1191

การวิเคราะห์สมรรถนะของการสวิตช์กลุ่มข้อมูลสามเส้นทางชนิด N x N แบบไม่มีการติดขัดภายในที่มีความสามารถในการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล

น.อ. วีระชัย เชาว์กำเนิด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-165-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 16894819

24 มี.ค. 2547

PERFORMANCE ANALYSIS OF A THREE-PATH, NxN NONBLOCKING PACKET SWITCH WITH RESEQUENCING CAPABILITY

GP. CAPT. WEERACHAI CHAOKUMNERD

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974 -633-165 -5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของการสวิตช์กลุ่มข้อมูลสามเส้นทางชนิด N x N แบบไม่มีการติดขัดภายในที่มีความสามารถในการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
โดย	น.อ. วีระชัย เชาว์กำเนิด
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

.....กรรมการ

(รองศาตราจารย์ ดร. ณรงค์ อยู่ถนอม)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วาทิต เบญจพลกุล)

.....กรรมการ

(พลอากาศโท ดร. ชูฤทธิ์ มีสัจจี)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วีระชัย เชาว์กำเนิด,นอ. : การวิเคราะห์สมรรถนะของการสวิตช์กลุ่มข้อมูลสามเส้นทางชนิดNxNแบบไม่มีการติดขัดภายในที่มีความสามารถในการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล (PERFORMANCE ANALYSIS OF A THREE-PATH, NxN NONBLOCKING PACKET SWITCH WITH RESEQUENCING CAPABILITY) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ , 89 หน้า. ISBN 974-633-165-5

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาระบบการสวิตช์กลุ่มข้อมูล ที่นำมาใช้ในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคมปัจจุบันสำหรับให้กลุ่มข้อมูลที่เข้ามาค้นขาเข้าส่งผ่านไปยังปลายทาง บางครั้งยังเกิดปัญหาการติดขัดภายในอุปกรณ์สวิตช์เสนอวิธีการนำทฤษฎีของแถวคอยแบบ M/M/C มาประยุกต์ใช้เป็น เส้นทางผ่านภายในอุปกรณ์สวิตช์ เพื่อแก้ปัญหาการติดขัดภายในของกลุ่มข้อมูลที่หัวแถวคอยที่ต้องการออกปลายทางเดียวกันให้สามารถผ่านไปยังปลายทางได้ครั้งละจำนวน C หน่วย ในขณะเวลาเดียวกัน โดยใช้วิธีการจัดแบบจำลองเส้นทางสวิตช์ให้ทำงานแบบเรียงลำดับเข้าก่อนออกก่อน (First In First Out, FIFO) และการทำงานแบบสุ่ม (Random Order of Service, ROS) และยัง ได้ศึกษาเวลาที่ใช้ในการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูลที่ปลายทางก่อนส่งไปยังจุดถัดไป

แบบจำลองเส้นทางสวิตช์ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เวลาตอบสนองของระบบสามารถคำนวณได้เมื่อกำหนดให้เส้นทางสวิตช์มีจำนวน C=3 จ่ายภาระงานให้กับระบบ 50% และจัดเส้นทางแบบเข้าก่อนออกก่อน เวลารวม (เวลาที่ส่งกลุ่มข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางบวกกับเวลาการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล) ให้ C=1, เวลารวมที่ระบบใช้จะมากกว่าเวลาที่ระบบใช้เมื่อไม่มีการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูลประมาณ 2.5% ในกรณี C=2, 3 เวลารวมที่ระบบใช้จะเท่ากับเวลาที่ระบบใช้เมื่อไม่มีการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล ส่วนการจัดแบบสุ่ม ให้ C=1 เวลารวมที่ระบบใช้มากกว่าเวลาที่ระบบใช้เมื่อยังไม่มีการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล ประมาณ 8.5% และC=2, 3 เวลารวมที่ระบบใช้จะมากกว่าเวลาที่ระบบใช้เมื่อไม่มีการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูลประมาณ 1.1%

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2538

C317789 : MAJOR ELETRICAL ENGINEERING

KEY WORD : PACKET SWITCH / NONBLOCKING / RESEQUENCING

WEERACHAI CHAOKUMNERD,GP.CAPT : PERFORMANCE ANALYSIS OF A THREE-PATH , NxN NONBLOCKING PACKET SWITCH WITH RESEQUENCING CAPABILITY : ASSO . PROF. PRASIT PRAPINMONGKOLKARN , Ph.D 89 pp. ISBN 974-633-165-5

This dissertation is a study on the packet switch system to be used in communication networks nowadays, for delivering the packets from the source to the destination. Even though the congestion of the packet problem still occurs, which leads to the theory of a general model M/M/C queue for the switch path application to be adapted for solving congestion problems when the packets at the head-of-line position have the same destination. To make these packets pass through C paths simultaneously, two disciplines for the switching path apply: The First In First Out (FIFO), and the Random Order of Rervice (ROS); also the study is done on the resequencing delay at the destination.

The response time of the system is calculated by the proposed method in this study. It is assumed that C has three switch paths working 50% under the offered load. In the case of the FIFO method with C=1, the total delay (the time spent for sending packets from the source to the destination plus resequencing delay) is about 2.5% longer than the system response time without resequencing delay. And if C = 2, 3, the total delay and the system response time are equal. In the ROS method at C = 1, the total delay is about 8.5% longer than the system response time; and when C = 2, 3, the total delay is about 1.1% longer than system response time.

สาขาวิชา Electrical Engineering ลายมือชื่อนิสิต.....

ภาควิชา Electrical Engineering ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 1995

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ท่านได้กรุณาแนะนำและให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงได้ช่วยจัดหาเอกสารเพื่อใช้ในการค้นคว้าทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์ ซึ่งเป็นประธาน รองศาสตราจารย์ ดร. ฉรงค์ อยู่ถนอม, รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล, อาจารย์ ดร. วาทิต เบญจพลกุล และ พลอากาศโท ดร. ชูลิต มีสัจจี ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.น.ท.ดร. สุธรรม ศรีเกษม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายเรืออากาศที่กรุณาให้ความช่วยเหลือสนับสนุนห้องทดลอง แมตแล็บซอฟต์แวร์แพกเกจ ขอขอบพระคุณ คุณณัฐกิจ ทองสว่าง และ คุณเอนก ทองประไพ ที่ช่วยสนับสนุนจัดหาข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์จนเป็นผลสำเร็จ ขอขอบคุณ คุณวิทยา หวัดสนิท ที่ช่วยงานพิมพ์วิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ตามกำหนดเวลา

ยิ่งไปกว่านั้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณพ่อ, แม่ที่ได้วางพื้นฐานการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้า อันมีผลนำมาสู่ความสำเร็จในการศึกษานี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณปทุม ทองประไพ, พ.อ.อ. หญิงมณฑา เชาว์กำเนิด, น.ส. ทัศนีย์ เชาว์กำเนิด และ นนอ. ณัฐวุฒิ เชาว์กำเนิด ซึ่งเป็นผู้ที่ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนได้รับความสำเร็จในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญตาราง ญ

สารบัญรูปภาพ ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ต

บทที่

1. บทนำ....1

1.1 คำนำ....1

1.2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา....3

1.3 เป้าหมายของงานวิจัย....3

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย....4

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย....4

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ....4

2. โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์สวิตช์....5

2.1 จำแนกการต่อเครือข่ายของการสวิตช์กลุ่มข้อมูล....5

2.2 น็อกเอาต์สวิตช์....5

2.3 อิเล็กทรอนิกส์และโฟโตนิกส์สวิตช์....8

2.4 เทคนิคการมัลติเพลกซ์ของระบบสวิตช์....8

2.5 เทคนิคการเข้าจังหวะในการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์....9

2.6 ลักษณะสวิตช์ที่มีคุณสมบัติเกิดการติดขัดและไม่มีการติดขัด เมื่อมีข่าวสารหรือกลุ่มข้อมูลส่งผ่าน....10

2.7 อุปกรณ์สวิตช์แบบยูนิแคสต์และมัลติแคสต์....10

2.8 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สวิตช์....15

2.9 วิธีแก้ปัญหาการติดขัดภายในของอุปกรณ์สวิตช์....15

2.10 วิธีการจัดให้สวิตช์มีหน่วยเก็บความจำร่วม....17

2.11 สวิตช์แบบใช้สื่อกลางการส่งผ่านร่วมกัน.....20
2.12 ลักษณะโครงสร้างของการสวิตช์กลุ่มข้อมูลที่นำมาใช้ใน
เครือข่ายสื่อสารโทรคมนาคม.....20
2.13 ย่านบรอดแบนด์และการสวิตช์กลุ่มข้อมูลแบบส่งด้วยความเร็วสูง.....22

3. ทฤษฎีและการออกแบบแถวคอยของการสวิตช์กลุ่มข้อมูล.....24
3.1 วิธีของการจัดแถวคอย.....24
3.2 วิเคราะห์แบบจำลองของการจัดแถวคอย.....26

4 การนำแบบจำลองแถวคอยแบบ M/M/C มาประยุกต์เป็น
เส้นทางสวิตช์ N x N ไม่มีการติดขัดภายใน.....36
4.1 การสวิตช์กลุ่มข้อมูลชนิด NxN ไม่มีการติดขัดภายใน.....36
4.2 กำหนดให้ C มีจำนวน 3 เส้นทางสวิตช์
โดยจัดให้ผ่านไปด้านออกได้ 2 วิธี.....37

5. การจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล.....56
5.1 เวลาในการจัดเรียงลำดับข้อมูล.....56
5.2 การวิเคราะห์เวลาในการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล.....57
5.3 เวลาเฉลี่ยของการส่งข้อมูลผ่านเส้นทางสวิตช์แบบ M/M/C.....59

6. บทสรุปและเสนอแนะ.....73
6.1 บทสรุป.....73
6.2 ข้อเสนอแนะ.....74

รายการอ้างอิง.....75
ภาคผนวก.....78
ประวัติผู้เขียน.....89

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตาราง 2.1 คุณสมบัติของการสวิตช์กลุ่มข้อมูล.....7

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 8x8 บันยันสวิตช์....2

1.2 8x8 ครอสบาร์สวิตช์....2

2.1 การสวิตช์กลุ่มข้อมูลชนิดแบ่งเวลา....6

2.2 โครงสร้างของน็อกเอาต์สวิตช์....12

2.3 วิธีการต่อมัลติสเตจแบบชัฟเฟิล....13

2.4 เครือข่ายแบบ 8 ต่อ 8 เคลตา - 2....14

2.5 โครงสร้างของพรีลูดสวิตช์....17

2.6 การมัลติเพลกซ์แบบ อนุกรม - ขนาน....18

2.7 การจัดที่อยู่ของกลุ่มข้อมูลในหน่วยเก็บความจำร่วม....19

2.8 การดีมัลติเพลกซ์กลุ่มข้อมูล....19

2.9 การต่อ 32 x 32 สวิตช์แบบสองสเตจ....21

2.10 การต่อ 32 x 32 สวิตช์แบบสามสเตจ....22

3.1 การจัดแถวคอยทางด้านเข้า....25

3.2 การจัดแถวคอยแบบ อินพุตสมูททิง....25

3.3 การจัดแถวคอยทางด้านขาออก....27

3.4 การจัดแถวคอยชนิดบัฟเฟอร์ร่วมสมบูรณ์แบบ....27

3.5 ค่าความน่าจะเป็นของการสูญหายของกลุ่มข้อมูล
เพิ่มขึ้นตามจำนวน N สำหรับอินพุตสมูททิง เมื่อ P=0.8....30

3.6 ค่าความน่าจะเป็นในการสูญหายของกลุ่มข้อมูลสามารถลดลงได้
ด้วยการเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์เมื่อ P=0.9 สำหรับอินพุตสมูททิง....30

3.7 ค่าความน่าจะเป็นในการสูญหายของกลุ่มข้อมูล
สำหรับแถวคอยด้านออก เมื่อ P=0.8....33

3.8 ค่าความน่าจะเป็นในการสูญหายของกลุ่มข้อมูล
สำหรับแถวคอยด้านออก เมื่อ P=0.9....33

3.9 ค่าความน่าจะเป็นในการสูญหายของกลุ่มข้อมูล
สำหรับชนิดบัฟเฟอร์ร่วมสมบูรณ์แบบ เมื่อ P=0.8....34

3.10 ค่าความน่าจะเป็นในการสูญหายของกลุ่มข้อมูล
สำหรับชนิดบัฟเฟอร์ร่วมสมบูรณ์แบบ เมื่อ P=0.9.....35
4.1 แบบจำลองการสวิตช์กลุ่มข้อมูลชนิด N x N ไม่มีการติดขัดภายใน.....36
4.2 แถวคอยเสมือนของกลุ่มข้อมูลที่หัวแถวคอย
ต้องการออกขาออกเดียวกัน.....37
4.3 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานของสามเส้นทางสวิตช์.....38
4.4 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานของสามเส้นทางสวิตช์
แบบสุ่ม.....42
4.5 เวลาเฉลี่ยในการทำงานของระบบที่จัดเส้นทางสวิตช์
แบบเข้าก่อนออกก่อนและเส้นทางสวิตช์แบบสุ่ม.....48
4.6 เวลาเฉลี่ยในการทำงานของระบบที่มีเส้นทางสวิตช์แบบเข้าก่อนออกก่อน
เมื่อ C=1,2,3 และ λ=1, $\mu_1=\mu_2=\mu_3=1$.....50
4.7 เวลาเฉลี่ยในการทำงานของระบบที่มีเส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม
เมื่อ C=1,2,3 และ λ=1 , $\mu_1=\mu_2=\mu_3=1$.....51
4.8 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการทำงานของระบบของJEAN และ E.STERN
กับผลการวิจัยนี้ เมื่อเส้นทางสวิตช์ทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน.....53
4.9 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการทำงานของระบบของ JEAN และ E. STERN
กับผลการวิจัยนี้ เมื่อเส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม.....54
5.1 การจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูลของเส้นทางผ่าน.....57
5.2 วงจรเชื่อมโยงระหว่างจุดต่อจุดด้วยหลายเส้นทางผ่าน.....59
5.3 แผนภาพการทำงานตามสถานะของเส้นทางสวิตช์.....60
5.4 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
เมื่อเส้นทางสวิตช์ทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน , C=1.....63
5.5 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
เมื่อเส้นทางสวิตช์ทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน , C=2.....63
5.6 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
เมื่อเส้นทางสวิตช์ทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน , C=3.....64
5.7 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
เมื่อ C=1,2, และ 3 เส้นทางสวิตช์ทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน.....65

5.8 เวลารวมและเวลาเฉลี่ยการใช้งานของระบบเมื่อ C=1 , 2 และ 3 เส้นทาง สวิตช์ทำงานแบบเข้าก่อนออกก่อน.....66
5.9 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล เมื่อ C=1 เส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม.....67
5.10 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล เมื่อ C=2 เส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม.....68
5.11 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล เมื่อ C=3 เส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม.....69
5.12 เวลาเฉลี่ยและเวลาของการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล เมื่อ C=1,2 และ 3 เส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม.....70
5.13 เวลารวมและเวลาเฉลี่ยในการใช้งานของระบบ เมื่อ C=1,2 และ 3 เส้นทางสวิตช์ทำงานแบบสุ่ม.....71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NxN	ขนาดของสวิตช์มีด้านเข้า N ด้านและด้านออก N ด้าน
C	จำนวนช่องสื่อสารหรือจำนวนเส้นทาง
λ	อัตราความเร็วในการเข้ามาของกลุ่มข้อมูล
μ	อัตราความเร็วในการทำงานของช่องสื่อสารหรือเส้นทาง
M/M/C	วิธีการจัดแถวคอยแบบให้กลุ่มข้อมูลเข้ามาในระบบด้วยวิธีการของป๊วส์ซอง เวลาที่ให้บริการเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล มีจำนวนช่องสื่อสารหรือเส้นทาง C จำนวน
M/G/1	วิธีการจัดแถวคอยแบบให้กลุ่มข้อมูลเข้ามาในระบบด้วยวิธีการของป๊วส์ซอง เวลาที่ให้บริการเป็นแบบทั่วไป มีช่องสื่อสารหรือเส้นทาง 1 จำนวน
M/D/1	วิธีการจัดแถวคอยแบบให้กลุ่มข้อมูลเข้ามาในระบบด้วยวิธีการของป๊วส์ซอง เวลาที่ให้บริการคงที่ตลอด มีช่องสื่อสารหรือเส้นทาง 1 จำนวน
M/M/1	วิธีการจัดแถวคอยแบบให้กลุ่มข้อมูลเข้ามาในระบบด้วยวิธีการของป๊วส์ซอง เวลาที่ให้บริการเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล มีช่องสื่อสารหรือเส้นทาง 1 จำนวน
P	ความน่าจะเป็น
FIFO	วิธีการจัดแถวคอยชนิดให้กลุ่มข้อมูลเข้าก่อนออกก่อน
ROS	วิธีการจัดแถวคอยชนิดให้กลุ่มข้อมูลเข้าแบบสุ่ม
C_{ij}	สัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์ของ i แถวนอน (Row) และ j แนวตั้ง (Column)
ρ	ค่าใช้ประโยชน์
E[N]	จำนวนเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลในระบบ
E[R]	เวลาเฉลี่ยที่ระบบทำงาน
E[T]	เวลารวมเฉลี่ยทั้งหมดที่ระบบทำงาน
E[RD]	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการจัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
n	จำนวนกลุ่มข้อมูลมีอยู่ในระบบ
P_k	ความน่าจะเป็นที่มีกลุ่มข้อมูล k จำนวนในระบบ

P_n	ความน่าจะเป็นที่มีกลุ่มข้อมูล n จำนวนในระบบ
$\overline{W_s}$	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ส่งกลุ่มข้อมูลผ่านเส้นทาง
$\overline{W_i}$	เวลาเฉลี่ยที่ส่งกลุ่มข้อมูลไปยังหัวแถวคอย
$\overline{W_{s\ FIFO}^2}$	โมเมนต์ที่สองของเวลาเฉลี่ยในระบบที่จัดให้กลุ่มข้อมูลเข้าก่อนออกก่อน
$\overline{W_{s\ ROS}^2}$	โมเมนต์ที่สองของเวลาเฉลี่ยในระบบที่จัดให้กลุ่มข้อมูลเข้ามาแบบสุ่ม
$\overline{D}$	เวลารวมที่ระบบทำงาน เมื่อยังไม่จัดเรียงลำดับกลุ่มข้อมูล
H_j	ผลรวมทางฮาร์มอนิกของ j