

การปรับปรุงกระบวนการทดสอบวงจรขยาย LMX324

Improving the LMX324 Amplifier IC Testing Process

ศิริรัตน์ ชุตติชุต และ ปฐมพงศ์ วิริยะอุดมชาติ*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230 E-mail: prathompong.v@gmail.com*

Sirirat Juttijudata Prathompong Viriyadumchat*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Siriracha, Kasetsart University,
Siriracha campus, Siriracha, Chonburi 20230, E-mail: prathompong.v@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงขั้นตอนการทดสอบวงจรขยายของกระบวนการผลิตวงจรขยายรุ่น LMX324 โดยกระบวนการทดสอบนี้ต้องทำการทดสอบทางไฟฟ้าตามมาตรฐานที่ถูกกำหนดไว้ในเอกสารกำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 8 พารามิเตอร์ และการทดสอบแต่ละพารามิเตอร์นั้นต้องผ่านขั้นตอนทั้งหมด 8 ขั้นตอน และสามารถทดสอบได้ครั้งละ 1 ชุดเท่านั้น โดยพิจารณาการปรับปรุงขั้นตอนการทดสอบใน 3 ประเด็น ประเด็นแรกพิจารณาการจัดลำดับของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่จะทดสอบใหม่โดยใช้การวิเคราะห์ ECRS และ มูลค่ากิจกรรมเพื่อกำจัดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า (ขั้นตอนการตั้งค่าในการทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าเท่ากันและมีการรอคอยที่ไม่จำเป็น) การจัดลำดับพารามิเตอร์ทดสอบใหม่สามารถลดเวลาไปได้ 9.4% ต่อการทดสอบ 1 ชุด ประเด็นถัดมาพิจารณาการเพิ่มจำนวนชุดทดสอบจาก 1 ชุดเป็น 4 ชุดในเวลาเดียวกัน โดยการออกแบบติดตั้งวงจรวัดแรงดันเพิ่มเติมจากวงจรเดิมที่มีอยู่ การเพิ่มจำนวนการทดสอบเป็น 4 ชุดพร้อมกันลดเวลาทดสอบไปได้ 25.6% ต่อการทดสอบ 1 ชุด ประเด็นสุดท้ายที่พิจารณาได้แก่การลดเวลาการทดสอบในขั้นตอนการวัดค่าทางไฟฟ้าของแต่ละการทดสอบซึ่งใช้เวลาถึง 61% ของเวลาทดสอบทั้งหมด เนื่องจากการกำหนดจำนวนรอบที่ใช้ในการวัดค่าทางไฟฟ้าซ้ำ 1,160 รอบต่อการวัดหนึ่งค่าแรงดัน การทดสอบต้นเนตถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาจำนวนรอบที่น้อยที่สุด โดยที่ค่าที่วัดได้จะต้องอยู่ในระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด 1,160 รอบ จากการทดสอบพบว่าจำนวนรอบ 800 และ 350 รอบ สำหรับการทดสอบที่ค่า 5V และ 10 V ก็เพียงพอแล้ว การลดจำนวนรอบดังกล่าวสามารถลดเวลาการทดสอบไป 23.8% ต่อการทดสอบ 1 ชุด กล่าวโดยสรุปจากการปรับปรุงทั้งสามประเด็นสามารถลดเวลาทดสอบรวมได้ถึง 58.8% เพื่อให้เกิดความมั่นใจกับขั้นตอนการทดสอบใหม่ ผลที่ได้จากขั้นตอนใหม่ถูกเปรียบเทียบกับขั้นตอนเดิมโดยใช้วิธี GR&R พบว่าการทดสอบที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% อย่างเห็นที่น่าพอใจ

คำหลัก การปรับปรุงกระบวนการทดสอบ ECRS มูลค่ากิจกรรม การทดสอบต้นเนต GR&R

Abstract

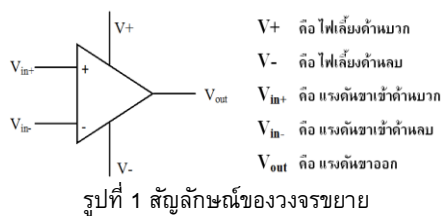
The objective of this research is to improve LMX324 amplifier IC testing process. The testing has to be compliant with the given standard in the document. Eight product characteristic parameters are tested. Each test consists of eight steps and can only be performed on one unit at a time. Three improvement strategies are considered. The first one focuses on the re-ordering the sequence of characteristic parameters to be tested. ECRS and value added activities are utilized to remove non-value added activities (steps involved the same value setting for testing and an unnecessary waiting). The re-ordering reduces testing time by 9.4% per unit. The next strategy tries to increase number of units tested for a given test period – in this case, from 1 to 4 units tested at the same time. In order to do that, new voltage

measurement circuits are designed and installed to existing on. Doing so cut testing time by 25.6% per unit tested. The last strategy considered is try to cut down the testing time during voltage measurement of testing step which takes 61% of total testing time due to the fact that the testing step has to measure the voltage over 1,160 times for one test. Dunnett's test is performed in order to determine the lowest possible number of samples must be taken for the test. Result shows that the test requires 800 and 350 repetitions for 5V and 10V testing with 95% level of confidence. The reduction in the number of samples required greatly cut the test time down by 23.8% per unit. In summary, all the three strategies reduce in total 58.6% of testing time per unit. To further check the variation of result due to the new test procedure in comparison to the original one, GR&R is performed. Result suggests the variation between the new and original testing is satisfactorily less than 5%.

Keywords: Improving the Testing Process, ECRS, Value Added Activities, Dunnett's test, GR&R

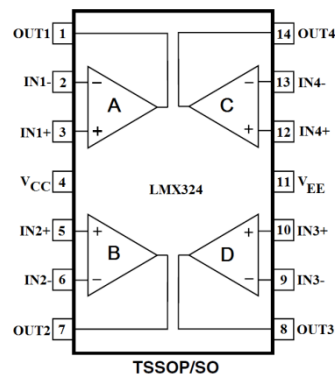
1. บทนำ

วงจรรวม (Integrated Circuit: IC) ประเภท วงจรขยาย (Operational Amplifier Circuit: Op-Amp) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถทำหน้าที่ได้หลากหลายเมื่อนำไปต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นก็จะสามารถทำเป็นวงจรรวมสัญญาณ (Sum signal) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference signal) หรือวงจรรขยายสัญญาณ (Amplify signal) ซึ่งมีสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าดังรูปที่ 1



วงจรรขยาย LMX324 เป็นวงจรรขยายประเภท ขยายแรงดันในบรรจุภัณฑ์ TSSOP (Thin Small Outline Package) ภายในประกอบด้วยวงจรรขยาย 4 ชุด (A-D) มีสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าดังรูปที่ 2 โดยกระบวนการผลิตวงจรรขยายนั้น วงจรทุกชิ้นต้องมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าตามมาตรฐานสากลที่เป็นไปตามข้อกำหนดของเอกสารผลิตภัณฑ์ (Device's Datasheet specification) ดังนั้นเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้า รวมทั้งเป็นการรับรองคุณภาพของวงจรรขยาย วงจรทุกชิ้นจึงต้องผ่านกระบวนการทดสอบทางไฟฟ้าตามข้อกำหนด โดยวงจรรขยาย LMX324 ต้องผ่านขั้นตอนการทดสอบทางไฟฟ้าตาม

ข้อกำหนดทั้งสิ้น 8 พารามิเตอร์ รายละเอียดคุณลักษณะในแต่ละพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ LMX324

ทั้งนี้กระบวนการทดสอบดังกล่าวใช้เครื่องจักรรุ่น Aetrium ในการจับและเปลี่ยนถ่ายชิ้นงาน โดยมีฮาร์ดแวร์ที่มีวงจรสำหรับใช้ในการทดสอบเป็นตัวเชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบรุ่น TMT ที่มีหน้าที่ในการจ่ายและวัดค่าทางไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการทำงานต่างๆของเครื่องจักร ฮาร์ดแวร์ และเครื่องทดสอบ รวมถึงการประมวลผลการวัดจะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมทดสอบทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติมาตรฐานของพารามิเตอร์ที่ทดสอบ

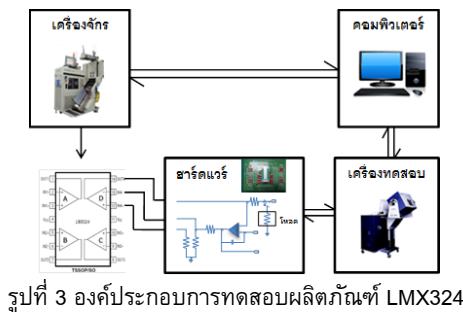
ลำดับ	พารามิเตอร์	ตัวย่อ	เงื่อนไข	คุณลักษณะ			
				ต่ำสุด	ปกติ	สูงสุด	หน่วย
1	แรงดันขาเข้าตรงขยา Input Offset Voltage	VOS	-	-	1	6	mV
2	การขยายสัญญาณแรงดัน Large-Signal Voltage Gain	AVOL	-	20	120	-	V/mV
3	อัตราการจัดเบี่ยงแรงดันไฟเลี้ยง Power-Supply Rejection Ratio	PSRR	-	82	96	-	dB
4	อัตราการจัดเบี่ยงโหมดร่วม Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	-	72	92	-	dB
5	การแกว่งของแรงดันขาออก Output-Voltage Swing	V _{out_Swing}	V _{CC} - V _{OH}	-	12	50	mV
6	การแกว่งของแรงดันขาออก Output-Voltage Swing	V _{out_Swing}	V _{CC} - V _{OH}	-	40	110	mV
7	กระแสขาเข้า Input Bias Current	IBIAS	-	-	18	50	nA
8	กระแสลัดวงจรขาออก Output Short-Circuit Current	IOUT	Sourcing	5	25	-	mA
			Sinking	10	28	-	mA

ตารางที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	เงื่อนไข	กระบวนการทดสอบ									
		1. ตั้งค่า เริ่มต้น แรงดันทุก ด้านเพื่อ	2. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Loop out vout (V)	3. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Force out vout (V)	4. ตั้งค่า สำหรับ การวัด V+ (V)	5. ตั้งค่า สำหรับ การวัด V- (V)	6. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Vout (V)	7. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Vout (V)	8. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Vout (V)	9. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Vout (V)	10. ตั้งค่า สำหรับ การวัด Vout (V)
1.VOS	-	0.0	9.95	0.4	-	1.7	-1.0	10	1,160	0.0	-
2.AVOL	-	0.0	4.95	-1.4	2k	1.7	-1.0	5	1,160	0.0	2k
3.PSRR	-	0.0	4.95	0.0	-	8.0	-1.0	5	1,160	0.0	-
4.CMRR	-	0.0	4.95	-0.45	-	0.9	-1.8	5	1,160	0.0	-
5.Vout_Swing	V _{CC} - V _{OH}	0.0	4.95	-1.5	10k	1.7	-1.0	5	1,160	0.0	10k
6.Vout_Swing	V _{CC} - V _{OH}	0.0	4.95	-2.5	2k	3.0	-2.0	5	1,160	0.0	2k
7.IBIAS	-	0.0	9.95	0.4	-	1.7	-1.0	10	1,160	0.0	-
8.IOUT	Sourcing	0.0	4.95	-1.0	100	3.0	-2.0	5	1,160	0.0	100
	Sinking										

ตารางที่ 3 เวลาที่ใช้การทดสอบผลิตภัณฑ์ในปัจจุบัน

พารามิเตอร์	เวลาที่ใช้	กระบวนการทดสอบ (ผลิตภัณฑ์เดิม)							
		1. ตั้งค่า เริ่มต้น	2. ตั้งค่า สำหรับ การวัด	3. ตั้งค่า สำหรับ การวัด	4. ตั้งค่า สำหรับ การวัด	5. ตั้งค่า สำหรับ การวัด	6. ตั้งค่า สำหรับ การวัด	7. ตั้งค่า สำหรับ การวัด	8. ตั้งค่า สำหรับ การวัด
1.VOS	0.207	1.945	0.060	60.032	60.320	0.124	0.002	0.022	122.712
2.AVOL	0.207	7.448	5.060	50.244	120.640	0.664	0.002	0.022	184.287
3.PSRR	0.207	12.009	5.060	40.064	120.640	0.124	0.002	0.022	178.128
4.CMRR	0.207	9.717	2.652	40.064	120.640	2.772	0.002	0.022	176.076
5.Vout_Swing	0.207	1.653	10.652	76.519	180.960	36.956	0.008	0.022	306.977
6.Vout_Swing	0.207	1.653	10.652	76.519	180.960	36.956	0.008	0.022	306.977
7.IBIAS	0.207	1.945	5.060	130.288	200.960	0.062	0.006	0.022	338.551
8.IOUT	0.727	21.437	5.060	50.288	120.640	0.114	0.002	0.022	198.290
เวลารวม	2.176	57.807	44.256	524.019	1105.760	77.772	0.032	0.176	1,811.999
%	0.12%	3.19%	2.44%	28.92%	61.02%	4.29%	0.00%	0.01%	100.00%



กระบวนการทดสอบพารามิเตอร์ของวงจรขยาย ทั้ง 8 พารามิเตอร์ ต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ 8 ขั้นตอน คือขั้นตอนการตั้งค่าเริ่มต้น การตั้งค่าไฟฟ้าสำหรับการทดสอบ การตั้งค่าไฟฟ้าให้กับผลิตภัณฑ์ การตั้งค่าการวัด การวัดค่าทางไฟฟ้า การรีเซ็ตค่าไฟฟ้า การคำนวณผล และการแสดงผล โดยมีกำหนดเงื่อนไข และการตั้งค่าต่างๆในการทดสอบ ดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ ขั้นตอนการวัดค่าทางไฟฟ้านั้นถูกกำหนดให้มีการวัดซ้ำเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าว่าผลิตภัณฑ์นั้นได้ผ่านการวัดเป็นจำนวนครั้งที่มากพอ และจะเป็นไปตามคุณลักษณะตามที่กำหนดไว้

จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในกระบวนการทดสอบวงจรขยายตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง กันยายน 2557 พบว่าเวลารวมของกระบวนการทดสอบคือ 1.81 วินาที/ชิ้น และขั้นตอนการตั้งค่าไฟฟ้าและการวัดค่าทางไฟฟ้าเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาในกระบวนการทดสอบไฟฟ้ามากถึง 99% ของเวลาที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3

นอกจากนี้ยังพบว่าขั้นตอนการทดสอบที่ 1-4 และ 6 (ขั้นตอนการตั้งค่าเริ่มต้น การตั้งค่าไฟฟ้าสำหรับการทดสอบ การตั้งค่าไฟฟ้าให้กับผลิตภัณฑ์ การตั้งค่าการวัด และการรีเซ็ตค่าไฟฟ้า) มีการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่เหมือนกันในหลายพารามิเตอร์ ซึ่งทำให้เสียเวลาจากการตั้งค่าที่ซ้ำซ้อน กลับไปกลับมา เนื่องจากการจัดลำดับการทดสอบพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม จึงนำหลักการ ECRS ร่วมกับการวิเคราะห์คุณค่ากิจกรรมมาวิเคราะห์และพัฒนากระบวนการตั้งค่าทางไฟฟ้าเพื่อกำจัดขั้นตอนที่ไม่เกิดประโยชน์ นอกจากนี้ขั้นตอนการทดสอบที่ 5 คือการวัดค่าทางไฟฟ้า มีการกำหนดรอบการวัดซ้ำที่มากถึง 1,160 รอบ ทำให้ใช้เวลาในการทดสอบมาก วิธีของต้นเนตจึงถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อหาค่าจำนวนรอบการวัดซ้ำที่เหมาะสม (ลดลง) โดยผลการวัดค่าแรงดันต้องไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าแรงดันระหว่างรอบการวัดซ้ำเดิมกับรอบการวัดซ้ำที่ต่ำกว่า

2. เทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการทดสอบ วงจรขยาย

2.1 หลักการ ECRS และการวิเคราะห์มูลค่า กิจกรรม

ECRS เป็นหลักการปรับปรุงคุณภาพที่มีองค์ประกอบ 4 ด้าน โดยองค์ประกอบแรกคือการกำจัด (Eliminate) เป็นการพิจารณาขั้นตอนการทำงานเพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่จำเป็นและไม่เกิดมูลค่าเพิ่มต่อผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบที่ 2 คือการรวมกัน (Combine) เป็นการรวมขั้นตอนการทำงานให้เหลือน้อยลง องค์ประกอบที่ 3 คือการจัดใหม่ (Rearrange) เป็นการจัดลำดับงานใหม่ให้เหมาะสมเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงและการรอคอยที่ไม่จำเป็น และองค์ประกอบสุดท้ายคือการทำให้ง่าย (Simplify) เป็นการปรับปรุงวิธีการทำงาน หรือสร้างอุปกรณ์ช่วยให้การทำงานง่ายขึ้น ซึ่งภาวิณี [1] ประสบความสำเร็จจากการนำหลักการนี้ไปใช้ร่วมกับ Why-Why analysis ในการกำจัดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตเบรคเกอร์ และพิทธพนธ์ [2] ประสบความสำเร็จในการนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H ในการปรับปรุงขั้นตอนการล้างขวด โดยในขั้นตอนของการจัดใหม่ จะใช้หลักการลำดับขั้นตอนในกระบวนการทดสอบความผิดพลาด (Defect Oriented Testing, DOT) ที่ถูกนำเสนอโดย Hamidreza และคณะ [3] โดยเริ่มต้นทดสอบขั้นตอนที่สามารถพบของเสียมากที่สุดก่อน และรองลงมาในลำดับต่อไป เพื่อคัดแยกของเสียออกให้เร็วที่สุด

การวิเคราะห์มูลค่ากิจกรรม จำแนกกิจกรรมออกเป็น 3 ประเภท ประเภทแรกคือกิจกรรมที่เพิ่มมูลค่า (Value Added: VA) เป็นกิจกรรมที่จำเป็นต่อกระบวนการทดสอบ ประเภทที่สองคือกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่าแต่จำเป็น (Necessary but Non Value Added: NNVA) เป็นกิจกรรมที่สูญเสียเปล่าแต่อาจจำเป็นต้องให้เกิดขึ้นในกระบวนการทดสอบ และประเภทสุดท้ายคือ กิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า (Non Value Added: NVA) เป็นกิจกรรมที่เป็นความสูญเสียเปล่าและสามารถกำจัดออกไปได้

2.2 วิธีของดันเน็ต (Dunnett's method)

R. W. Day และ G. P. Quinn [4] ได้ศึกษาและจัดหมวดหมู่ของวิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน วิธีของดันเน็ตเป็น

วิธีที่เหมาะสมที่สุดในการเปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างเหตุการณ์ควบคุมกับเหตุการณ์อื่นๆ โดยสมมติฐานทางสถิติที่ต้องการทดสอบเป็นดังสมการที่ 1 และ 2

$$H_0: \mu_c = \mu_i \quad (1)$$

$$\text{และ} \quad H_1: \mu_c \neq \mu_i \quad (2)$$

การทดสอบสมมติฐานจะปฏิเสธ H_0 เมื่อผลเป็นดังเงื่อนไขในสมการที่ 3

$$|\bar{y}_c - \bar{y}_i| > d_{\alpha(a-1,f)} \sqrt{\text{MSE} \left(\frac{1}{n_c} + \frac{1}{n_i} \right)} \quad (3)$$

$$\text{และ} \quad \text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{k(n-1)} \quad (4)$$

กำหนดให้

y_{ij} แทน ค่าสังเกตที่ j จากเหตุการณ์ที่ i
โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, k$ เหตุการณ์
และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

$d_{\alpha(a-1,f)}$ คือ ค่าสถิติของดันเน็ต ที่ระดับนัยสำคัญ α (0.05)

a คือ จำนวนเหตุการณ์

f คือ จำนวนชั้นอิสระของความคลาดเคลื่อน

n คือ จำนวนซ้ำ

MSE คือ ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน

$\bar{y}_c$ แทน ค่าเฉลี่ยของเหตุการณ์ควบคุม

$\bar{y}_i$ แทน ค่าเฉลี่ยของเหตุการณ์กลุ่มที่ i

n_c แทน ขนาดตัวอย่าง (จำนวนรอบการวัดซ้ำ) ของเหตุการณ์ควบคุม

n_i แทน ขนาดตัวอย่าง (จำนวนรอบการวัดซ้ำ) ของเหตุการณ์กลุ่มที่ i

2.3 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนด้วย GR&R

Levine [5] กล่าวว่า GR&R หรือ Gage Repeatability and Reproducibility เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการผันแปรของกลุ่มการวัด 2 กลุ่ม ซึ่งมักจะถูกนำไปใช้ในการวัดผลรวมของความแปรปรวนในกระบวนการที่สนใจ โดยเป็นระบบการวัดความแปรปรวนที่แบ่งแยกระบบออกเป็นการวัดผลทางด้านการทำซ้ำ (Repeatability) และด้านการทำซ้ำ (Reproducibility) Montgomery [6] เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดเพื่อตรวจสอบเครื่องมือ เครื่องจักร หรือผู้ปฏิบัติงานที่ต่างกัน ผลของ GR&R สามารถทำให้รู้ถึงสาเหตุของการวัดที่ผิดพลาดได้ ซึ่งหลังจาก

วิเคราะห์ผลแล้วจะทำให้ระบบการวัดมีความเที่ยงตรง และแม่นยำมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือ GBD ของบริษัททรินิตี้ศึกษาในการตรวจสอบค่า %GR&R ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. การดำเนินการ

3.1 การปรับปรุงกระบวนการตั้งค่าต่าง ๆ ด้วยหลักการ ECRS และการวิเคราะห์มูลค่ากิจกรรม

3.1.1 การจัดลำดับและลดกิจกรรมที่ไม่เกิดมูลค่า

เริ่มต้นด้วยการจัดลำดับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบโดยแบ่งกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มการทดสอบที่ต้องการต่อโหลด และกลุ่มการทดสอบที่ไม่ต้องการต่อโหลด โดยเริ่มทดสอบพารามิเตอร์ที่ไม่ต่อโหลดและเรียงลำดับจากพารามิเตอร์ที่พบของเสียมากที่สุดก่อน [3] ดังแสดงตารางที่ 4 โดย %ของเสียอ้างอิงจากการทดสอบงาน 32,543 ชิ้น

ตารางที่ 4 ลำดับการทดสอบก่อนและหลังทำการปรับปรุง

ก่อนปรับปรุง			หลังปรับปรุง		
พารามิเตอร์	%ของเสีย	โหลด (Ω)	พารามิเตอร์	%ของเสีย	โหลด (Ω)
1.VOS	4.45%	-	1.VOS	4.45%	-
2.AVOL	0.32%	2k	2.IBIAS	3.09%	-
3.PSRR	0.23%	-	3.PSRR	0.23%	-
4.CMRR	0.07%	-	4.CMRR	0.07%	-
5.Vout_Swing	0.42%	10k	5.AVOL	0.32%	2k
6.Vout_Swing	0.07%	2k	6.Vout_Swing	0.42%	10k
7.IBIAS	3.09%	-	7.Vout_Swing	0.07%	2k
8.IOUT	0.01%	100	8.IOUT	0.01%	100

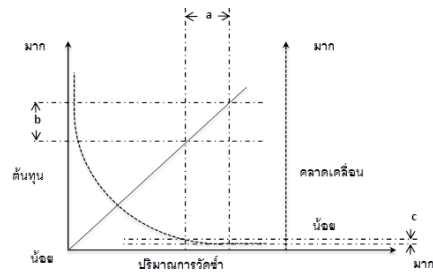
3.1.2 การเพิ่มวงจรและการทดสอบพร้อมกัน 4 ชุด

เนื่องจากปัจจุบันการทดสอบ LMX324 ถูกออกแบบให้สามารถทดสอบวงจรขยายภายในได้เพียงคราวละ 1 ชุด จาก 4 ชุด ทำให้เกิดความล่าช้า การทดสอบอย่างคู่ขนานทั้ง 4 ชุดจึงเป็นทางเลือกในการลดเวลาการทดสอบ แต่เมื่อทำการตรวจสอบทรัพยากรและช่องทางการเชื่อมต่อของเครื่องทดสอบและฮาร์ดแวร์ พบว่าวงจรวัดค่าทางไฟฟ้าในเครื่องทดสอบไม่เพียงพอต่อการทดสอบวงจรขยายภายในพร้อมกันทั้ง 4 ชุดในการทดสอบพารามิเตอร์ Vout_Swing ซึ่งต้องใช้วงจรวัด 2 วงจรต่อการทดสอบวงจรขยาย 1 ชุด ในการวัดแรงดันพร้อมกัน 2 ตำแหน่งเพื่อหาผลต่างแรงดัน จึงต้องออกแบบวงจรเพิ่มเติมบนฮาร์ดแวร์ โดยนำวงจรขยายประเภท

เปรียบเทียบสัญญาณมาต่อเพิ่มเพื่อแปลงแรงดัน 2 ตำแหน่งให้เป็นผลต่างแรงดัน และทำการวัดด้วยวงจรวัดเพียง 1 วงจร จึงสามารถทำการทดสอบได้พร้อมกัน 4 ชุด ครอบคลุมการทดสอบ

3.2 การปรับปรุงขั้นตอนการวัดด้วยการลดปริมาณรอบการวัดซ้ำ

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อเวลาและค่าการวัดทางไฟฟ้า คือรอบการวัดซ้ำ โดยที่ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อค่าการวัด ถ้าวรอบการวัดซ้ำมากเท่าใด ผลการวัดที่ได้จะเข้าใกล้ค่าจริงมากเท่านั้น แต่เวลาในการทดสอบซึ่งก็คือต้นทุนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนและปริมาณการวัดซ้ำ ที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

ปัจจุบันขั้นตอนการวัดของผลิตภัณฑ์ LMX324 มีรอบการวัดซ้ำอยู่ที่ 1,160 รอบ ต่อการวัดหนึ่งค่าแรงดัน โดยวัดที่ย่านแรงดันการวัด 10V (โวลต์) สำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ VOS และ IBIAS และ ย่านแรงดันการวัด 5V สำหรับการทดสอบพารามิเตอร์อื่น วิธีต้นเนต [4] จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดัน เพื่อหารอบการวัดซ้ำที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลการวัดแรงดันเทียบเท่ากับรอบการวัดซ้ำเดิม โดยแบ่งระดับแรงดันในแต่ละย่านออกเป็น 3 ระดับ คือ 5V 7.5V และ 10V สำหรับย่านแรงดันการวัด 10V และ 0.1V 2.5V และ 5V สำหรับย่านแรงดันการวัด 5V โดยกำหนดให้ปริมาณการวัดซ้ำเดิม 1,160 รอบ เป็นเหตุการณ์ควบคุม (Control) เพื่อใช้อ้างอิงในการเปรียบเทียบกับรอบการวัดซ้ำที่ต่ำลง ที่ปริมาณการทำซ้ำ (Repeat) 30 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ประมวลผลผ่านโปรแกรม Minitab

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรอบการวัดซ้ำที่น้อยที่สุดที่สามารถให้ผลการวัดค่าแรงดันเทียบเท่ากับการวัดด้วยรอบการวัดควบคุม

3.3 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนด้วยGR&R

หลังทำการปรับปรุงกระบวนการทั้งหมดข้างต้น ต้องทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของผลการวัดทั้งหมดทุกพารามิเตอร์ โดยเก็บผลการทดสอบงาน 1 ชิ้นด้วยโปรแกรมก่อนและหลังทำการปรับปรุงอย่างละ 30 ครั้ง จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ %GR&R ด้วยเครื่องมือ GBD ของบริษัทกรณีศึกษา ถ้า %GR&R น้อยกว่า 5% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรงของผลการทดสอบ

4. การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงกระบวนการทดสอบ

4.1 การปรับปรุงกระบวนการตั้งค่าต่าง ๆ ด้วยหลักการ ECRS และการวิเคราะห์มูลค่ากิจกรรม

4.1.1 การจัดลำดับและลดกิจกรรมที่ไม่เกิดมูลค่า

ผลจากการจัดลำดับกระบวนการใหม่ทำให้กิจกรรมในการทดสอบมีความต่อเนื่องและเป็นระเบียบมากขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์มูลค่ากิจกรรมพบว่าสามารถกำจัดกิจกรรมการตั้งค่าที่ซ้ำซ้อนรวมถึงการรอคอยที่ไม่จำเป็นออกจากกระบวนการทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า (NVA) 61 กิจกรรม ส่งผลให้เวลาในการทดสอบลดลง 170.190 มิลลิวินาทีต่อชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 การกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบพารามิเตอร์ หลังการปรับปรุงการจัดเรียงและลด

กิจกรรมที่ไม่เกิดคุณค่า

พารามิเตอร์	เงื่อนไข	กระบวนการทดสอบ									
		1.ตั้งค่าเริ่มต้น	2.ตั้งค่าให้ซ้ำ	3.ตั้งค่าให้ซ้ำ	4.ตั้งค่าให้ซ้ำ	5.ตั้งค่าให้ซ้ำ	6.ตั้งค่าให้ซ้ำ	7.ตั้งค่าให้ซ้ำ	8.ตั้งค่าให้ซ้ำ	9.ตั้งค่าให้ซ้ำ	10.ตั้งค่าให้ซ้ำ
1.VOS	-	0.0	9.95	0.4	-	1.7	-1.0	10	1,160	0.0	-
2.IBIAS	-	-	-	-	-	-	-	-	1,160	0.0	-
3.PSRR	-	0.0	4.95	0.0	-	6.0	-1.0	5	1,160	0.0	-
4.CMRR	-	-	-	-0.45	-	0.9	-1.8	-	1,160	0.0	-
5.AVOL	-	-	-	1.4	2k	1.7	-1.0	-	1,160	0.0	2k
6.Vout_Swing	$V_{CC} - V_{CE}$	-	-	2.2	10k	-	-	-	1,160	0.0	10k
7.Vout_Swing	$V_{CC} - V_{CE}$	-	-	3.5	2k	3.0	-2.0	-	1,160	0.0	2k
8.IOUT	Sourcing	-	-	1.0	100	-	-	-	1,160	0.0	100
	Sinking	-	-	-1.0	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 6 กิจกรรมและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	จำนวนกิจกรรม			เวลากิจกรรม (มิลลิวินาที)		
	VA	NVA	NNVA	VA	NVA	NNVA
1.VOS	10	8	6	19.779	20.789	40.024
2.IBIAS	9	25	17	36.520	135.444	40.227
3.PSRR	23	2	13	84.875	0.665	55.148
4.CMRR	22	6	14	85.580	2.032	51.024
5.AVOL	25	5	19	85.084	1.167	60.596
6.Vout_Swing	40	4	81	126.672	1.247	122.898
7.Vout_Swing	40	4	81	126.020	1.899	122.898
8.IOUT	25	7	18	83.744	6.947	70.159
รวม	194	61	249	648.274	170.190	562.975

4.1.2 การเพิ่มวงจรและการทดสอบพร้อมกัน 4 ชุด

ผลจากการเพิ่มวงจรในฮาร์ดแวร์ และการปรับปรุงการทดสอบทุกพารามิเตอร์ให้รองรับการทดสอบวงจรขยายภายในพร้อมกัน 4 ชุดอย่างคู่ขนานสามารถลดเวลาในการทดสอบลง 463.876 มิลลิวินาทีต่อชิ้น

4.2 การลดปริมาณรอบการวัดซ้ำ

เนื่องจากย่านแรงดันการวัดหนึ่งสามารถกำหนดรอบการวัดซ้ำได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่งผลให้รอบการวัดซ้ำในย่านแรงดันการวัด 5V และ 10V สามารถลดลงจาก 1,160 รอบเหลือ 800 และ 350 รอบ ตามลำดับ โดยผลการตรวจสอบความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแรงดันด้วยวิธีของดินเนตแสดงได้ดังตารางที่ 7 และ 8

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยแรงดันย่าน 5V

รอบการวัด	ค่าเฉลี่ยแรงดัน (V)				
	0.1	กลุ่ม	2.5	กลุ่ม	5.0
1,160(ควบคุม)	0.100041	} เข้ากลุ่มกัน	2.50041	} เข้ากลุ่มกัน	4.99960
800	0.100041		2.50041		4.99960
750	0.100049		2.50041		4.99964
700	0.100008		2.50041		4.99951
600	0.100022		2.50041		4.99943
500	0.100093	} เข้ากลุ่มกัน	2.50041	} เข้ากลุ่มกัน	4.99965
400	0.100093		2.50041		4.99952
200	0.100080		2.50043		4.99965

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยแรงดันย่าน 10V

รอบการวัด	ค่าเฉลี่ยแรงดัน (V)				
	5.0	กลุ่ม	7.5	กลุ่ม	10.0
1,160(ควบคุม)	4.99878	} เข้ากลุ่มกัน	7.49966	} เข้ากลุ่มกัน	9.99819
800	4.99879		7.49963		9.99818
400	4.99880		7.49964		9.99814
350	4.99879		7.49964		9.99812
300	4.99871		7.49956		9.99805
250	4.99867	} เข้ากลุ่มกัน	7.49950	} เข้ากลุ่มกัน	9.99800
200	4.99869		7.49954		9.99792

การลดรอบการวัดซ้ำสามารถลดเวลาในขั้นตอนการวัดค่าทางไฟฟ้าลง 430.56 มิลลิวินาทีต่อชิ้น

4.3 การตรวจสอบความเที่ยงตรง

จากการตรวจสอบ %GR&R ผ่านเครื่องมือ GBD พบว่าผลการทดสอบทุกพารามิเตอร์มี %GR&R ต่ำกว่า 5% แสดงว่าการลดเวลาโดยการปรับปรุงขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดไม่ส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรงของผลการทดสอบ สามารถเป็นที่ยอมรับและใช้ได้จริงในบริษัทกรณีศึกษา

5. สรุป

การปรับปรุงขั้นตอนการทดสอบวงจรขยายสามารถลดเวลาในการทดสอบลง 58.8% จาก 1.81 วินาที/ชิ้น เหลือ 0.75 วินาที/ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งเวลาที่ลดลงเกิดจากการจัดลำดับกระบวนการและลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า 170.190×10^{-3} วินาทีจากการเพิ่มวงจรและทำการทดสอบพร้อมกัน 4 ชุด 463.876×10^{-3} วินาที และจากการลดรอบการวัดซ้ำ 430.56×10^{-3} วินาที โดยสามารถลดต้นทุนให้กับบริษัทประมาณ 60,000 ดอลลาร์ต่อไตรมาส เนื่องด้วยปริมาณการผลิตวงจรขยาย LMX324 มีสูงถึง 5 แสนชิ้นต่อไตรมาส

ตารางที่ 9 เวลาที่ใช้การทดสอบผลิตภัณฑ์หลัง

ปรับปรุง

	กระบวนการทดสอบ (มิลลิวินาที)							
	1.ตั้งค่า เริ่มต้น	2.ตั้งค่า ไฟฟ้า สำหรับ การ ทดสอบ	3.ตั้งค่า ไฟฟ้า ให้กับ ผลิตภัณฑ์	4.ตั้งค่า การวัด	5.วัดค่า ทางไฟฟ้า	6.รีเซ็ต ค่าไฟฟ้า	7.คำนวณ	8.แสดงผล
พารามิเตอร์								เวลารวม
1.VOS	0.207	1.280	0.960	10.032	18.200	0.000	0.002	29.803
2.IBIAS	0.000	0.000	0.000	10.257	36.400	0.062	0.006	46.747
3.PSRR	0.207	11.344	5.060	10.064	83.200	0.124	0.002	110.023
4.CMRR	0.000	7.892	2.652	10.064	83.200	2.772	0.002	106.604
5.AVOL	0.000	6.488	5.960	10.244	83.200	0.664	0.002	105.680
6.Vout_Swing	0.000	1.133	10.000	17.312	83.200	10.310	0.004	121.980
7.Vout_Swing	0.000	1.133	10.652	17.312	83.200	10.310	0.004	122.632
8.IOUT	0.000	10.277	0.000	10.288	83.200	0.114	0.002	103.903
เวลารวม	0.414	39.547	33.484	95.572	553.800	24.356	0.024	747.373

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาวิณี อัจจุ. 2551. การลดเวลาสูญเสียในการกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เบรกเกอร์. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] พิทรพนธ์ พิทักษ์. 2552. การศึกษากระบวนการผลิตเพื่อการผลิตเพิ่มผลผลิต กรณีศึกษา อุตสาหกรรมล้างขวด. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์.
- [3] Hamidreza Hashempour, Jos Dohmen, Bratislav Tasic, Bram Kruseman, Camelia Hora, Maikel van Beurden and Yizi Xing. 2011. Test time reduction in analogue/mixed-signal devices by defect oriented testing. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2011.
- [4] Day, R. W., and G. P. Quinn. 1989. Comparisons of treatments after an analysis of variance in ecology, Ecological Monographs 59: 433-463.
- [5] Levine, D. M. 2006. Statistics for six sigma green belts with MINITAB and JMP. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [6] Montgomery, D. C. 2005. Introduction to statistical quality control. Hoboken, NJ: John Wiley.