หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การสร้างเครื่องสังเคราะห์เสียงดนตรี

เครื่องสังเคราะห์เสียงดนตรีอิเลคทรอนิคส์ (electronic music synthesizer) ใช้การสังเคราะห์เสียงแบบฟอร์แมนท์ (formant synthesis) กล่าวคือใช้ออสซิลเลเตอร์ตัวเดียวสำหรับสร้างรูปคลื่นที่อุดมด้วยฮาร์โมนิค ซึ่งโดยปกติได้แก่ คลื่นรูปฟันเลื่อย , สามเหลี่ยม, จตุรัส จากนั้นจึงกำจัดองค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ไม่เกี่ยวข้องทิ้งไป เพื่อให้ได้รูปคลื่นของสัญญาณเสียงที่ต้องการ สำหรับออร์แกนอิเลคทรอนิคส์ (electronic organ) ใช้เทคนิคที่เรียกว่า การสังเคราะห์เสียงแบบความถี่ (frequency synthesis) โดยใช้กลุ่มออสซิลเลเตอร์ผลิตคลื่นรูปซายน์ (sine wave) ความถี่ต่าง ๆ จากนั้นจึงรวมคลื่นรูปซายน์ที่มีความถี่ อำพน และเฟสที่เหมาะสมเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้รูปคลื่นที่ต้องการ (8, 11)

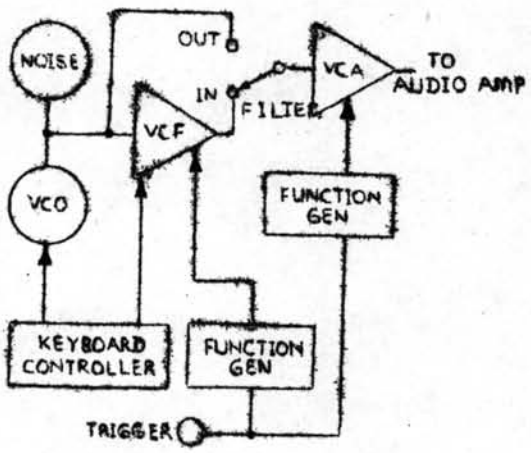
เครื่องสังเคราะห์เสียงใช้เทคนิคของแรงดันควบคุม (control voltage) มาแทนที่การควบคุมด้วยมืออย่างเครื่องดนตรีอิเลคทรอนิคส์ก่อน ๆ ซึ่งจำกัดอัตราเร็ว (speed) ความแม่นยำ (accuracy) และจำนวนการเปลี่ยนแปลง (number of changes) เนื่องจากแรงดันเคลื่อนที่ในอัตราเร็วกว่าการควบคุมด้วยมือมาก และแรงดันยังวัดได้อย่างถูกต้องด้วยเครื่องวัด นอกจากนี้เราสามารถใช้แรงดันควบคุมจำนวนเท่าใดก็ได้ในเวลาพร้อม ๆ กัน เพื่อให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ มากมาย ด้วยเหตุนี้แรงดันควบคุมจึงให้ผลดีกว่าการควบคุมด้วยมือมาก

การใช้แรงดันควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบกัมมันต์ (active) และแบบธรรมดา (passive) แบบแรกประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันซึ่งควบคุมหน่วย (modules) ต่าง ๆ แต่ละหน่วย แหล่งกำเนิดดังกล่าวที่พบในเครื่องสังเคราะห์เสียงคือ คีย์บอร์ด (keyboard) ซีเควนเซอร์ (sequencer) และแหล่งกำเนิดแรงดันส่งเดช (random voltage source) สำหรับแบบธรรมดานั้นการทำงานของหน่วยที่ใช้แรงดันควบคุม

แบบนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแรงดันดังกล่าวแล้วข้างต้น หน่วยดังกล่าวได้แก่ ออสซิลเลเตอร์แรงดันควบคุม (voltage - controlled oscillator = VCO) ตัวกรองแรงดันควบคุม (voltage - controlled filter = VCF) และตัวขยายแรงดันควบคุม (voltage - controlled amplifier = VCA) (1)

ตัวพารามิเตอร์ (parameter) ต่าง ๆ ของแต่ละโน้ตเสียงถูกควบคุมโดยหน่วยที่ประกอบกันขึ้นเป็นเครื่องสังเคราะห์เสียง กล่าวคือ ระดับเสียงและเสียงล้ำควบคุมโดยออสซิลเลเตอร์แรงดันควบคุมและตัวกรองแรงดันควบคุม เอ็นเวลโลพหรือไดนามิคส์ของเสียงอันได้แก่ การขึ้น การคงที่ และการสลายของเสียง ควบคุมโดยตัวขยายแรงดันควบคุม และตัวกำเนิดหน้าที่ (function generator)

สำหรับเครื่องสังเคราะห์เสียงดนตรีที่สร้างขึ้นประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ (12) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังของเครื่องสังเคราะห์เสียงที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นเครื่องสังเคราะห์เสียงขนาดจิ๋ว (micro-synthesizer) เรียกว่าโนม (GNOME)

เครื่องสังเคราะห์เสียงที่สร้างขึ้น มีปุ่มควบคุมต่าง ๆ สวิทช์ และโปเทนชิโอมิเตอร์วางอยู่ที่แผงด้านหน้า เพื่อสะดวกในการปรับแต่งและควบคุม

ตัวควบคุมคีย์บอร์ด (keyboard controller) เป็นตัวแบ่งแรงดัน (voltage divider) สำหรับจ่ายแรงดันควบคุมซึ่งขึ้นกับแต่ละคีย์ที่กด มีสวิทช์ที่แผงด้านหน้าสำหรับเลือกจ่ายแรงดันแก่ออสซิลเลเตอร์หรือตัวกรองแรงดันควบคุม

I 18027465

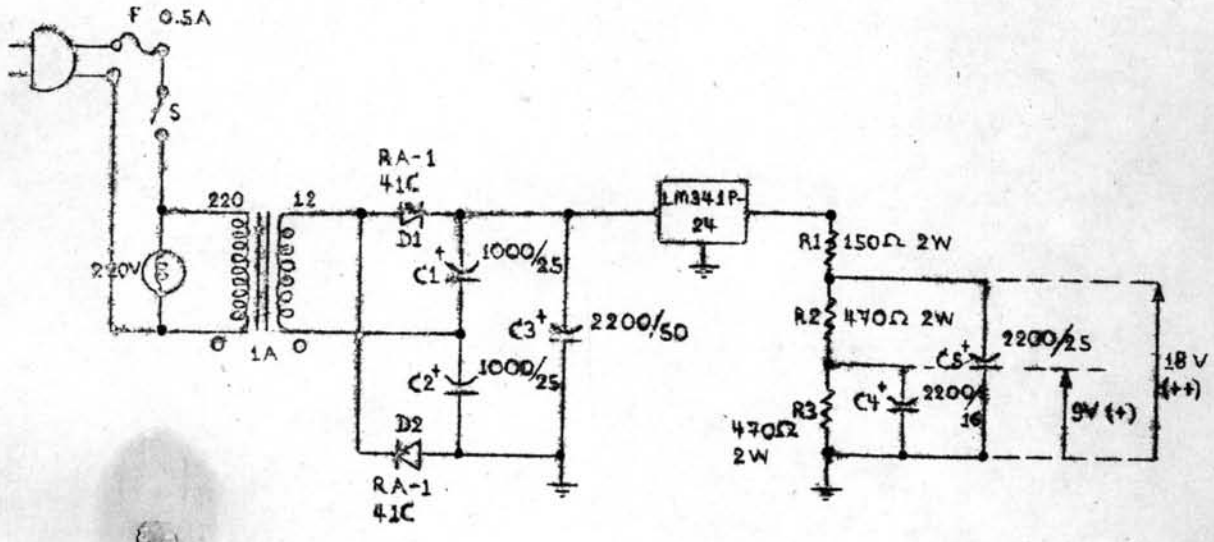
ออสซิลเลเตอร์แรงดันควบคุม มีรูปคลื่นคาย 2 แบบคือ คลื่นรูปสามเหลี่ยมและจตุรัส ทางด้านป้อนของออสซิลเลเตอร์นี้มีตัวควบคุมการลาด (SKEW control) สำหรับเปลี่ยนคลื่นรูปสามเหลี่ยมให้เป็นคลื่นรูปลาดหรือฟันเลื่อย (ramp or sawtooth) ในขณะที่คลื่นรูปจตุรัสเปลี่ยนไปเป็นดลช่วงสั้น (short duration pulse) ทำให้สามารถเลือกรูปคลื่นได้ถึง 4 แบบ จากออสซิลเลเตอร์ราคาถูก ตัวควบคุมระดับ (LEVEL control) แต่ละตัวตรงตำแหน่งคายทั้งสองของออสซิลเลเตอร์จะทำให้เลือกหรือผสมรูปคลื่นตามต้องการได้ ตัวคายของออสซิลเลเตอร์ป้อนให้เส้นทางร่วมของสัญญาณเสียง (common audio bus) เช่นเดียวกับตัวคายของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (noise source) เส้นทางร่วมนี้จะขับตัวกรองแรงดันควบคุมเสมอ แต่มีสวิทช์อยู่ที่ด้านป้อนของตัวขยายแรงดันควบคุม ทำให้สามารถจะลัดการทำงานของตัวกรองได้ถ้าต้องการ

เครื่องสังเคราะห์เสียงนี้มีตัวกำเนิดหน้าที่ 2 ตัว ตัวหนึ่งสำหรับจัดแรงดันควบคุมป้อนให้ตัวกรองแรงดันควบคุม และอีกตัวป้อนให้ตัวขยายแรงดันควบคุม ตัวกำเนิดหน้าที่มีไว้สำหรับจัดเอ็นเวลโลพแบบของเครื่องดนตรีชนิดตี หรือเครื่องสาย หรือเครื่องลม และสำหรับตัวกำเนิดหน้าที่ของ VCF ยังมีสวิทช์ซ้ำ (REPEAT) สามารถให้ประพฤติตังหนึ่งเป็นทริกเกอร์ (trigger) เอง จึงอาจใช้สำหรับให้เกิดผลของการซ้ำรอบในอัตราเร็วต่ำ ๆ คล้ายทรีโมโลได้ด้วย โดยปกติตัวกำเนิดหน้าที่ทั้งสองจะถูกทริกเกอร์จากแผงด้านหน้าตรงที่เป็นปุ่มทริกเกอร์

ไดนามิคส์ในเครื่องสังเคราะห์เสียงสามารถปรับได้โดยการทำงานของตัวกำเนิดหน้าที่ซึ่งมักจะเรียกว่า ตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพ (envelope generator) ร่วมกับ VCA กล่าวคือ ปรับให้สร้างแรงดันซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าเอาแรงดันนี้มาดูที่ฉากของออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ก็จะเห็นเป็นรูปดังรูปที่ 2.13, 2.14, 2.15 แรงดันนี้ควบคุม VCA เมื่อแรงดันควบคุมขึ้นสูง อัตราขยาย (gain) ก็จะสูง เมื่อแรงดันควบคุมคงที่อัตราขยายของตัวขยายก็คงที่ และเมื่อแรงดันควบคุมลดลงอัตราขยายก็จะลดลงในลักษณะเดียวกัน

3.1 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) (13, 14)

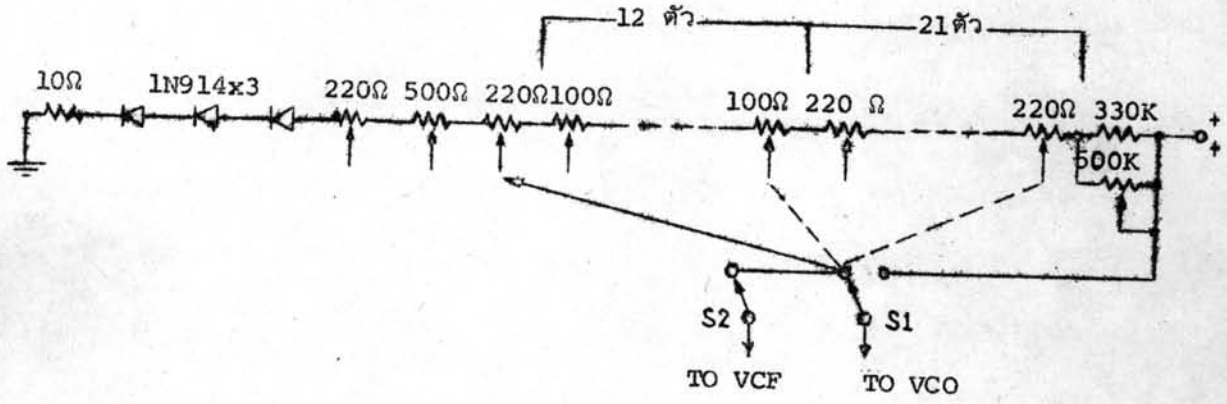
วงจรที่ใช้เป็นแบบทำให้แรงดันสม่ำเสมอ (voltage regulator) และใช้การเร็กติฟาย (rectify) แบบทวีคูณแรงดัน (voltage doubler)



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟที่ใช้กับโนม

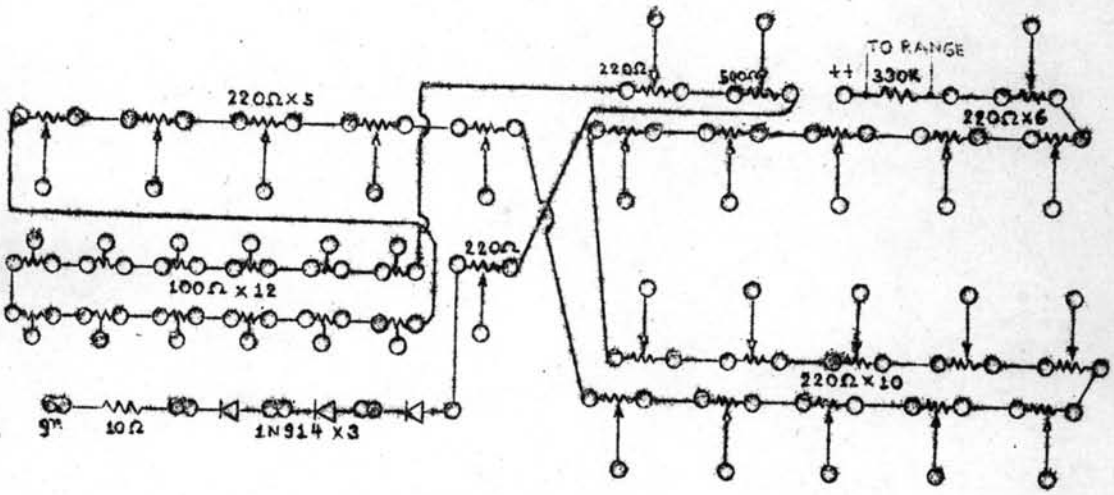
วงจรทวีคูณแรงดันดูคล้ายกับเร็กติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น (half - wave rectifier) 2 วงจรต่ออนุกรมกัน ระหว่างครึ่งรอบแรกเมื่อประจุบวกปรากฏที่ขั้วบวกของไดโอด (diode) D1 D1 จะนำกระแส (conduct) และ D2 ไม่นำกระแส ดังนั้น C1 จะถูกประจุให้มีแรงดันถึงแรงดันยอด (peak line voltage) ในทำนองเดียวกันระหว่างครึ่งรอบหลัง D2 จะนำกระแส และ D1 ไม่นำกระแส ทำให้ C2 ถูกประจุถึงแรงดันยอด เนื่องจาก C1 และ C2 ต่ออนุกรมกันอยู่ ดังนั้นแรงดันคร่อม C1C2 จะมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันยอด C3 มีหน้าที่กรองกระแสไฟตรงที่ได้ให้เรียบขึ้น จากนั้นจึงเข้าสู่ตัวทำให้แรงดันสม่ำเสมอ ในที่นี้ใช้วงจรรวมหรือไอซี (integrated circuit or IC) เบอร์ LM 341P - 24 จะได้ตัวคายจากไอซีมีค่า 24 โวลต์ แต่เราต้องการไฟเลี้ยงวงจรต่าง ๆ ของโนมเป็น 18 และ 9 โวลต์ จึงใช้ตัวต้านทาน R1 , R2 และ R3 เป็นตัวลดแรงดันลง

3.2 <u>ตัวควบคุมคีย์บอร์ด</u> (Keyboard Controller)



รูปที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมคีย์บอร์ด

วงจรนี้มีโปเทนชิโอมิเตอร์ 500 KΩ ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแบบเกือกม้าทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดัน เมื่อเพิ่มความต้านทานของโปเทนชิโอมิเตอร์จะเป็นการลดแรงดันที่คร่อมตัวต้านทานเกือกม้า คีย์หนึ่ง ๆ จะป้อนแรงดันซึ่งเป็นสัดส่วนกับตำแหน่งของตัวต้านทานเกือกม้าสู่ VCO โดยมีวงจรตัวตามอิมิตเตอร์ (emitter follower) ใน VCO เป็นตัวรับเพื่อป้องกันการโหลด (load) ของตัวควบคุมคีย์บอร์ด สวิทช์ S1, S2 มีไว้สำหรับให้แรงดันป้อนสู่ VCO หรือ VCF หรือทั้งคู่พร้อมกัน ไดโอดทั้งสามที่ต่ออยู่ตรงส่วนปลายของวงจรจะทำให้มีแรงดันประมาณ 1.5 โวลต์ เพื่อเป็นการประกันว่าจะมีแรงดันพอเพียงที่จะขับ VCO ให้ทำงานเสมอ ไม่ว่าโปเทนชิโอมิเตอร์จะอยู่ ณ ตำแหน่งใดก็ตาม



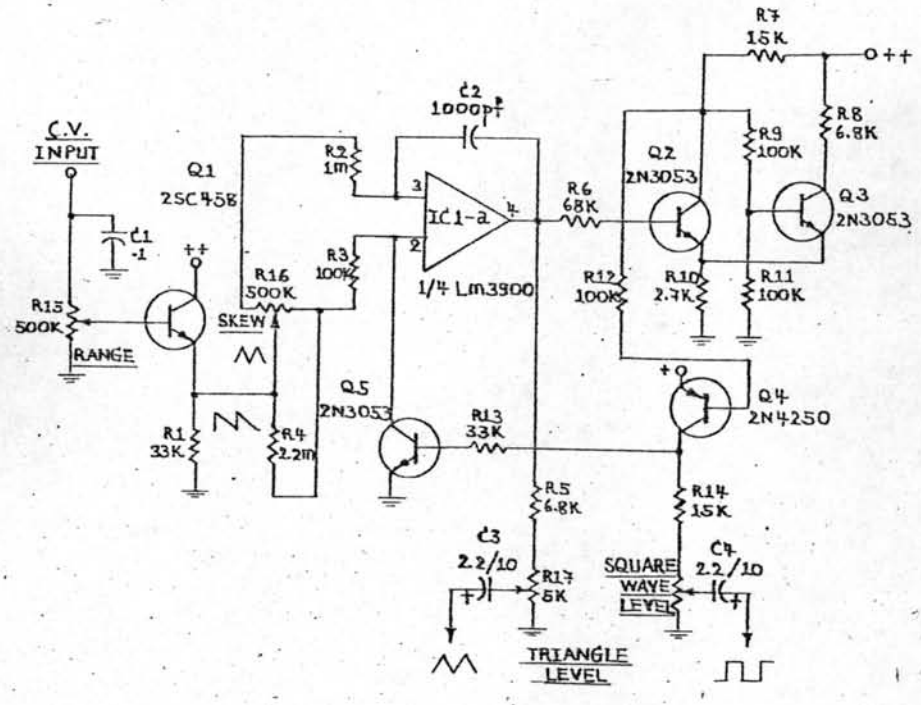
รูปที่ 3.4 แสดงลวยทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรตัวควบคุมคีย์บอร์ด

3.3 <u>ออสซิลเลเตอร์แรงดันควบคุม</u> (Voltage-Controlled Oscillator = VCO)

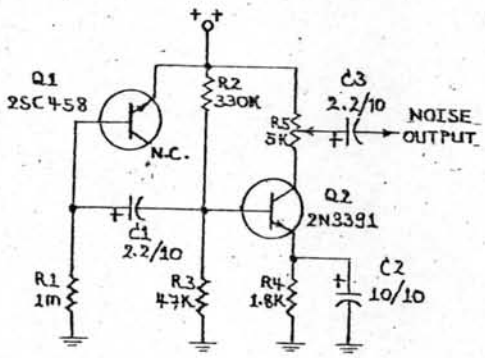
ตามรูปที่ 3.5 แรงดันควบคุมป้อนสู่ออสซิลเลเตอร์ตรงตำแหน่ง "ตัวป้อนแรงดันควบคุม (C.V. INPUT)" มีตัวจุ C1 ทำหน้าที่เป็นทางลัด (bypass) ลงดินของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสัมผัส (contact-noise) จากคีย์บอร์ด แล้วแรงดันควบคุมถูกป้อนให้กับตัวควบคุมพิสัย (RANGE control) R15 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวลด (attenuator) มี Q1 เป็นตัวตามอิมิตเตอร์ทำหน้าที่จัดความขัดให้เหมาะสม (impedance matching) ระหว่างตัวป้อนแรงดันควบคุมและวงจรออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์นี้เป็นแบบธรรมดาประกอบด้วยอินทีเกรเตอร์ (integrator, IC1-a) และชมิทท์ ทริกเกอร์ (Schmitt trigger) ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 กับส่วนประกอบอื่น ๆ

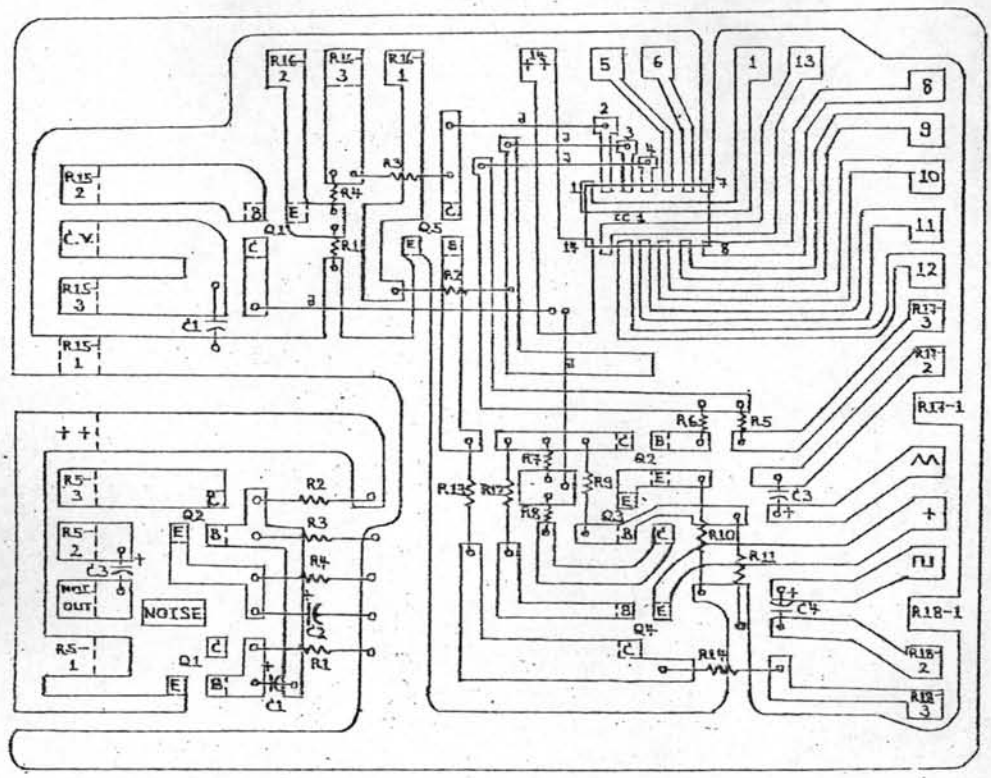
อินทีเกรเตอร์มีลักษณะที่ว่า ตัวขยายจะทำงานเพื่อทำให้กระแสไหลเข้าสู่ขั้วป้อนกลับ (inverting input) ขา 3 และขั้วป้อนไม่กลับ (non-inverting input) ขา 2 เป็น



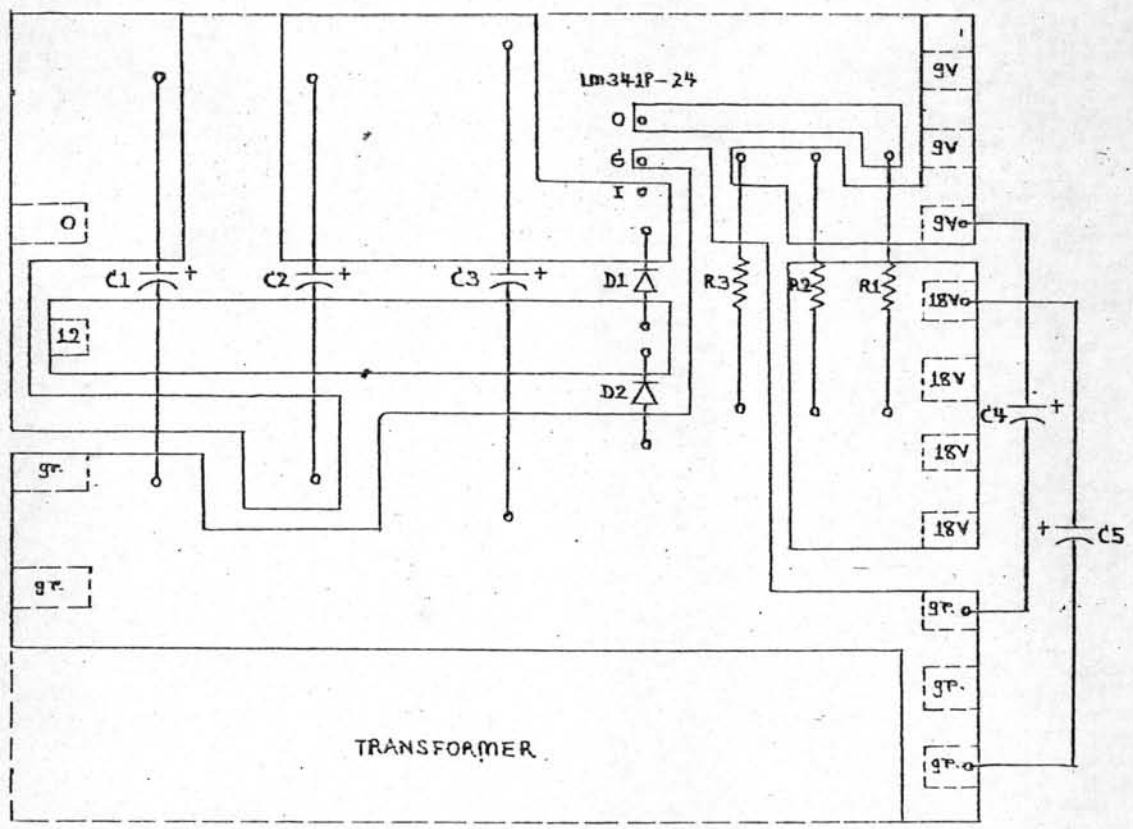
รูปที่ 3.5 วงจรออสซิลเลเตอร์แรงดันควบคุม



รูปที่ 3.6 วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.7 ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจร VCO และแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.8 ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟ

จำนวนเท่า ๆ กัน เนื่องจากค่าความต้านทานของ R2, R3 และ R16 จึงทำให้กระแสที่ไหลเข้าขั้วป้อนไม่กลับมีค่าอย่างน้อยที่สุดเป็น 2 เท่าของกระแสที่ไหลเข้าสู่ขั้วป้อนกลับเสมอ เว้นแต่เมื่อทรานซิสเตอร์ Q5 ทำงาน เพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสดังกล่าว แรงดันคายของตัวขยายต้องขึ้นสูงเป็นสัดส่วนเชิงเส้น เพื่อขับกระแสผ่าน C2 เข้าสู่ขั้วป้อนกลับ ณ บางตำแหน่งแรงดันคายของอินทีเกรเตอร์จะเพิ่มขึ้นเกินกว่าขีดเริ่มซึ่งกำหนดโดยชมิทท์ ทริกเกอร์ ทำให้แรงดันคอลเล็คเตอร์ (collector voltage) ของ Q2 แกว่ง (switch) จาก +18 โวลต์ถึงประมาณ +3 โวลต์ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวหัวต่อ (junction) เบส-อิมิตเตอร์ของ Q4 จะถูกลำเอียงตรง (forward bias) เป็นผลให้คอลเล็คเตอร์ของทรานซิสเตอร์นี้มีแรงดันสูงถึงประมาณ +9 โวลต์ กระแสผลลัพธ์ที่ไหลผ่าน R13 เข้าสู่เบสของ Q5 จะทำให้ Q5 ทำงาน ซึ่งจะมีผลคือไปชันท์ (shunt) กับกระแสที่ไหลเข้าขั้วป้อนไม่กลับก่อนหน้านั้นเล็กน้อยลงดินไป ตอนนี้ตัวขยายของอินทีเกรเตอร์ก็จะพยายามทำให้กระแสส่วนเกินไหลไปสู่ขั้วป้อนกลับโดยการลดแรงดันคายลงอย่างเป็นเชิงเส้น เพื่อดึงกระแสออกจากขั้วป้อนนี้ผ่าน C2 เมื่อแรงดันคายของตัวขยายตกลงจนมีค่าต่ำกว่าระดับขีดเริ่ม ชมิทท์ ทริกเกอร์ก็จะตั้งใหม่ (reset) แรงดันคอลเล็คเตอร์ของ Q2 จะขึ้นสูงอีกครั้ง และทำให้ Q4, Q5 หยุดทำงาน และคืน (restore) กระแสที่ไหลเข้าสู่ขั้วป้อนไม่กลับของอินทีเกรเตอร์ เพื่อว่าจะได้เริ่มต้นรอบใหม่อีก

รอบดังกล่าวเป็นเอกลักษณ์กับเมื่อตัวควบคุมการลาด (SKEW control) ถูกหมุนไปสู่ตำแหน่งลาด (RAMP) ยกเว้นความต้านทานที่ลดลงในวงจรขั้วป้อนไม่กลับยอมให้กระแสที่มากกว่าไหลได้ ซึ่งทำให้ตัวคายของอินทีเกรเตอร์ลาดเอียงขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว ในเวลาเดียวกันความต้านทานที่ลดลงในวงจรขั้วป้อนไม่กลับก็จะเพิ่มให้กับขั้วป้อนกลับ เพื่อให้ตัวคายของอินทีเกรเตอร์ลดลงอย่างช้า ๆ ผลรวมของการเพิ่มของเวลาตอนขึ้น และการลดลงของเวลาตอนลง รักษาให้คาบทั้งหมดของรูปคลื่นเกือบคงที่อยู่เสมอ

การปรับตัวควบคุมการลาด R16 ทำให้คลื่นรูปสามเหลี่ยมมีความลาดเอียงต่าง ๆ กัน สำหรับคลื่นรูปจตุรัสนั้นก็ทำให้มีช่วงห่างต่าง ๆ กันออกไปกลายเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular wave) เมื่อหมุน R16 ไปทางหนึ่ง และกลับมาเป็นคลื่นรูปจตุรัสเมื่อหมุนมาอีกทางหนึ่ง

ตัวคายชนิดสามเหลี่ยมหรือคลื่นรูปลาดของอินทีเกรเตอร์ป้อนให้ R5 และโปเทนชิโอมิเตอร์ R17 โดย R17 เป็นตัวปรับระดับของคลื่นนี้ ซึ่งส่งไปยังเส้นทางร่วมของสัญญาณเสียง ในทำนองเดียวกันโปเทนชิโอมิเตอร์ R18 ในวงจรคอลเล็คเตอร์ของ Q4 เป็นตัวปรับระดับของคลื่นรูปจตุรัสหรือสี่เหลี่ยมที่ส่งไปยังเส้นทางร่วมดังกล่าว

เมื่อเปลี่ยนแรงดันควบคุมไป จะได้ความถี่ของคลื่นที่ออสซิลเลทเปลี่ยนไปกล่าวคือ เมื่อให้แรงดันควบคุมมากจะได้คลื่นความถี่สูง เมื่อแรงดันควบคุมน้อยจะได้คลื่นความถี่ต่ำ

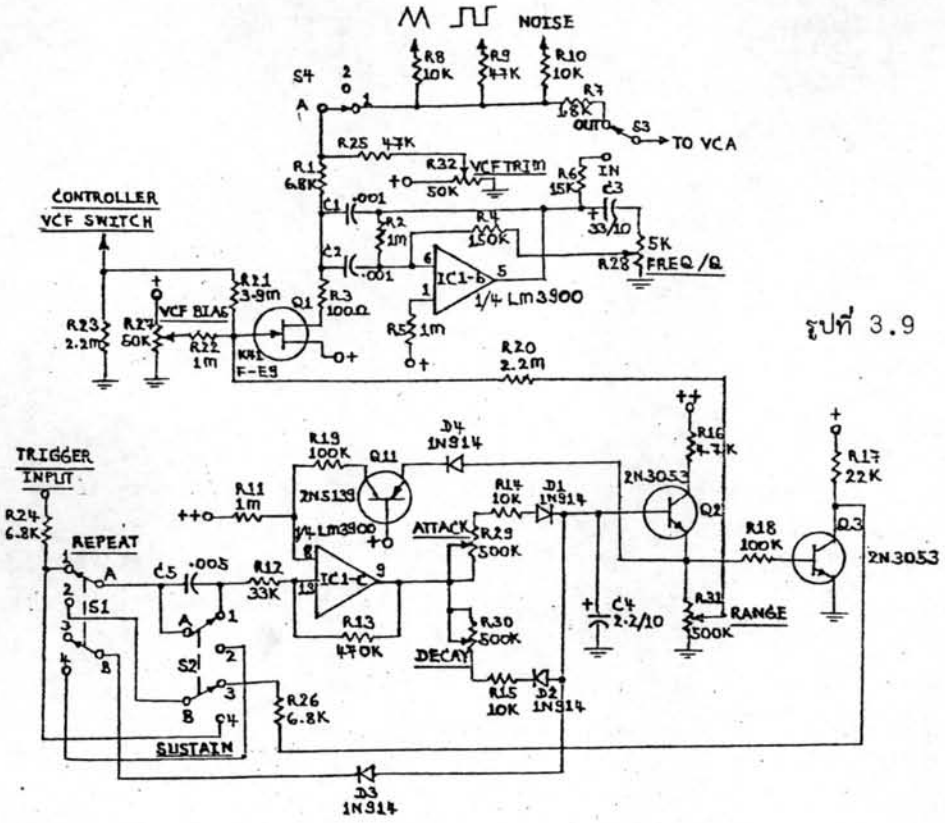
3.4 <u>แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน</u> (Noise Source)

วงจรที่ใช้เป็นแบบมาตรฐานซึ่งใช้สัญญาณรบกวนแบบเสียงยิงปืน (shot-noise) อันเป็นผลมาจากขบวนการถล่ม (avalanching process) ของการลำเอียงกลับ (reverse bias) ที่หัวต่อของเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 จะได้สัญญาณรบกวนปรากฏคร่อมตัวต้านทาน R1 และควบ (coupling) โดยตัวจุ C1 ไปสู่ตัวขยายขั้นเดียว ซึ่งประกอบด้วย Q2, R2, R3 และ R4 โปเทนชิโอมิเตอร์ R5 เป็นตัวควบคุมระดับของสัญญาณรบกวน เมื่อหมุนโปเทนชิโอมิเตอร์นี้ไปสู่คอลเล็คเตอร์ของ Q2 ปริมาณของสัญญาณรบกวนที่ถูกนำสู่เส้นทางร่วมของสัญญาณเสียงจะเพิ่มขึ้น

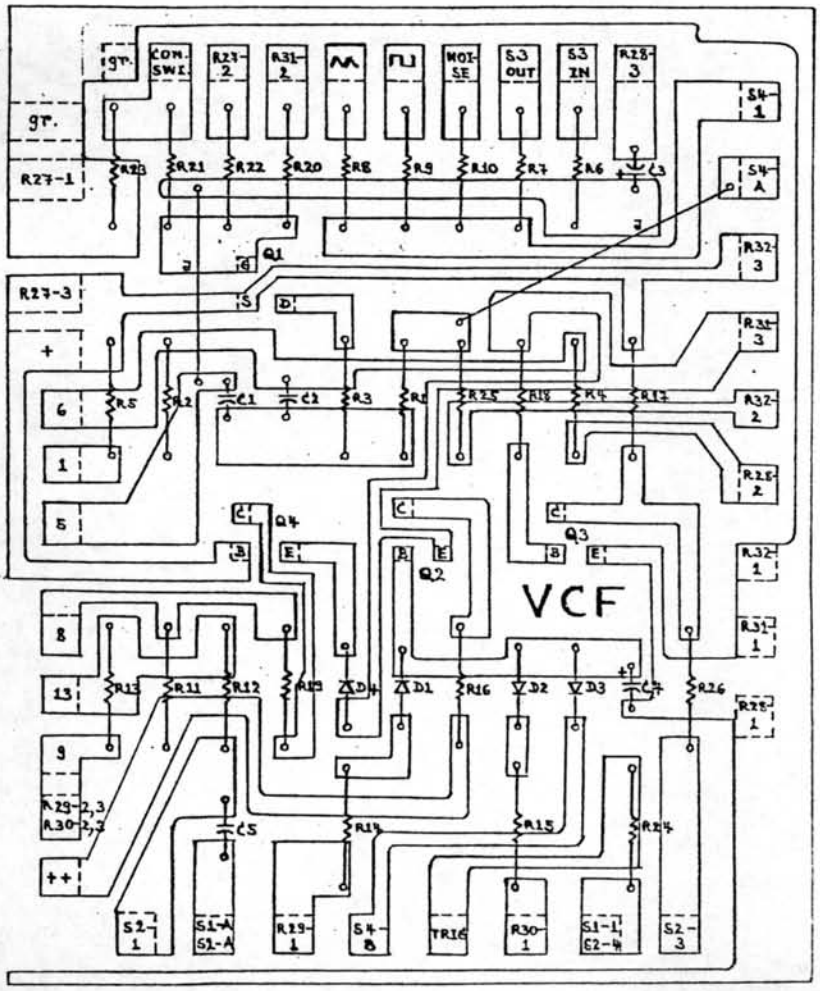
3.5 <u>ตัวกรองแรงดันควบคุม</u> (Voltage-Controlled Filter = VCF)

VCF นี้สร้างขึ้นโดยอาศัยส่วนหนึ่งของตัวขยาย LM-3900 และปรับแต่งได้โดยการแปรค่ายังผลของความต้านทานของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้ามีผล (field-effect transistor = FET) Q1 สัญญาณทั้งสามที่ป้อนให้กับเส้นทางร่วมของสัญญาณเสียงจะผสมเข้าด้วยกันโดย R8, R9, R10 และผ่าน R1 เข้าสู่ตัวป้อนของตัวกรอง สวิทช์ S3 เป็นทางให้สัญญาณที่ถูกกรองแล้วหรือยังไม่ได้กรองเข้าสู่ VCA

แรงดันควบคุมสำหรับตัวกรองนี้อาจมาจากตัวควบคุมคีย์บอร์ด หรือตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพของ VCF แรงดันจากคีย์บอร์ดจะตกคร่อม R23 และป้อนสู่เกท (gate)



รูปที่ 3.9 วงจรตัวกรองแรงดันควบคุม



รูปที่ 3.10

ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์

ของวงจรตัวกรองแรงดันควบคุม

ของ FET Q1 ผ่าน R21 ในขณะที่แรงดันจากตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพป้อนผ่าน R20

ตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพประกอบด้วยส่วนหนึ่งของ LM-3900 แรงดันทริกเกอร์ ซึ่งปรากฏที่ R12 จะผลิตกระแสไหลเข้าสู่ขั้วป้อนไม่กลับของตัวขยาย ดังนั้นจะไปสวิทช์ให้ตัวคายของตัวขยายมีระดับสูง และแรงดันคายที่มีค่ามากนี้จะไปประจุตัวจุเวลา (timing capacitor) C4 ผ่าน R14, ตัวควบคุมการขึ้น (ATTACK control) R29 และไดโอด D1 ซึ่งถูกลำเอียงตรง แรงดันคร่อม C4 จะมีความไวเพราะมีตัวตามอิมิตเตอร์ความชัดสูง Q2 โดยมีแรงดันที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์นี้เป็นแรงดันคร่อมไดโอดน้อยกว่าแรงดันคร่อม C4

เมื่อตัวขยายทำงานโดยสัญญาณจากทริกเกอร์ ก็จะทำงานต่อไปด้วยกระแสป้อนกลับ (feedback current) ผ่าน R13 แม้จะเอาทริกเกอร์ออกแล้วก็ตาม นานเท่าที่แรงดันของอิมิตเตอร์ของ Q2 มีค่าน้อย Q4 จะไม่ทำงาน (off) และไม่มีกระแสไหลผ่าน R19 เข้าไปในขั้วป้อนกลับของตัวขยาย ทันทีที่แรงดันที่อิมิตเตอร์ของ Q2 มีค่าเกินแรงดันคร่อมไดโอดทั้งสอง (D4 และรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของ Q4) มากกว่า +9 โวลต์ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงที่เบสของ Q4 ทรานซิสเตอร์นี้จะเริ่มนำกระแส (conduct) ทำให้มีกระแสไหลผ่าน R19 เข้าสู่ขั้วป้อนกลับของตัวขยาย ในขณะนี้ถ้าเอาสัญญาณทริกเกอร์ออกไป ตัวคายของตัวขยายจะตั้งใหม่ (reset) ที่แรงดันต่ำทำให้ประจุบน C4 ระบายออกไปผ่าน R15 ตัวควบคุมการสลาย (DECAY control) R30 และไดโอด D2 ซึ่งถูกลำเอียงตรงโดยเงื่อนไขดังกล่าว แต่ถ้าสัญญาณทริกเกอร์ยังคงอยู่ต่อไป ก็จะทำให้มีกระแสเพียงพอเข้าสู่ขั้วป้อนไม่กลับของตัวขยาย เพื่อรักษาให้ตัวคายสูงสำหรับตอนที่เป็นช่วงคงที่ (sustain)

สวิทช์ S2 มีหน้าที่สำหรับปรับให้ตัวคายจากตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพเป็นแบบคงที่หรือไม่คงที่ (non-sustain) โดยการยอมให้มีการควบสู่ตัวป้อนแบบโดยตรงหรือแบบมีตัวจุต่ออยู่ สำหรับสวิทช์ S1 มีไว้สำหรับหน้าที่ในการซ้ำ โดยการให้สัญญาณทริกเกอร์ถูกแทนที่โดยแรงดันคอลเล็คเตอร์ของ Q3 ทรานซิสเตอร์ Q3 เป็นตัวกลับอย่างง่าย (simple inverter stage) ซึ่งเปลี่ยนให้เป็นแรงดันคายค่าสูง เมื่อตัวคายของตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพมีค่าใกล้ระดับต่ำสุด

ไดโอด D3 มีหน้าที่เป็นทางคายประจุจาก C4 กลับเข้าสู่วงจรทริกเกอร์ เมื่อตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพกำลังทำให้เกิดสภาวะใบ้ (mute) กล่าวคือเมื่อ "ไม่คงที่" และ "ซ้ำ"

3.6 <u>ตัวขยายแรงดันควบคุม</u> (Voltage-Controlled Amplifier = VCA)

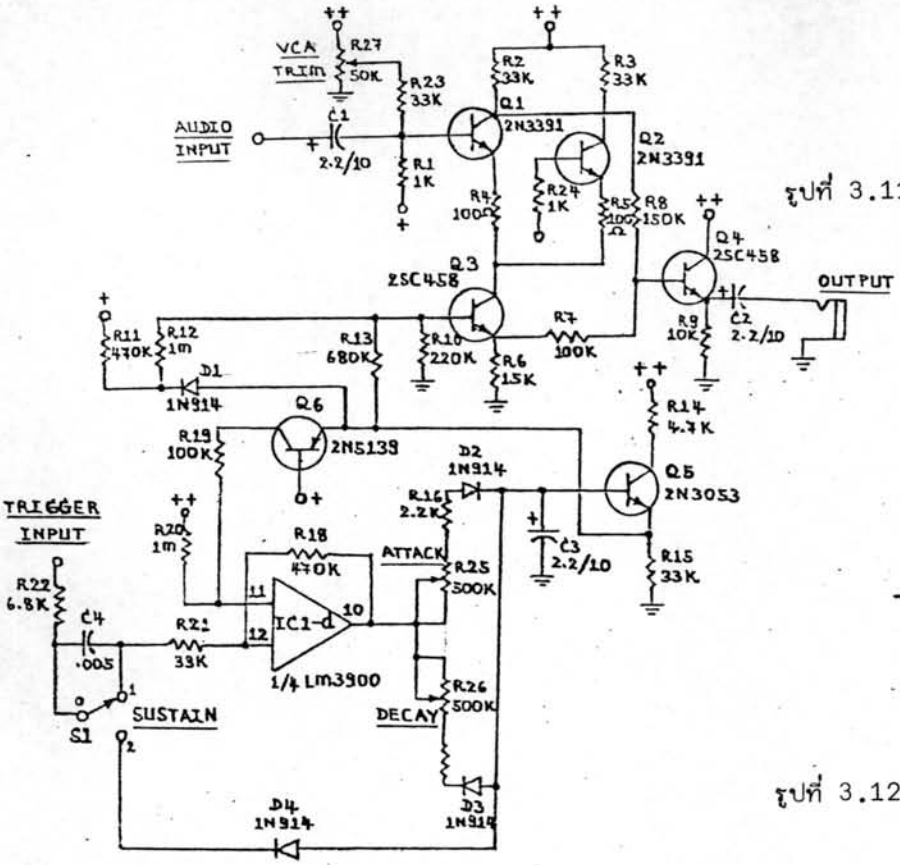
ถ้าไม่คำนึงถึงส่วนประกอบที่ใช้สำหรับการซ้ำแล้ว การทำงานของตัวกำเนิดหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับ VCA ก็เหมือนกับตัวกำเนิดหน้าที่ของ VCF

VCA นี้เป็นแบบธรรมดา ประกอบด้วยคู่ดิฟเฟอเรนเชียล (differential) Q1 และ Q2 ซึ่งใช้ตัวระบายกระแสคงที่ (constant current sink) ร่วมกันในวงจรอิมิตเตอร์ทั้งสอง เนื่องจากอัตราขยาย (gain) ของทรานซิสเตอร์เป็นสัดส่วนกับกระแสคอลเล็คเตอร์ กระแสมากไหลผ่านตัวระบายกระแส Q3 จะไปเพิ่มอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ทั้งสองในวงจรดิฟเฟอเรนเชียล สำหรับ VCA นี้ การแปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟตรงซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มและการลดของอัตราขยายของคู่ทรานซิสเตอร์นี้จะถูกหักล้างใน R7 และ R8 และอันนี้ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่า ขณะที่แรงดันที่คอลเล็คเตอร์ของ Q1 ตกด้วยอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น แรงดันที่อิมิตเตอร์ของ Q3 จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกันอันเนื่องจากกระแสไหลผ่าน R6 อัตราส่วนของ R7 ต่อ R8 ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับไฟตรง ทั้ง ๆ ที่เป็นเพียงตัวลดของสัญญาณเสียงที่ปรากฏที่คอลเล็คเตอร์ของ Q1 เท่านั้น

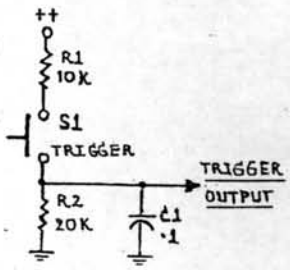
วงจรตัวตามอิมิตเตอร์ Q4 จัดให้เกิดความขัดป้อนสูงแก่ตัวคายของ VCA ขณะเดียวกันก็มีความขัดคายต่ำ เพื่อขับเครื่องขยายกำลัง (power amplifier) ที่ใช้กับโนม

3.7 <u>ทริกเกอร์</u> (Trigger)

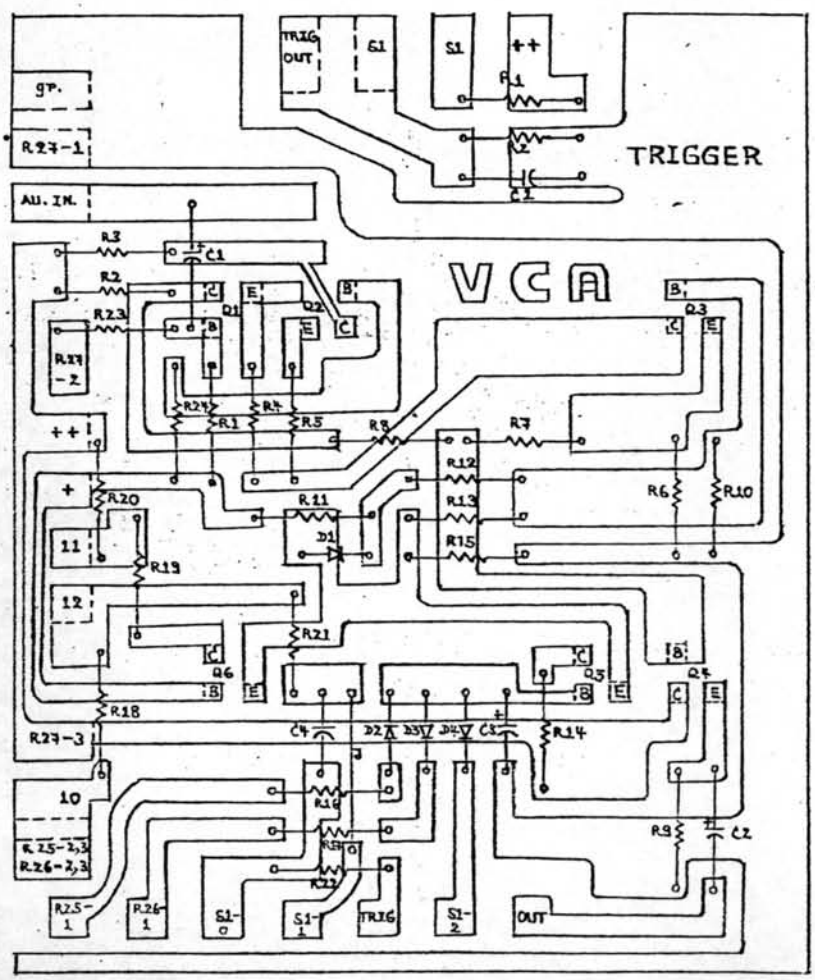
S1 เป็นสวิทช์สำหรับกดทริกเกอร์ โดยต่อจากไฟป้อน 18 โวลต์ ผ่าน R1 ตัวจุ C1 มีไว้สำหรับเป็นทางผ่านลงดินของการดลที่เกิดจากการสัมผัส



รูปที่ 3.11 วงจรตัวขยายแรงดันควบคุม



รูปที่ 3.12 วงจรทริกเกอร์



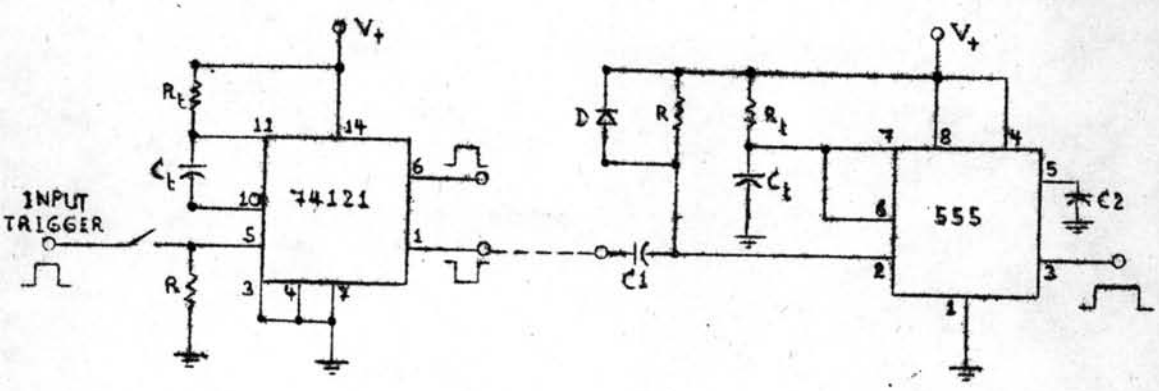
รูปที่ 3.13

ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจร VCA และทริกเกอร์

3.8 วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (Monostable Multivibrator)

ตามแผนผังของโนมตังรูปที่ 3.1 เมื่อจะเล่นเครื่องสังเคราะห์เสียงที่สร้างขึ้น ต้องเล่นทั้งคีย์และกดทริกเกอร์ด้วย ซึ่งอาจต้องใช้นิ้วมือกดคีย์ และใช้เท้าสำหรับทริกเกอร์ อันเป็นการยุ่งยาก ดังนั้นในการสร้างเครื่องสังเคราะห์เสียงดังกล่าว จึงได้พยายามทำให้สามารถใช้นิ้วมือเล่นทั้งคีย์และกดทริกเกอร์ไปด้วย ครั้งแรกทดลองใช้วงจรโมโนสเตเบิลเพื่อจะหน่วง (delay) ให้ตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพของ VCF และ VCA ทำงานภายหลังจากที่ VCO ทำงานไปแล้ว ทั้งนี้เพราะว่าเพื่อให้มีการออสซิลเลทสร้างรูปคลื่นขึ้นมาตามต้องการก่อน แล้วจึงจะให้มีเสียงดังออกมา (เมื่อ VCA ทำงาน) เพื่อให้แน่ใจว่ามีรูปคลื่นถูกสร้างมารอที่ตัวป้อนของ VCF หรือ VCA แล้วนั่นเอง

วงจรที่ทดลองทำได้ใช้ไอซีเบอร์ 74121 มาสร้างเป็นโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ชุดแรกสำหรับผลิตดลลบขึ้นมาใช้เป็นทริกเกอร์แก่วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ชุดที่สอง ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 555 มาสร้าง จะได้ตัวคายออกมาเป็นดลบวก ซึ่งเราสามารถที่จะกำหนดเวลาในการหน่วงได้ ดลบวกที่ได้นี้ใช้ไปทริกเกอร์ตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพของ VCF และ VCA โดยที่ VCO ได้ทำงานสร้างรูปคลื่นไปรออยู่แล้วเมื่อตอนที่เราทริกเกอร์ตัวป้อนของโมโนสเตเบิลชุดแรก



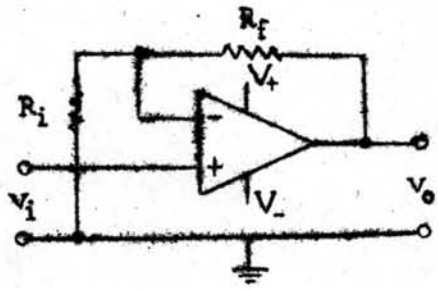
รูปที่ 3.14 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ 74121 และ 555 (15,16)

โมโนสเตเบิลที่ใช้ 74121 ต่อวงจรดังรูปที่ 3.14 ทริกเกอร์ที่ป้อนเข้าขาป้อนของไอซีนี้ ซึ่งจะเป็นแรงดันค่าต่าง ๆ จากคีย์บอร์ดมีค่าประมาณ 2-5 โวลต์ ผลตอบสนองต่อทริกเกอร์นี้จะให้ตัวคาย 2 ชนิด คือที่ขา 6 ให้เป็นดลบวก ขา 1 ให้ดลลบ ตัวจุที่ต่ออยู่ระหว่างขา 10 และ 11 ร่วมกับตัวต้านทานระหว่างขา 11 และ 14 เป็นตัวกำหนดความกว้างของดลคายที่ได้ ค่าของความต้านทานสามารถอยู่ระหว่าง 2 ถึง 40 KΩ และค่าความจุมีได้ตั้งแต่ 10 pF ขึ้นไป โมโนสเตเบิลที่ต้องการเวลาน้อย ๆ เราจึงจะใช้ 74121 ไม่เช่นนั้นแล้วใช้ 555 จะดีกว่า[15]

ตัวคายดลลบที่ได้จากขา 1 ของ 74121 ป้อนเป็นทริกเกอร์ที่ขา 2 ของ 555 ซึ่งต่อวงจรเป็นโมโนสเตเบิลชุดที่สอง เพื่อว่าเราสามารถยืดเวลาของการเริ่มทำงานของ VCF และ VCA ภายหลังที่ VCO ทำงานไปแล้วได้ตามต้องการ ในวงจรโมโนสเตเบิลชุดที่สอง เมื่อตัวป้อนถูกทริกเกอร์จะให้ตัวคายขึ้นสูงเป็นบวก C_t จะประจุโดย R_t หลังจากที่มีการทริกเกอร์จนมีแรงดันเป็น 2/3 ของแรงดันไฟเลี้ยง (supply voltage) ที่ตอนปลายของรอบ C_t คายประจุจนถึงระดับดิน (ground) ดังนั้นจะได้ตัวคายเป็นดลบวกซึ่งมีการหน่วงเวลา (positive time duration) ในกรณีนี้ดลของทริกเกอร์ต้องแคบกว่าดลคาย เวลาหน่วงมีค่า $1.1 R_t C_t$ โดย R_t มีค่าระหว่าง 1 KΩ - 3.3 MΩ C_t มีค่าต่ำสุด 500 pF ค่าสูงสุดกำหนดโดยการรั่วไหล (leakage) ความกว้างของเวลาหน่วงไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และความผันแปรของแรงดันไฟเลี้ยง (supply voltage variations) ซึ่งยาวเมื่อเทียบกับรอบเวลา (timing cycle) ความผันแปรของแรงดันไฟเลี้ยงดังกล่าวได้แก่ ฮัม (hum) เป็นต้น สามารถทำให้เกิดอาการกระตุก (jitter) หรือความไม่เสถียรภาพ (instability) จึงต้องกำจัดทิ้งโดยการต่อตัวจุทางผ่าน (bypass capacitor) ที่ขา 5 ของ IC 555[15]

เนื่องจากเราต้องการใช้แรงดันจากคีย์ต่าง ๆ ไปทริกเกอร์โมโนสเตเบิลชุดแรก แรงดันนี้มีค่าตั้งแต่ประมาณ 1.5 โวลต์ ถึง 18 โวลต์ แต่แรงดันที่ได้ทดลองใช้ทริกเกอร์อยู่นั้นอยู่ในช่วง 2-5 โวลต์ ดังนั้นเราจึงต้องขยายแรงดันต่ำ ๆ จากคีย์บอร์ด

เพื่อให้สามารถใช้ไปทริกเกอร์ได้ และในขณะเดียวกันแรงดันจากคีย์บอร์ดที่สูงเกินกว่า 5 โวลต์ ก็จะไม่ถูกขยาย วิธีที่จะทำได้นี้โดยป้อนแรงดัน 1.5 ถึง 18 โวลต์ เข้าขั้วป้อนไม่กลับของวงจรขยายโดยใช้ออปแอมป์ (operational amplifier = op-amp) ซึ่งต่อวงจรแบบไม่กลับ (non-inverting) ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรขยายใช้ออปแอมป์ต่อแบบไม่กลับ

ใส่แรงดันป้อนเข้าที่ขั้วป้อนไม่กลับ จะมีแรงดันคายส่วนหนึ่งป้อนกลับสู่ขั้วป้อนกลับจากตัวแบ่งแรงดัน $R_f - R_i$ จะได้อัตราขยายตามสูตร (17)

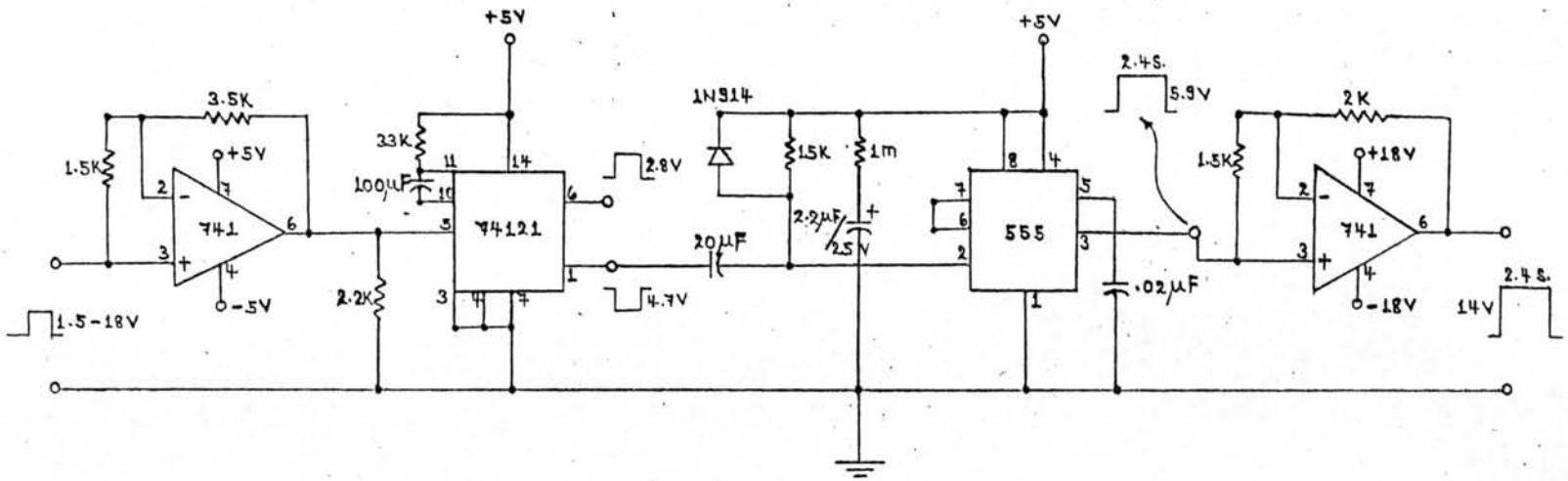
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_i + R_f}{R_i}$$

ดังนั้นคำนวณหา R_f , R_i ได้ตามต้องการ

โดยการใส่แรงดัน V_+ , V_- มีค่า ± 5 โวลต์ (ไม่ให้เกิน 5 โวลต์) จะทำให้ได้แรงดันคายไม่เกิน 5 โวลต์ ซึ่งไม่เป็นอันตรายที่จะใช้เป็นทริกเกอร์ป้อนแก่ 74121

ในทำนองเดียวกัน เราใช้วงจรดังรูปที่ 3.15 สำหรับขยายแรงดันคายที่ได้จากโมโนสเตเบิลชุดที่สองซึ่งมีค่าประมาณ 5.9 โวลต์ ให้มีค่าประมาณ 14 โวลต์ ตามที่ได้จากวงจรทริกเกอร์ของโนม แต่ตอนนี้เราใส่แรงดัน V_+ เป็น 18 โวลต์, V_- เป็น -18 โวลต์

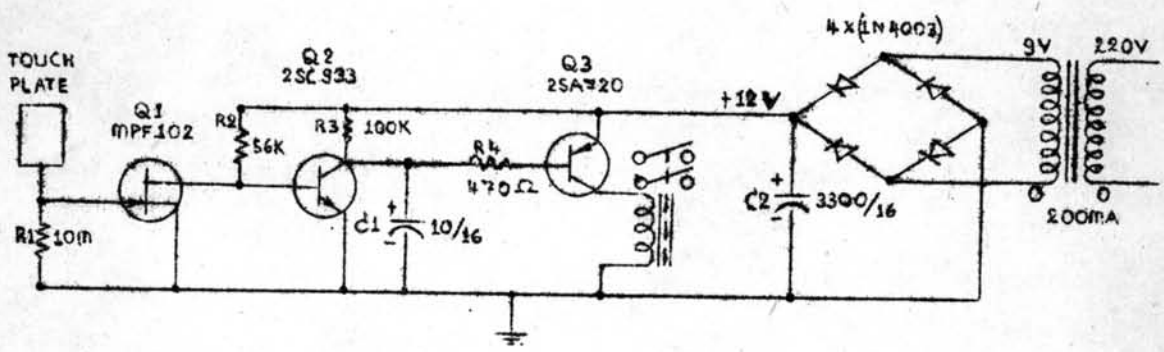
ดังนั้นวงจรรวมทั้งหมดที่ทดลองจะทำเป็นดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรทั้งหมดของโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ที่ทดลองทำ พร้อมค่าอุปกรณ์ที่ใช้

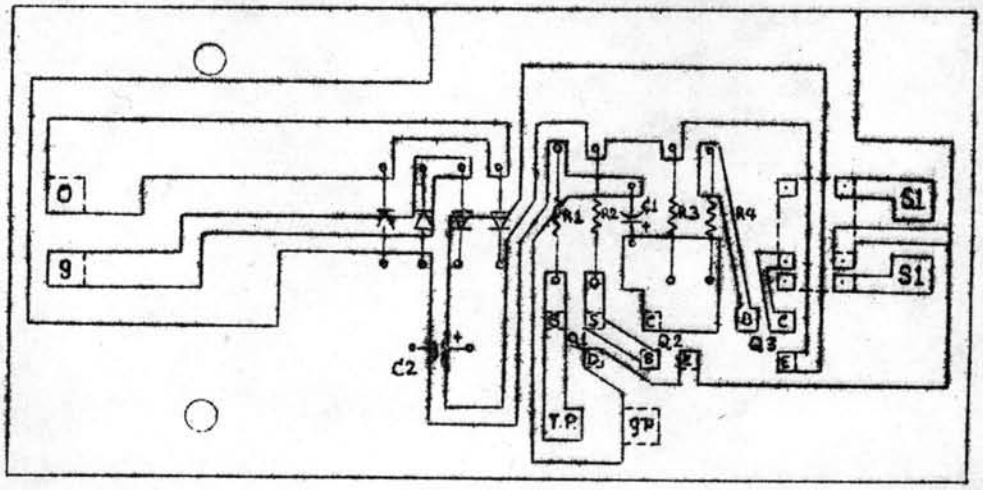
ผลที่ได้จากวงจรรูปที่ 3.16 เมื่อนำไปทริกเกอร์ตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพของ VCF และ VCA จะให้ผลไม่เหมือนกับใช้วงจรทริกเกอร์ของโนมเองในบางเงื่อนไข กล่าวคือจะให้รูปเอ็นเวลโลพผิดแผกไป เช่นตามปกติแล้วถ้าเป็นกรณีให้คงที่ เราสามารถบังคับช่วงเวลาตอนคงที่ได้ด้วยระยะเวลาการกดทริกเกอร์ไว้ แต่เมื่อใช้โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แล้วเราไม่อาจทำเช่นนั้นได้ จึงได้พยายามคิดหาวงจรใหม่ ที่จะเหมาะสมนำมาใช้ร่วมกับวงจรทริกเกอร์ของโนมแล้ว สามารถเล่นคีย์พร้อม ๆ กับกดทริกเกอร์วงจรตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพได้ จากการทดลองสร้างสวิทช์สัมผัสปรากฏว่าสามารถนำมาใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

3.9 สวิทช์สัมผัส (Touch Switch or Capacitance Switch) [18]

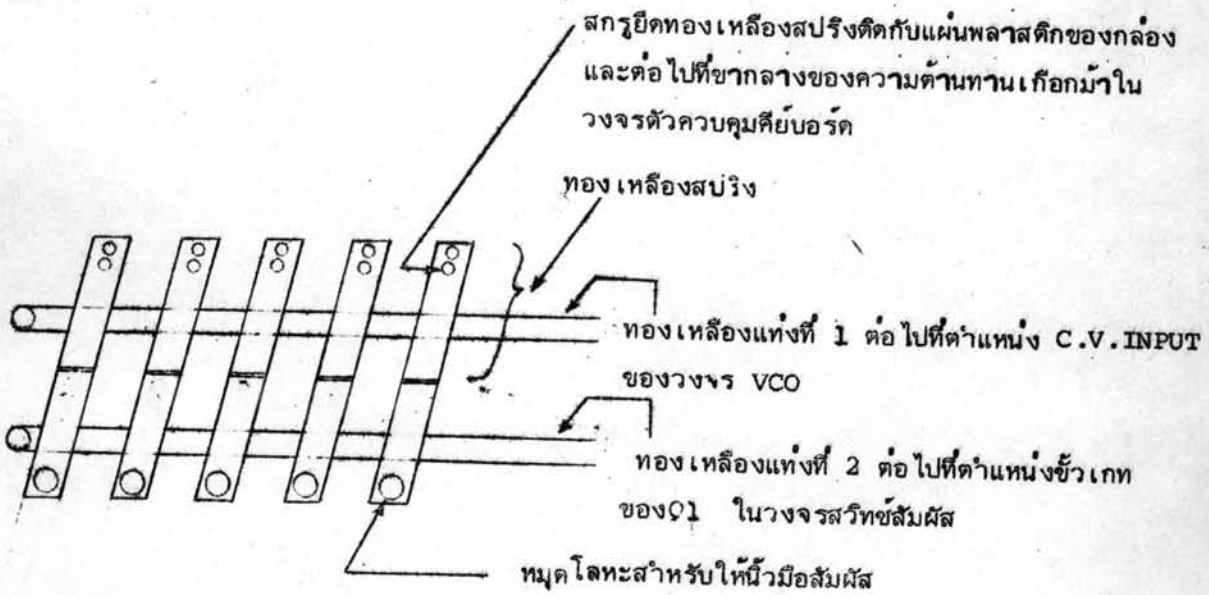


รูปที่ 3.17 วงจรสวิทช์สัมผัสพร้อมแหล่งจ่ายไฟ

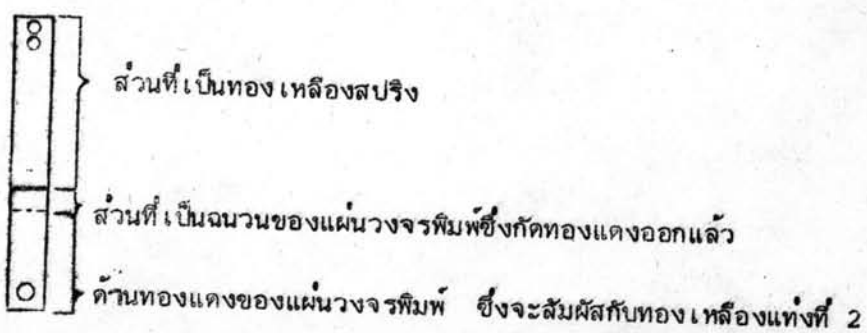
วงจรในรูปที่ 3.17 เมื่อต่อขาทั้งสองของรีเลย์ (relay) ที่เดิมเป็นคู่เปิด (off) แต่เมื่อใช้นิ้วมือแตะแผ่นสัมผัส (touch plate) ของวงจรสวิทช์สัมผัสแล้วจะกลายเป็นคู่ปิด (on) เข้าที่สวิทช์ S1 ของวงจรทริกเกอร์ของโนม จะทำให้เราสามารถทริกเกอร์ตัวกำเนิดเอ็นเวลโลพของ VCF และ VCA ได้นานตราบเท่าที่เราเอานิ้วมือแตะที่แผ่นสัมผัส R1 กำหนดความชัดป้อนของวงจรเอาไว้ที่ 10 MΩ เมื่อ



รูปที่ 3.18 ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรสวิทช์สัมผัสพร้อมแหล่งจ่ายไฟ



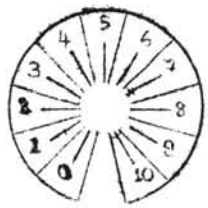
รูปที่ 3.19 แสดงการต่อส่วนที่เป็นคีย์ต่าง ๆ (ดูจากด้านบน)



รูปที่ 3.20 ขยายให้เห็นด้านล่างของแผ่นคีย์แต่ละแผ่น

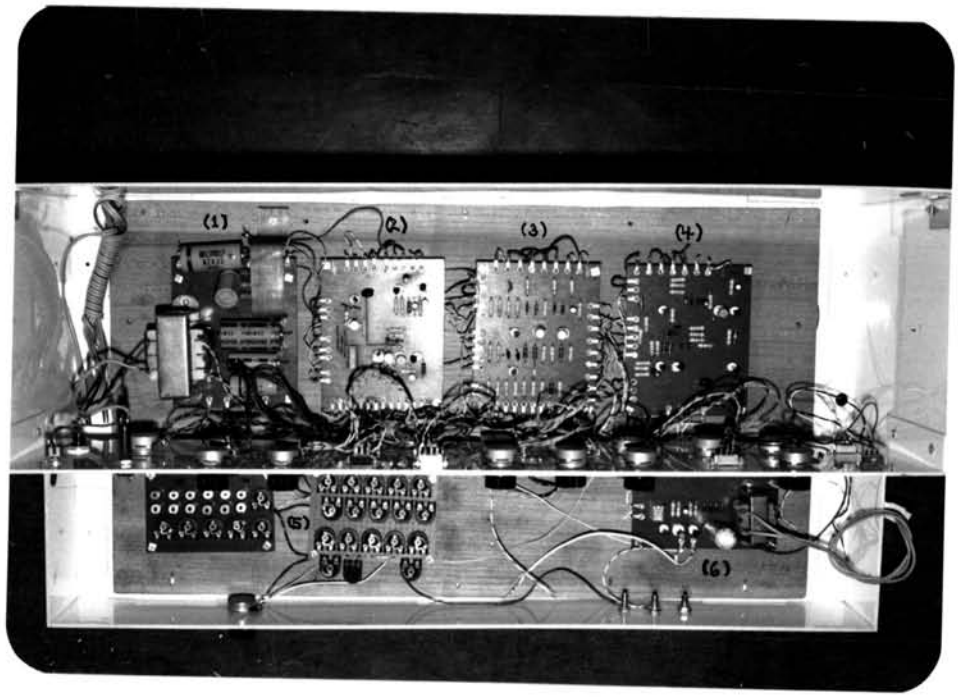
เอานิ้วแตะแผ่นสัมผัส ร่างกายของเราจะเป็นเสมือนกับเสาอากาศที่ชักนำสัญญาณจากไฟบ้าน (50 เฮิทซ์) เข้ามาในวงจร Q1 จะขยายสัญญาณทำให้ Q2 นำกระแส และจะทำให้ Q3 นำกระแสตามไปด้วย C1 จะช่วยหน่วงไว้ไม่ให้เกิดการกระเพื่อมตามความถี่ของสัญญาณที่เข้ามา แผ่นสัมผัสซึ่งในที่นี้ใช้แท่งทองเหลืองต้องพยายามให้อยู่ใกล้ขั้วเกทของ Q1

เวลาเล่นคีย์ ใช้นิ้วมือแตะหมุดโลหะ กดแผ่นคีย์ลงมา จังหวะแรกทองเหลืองสปริงจะสัมผัสกับทองเหลืองแท่งที่ 1 ทำให้ VCO สร้างรูปคลื่นที่มีความถี่ขึ้นอยู่กับแรงดันซึ่งป้อนจากวงจรตัวควบคุมคีย์บอร์ดผ่านแผ่นคีย์เข้าสู่ VCO จังหวะที่ 2 ด้านทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์จะสัมผัสทองเหลืองแท่งที่ 2 มีผลไปทริกเกอร์ VCF และ VCA ให้ทำงาน เมื่อปล่อยมือ ทองเหลืองสปริงจะสปริงแผ่นคีย์ขึ้นไปอยู่ในลักษณะเดิม ดังนั้น VCO หยุดสร้างรูปคลื่น และ VCF, VCA หยุดทำงาน



รูปที่ 3.21 แสดงการแบ่งหน้าปัทม์ของตัวควบคุมต่าง ๆ

รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายภายนอกของเครื่องสังเคราะห์เสียงที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.23 ภาพถ่ายภายในของเครื่องสังเคราะห์เสียงที่สร้างขึ้น

รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายแผงด้านหน้าของเครื่องสังเคราะห์เสียงที่สร้างขึ้น

โดยที่ (1) คือแหล่งจ่ายไฟ , (2) VCO , (3) VCF, (4) VCA , (5) ตัวควบคุมคีย์บอร์ด , (6) สวิทช์สัมผัส