדותי (Linear / Triode Region)
46	15.5 מצב 4: צביטה (Pinch-Off) ורוויה (Saturation)
46	16 אפקטים לא-אידיאליים
46	16.1 אפנון אורך תעלה (Channel Length Modulation)
47	16.2 רוויית מהירות (Velocity Saturation)
48	16.3 סיכום אזורי הפעולה
48	17 חישוב מתח הסף (Threshold Voltage Calculation)
49	17.1 נוסחת מתח הסף הבסיסית
49	17.2 אפקט הגוף (Body Effect)
49	17.3 הנוסחה המתוקנת למתח הסף

50	18	מודלי זרם ב-MOSFET (Current Models)
51	18.1	האזור הלינארי (Linear / Resistive Region)
51	18.1.1	פיתוח הנוסחה
51	18.2	אזור הרוויה (Saturation Region)
52	18.2.1	אפנון אורך תעלה (Channel Length Modulation)
52	18.3	אופייני I_{DS} כתלות ב- V_{DS}
54	18.4	רוויית מהירות (Velocity Saturation) – תעלות קצרות
55	18.5	המודל המאוחד (Unified Model)
55	18.6	מתח ה-Overdrive ואופייני $V_{GS}-I_{DS}$
55	19	דוגמה מעשית
55	19.1	נתוני תהליך ונוסחאות כלליות
56	19.2	דוגמה מספרית: טרנזיסטור nMOS
57	19.2.1	חישוב מתח הסף המושפע מן הגוף
57	19.2.2	חישוב מתחים בטרנזיסטור
58	19.2.3	קביעת אזור הפעולה
58	20	מהפך CMOS: מבוא אינטואיטיבי
58	20.1	מוטיבציה
59	20.2	הגדרת CMOS ו-MOS
59	20.3	מודל המתג הכפול
61	20.4	תנופה מפס לפס (Rail-to-Rail Swing)
61	20.5	פעולה סטטית של מהפך CMOS
61	20.5.1	מאפיינים סטטיים בסיסיים
62	20.5.2	פתרון גרפי באמצעות מחלק מתח
63	20.6	בניית עקומת ההעברה של מהפך CMOS
63	20.6.1	עיקרון כללי: השוואת עקומות ה-I-V
64	20.6.2	עקומות ה-I-V של ה-nMOS
64	20.6.3	התאמת עקומות ה-pMOS למערכת הצירים
65	20.6.4	סופרפוזיציה (Superposition) של שתי המשפחות
65	20.7	דוגמה מפורטת של נקודות חיתוך
65	20.8	בנייה מלאה של עקומת ה-VTC
66	20.9	אזורי פעולה אינטואיטיביים
67	20.10	אזורי פעולה לאורך ה-VTC
68	20.11	סף המיתוג V_M
69	20.12	מרווחי רעש (Noise Margins)
70	20.13	סיכום תכונות סטטיות
70	20.14	שאלה
72	20.15	שאלה
74	21	מאפיינים דינמיים של מהפך CMOS
74	21.1	עיכוב ההתפשטות (t_{pd})
75	21.2	זמן עלייה (t_r) וזמן ירידה (t_f)
75	21.3	שאלת מבחן

89	22	קיבוליות פריזטיות ומודל RC שקול
89	22.1	מודל RC של מהפך CMOS
90	22.2	קיבול העומס השקול C_{load}
91	22.3	חישוב עיכוב ההתפשטות t_{pd}
91	22.4	שיטת האינטגרל המדויק (מעבר t_{pHL})
91	22.5	שיטת הזרם הממוצע
91	22.6	שיטת ההתנגדות השקולה
92	22.7	השפעת גודל ההתקן (Device Sizing)
92	22.7.1	יחס רוחב/אורך W/L
93	22.7.2	יחס גודל בין pMOS ל-nMOS (פרמטר β)
94	22.7.3	גורם הגדלה S למוליך עומס גדול
95	23	צריכת הספק במהפך CMOS
95	23.1	הספק דינמי P_{dyn}
96	23.2	הספק קצר P_{sc}
97	23.3	הספק סטטי P_{static}
97	23.4	סיכום צריכת ההספק
97	24	קיבולים פריזטיים
98	24.1	קיבוליות ב-MOSFET
98	24.2	קיבול השער-ערוץ (Gate-Channel)
98	24.3	קיבול צומת (Junction Capacitance)
100	24.4	מרכיבי קיבול השער
100	24.5	קיבול שער
101	24.6	מודל קיבול לעיכוב של מהפך
101	24.7	הקיבול הפנימי C_{out}
102	24.8	קיבול העומס הכולל
103	24.9	קיבול מוצא פנימי (Intrinsic Output Capacitance)
103	24.10	קיבול דיפוזיה (Diffusion Capacitance)
104	24.11	קיבול שער-לניקוז (Gate-to-Drain Capacitance)
104	24.12	מקור הקיבול Gate-Drain
106	24.13	סיכום קיבול המוצא הפנימי
106	24.14	קיבול כניסת העומס (Load Input Capacitance)
106	24.15	התנהגות הקיבולים בזמן מעבר
107	24.16	השפעת אפקט מילר וקיבול חפיפה
108	24.17	נוסחת קיבול כניסת העומס
108	24.18	סיכום קיבול העומס הכולל
109	24.19	שאלה
111	24.20	שאלה
112	25	מעגל A: מהפך עם עומס NMOS (דיודה)
112	25.1	1. חישוב V_{OH} (Output High)
113	25.2	2. חישוב V_{OL} (Output Low)
113	25.3	3. חישוב V_M (Switching Threshold)
114	25.4	1. חישוב V_{OH} ו- V_{OL}
114	25.5	2. חישוב V_M