บทที่ 6

การทดลอง

ในบทนี้เสนอการทดลองวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ โดยใช้ชุดวัดเปรียบเทียบสมรรถนะ MCNC [20,21] ของ CBL/NCSU (CAD Benchmarking Laboratory / N C State University) และเลือกวงจรเปรียบเทียบสมรรถนะ 8 วงจร ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ชุดวงจรเปรียบเทียบสมรรถนะที่เลือกใช้ในการทดลอง

ชื่อวงจร	จำนวนอินพุต	จำนวนเอาต์พุต	จำนวนพจน์
9Sym	9	1	87
Clip	9	5	167
Con1	7	2	9
Ex5P	8	63	256
Rd84	8	4	256
Sao2	10	4	58
Sqrt8	8	4	40
Z9Sym	9	1	420

จากวงจรเปรียบเทียบสมรรถนะทั้งแปดวงจร การทดลองได้ออกแบบส่วนวงจรรางคู่ โดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันและแผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ กำหนดให้ค่าความหน่วงเกตและสายเป็นค่าสุ่มภายในช่วงของค่าความหน่วง [22,23] ดังนี้

ช่วงของค่าความหน่วงเกตและสายในส่วนวงจรรางคู่

ช่วงค่าความหน่วงของเกตแอนด์ขนาด 2 อินพุต = 25 – 41 นาโนวินาที

ช่วงค่าความหน่วงของเกตออร์ขนาด 2 อินพุต = 9 – 25 นาโนวินาที

ช่วงค่าความหน่วงของสายอินพุต = 17 – 33 นาโนวินาที

ช่วงค่าความหน่วงของสายภายใน = 2 เท่าของเกตที่สายต่อเป็นอินพุต

ช่วงค่าความหน่วงของเกตขนาด n อินพุต = (ค่าความหน่วงของเกตขนาด 2 อินพุต) $\lceil \log_2 n \rceil$

สรุปจำนวนเกตและสายที่ใช้ในส่วนวงจรรางคู่ ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 จำนวนเกตและสายในส่วนวงจรรางคู่ของชุดวงจรเปรียบเทียบสมรรถนะที่เลือกใช้ในการทดลอง

ชื่อวงจร	การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน			การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ		
	จำนวนอินพุต	จำนวนเกต	จำนวนสาย	จำนวนอินพุต	จำนวนเกต	จำนวนสาย
9Sym	18	356	374	18	86	104
Clip	18	666	684	18	333	351
Con1	14	22	36	14	40	54
Ex5P	16	31294	31310	16	1234	1250
Rd84	16	1688	1704	16	140	156
Sao2	20	316	336	20	270	290
Sqrt8	16	136	152	16	86	102
Z9Sym	18	1728	1746	18	89	107

ในบทนี้เสนอการทดลองตามลำดับ คือ การเปรียบเทียบค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่ที่ได้จากการประมาณกับค่าความหน่วงที่ได้จากการจำลองการทำงานเพื่อทดสอบวิธีการประมาณค่าความหน่วงที่ใช้ในการออกแบบส่วนวงจรตอบรับ การวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนเพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้กับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน และการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ระหว่างการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์และการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์

6.1 การเปรียบเทียบค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่ที่ได้จากการประมาณกับค่าความหน่วงที่ได้จากการจำลองการทำงาน

เนื่องจาก การประมาณค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่มีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ให้สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงได้ในขอบเขตอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด โดยค่าความหน่วงประมาณได้ใช้ในการคำนวณค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ของส่วนวงจรตอบรับให้สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ ดังนั้น การทดลองนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อวัดความถูกต้องของการประมาณค่าความหน่วงที่เสนอในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.3 โดยเปรียบเทียบกับค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณสูงสุดของส่วนวงจรรางคู่ที่ได้จากการจำลองการทำงานซึ่งเสนอในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 และมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 6.1

1. สร้างส่วนวงจรรางคู่โดยใช้ค่าความหน่วงเกตและสายเป็นค่าสุ่มในช่วงที่กำหนดข้างต้น
2. วัดค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่โดยใช้การประมาณที่เสนอในหัวข้อ 3.3.1 สมการที่ 3.1 ถึง 3.6 และหัวข้อ 3.3.3 สมการที่ 3.29 และ 3.30
3. สำหรับแบบอินพุตเป็นค่ารหัสตรงรางคู่ตั้งแต่ค่าตรรกะ $[000...0]_n$ ถึง $[111...1]_n$
   3.1 วัดค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่โดยใช้การจำลองการทำงานที่เสนอในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 สมการที่ 5.6 และ 5.7 เปรียบเทียบกับค่าจากการประมาณในข้อ 2
   - หากค่าความหน่วงประมาณน้อยกว่าค่าความหน่วงจากการจำลองการทำงาน จะได้ว่า การประมาณค่าไม่สามารถใช้ในการออกแบบวงจรได้
4. หากในทุกแบบอินพุตมีค่าความหน่วงประมาณมากกว่าค่าความหน่วงจากการจำลองการทำงาน ให้วัดค่าความหน่วงเฉลี่ยทุกแบบอินพุตเพื่อเป็นผลการทดลอง

จากการทดลองได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการวัดค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่โดยใช้การประมาณและการวัดค่าความหน่วงโดยใช้การจำลองการทำงาน

ชื่อวงจร	การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน				การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ			
	ขั้นทำงาน		ขั้นว่าง		ขั้นทำงาน		ขั้นว่าง	
	ค่าจากการประมาณ	ค่าจากการจำลองการทำงาน	ค่าจากการประมาณ	ค่าจากการจำลองการทำงาน	ค่าจากการประมาณ	ค่าจากการจำลองการทำงาน	ค่าจากการประมาณ	ค่าจากการจำลองการทำงาน
9Sym	68.84	49.12	69.18	59.13	86.13	78.95	98.26	82.41
Clip	49.98	36.87	51.09	37.29	64.95	53.34	69.13	58.32
Con1	29.95	24.27	31.83	25.98	48.34	34.19	50.36	47.29
Ex5P	113.09	78.13	120.64	79.56	140.63	121.29	184.65	169.33
Rd84	84.69	73.62	91.54	74.92	103.49	92.24	129.10	114.21
Sao2	34.36	29.12	57.59	34.64	49.25	35.57	65.61	49.64
Sqrt8	32.68	24.87	37.85	36.54	53.86	47.86	63.12	52.69
Z9Sym	129.40	88.62	134.20	94.93	136.94	113.67	207.63	187.93

จากตารางสรุปได้ว่า ค่าความหน่วงที่ได้จากการประมาณมีค่ามากกว่าค่าความหน่วงที่ได้จากการจำลองการทำงาน เนื่องจากการคำนวณค่าความหน่วงประมาณของเส้นทางต่อเชื่อมของส่วนประกอบวงจรจากอินพุตไปยังเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ได้ใช้ค่าสูงสุดจึงทำให้ค่าประมาณที่ได้เกินจริง แต่ทั้งนี้วิธีการประมาณที่ใช้สามารถประกันได้ว่าไม่เกิดค่าที่ต่ำกว่าค่าจริงจึงใช้ประกันการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ได้

6.2 การวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

จากการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนในหัวข้อ 2.1 2.7 และ 2.9 ในบทที่ 2 พบว่า ส่วนวงจรตอบรับที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมมูลฐานจะตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่เฉพาะที่อินพุตของส่วนวงจรรางคู่เท่านั้น จึงทำให้การประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณภายในส่วนวงจรรางคู่ต้องพึ่งเวลาในการทำงานของสิ่งแวดล้อมโดยวงจรจะทำงานให้เอาต์พุตที่ถูกต้องเมื่อสิ่งแวดล้อมทำงานช้ากว่าวงจรมาก ๆ ดังเช่นข้อกำหนดของภาวะแวดล้อมมูลฐาน และเมื่อ

พิจารณาภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก พบว่า ส่วนวงจรตอบรับจะตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ทุกสายของส่วนวงจรรางคู่และให้เอาต์พุตเมื่อทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณเสร็จสิ้นแล้ว ทำให้วงจรเชิงผสมที่ได้สามารถตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้เองโดยไม่ต้องพึ่งการทำงานของสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณาความสามารถในการตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของวงจรข้างต้นเปรียบเทียบกับความสามารถในการทนต่อความแปรปรวนความหน่วง จะได้ว่า วงจรที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมมูลฐานซึ่งต้องพึ่งการทำงานของสิ่งแวดล้อมไม่สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่เกิดภายในวงจรและที่เกิดที่สิ่งแวดล้อมได้ จึงเทียบความสามารถในการทนต่อความแปรปรวนความหน่วงของวงจรได้เป็นอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดน้อยกว่าหนึ่ง แต่วงจรที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออกซึ่งสามารถตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้เองจะทนต่อความแปรปรวนความหน่วงได้สูงกว่า และเทียบความสามารถในการทนต่อความแปรปรวนความหน่วงของวงจรได้เป็นอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมากกว่าหนึ่ง

การทดลองนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนซึ่งได้เสนอในบทที่ 4 เพื่อเปรียบเทียบกับสมมติฐานข้างต้น โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 6.2

1. สร้างส่วนวงจรรางคู่โดยใช้ค่าความหน่วงเกตและสายเป็นค่าสุ่มในช่วงที่กำหนดข้างต้น และจากข้อกำหนดกิ่งของสายเทียบเท่าตลอดช่วง จึงกำหนดให้ค่าความหน่วงที่ทุกกิ่งของสายมีค่าเท่ากันเป็น 0
2. ออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนโดยใช้แนวทางที่เสนอในหัวข้อ 2.7 และ 2.9 ในบทที่ 2 และจากการวิเคราะห์ความหน่วงในการออกแบบไมโครโพรเซสเซอร์ TITAC-2 [9,10] การออกแบบได้กำหนดให้ค่าความหน่วงอุปกรณ์ชนิดซีเป็น 1.5 เท่าของค่าความหน่วงของเกตออร์ทั้งในภาวะแวดล้อมมูลฐาน และภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก
3. วัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรเชิงผสมที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนในข้อ 2 โดยใช้สมการที่ 4.3 ตามวิธีการที่เสนอในบทที่ 4

จากการทดลองได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

ชื่อวงจร	การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน		การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ	
	ภาวะแวดล้อมมูลฐาน	ภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก	ภาวะแวดล้อมมูลฐาน	ภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก
9Sym	0.18	1.65	0.45	3.33
Clip	0.28	2.97	0.70	4.88
Con1	0.33	3.43	0.78	4.51
Ex5P	0.27	1.87	0.62	3.28
Rd84	0.17	1.63	0.52	3.26
Sao2	0.18	3.02	0.46	4.57
Sqrt8	0.54	3.19	0.69	4.78
Z9Sym	0.19	1.47	0.46	1.37

จากตารางจะได้ว่า วงจรที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออกมีอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมากกว่าวงจรที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมมูลฐานจริง เนื่องจากในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก การออกแบบจะให้อุปกรณ์ชนิดซีทำหน้าที่ตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ทุกสายภายในส่วนวงจรรางคู่แล้วจึงเกิดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ ทำให้สมการที่ 4.3 ในบทที่ 4 ซึ่งใช้สำหรับวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมี {ค่าต่ำสุด($D_e(ACK)_{\text{ขั้นทำงาน}}, D_e(ACK)_{\text{ขั้นว่าง}}$)} มากกว่า {ค่าความหน่วงของเส้นทางในส่วนวงจรรางคู่ที่มีกิ่งของสายมากสุด} และได้อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหนึ่งจริง

เมื่อพิจารณาภาวะแวดล้อมมูลฐาน พบว่า ส่วนวงจรตอบรับจะออกแบบเพื่อตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับเฉพาะที่อินพุตของส่วนวงจรรางคู่เท่านั้น ทำให้สมการที่ใช้วัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูดสุดมี {ค่าต่ำสุด($D_e(ACK)_{\text{ขั้นทำงาน}}, D_e(ACK)_{\text{ขั้นว่าง}}$)} มีโอกาสน้อยกว่า {ค่าความหน่วงของเส้นทางในส่วนวงจรรางคู่ที่มีกิ่งของสายมากสุด} จึงเป็นผลให้อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่ได้มีโอกาสน้อยกว่าหนึ่ง และจากสมการที่ใช้พบว่า การออกแบบสามารถเพิ่มความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงของวงจรให้ทนต่ออัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดได้สูงขึ้นโดยการเพิ่มค่าความหน่วงของเกตในส่วน

วงจรตอบรับเพื่อให้ {ค่าต่ำสุด($D_e(ACK)_{\text{ขั้นทำงาน}}$,$D_e(ACK)_{\text{ขั้นว่าง}}$)} ในสมการมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับ {ค่าความหน่วงของเส้นทางในส่วนวงจรรางคู่ที่มีกิ่งของสายมากสุด}

นอกจากนี้พบว่า วงจรที่ออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับมีอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดมากกว่าวงจรที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน เนื่องจากการแปลงส่วนวงจรรางคู่จากแผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับจะได้เส้นทางในส่วนวงจรรางคู่เทียบเท่าเส้นเชื่อมในแผนภาพโดยมีกิ่งของสายเกิดที่บัพภายในของแผนภาพ ดังนั้น จำนวนกิ่งของสายในแต่ละเส้นทางในส่วนวงจรรางคู่จึงเท่ากับจำนวนระดับของบัพภายในซึ่งมีค่าไม่เกินจำนวนตัวแปรอินพุตของวงจร ทำให้การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับสามารถให้ส่วนวงจรรางคู่ที่มีจำนวนกิ่งของสายน้อยกว่าการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน และส่งผลให้วงจรที่ได้มีโอกาสเกิดความแปรปรวนความหน่วงน้อยกว่าและทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดได้สูงกว่า

6.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้กับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรระหว่างวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้กับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรพิจารณาจาก

6.3.1 เวลาที่ใช้ในการทำงาน

เวลาที่ใช้ในการทำงาน วัดจากเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่างเฉลี่ยทุกแบบอินพุต โดยใช้การจำลองการทำงานซึ่งเสนอในหัวข้อ 5.1 และ 5.4 ซึ่งจะได้ว่า ค่าเวลาที่น้อยหมายถึงวงจรใช้เวลาในการทำงานน้อยและมีประสิทธิภาพสูงกว่า

6.3.2 ค่าใช้จ่ายวงจร (Hardware Cost)

ค่าใช้จ่ายวงจร วัดจากจำนวนสายที่เลือกจากส่วนวงจรรางคู่และจำนวนเกตที่ใช้ในส่วนวงจรตอบรับโดยเทียบให้ทุกเกตรวมทั้งอุปกรณ์ชนิดซีมีขนาดสองอินพุตเท่านั้น ค่าใช้จ่ายวงจรที่น้อยหมายถึงส่วนวงจรตอบรับมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงกว่า

สรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

การทดลองที่ 6.3

1. สร้างส่วนวงจรรางคู่โดยใช้ค่าความหน่วงเกตและสายเป็นค่าสุ่มในช่วงที่กำหนดข้างต้น และจากข้อกำหนดกิ่งของสายเทียบเท่าตลอดช่วง จึงกำหนดให้ค่าความหน่วงที่ทุกกิ่งของสายมีค่าเท่ากันเป็น 0
2. ออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนโดยใช้แนวทางที่เสนอในหัวข้อ 2.7 และ 2.9 ในบทที่ 2 และจากการวิเคราะห์ความหน่วงในการออกแบบไมโครโพรเซสเซอร์ TITAC-2 [9,10] การออกแบบได้กำหนดให้ค่าความหน่วงอุปกรณ์ชนิดซีเป็น 1.5 เท่าของค่าความหน่วงของเกตออร์ทั้งในภาวะแวดล้อมมูลฐาน และภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก
3. วัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรเชิงผสมที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนในข้อ 2 โดยใช้สมการที่ 4.3 ตามวิธีการที่เสนอในบทที่ 4
4. นำอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของแต่ละวงจรที่วัดได้ในข้อ 3 มาสร้างวงจรเชิงผสมที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้โดยให้ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์ และกำหนดให้ใช้ส่วนวงจรรางคู่เดียวกับส่วนวงจรรางคู่ของวงจรเชิงผสมที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน
5. วัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรเฉลี่ยทุกแบบอินพุตโดยใช้สมการที่ 5.15 และ 5.16 ในหัวข้อ 5.1 และ 5.4 ในบทที่ 5 และวัดค่าใช้จ่ายวงจร

จากการทดลองได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.5 และ 6.6

ตารางที่ 6.5 ผลการวัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ (SDI) และวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน (QDI)

(ก) ภาวะแวดล้อมมูลฐาน

ชื่อวงจร	การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน				การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ			
	ขั้นทำงาน		ขั้นว่าง		ขั้นทำงาน		ขั้นว่าง	
	QDI	SDI	QDI	SDI	QDI	SDI	QDI	SDI
9Sym	89.12	48.00	88.81	73.28	178.25	127.79	177.63	158.05
Clip	79.87	63.62	87.63	77.77	159.75	143.13	175.25	163.06
Con1	74.24	57.45	71.46	67.91	148.91	131.50	143.73	138.55
Ex5P	78.13	73.63	74.50	74.00	189.83	183.71	162.74	148.21
Rd84	73.62	37.68	71.64	59.76	153.38	137.36	145.77	133.03
Sao2	90.21	50.65	178.25	141.88	158.47	110.69	301.31	253.68
Sqrt8	71.87	66.01	72.25	70.00	144.59	138.00	144.50	142.00
Z9Sym	88.62	79.41	247.99	241.51	79.89	76.82	327.49	302.99

(ข) ภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก

ชื่อวงจร	การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน				การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ			
	ขั้นทำงาน		ขั้นว่าง		ขั้นทำงาน		ขั้นว่าง	
	QDI	SDI	QDI	SDI	QDI	SDI	QDI	SDI
9Sym	175.16	113.00	143.59	102.00	339.41	256.25	251.79	211.14
Clip	158.81	118.77	142.73	101.75	307.03	266.14	252.18	211.40
Con1	97.31	78.04	100.66	85.33	190.69	172.64	191.31	177.90
Ex5P	264.75	189.04	120.88	100.28	464.67	407.46	222.96	206.07
Rd84	215.42	136.39	141.59	100.31	396.73	303.95	251.03	209.33
Sao2	139.48	102.96	219.21	198.26	219.48	144.29	440.66	375.34
Sqrt8	136.43	103.21	106.11	84.65	267.24	234.02	196.53	175.37
Z9Sym	327.23	277.407	605.501	577.71	291.72	95.44	459.13	418.42

ตารางที่ 6.6 ผลการวัดค่าใช้จ่ายวงจรของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ และวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

ชื่อวงจร	การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน					การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ				
	ส่วนวงจรรางคู่		ส่วนวงจรตอบรับ			ส่วนวงจรรางคู่		ส่วนวงจรตอบรับ		
	เกต	สาย	FMQDI	IOQDI	IOSDI	เกต	สาย	FMQDI	IOQDI	IOSDI
9Sym	356	374	18	374	193	86	104	18	48	36
Clip	666	684	18	684	311	333	351	18	145	96
Con1	22	36	14	36	14	40	54	14	26	10
Ex5P	31294	31310	16	31310	15301	1234	1250	16	458	169
Rd84	1688	1704	16	1704	839	140	156	16	64	52
Sao2	316	336	20	336	140	270	290	20	131	78
Sqrt8	136	152	16	152	69	86	102	16	44	25
Z9Sym	1728	1746	18	1746	876	89	107	18	50	37

โดยใช้ตัวย่อในตารางดังนี้

1. 'เกต' และ 'สาย' แทนจำนวนเกตและจำนวนสายตามลำดับ
2. 'FMQDI' แทนวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนในภาวะแวดล้อมมูลฐาน
3. 'IOQDI' แทนวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออก
4. 'IOSDI' แทนวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ โดยกำหนดให้ใช้อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจร 'IOQDI'

จากตารางสรุปได้ว่า วงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนทั้งนี้เป็นผลมาจากข้อกำหนดของแบบจำลองความหน่วงที่ใช้ ดังนี้

1. ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน การออกแบบวงจรไม่มีการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหน่วงและไม่กำหนดค่าความหน่วงของเกตและสายในการออกแบบ ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณเพื่อการออกแบบวงจรจึงเทียบเท่ากับการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกตและสายเป็นอนันต์ ทำให้ส่วนวงจรตอบรับต้องตรวจสอบการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ทุกสายของส่วนวงจรรางคู่ จึงได้วงจรที่มีขนาดใหญ่และใช้เวลาในการทำงานมาก

แต่การกำหนดให้ทุกกิ่งของสายต้องมีค่าความหน่วงเท่ากันซึ่งเรียกว่าข้อกำหนดกิ่งของสายเทียบเท่าตลอดช่วง ทำให้วงจรมีจุดอ่อนที่ไม่สามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่กิ่งของสาย

2. ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ การออกแบบวงจรมีการวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณเพื่อนำอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เหมาะสมมาใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบวงจร การออกแบบจึงเทียบเท่ากับการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกต สาย และกิ่งของสายเท่ากัน ทำให้วงจรที่ได้จึงสามารถทนต่อความแปรปรวนความหน่วงตามสภาพความจริง มีขนาดเล็กกว่าและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

6.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ระหว่างการใช้เกตออร์และการใช้บัฟเฟอร์ในการออกแบบส่วนวงจรตอบรับ

จากแนวทางการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ในบทที่ 3 จะได้ว่า สามารถออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไร้อุปกรณ์ชนิดซีได้สองแนวทาง คือ การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์ในหัวข้อ 3.3 และการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์ในหัวข้อ 3.4 การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำงานระหว่างวงจรเชิงผสมแบบอสมวารทั้งสองแบบ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 6.4

1. สร้างส่วนวงจรรางคู่โดยใช้ค่าความหน่วงเกตและสายเป็นค่าสุ่มในช่วงที่กำหนดข้างต้น
2. ออกแบบส่วนวงจรตอบรับที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ โดยกำหนดให้อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดเท่ากับ 2.00 เช่นเดียวกับค่าที่ใช้ในการออกแบบไมโครโพรเซสเซอร์ TITAC-2 [9,10] ทั้งการออกแบบโดยใช้เกตออร์และการออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์
3. วัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรเฉลี่ยทุกแบบอินพุตตามวิธีการที่เสนอในบทที่ 5 กล่าวคือ ใช้สมการที่ 5.15 และ 5.16 สำหรับการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์ และใช้สมการที่ 5.19 และ 5.20 สำหรับการออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์

จากการทดลองได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ผลการวัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ระหว่างการใช้เกตออร์และการใช้บัฟเฟอร์ในการออกแบบส่วนวงจรตอบรับ

(ก) การออกแบบส่วนวงจรรางคู่โดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

ชื่อวงจร	ขั้นทำงาน			ขั้นว่าง		
	บัฟเฟอร์$_{ขนาน}$	บัฟเฟอร์$_{ที่เอาต์พุต}$	เกตออร์	บัฟเฟอร์$_{ขนาน}$	บัฟเฟอร์$_{ที่เอาต์พุต}$	เกตออร์
9Sym	149.35	154.27	130.23	149.49	167.29	138.13
Clip	137.26	143.79	117.96	159.68	178.31	149.46
Con1	150.95	152.21	149.42	164.86	166.39	164.16
Ex5P	176.32	185.32	137.18	184.49	194.26	173.67
Rd84	175.36	189.53	173.19	192.42	197.36	189.42
Sao2	113.12	136.37	102.16	137.68	147.76	124.65
Sqrt8	124.79	137.98	116.49	145.23	153.94	143.75
Z9Sym	181.49	198.45	174.36	181.26	207.46	174.24

(ข) การออกแบบส่วนวงจรรางคู่แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

ชื่อวงจร	ขั้นทำงาน			ขั้นว่าง		
	บัฟเฟอร์$_{ขนาน}$	บัฟเฟอร์$_{ที่เอาต์พุต}$	เกตออร์	บัฟเฟอร์$_{ขนาน}$	บัฟเฟอร์$_{ที่เอาต์พุต}$	เกตออร์
9Sym	184.25	194.31	173.12	206.13	210.66	197.67
Clip	167.14	175.94	163.35	181.20	183.40	180.32
Con1	154.39	167.98	151.23	182.36	184.37	181.42
Ex5P	237.73	248.13	219.94	281.28	284.23	276.34
Rd84	184.06	189.60	176.32	201.02	204.36	197.33
Sao2	172.91	176.65	164.74	193.33	199.64	187.36
Sqrt8	167.44	179.37	163.29	192.31	194.36	187.36
Z9Sym	201.30	213.48	199.19	274.41	275.92	264.73

จากตารางสรุปได้ว่า การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์ให้วงจรเชิงผสมที่ใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่าการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้ใช้บัฟเฟอร์ เมื่อวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการทำงานของอินพุตแต่ละแบบ พบว่า ส่วนวงจรตอบรับที่ออกแบบโดยใช้เกตออร์

มีลักษณะการทำงานที่ทำให้วงจรเชิงผสมที่ได้ทำงานเร็วซึ่งจะปรากฏชัดเจนเมื่อส่วนวงจรรางคู่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการเปรียบเทียบจึงใช้การจำลองตัวอย่างลักษณะเวลาในการทำงานดังนี้

กำหนดให้ส่วนวงจรรางคู่มีจุดภายใน 16 จุด ซึ่งมีค่าความหน่วง 2,2,3,4,5,8,9,10, 12,13,15,19,21,24,25,27 นาโนวินาทีตามลำดับ และมีค่าความหน่วงต่ำสุดของเอาต์พุต (f,f') เท่ากับ 17 นาโนวินาที ในกรณีที่การออกแบบกำหนดให้อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดเท่ากับ 2.00 จะได้ว่า ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์สำหรับการต่อขนานกับส่วนวงจรรางคู่เท่ากับ 54 นาโนวินาที และค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์สำหรับการต่อที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่เท่ากับ 37 นาโนวินาที จึงจำลองเวลาเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 การจำลองเวลาเปรียบเทียบของวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ระหว่างการใช้เกตออร์และการใช้บัฟเฟอร์ในการออกแบบส่วนวงจรตอบรับ

แบบอินพุต	d(DR)	d(f,f')	$d_{\text{บัฟเฟอร์ขนาน}}$(วงจร)	$d_{\text{บัฟเฟอร์ที่เอาต์พุต}}$(วงจร)	$d_{\text{เกตออร์}}$(วงจร)
A	15	19	54	56	$30 + \Delta_A$
B	21	17	54	54	$42 + \Delta_B$
C	25	22	54	59	$50 + \Delta_C$
D	27	30	54	67	$54 + \Delta_D$

โดยใช้ตัวย่อในตาราง ดังนี้

1. d(DR) คือ ค่าความหน่วงสูงสุดในการเปลี่ยนระดับสัญญาณของทุกจุดภายในส่วนวงจรรางคู่เมื่อไม่เกิดความแปรปรวนความหน่วง
2. d(f,f') คือ ค่าความหน่วงในการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่เอาต์พุต (f,f') ของส่วนวงจรรางคู่
3. $d_{\text{บัฟเฟอร์ขนาน}}$(วงจร) และ $d_{\text{บัฟเฟอร์ที่เอาต์พุต}}$(วงจร) คือ เวลาเปรียบเทียบในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ต่อขนานและที่ออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ต่อที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ ตามลำดับ
4. $d_{\text{เกตออร์}}$(วงจร) คือ เวลาเปรียบเทียบในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์
5. Δ_x คือ ค่าความหน่วงต่ำสุดในการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สายอินพุตของส่วนวงจรตอบรับสำหรับแบบอินพุต x และมีค่าไม่เกิน d(DR)

จากการจำลองเวลาเปรียบเทียบจะได้ว่า การใช้บัฟเฟอร์เป็นผลให้ค่าความหน่วงในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่เป็นค่าคงที่โดยเท่ากับ

ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์ที่ใช้ กล่าวคือ เวลาในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยต่อบัฟเฟอร์ขนานมีค่าคงที่เท่ากับ 54 นาโนวินาที และเวลาในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยต่อบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตมีค่าเทียบได้กับการบวกค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่กับค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์ ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์ พบว่า การใช้เกตออร์จะให้ส่วนวงจรตอบรับมีค่าความหน่วงของสัญญาณแสดงความบริบูรณ์เปลี่ยนไปตามค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่ในแต่ละแบบอินพุต ทำให้ในกรณีที่ส่วนวงจรรางคู่มีค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณน้อยวงจรเชิงผสมที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์จึงใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อส่วนวงจรรางคู่มีขนาดใหญ่วงจรเชิงผสมจะมีแบบอินพุตหลายแบบที่ค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณมีค่าน้อย และทำให้การออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้เกตออร์จึงให้วงจรเชิงผสมที่ทำงานได้เร็วกว่าการออกแบบส่วนวงจรตอบรับโดยใช้บัฟเฟอร์

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ทั้งสองแบบจะได้ว่า การต่อบัฟเฟอร์ขนานกับส่วนวงจรรางคู่จะให้วงจรเชิงผสมที่ทำงานได้เร็วกว่า แต่มีข้อเสียคือต้องใช้บัฟเฟอร์ที่มีค่าความหน่วงมากกว่า

สรุป

บทนี้เสนอการทดลองซึ่งแบ่งเป็น 4 ส่วนและสรุปแต่ละส่วนได้ดังนี้

1. การวัดความถูกต้องในการประมาณค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่

พบว่า วิธีการประมาณที่ใช้ในการออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ให้ค่าประมาณที่เกินจริงแต่ค่าดังกล่าวสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ได้

2. การวัดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

พบว่า อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมรับเข้าส่งออกมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดของวงจรที่ออกแบบในภาวะแวดล้อมมูลฐาน และการออกแบบสามารถใช้การเพิ่มค่าความหน่วงของเกตในส่วนวงจรตอบรับเพื่อให้วงจรที่ได้มีความทนต่อความแปร

ปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดค่าสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่า การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับสามารถจำกัดจำนวนกิ่งของสายในส่วนวงจรรางคู่ ซึ่งทำให้วงจรที่ได้มีความทนต่อความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดได้สูงกว่าวงจรที่ออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

3. การเปรียบเทียบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้กับวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

พบว่า ในแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ การออกแบบวงจรจะมีการวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณและกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบวงจร ซึ่งต่างจากแบบจำลองความหน่วงแบบไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือนที่ ข้อกำหนดความหน่วงในการออกแบบวงจรเทียบเท่าการกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่เกตและสายในวงจรให้เป็นอนันต์และให้กิ่งของสายไม่มีความแปรปรวนความหน่วง ดังนั้นวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดเสมือน

4. การเปรียบเทียบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ระหว่างการใช้เกตออร์และการใช้บัฟเฟอร์ในการออกแบบส่วนวงจรตอบรับ

พบว่า การใช้เกตออร์ในการออกแบบส่วนวงจรตอบรับเป็นผลให้ค่าความหน่วงในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่มีค่าเปลี่ยนไปตามแบบอินพุต ซึ่งต่างจากการใช้บัฟเฟอร์ที่ให้ค่าความหน่วงในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณเป็นค่าคงที่ ทำให้เมื่อส่วนวงจรรางคู่มีขนาดใหญ่การใช้เกตออร์ในการออกแบบจะให้วงจรเชิงผสมที่ทำงานได้เร็วกว่า นอกจากนี้พบว่า การใช้บัฟเฟอร์ต่อขนานกับส่วนวงจรรางคู่จะให้วงจรเชิงผสมที่ทำงานได้เร็วกว่าการใช้บัฟเฟอร์ต่อที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ แต่ทั้งนี้การใช้บัฟเฟอร์ต่อขนานกับส่วนวงจรรางคู่จะต้องใช้บัฟเฟอร์ที่มีค่าความหน่วงมากกว่าการใช้บัฟเฟอร์ต่อที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่