บทที่ 5

การจำลองการทำงานของวงจร

การออกแบบวงจรที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จะมีการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหน่วงเพื่อกำหนดอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) และออกแบบวงจรระดับเกตให้มีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณถูกต้องทนต่อความแปรปรวนความหน่วงในขอบเขตอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดที่กำหนด เมื่อการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารให้มีคุณสมบัติไม่เกิดฮาซาร์ดกำหนดให้ ส่วนวงจรตอบรับสร้างการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์เพื่อทำหน้าที่ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในวงจรก่อนที่จะส่งเอาต์พุตจากวงจร การออกแบบวงจรระดับเกตที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้จึงให้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณของสัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีค่ามากกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เป็น K เท่า

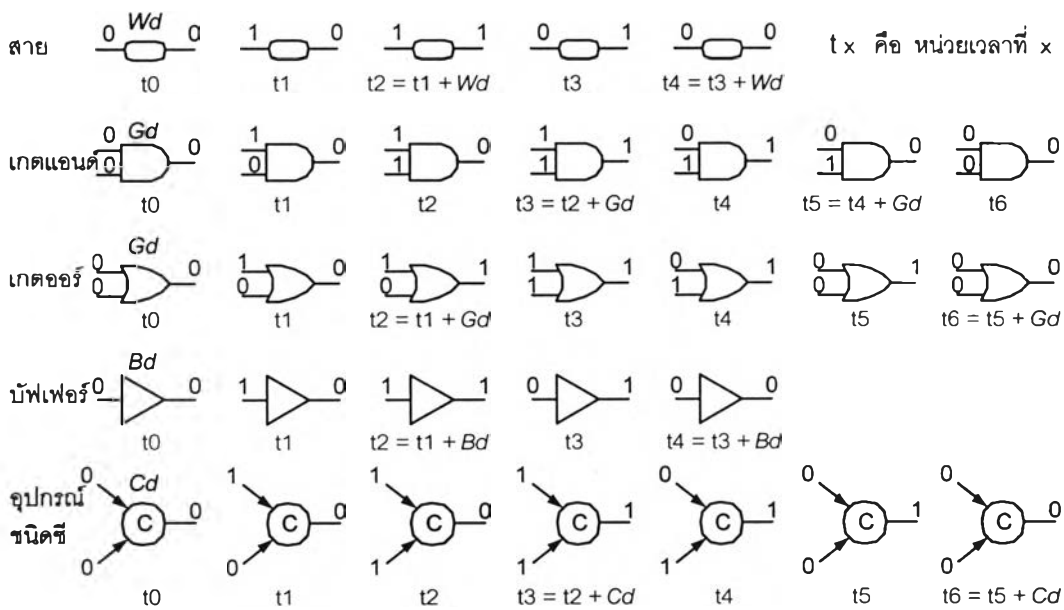
จากแนวทางการออกแบบวงจรที่เสนอในบทที่ 3 จะได้ว่า สำหรับส่วนวงจรตอบรับที่ออกแบบโดยใช้เกตออร์ ความถูกต้องในการทำงานของวงจรเกิดจากองค์ประกอบสามประการ คือ การประมาณค่าความหน่วงของส่วนวงจรรางคู่ให้ค่าความหน่วงที่ไม่ต่ำกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ การเลือกสายให้กลุ่มสายที่สามารถประกันการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ในขั้นว่าง และการจัดเรียงเกตออร์ในส่วนวงจรตอบรับรวมให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ได้ และสำหรับส่วนวงจรตอบรับที่ออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์พบว่า ความถูกต้องในการทำงานของวงจรเกิดจาก รูปแบบการต่อบัฟเฟอร์และการคำนวณค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์ประกอบกันให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่ในขอบเขตความแปรปรวนความหน่วงที่อัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุดได้

ในบทนี้เสนอวิธีการจำลองการทำงานเพื่อทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ที่ได้เสนอในบทที่ 3

สำหรับใช้ในการทดลองในบทที่ 6 โดยเสนอตามลำดับดังนี้ การจำลองการทำงานของวงจร การทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์ การทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ และการวัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจร

5.1 การจำลองการส่งผ่านระดับสัญญาณในวงจร

ในงานวิจัยนี้ใช้จำลองการทำงานของวงจรในระดับเกต โดยการใส่แบบอินพุตที่ถูกต้องเพื่อให้วงจรมีการส่งผ่านระดับสัญญาณตามลักษณะการทำงานของเกตในวงจร ซึ่งจากการออกแบบวงจรในบทที่ 3 พบว่าวงจรประกอบด้วยสาย เกตแอนด์ เกตออร์ บัฟเฟอร์ และอุปกรณ์ซนิดซี และสรุปการจำลองการส่งผ่านระดับสัญญาณจากลักษณะการทำงานของแต่ละส่วนประกอบวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การจำลองการส่งผ่านระดับสัญญาณในแต่ละส่วนประกอบวงจร

5.2 การทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์

การจำลองการทำงานของวงจรในแต่ละรอบการทำงานแบ่งได้เป็นสองขั้น คือ ขั้นทำงานและขั้นว่าง โดยในขั้นทำงานการจำลองการทำงานจะให้แบบอินพุตของวงจรเป็นค่า

รหัสตรงรางคู่ และในขั้นว่างการจำลองการทำงานจะให้แบบอินพุตของวงจรเป็นค่าตัวแบ่งรอบการทำงาน ดังนั้น เมื่อวงจรมีสายคู่อินพุต n คู่ วงจรจะได้รับการทดสอบการทำงานสำหรับแบบ อินพุตเป็นค่ารหัสตรงรางคู่ตั้งแต่ค่าตรรกะ $[000...0]_n$ ถึง $[111...1]_n$ ซึ่งในแต่ละรอบสามารถแบ่งการทดสอบเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

5.2.1 การทดสอบวงจรโดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนความหน่วงในวงจรเท่ากับ 1

การทดสอบในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในวงจร และทดสอบความสามารถในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรตอบรับเมื่อไม่มีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความหน่วง โดยกำหนดให้ค่าความหน่วงของเกตและสายในการจำลองการทำงานเป็นค่าเดียวกับค่าความหน่วงประมาณในการออกแบบวงจรระดับเกต และแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ระดับ คือ

5.2.1.1 การพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในระดับกลุ่มส่วนประกอบวงจร

เมื่อให้กลุ่มส่วนประกอบวงจรแทนชุดของเกตและสายที่วิเคราะห์สำหรับใช้ในการเลือกสายเพื่อประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ จะได้ว่าสามารถแบ่งการตรวจสอบการทำงานของวงจรเชิงผสมตามลักษณะการออกแบบส่วนวงจรรางคู่ ดังนี้

1. การออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน

ในการออกแบบโดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผัน กลุ่มส่วนประกอบวงจร หมายถึง เกตและสายในแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ ซึ่งการตรวจสอบแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์ได้รับการเลือก

กรณีนี้จะตรวจสอบว่า การใช้สายเอาต์พุตของเกตออร์ร่วมกับกลุ่มสายอินพุตของเกตแอนด์ที่มีค่าความหน่วงมากกว่าสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ $1 \rightarrow 0$ ในขั้นว่างได้จริง โดยใช้การเปรียบเทียบค่าความหน่วง ดังนี้

กำหนดให้

$\tau(x)$ = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ที่จุดปลายของสาย x

กลุ่มสายที่เลือกของคู่เกตแอนด์ออร์จะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ เมื่อ

$$\tau_{\text{สูงสุด}}(\text{กลุ่มสายที่เลือก}) > \tau_{\text{สูงสุด}}(\text{กลุ่มสายอินพุตของคู่เกตแอนด์ออร์}) \quad (5.1)$$

กรณีที่ 2 เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์ไม่ได้รับการเลือก

เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์ไม่ได้รับการเลือกแสดงว่า สายดังกล่าวได้ต่อเป็นอินพุตของเกตออร์ถัดไป ดังนั้นการตรวจสอบการทำงานของวงจรจึงแบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกการตรวจสอบจะพิจารณาเสมือนว่าสายเอาต์พุตของเกตออร์ที่คู่เกตแอนด์ออร์นี้ได้ถูกเลือกใช้ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ และช่วงที่สองการตรวจสอบจะพิจารณาที่คู่เกตแอนด์ออร์ถัดไปว่าการใช้สายเอาต์พุตของเกตออร์ถัดไปสามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สายเอาต์พุตของเกตออร์นี้ได้จริง สรุปการเปรียบเทียบค่าความหน่วงได้ดังนี้

กลุ่มสายที่เลือกของคู่เกตแอนด์ออร์จะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ เมื่อ

$$\tau_{\text{สูงสุด}}(\text{กลุ่มสายที่เลือก,สายเอาต์พุตของเกตออร์}) > \tau_{\text{สูงสุด}}(\text{กลุ่มสายอินพุตของคู่เกต}) \quad (5.2)$$

$$\tau_{\text{สูงสุด}}(\text{สายเอาต์พุตของเกตออร์ถัดไป}) > \tau_{\text{สูงสุด}}(\text{สายเอาต์พุตของเกตออร์นี้}) \quad (5.3)$$

2. การออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ

ในการออกแบบโดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ กลุ่มส่วนประกอบวงจร หมายถึง เกตและสายในแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ ซึ่งเมื่อรวมเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตของแต่ละเกตออร์ การตรวจสอบแบ่งได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 1

เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 1 แสดงว่า มีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตหนึ่งเส้นทางมีค่าระดับสัญญาณ 1 ทั้งเส้นทาง ดังนั้นในกรณีนี้จึงตรวจสอบว่า การใช้สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ร่วมกับสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ซึ่งมีค่า

ความหน่วงมากกว่าสามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1→0 ในแต่ละเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ได้จริง โดยการทดสอบใช้การเปรียบเทียบค่าความหน่วง ดังนี้

กลุ่มสายที่เลือกของแต่ละเกตออร์จะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ เมื่อ

$$\text{ความหน่วง}_{\text{สูงสุด}}\ (\text{สายหลักของการต่อเชื่อมเกตออร์ , สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์}) \quad (5.4)$$
$$> \text{ความหน่วง}_{\text{สูงสุด}}\ (\text{กลุ่มสายในทุกเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์})$$

กรณีที่ 2 เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 0

เมื่อสายเอาต์พุตของเกตออร์มีค่าระดับสัญญาณ 0 แสดงว่า ไม่มีเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตมีค่าระดับสัญญาณ 1 ทั้งเส้นทาง แต่ทั้งนี้อาจสายบางสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์มีค่าระดับสัญญาณ 1 ได้ ดังนั้นในกรณีนี้จึงตรวจสอบว่า การใช้สายหลักของวงจรร่วมกับสายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์อื่นที่มีค่าความหน่วงมากกว่าสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณได้จริง โดยการทดสอบใช้การเปรียบเทียบค่าความหน่วง ดังนี้

กลุ่มสายที่เลือกจะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ เมื่อ

$$\text{ความหน่วง}_{\text{สูงสุด}}\ (\text{สายหลักของวงจร , สายในเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์อื่น}) \quad (5.5)$$
$$> \text{ความหน่วง}_{\text{สูงสุด}}\ (\text{กลุ่มสายในทุกเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์})$$

5.2.1.2 การพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในระดับวงจร

เมื่อสิ้นสุดการจำลองการทำงานของวงจรในแต่ละขั้นจะสามารถวัดค่าความหน่วงได้ดังนี้

กำหนดให้

$d_{\text{จำลองการทำงาน}}$ (DR) = ค่าความหน่วงการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรรางคู่

$d_{\text{จำลองการทำงาน}}$ (ACK) = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์

โดยการเปรียบเทียบค่าความหน่วงที่ทุกจุดในส่วนวงจรรางคู่ จะได้ว่า

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{DR})_{\text{ขั้นทำงาน}} = \text{ความหน่วง}_{\text{สูงสุด}}\ (\text{ทุกจุด}) \quad (5.6)$$

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{DR})_{\text{ขั้นว่าง}} = \text{ความหน่วง}_{\text{สูงสุด}}\ (\text{ทุกจุด}) \quad (5.7)$$

เนื่องจากสัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0→1 ในขั้นทำงาน และ 1→0 ในขั้นว่าง จะได้ว่า

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(ACK)_{\text{ขั้นทำงาน}} = \text{⌐ (ACK)} \quad (5.8)$$

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(ACK)_{\text{ขั้นว่าง}} = \text{¬ (ACK)} \quad (5.9)$$

จากค่าความหน่วงที่ได้ สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการทำงานในแต่ละขั้น ดังนี้

<u>ในขั้นทำงาน</u> วงจรจะทำงานถูกต้องเมื่อ

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(ACK)_{\text{ขั้นทำงาน}} > d_{\text{จำลองการทำงาน}}(DR)_{\text{ขั้นทำงาน}} \quad (5.10)$$

<u>ในขั้นว่าง</u> วงจรจะทำงานถูกต้องเมื่อ

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(ACK)_{\text{ขั้นว่าง}} > d_{\text{จำลองการทำงาน}}(DR)_{\text{ขั้นว่าง}} \quad (5.11)$$

และเมื่อเอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่เป็น (f,f') จะได้ว่า กลุ่มสายที่เลือกของทั้งวงจรจะสามารถใช้ประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณ เมื่อ

$$\text{¬}_{\text{สูงสุด}} \text{ (กลุ่มสายที่เลือกของทั้งวงจร)} > \text{¬}_{\text{สูงสุด}} \text{ (ทุกสายในวงจรยกเว้น f,f')} \quad (5.12)$$

5.2.2 การทดสอบวงจรโดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนความหน่วงในวงจรเท่ากับอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด (K)

การทดสอบในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในวงจร และทดสอบความสามารถในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรตอบรับเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความหน่วงมากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ส่วนวงจรตอบรับไม่สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่และวงจรที่ได้ทำงานผิดพลาด โดยกำหนดให้ค่าความหน่วงของเกตและสายในการจำลองการทำงานมีค่าเป็น K เท่าของค่าความหน่วงประมาณในการออกแบบวงจรระดับเกต และแบ่งการเปลี่ยนค่าความหน่วงเป็น 2 ระดับ คือ

5.2.2.1 การเปลี่ยนค่าความหน่วงในระดับกลุ่มส่วนประกอบวงจร

จากการพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในกลุ่มส่วนประกอบวงจรเพื่อตรวจสอบการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยใช้การเลือกสายในหัวข้อ 5.2.1.1 จะได้ว่า ในกรณีที่เกิดความแปรปรวนความหน่วง การตรวจสอบการใช้กลุ่มสายที่เลือกในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณสามารถทำได้โดย การเลือกกลุ่มส่วนประกอบวงจรแบบจัดหมู่ (Combination) เพื่อเปลี่ยนค่าความหน่วงในสายที่ไม่ได้รับการเลือกในแต่ละกลุ่มส่วนประกอบวงจรให้เป็น K เท่า และใช้แนวทางการเปรียบเทียบค่าความหน่วงในหัวข้อ 5.2.1.1 ดังนั้น เมื่อส่วนวงจรรางคู่ประกอบด้วยกลุ่มส่วนประกอบวงจร n กลุ่ม การเลือกกลุ่มส่วนประกอบวงจรเพื่อตรวจสอบในระดับนี้จะทำได้ทั้งหมด 2^n-1 แบบ ซึ่งจะได้ว่าการตรวจสอบการเลือกสายได้พิจารณาทั้งกรณีค่าความแปรปรวนความหน่วงเท่ากับ 1 และเท่ากับ K ในทุกกลุ่มส่วนประกอบวงจร

5.2.2.2 การเปลี่ยนค่าความหน่วงในระดับวงจร

จากการพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในระดับวงจรในหัวข้อ 5.2.1.2 จะได้ว่า ในกรณีที่เกิดความแปรปรวนความหน่วง การตรวจสอบการใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ร่วมกับการเลือกสายในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณสามารถทำได้โดย การเปลี่ยนค่าความหน่วงในทุกเกตและสายในส่วนวงจรรางคู่ให้เป็น K เท่า และใช้แนวทางการเปรียบเทียบค่าความหน่วงในหัวข้อ 5.2.1.2 ซึ่งจะได้ว่า การตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรได้พิจารณาทั้งกรณีค่าความแปรปรวนความหน่วงเท่ากับ 1 และเท่ากับ K

5.3 การทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์

การจำลองการทำงานของวงจรในแต่ละรอบการทำงานแบ่งได้เป็นสองขั้น คือ ขั้นทำงานและขั้นว่าง โดยในขั้นทำงานการจำลองการทำงานจะให้แบบอินพุตของวงจรเป็นค่ารหัสตรงรางคู่ และในขั้นว่างการจำลองการทำงานจะให้แบบอินพุตของวงจรเป็นค่าตัวแบ่งรอบการทำงาน ดังนั้น เมื่อวงจรมีสายคู่อินพุต n คู่ วงจรจะได้รับการทดสอบการทำงานสำหรับแบบอินพุตเป็นค่ารหัสตรงรางคู่ตั้งแต่ค่าตรรกะ $[000...0]_n$ ถึง $[111...1]_n$ ซึ่งในแต่ละรอบแบ่งการทดสอบเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

5.3.1 การทดสอบวงจรโดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนความหน่วงในวงจรเท่ากับ 1

การทดสอบในขั้นตอนนี้ มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรตอบรับเมื่อไม่มีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความหน่วง โดยจะกำหนดให้ ค่าความหน่วงของเกตและสายในการจำลองการทำงานเป็นค่าเดียวกับค่าความหน่วงประมาณในการออกแบบวงจรระดับเกต

เมื่อพิจารณาจากลักษณะการใช้บัฟเฟอร์ในการออกแบบ จะได้ว่า ส่วนวงจรตอบรับใช้ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง โดยการเลือกสายจากส่วนวงจรรางคู่ใช้เพียงเพื่อให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณในทุกแบบอินพุตเท่านั้น ดังนั้น การทดสอบวงจรจึงใช้การพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณในระดับวงจร และเปรียบเทียบค่าความหน่วงสำหรับตรวจสอบการทำงานในแต่ละขั้นโดยใช้สมการที่ 5.6 ถึง 5.11

5.3.2 การทดสอบวงจรโดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนความหน่วงในวงจรเท่ากับอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด (K)

การทดสอบในขั้นตอนนี้ มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณของส่วนวงจรตอบรับเมื่อมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความหน่วงมากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ส่วนวงจรตอบรับไม่สามารถประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่และวงจรที่ได้ทำงานผิดพลาด โดยในการจำลองการทำงานจะเปลี่ยนค่าความหน่วงของทุกเกตและสายในส่วนวงจรรางคู่ให้เป็น K เท่าของค่าความหน่วงประมาณของการออกแบบวงจรระดับเกต และใช้แนวทางการเปรียบเทียบค่าความหน่วงในหัวข้อ 5.3.1 ซึ่งจะได้ว่า การตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรได้พิจารณาทั้งกรณีค่าความแปรปรวนความหน่วงเท่ากับ 1 และเท่ากับ K

5.4 การวัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจร

การวัดเวลาที่ใช้ในทำงานของวงจรมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร โดย เมื่อวงจรมีสายคู่อินพุต n คู่ วงจรจะได้รับการจำลองการทำงานสำหรับแบบอินพุตเป็นค่ารหัสตรงรางคู่ตั้งแต่ค่าตรรกะ $[000...0]_n$ ถึง $[111...1]_n$ ซึ่งในแต่ละรอบจะสามารถวัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจร ดังนี้

กำหนดให้

$\lceil$ (x) = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ที่จุดปลายของสาย x

$\rfloor$ (x) = ค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่จุดปลายของสาย x

$Cd_{0\rightarrow 1,\ 1\rightarrow 0}$ = ค่าความหน่วงอุปกรณ์ซนิดซีสำหรับการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 และการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0

$d_{\text{จำลองการทำงาน}}$ (วงจร) [x] = เวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจร สำหรับแบบอินพุต x

$d_{\text{จำลองการทำงาน}}$ (วงจร) = เวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรเมื่อรวมทุกแบบอินพุต

ในการออกแบบวงจรทั้งแบบส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์และส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ต่อขนานกับส่วนวงจรรางคู่ พบว่า วงจรเชิงผสมที่ได้มีการใช้อุปกรณ์ซนิดซีในการต่อเชื่อมเอาต์พุต (f,f') ของส่วนวงจรรางคู่และเอาต์พุตของส่วนวงจรตอบรับ ทำให้ในขั้นทำงานการเกิดค่ารหัสตรงรางคู่ที่เอาต์พุตของวงจรต้องรอทั้งการเกิดค่ารหัสตรงรางคู่ที่ (f,f') และการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 0⟶1 ที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ และในขั้นว่างการเกิดค่าตัวแบ่งรอบการทำงานที่เอาต์พุตของวงจรต้องรอทั้งการเกิดค่าตัวแบ่งรอบการทำงานที่ (f,f') และการเปลี่ยนระดับสัญญาณ 1⟶0 ที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ ดังนั้นจึงได้เวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรสำหรับแบบอินพุต [A] เป็น

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นทำงาน}}[A] = \lceil_{\text{สูงสุด}}(f, f', ACK) + Cd_{0\rightarrow 1} \quad (5.13)$$

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นว่าง}}[A] = \rfloor_{\text{สูงสุด}}(f, f', ACK) + Cd_{1\rightarrow 0} \quad (5.14)$$

และเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรสำหรับทุกแบบอินพุตค่ารหัสตรงรางคู่ตั้งแต่ค่าตรรกะ $[000...0]_n$ ถึง $[111...1]_n$ ได้ดังนี้

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นทำงาน}} = \frac{\sum_{[000\ldots0]_n}^{[111\ldots1]_n} \left(\int_{\text{สูงสุด}} (f, f', ACK) \right)}{2^n} + Cd_{0\rightarrow 1} \quad (5.15)$$

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นว่าง}} = \frac{\sum_{[000\ldots0]_n}^{[111\ldots1]_n} \left(\overline{\int}_{\text{สูงสุด}} (f, f', ACK) \right)}{2^n} + Cd_{1\rightarrow 0} \quad (5.16)$$

ในการออกแบบวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้การต่อบัฟเฟอร์ที่เอาต์พุตของส่วนวงจรรางคู่ พบว่า วงจรเชิงผสมที่ได้มีเอาต์พุตเป็นเอาต์พุตของบัฟเฟอร์ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่าความหน่วงของบัฟเฟอร์เป็น Bd จะได้เวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรสำหรับแบบอินพุต [A] เป็น

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นทำงาน}}[A] = \int_{\text{ต่ำสุด}} (f, f') + Bd_{0\rightarrow 1} \quad (5.17)$$

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นว่าง}}[A] = \overline{\int}_{\text{ต่ำสุด}} (f, f') + Bd_{1\rightarrow 0} \quad (5.18)$$

และเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรสำหรับทุกแบบอินพุตค่ารหัสตรงรางคู่ตั้งแต่ค่าตรรกะ $[000\ldots0]_n$ ถึง $[111\ldots1]_n$ ได้ดังนี้

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นทำงาน}} = \frac{\sum_{[000\ldots0]_n}^{[111\ldots1]_n} \left(\int_{\text{ต่ำสุด}} (f, f') \right)}{2^n} + Bd_{0\rightarrow 1} \quad (5.19)$$

$$d_{\text{จำลองการทำงาน}}(\text{วงจร})_{\text{ขั้นว่าง}} = \frac{\sum_{[000\ldots0]_n}^{[111\ldots1]_n} \left(\overline{\int}_{\text{ต่ำสุด}} (f, f') \right)}{2^n} + Bd_{1\rightarrow 0} \quad (5.20)$$

สรุป

ในการออกแบบวงจรเชิงผสมแบบอสมวารที่ไม่ไวต่อความหน่วงชนิดปรับมาตราส่วนได้ วงจรระดับเกตต้องมีค่าความหน่วงในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณถูกต้องในขอบเขตอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด(K) ที่กำหนด กล่าวคือ ส่วนวงจรตอบรับต้องมีค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มากกว่าค่าความหน่วงการสิ้นสุดทุกการเปลี่ยนระดับสัญญาณในส่วนวงจรรางคู่เป็น K เท่า

การจำลองการทำงานของวงจรจึงมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ออกแบบ โดยในแต่ละรอบการทำงานของวงจรจะแบ่งการทดสอบเป็นสองขั้นตอน คือ การทดสอบวงจรที่ความแปรปรวนความหน่วงเท่ากับ 1 และเท่ากับอัตราส่วนความแปรปรวนความหน่วงสูงสุด

การทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์ จะแบ่งการพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณเป็นระดับกลุ่มส่วนประกอบวงจรและระดับวงจร โดย สำหรับการออกแบบส่วนวงจรรางคู่โดยใช้ตรรกะรางคู่ที่ไร้ตัวผกผันกลุ่มส่วนประกอบวงจรจะหมายถึงแต่ละคู่เกตแอนด์ออร์ และสำหรับการออกแบบส่วนวงจรรางคู่โดยใช้แผนภาพตัดสินใจแบบทวิภาคชนิดมีการลดทอนอันดับ กลุ่มส่วนประกอบวงจรจะหมายถึงเกตและสายในกลุ่มเส้นทางต่อเชื่อมเกตแอนด์ที่เป็นอินพุตสำหรับแต่ละเกตออร์

จากการพิจารณาลักษณะการส่งผ่านระดับสัญญาณเป็นระดับกลุ่มส่วนประกอบวงจรและระดับวงจร จะได้ว่า การตรวจสอบความถูกต้องของกลุ่มสายที่เลือกในการประกันการสิ้นสุดการเปลี่ยนระดับสัญญาณจึงใช้การเปรียบเทียบค่าความหน่วงทั้งในระดับกลุ่มส่วนประกอบวงจรและระดับวงจร และการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์จึงใช้การเปรียบเทียบค่าความหน่วงในระดับวงจรทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่าง

ในการทดสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้บัฟเฟอร์ การตรวจสอบความถูกต้องของกลุ่มสายที่เลือกจะพิจารณาเพียงความสามารถในการให้สัญญาณแสดงความบริบูรณ์มีการเปลี่ยนระดับสัญญาณในทุกแบบอินพุต และการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความหน่วงการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่สัญญาณแสดงความบริบูรณ์ใช้การเปรียบเทียบค่าความหน่วงในระดับวงจรทั้งในขั้นทำงานและในขั้นว่างเช่นเดียวกับการทดสอบวงจรที่ส่วนวงจรตอบรับออกแบบโดยใช้เกตออร์

นอกจากนี้ เมื่อสิ้นสุดการจำลองการทำงานของวงจรในแต่ละขั้นสามารถวัดเวลาที่ใช้ในการทำงานของวงจรเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรที่ออกแบบได้