

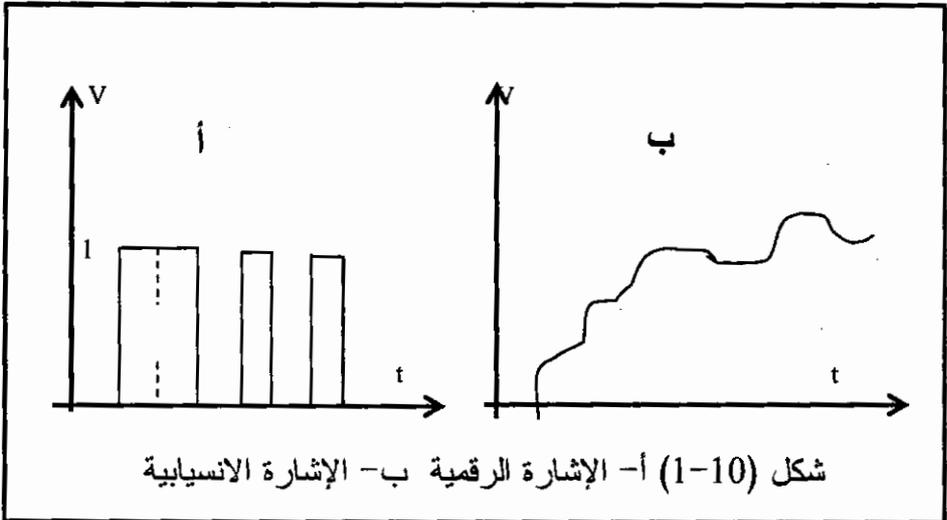
10 الفصل العاشر

التحويل من رقمي إلى انسيابي والعكس

Analog to Digital and Digital to Analog Conversion

1-10 مقدمة

إن عصر الإلكترونيات الذى نعيشه الآن قد فرض علينا التشابك بين الإشارات الرقمية والانسحابية بصورة لم يسبق لها مثيل . لذلك كانت الحاجة ملحة جدا لإيجاد الوسائل التى تقوم بعملية تحويل الإشارات من الصورة الرقمية إلى الصورة الانسحابية والعكس . إن الإشارة الرقمية هى تلك الإشارة التى لها مستويان مميزان فقط . المستوى العالى منهما يرمز له بالرمز 1 (واحد أو High) أما المستوى المنخفض فيرمز له بالرمز 0 (صفر أو Low) . فى حالة إشارة الجهد فإن المستوى العالى قد يكون 5 فولت تقريبا والمستوى المنخفض صفر فولت تقريبا وهذا هو نظام TTL الأكثر شيوعا وهناك الأنظمة الأخرى التى لا يتسع المجال لذكرها هنا والتى ينفرد كل نظام منها بمستويات الجهد الخاصة به . أما الإشارة الانسحابية فهى الإشارة التى من الممكن أن تأخذ مالا نهاية من القيم ، أو ينساب شكلها أو مقدارها بين مستوييها الأعلى والأدنى . فمثلا لو أن لدينا إشارة انسحابية يتراوح جهدها ما بين الصفر وثمانية فولتات فإن ذلك يعنى أن جهد هذه الإشارة يمكن أن يأخذ مالا نهاية من القيم (3,12 و 4,005 و 7,999.... وهكذا) بين هاتين القيمتين . شكل (1-10) يوضح مثلا لشكل إشارة رقمية وأخرى انسحابية .



إن نظاما بسيطا مثل نظام تقطير المياه الذى يستخدم الحاسب كأداة من أدوات التحكم لهو خير مثال لتوضيح الأماكن التى تكون فيها الحاجة ماسة لوجود مثل هذه المحولات . فى هذا النظام نجد أن أى إشارة قادمة من تنك التقطير لا يتم إدخالها إلى الحاسب إلا بعد تحويلها إلى الصورة الرقمية باستخدام المحول

الانسيابي/الرقمي Analog to Digital Converter, A/D وأحيانا أيضا يرمز له بالرمز ADC . كذلك فإن أى إشارة تحكم خارجة من الحاسب وقيل أن تصل إلى تلك التقطير فإنه لابد من تحويلها إلى الصورة الانسيابية عن طريق المحول الرقمي/الانسيابي Digital to Analog Converter D/A وأحيانا يرمز له أيضا بالرمز DAC . هذا الفصل سيشرح بالتفصيل عمل هذه المحولات والطرق المختلفة لكل منها ومميزات كل طريقة وسوف نبدأ بشرح المحول الرقمي/الانسيابي أولا لبساطته .

10-2 المحول الرقمي/الانسيابي D/A أو DAC

مهمة المحول الرقمي/الانسيابي هي تحويل الدخل الرقمي إلى خرج انسيابي . شكل (10-2أ) يوضح رسم صندوقى لمحول رقمى/انسيابي ذى 4 بتات ، أى أن دخله يتكون من 4 بتات ، وبالطبع فإن له خرجا واحدا فقط وهو الخرج الانسيابي . أما علاقة الخرج بهذه الدخول فهي أن الخرج يأخذ قيمة انسيابية تتناسب مع القيمة العددية للدخل والتي تتراوح بين القيمة 0000 وهي القيمة الصغرى والقيمة 1111 وهي القيمة العظمى وذلك على حسب الواحد والأصفار فى شفرة الدخل . شكل (10-2ب) يبين جميع القيم النسبية المختلفة (وليس قيما مطلقة كما سنرى) التى يمكن أن يأخذها الخرج . شكل (10-3) عبارة عن رسم توضيحي للجدول الموجود فى شكل (10-2ب) وبالنظر لهذا الشكل يمكننا القول بأن القيمة العظمى للخرج قد تم تقسيمها إلى 15 مستوى متساوية الأبعاد والبعد بين كل مستوى والذى يليه سىساوى القيمة العظمى للخرج مقسومة على عدد هذه المستويات . لذلك فإن قيمة الخرج بالفولت والمقابلة لأى شفرة من شفرات الدخل يمكن حسابها بسهولة كما فى المثال التالى :

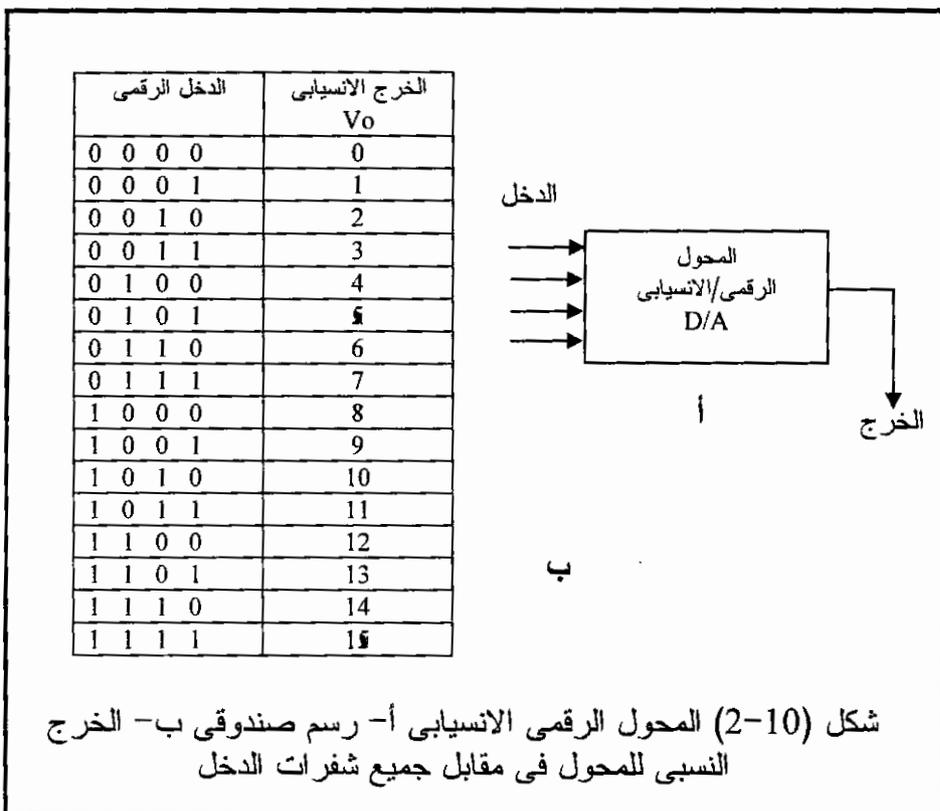
مثال 10-1

لديك محول رقمى/انسيابي D/A ذو 4 بتات القيمة العظمى لخرجه هي 5 فولت فما هي قيمة الخرج إذا كانت بتات الدخل عليها الشفرة 1001 . الشفرة 1001 تمثل العدد 9 والشفرة العظمى هي 1111 وهي تمثل العدد 15 وهذه تقابل القيمة الانسيابية 5 فولت ، لذلك فإن الخرج يمكن حسابه من العلاقة التالية :

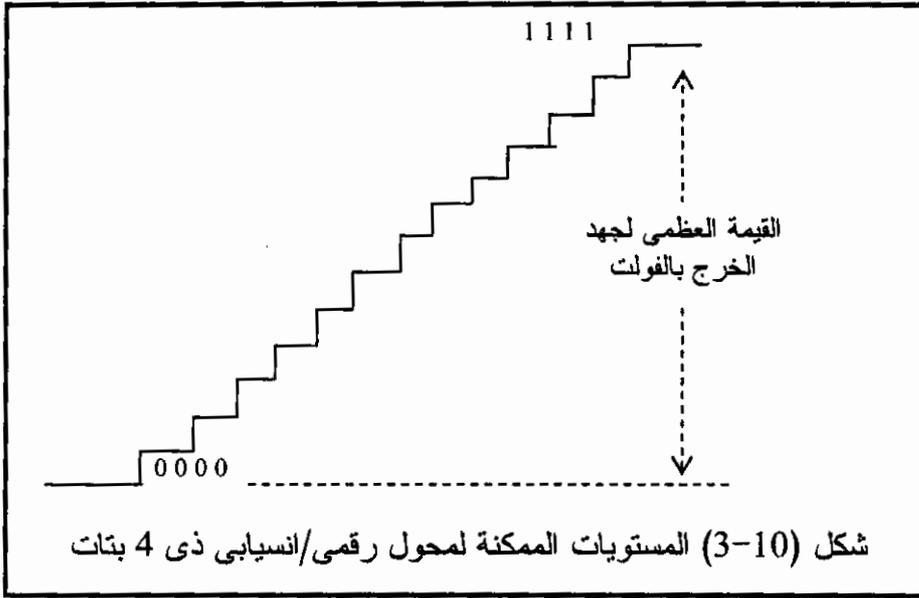
الخرج الانسيابي = $\frac{\text{القيمة العظمى للخرج الانسيابي} \times \text{القيمة العددية للشفرة المطلوب تحويلها}}{\text{القيمة العددية للشفرة العظمى للدخل}}$

$$= \frac{9 \times 5}{15} = 3 \text{ فولت}$$

أى أن الشفرة 1001 سيقابلها 3 فولت فى الخرج . جدول 1-10 يبين كل قيم الخرج بالفولت المقابلة لكل شفرة من شفرات الدخل كما فى المثال السابق محسوبة بالعلاقة السابقة .



باجراء مقارنة بين المحول الرقمى/الانسيابى وفاكك الشفرة Decoder نرى أن المحول الرقمى/الانسيابى ما هو إلا فاكك للشفرة أو منتخب ذو خرج واحد فقط وهذا الخرج يأخذ قيمة جهدية على حسب شفرة الدخل . الفرق بينهما أن المحول الرقمى/الانسيابى له خرج واحد يأخذ العديد من القيم الممكنة بين قيمتين صغرى وكبرى ، أما فاكك الشفرة فإن له 2^n من الخرج كل منها لا يأخذ إلا القيمة (واحد أو صفر) ويكون واحدا فقط من هذه الخرج فعلا وباقى الخرج خاملة على حسب شفرة الدخل ، هذا مع العلم أن n هى عدد بتات فاكك الشفرة أو المنتخب .



جدول 1-10 قيمة الخرج بالفولت لكل شفرة من شفرات الدخل لمحول رقمي انسيابي 4 بتات ، القيمة العظمى لجهد الخرج له هي 5 فولت ،

الدخل الرقمي	الخرج الانسيابي بالفولت V_o
0 0 0 0	0.000
0 0 0 1	0.333
0 0 1 0	0.666
0 0 1 1	1.000
0 1 0 0	1.333
0 1 0 1	1.666
0 1 1 0	2.000
0 1 1 1	2.333
1 0 0 0	2.666
1 0 0 1	3.000
1 0 1 0	3.333
1 0 1 1	3.666
1 1 0 0	4.000
1 1 0 1	4.333
1 1 1 0	4.666
1 1 1 1	5.000

إن دوائر المحول الرقمي/الانسيابي D/A تتكون دائما من شبكة مقاومات ومجمع للتيار . شبكة المقاومات تكون مهمتها هي تحقيق التيار الذي يتناسب مع القيمة

العديدية للدخل الثنائي وأما المجمع فيقوم بتجميع التيارات الخارجة من جميع فروع شبكة المقاومات وعادة ما يكون هذا المجمع عبارة عن مكبر للعمليات Operatonal Amplifier كما سنرى .

1-2-10 المحول الرقمي/الانسيابي باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائيا

شكل (10-4) يوضح دائرة هذا المحول الرقمي/الانسيابي حيث المفاتيح b_0 إلى b_3 هي عبارة عن مفاتيح اليكترونية ويمكن اعتبارها ترانزستورات . عندما يكون أى من هذه المفاتيح يساوى واحدا فإنه يكون متصلا بالجهد V أما عندما يكون هذا المفاتيح يساوى صفرا فإنه يكون متصلا بالأرضى . لاحظ أن هذه المفاتيح b_0 إلى b_3 تمثل فى الحقيقة الدخل الرقمي للمحول . التيار I الداخلى لمكبر العمليات يمكن حسابه من المعادلة التالية :

$$I=(V/R_1)b_3 + (V/2R_1)b_2 + (V/4R_1)b_1 + (V/8R_1)b_0 \quad (1-10)$$

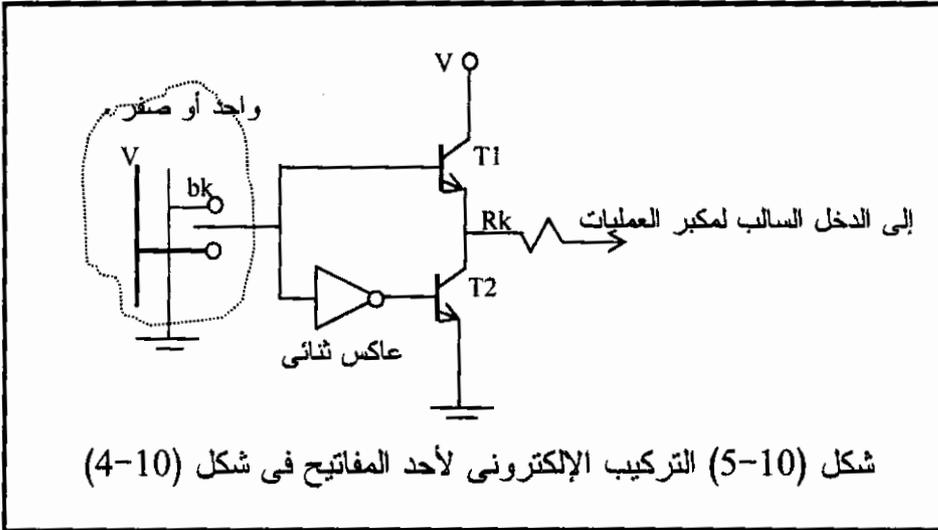
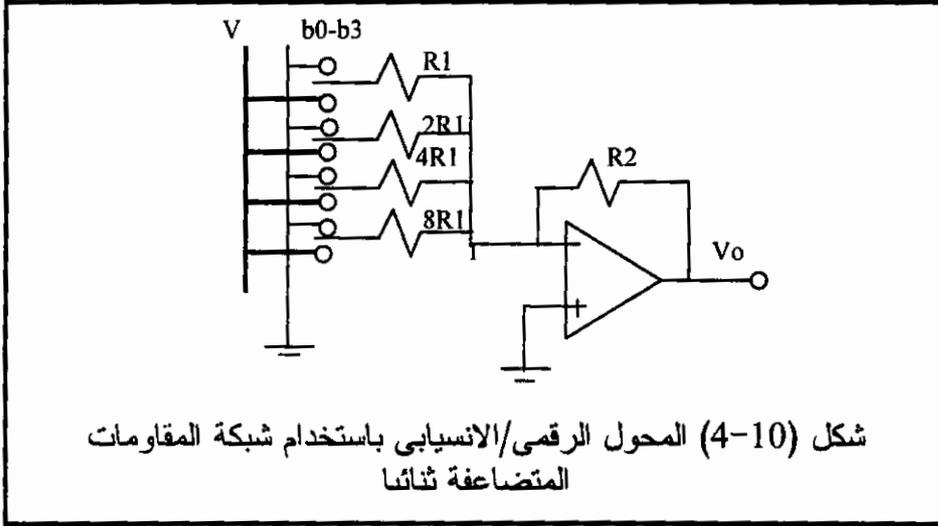
وأما جهد الخرج V_o فإنه يساوى حاصل ضرب التيار السابق فى $(-R_2)$ كما نعلم من خواص مكبر العمليات . مع بعض الإختصارات للمعادلة (1-10) يمكن كتابة الصورة النهائية لمعادلة جهد الخرج V_o كما يلى :

$$V_o=(-VR_2/8R_1) [8b_3 + 4b_2 + 2b_1 + b_0] \quad (2-10)$$

لاحظ من المعادلة (2-10) أنه بالتحكم فى قيم كل من R_1 , R_2 , V يمكن التحكم فى مستوى أو قيمة جهد الخرج V_o . فمثلا لو أخذنا قيم المتغيرات R_1 و R_2 و V بحيث أن القيمة $(VR_2/8R_1)$ تساوى -1 فإنه بالتعويض عن قيم b_0 إلى b_3 بواحد أو صفر فإنه يمكننا إيجاد جميع القيم الممكنة لجهد الخرج V_o . فمثلا إذا كانت $0000=b_3b_2b_1b_0$ فإن الخرج V_o سىساوى صفر فولت وأما إذا كانت الشفرة $1111=b_3b_2b_1b_0$ فإن الخرج V_o فى هذه الحالة سىكون 15 فولت ، وهكذا يمكن حساب جهد الخرج لأى شفرة دخل . حاول أيضا تغيير قيم المتغيرات R_1 , R_2 , V بحيث تتحكم فى القيمة العظمى لجهد الخرج .

شكل (10-5) يبين تركيب واحد من المفاتيح الإليكترونية b_k الموجودة فى شكل (10-4) . عندما يكون $b_k=1$ فإن الترانزستور T_1 يكون موصلا أى ON وبذلك يتم توصيل الجهد V على الطرف الأيسر للمقاومة R_k , لاحظ أنه فى هذه الحالة ونتيجة وجود العاكس فإن الترانزستور T_2 يكون غير موصل أى OFF

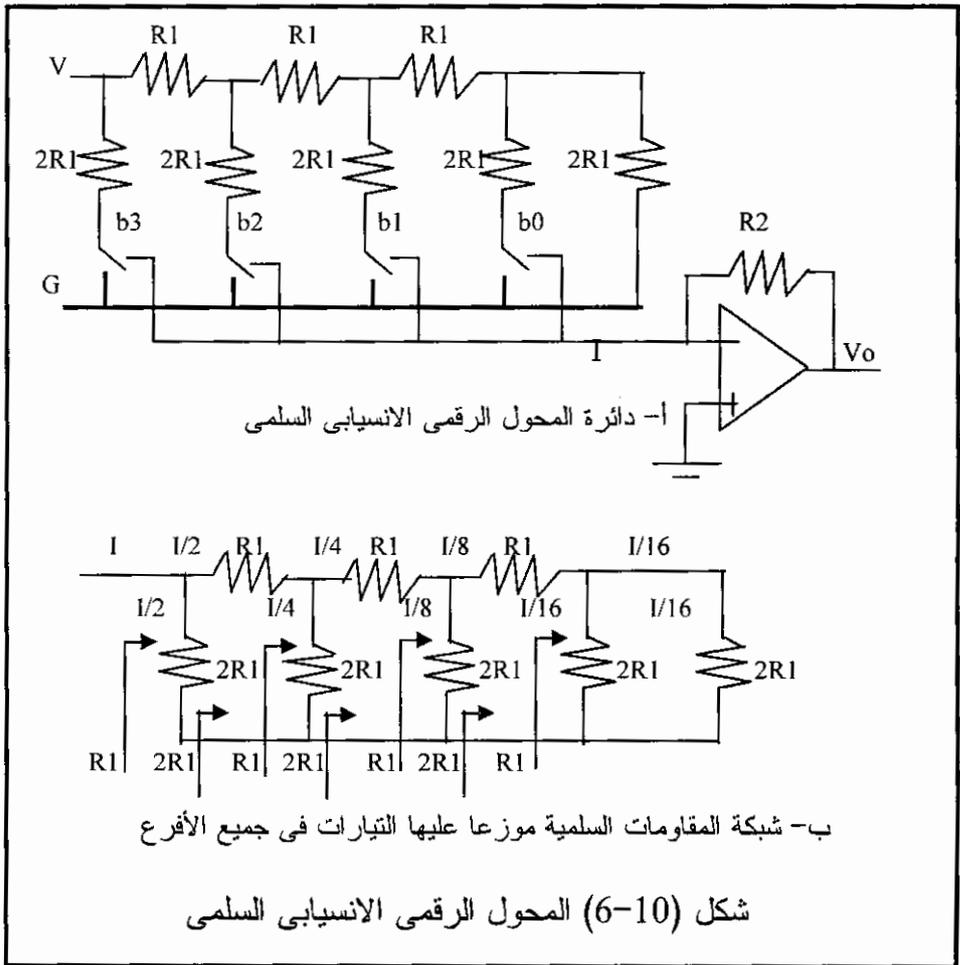
وبذلك نضمن أن المقاومة R_k ستكون معزولة من الأرضى فى حالة كون $b_k=1$. أما إذا كانت $b_k=0$ فإن الترانزستور $T1$ يكون OFF بينما أنه نتيجة العاكس فإن الترانزستور $T2$ يكون ON وبذلك توصل المقاومة R_k على الأرضى وتعزل عن مصدر الجهد V .



2-2-10 المحول الرقمى/الانسيابى باستخدام شبكة المقاومات السلمية ، Ladder network

(سلمية نسبة إلى سلم أو سلالم Ladder)

من عيوب دائرة المحول الرقمي/الانسيابي السابقة أن النسبة بين أصغر مقاومة وأكبر مقاومة كبيرة جدا وهذه النسبة تزداد بزيادة عدد البتات في دخل المحول ، فمثلا في حالة المحول ذي الثمانية بتات فإنه لو كانت أصغر مقاومة هي R فإن أكبر مقاومة ستكون $128R$. هذه النسبة الكبيرة سوف تضطر المصنع إلى تصنيع قيم كبيرة للمقاومات وكما نعلم فإن التفاوت في قيمة المقاومة يزداد بزيادة قيمتها مما سيؤدي إلى عدم دقة في خرج المحول الرقمي/الانسيابي . كذلك فإنه بما أن جميع دوائر المحولات الرقمية/الانسيابية تقريبا تصنع على دوائر تكاملية فإن وجود مثل هذه المقاومات الكبيرة يحتاج إلى مساحات كبيرة على الدائرة التكاملية مما يتسبب في تقليل كثافة المكونات على الشريحة وصعوبة في تصنيعها .



شكل (10-16) يبين دائرة المحول الرقمي/الانسيابي الجديدة ، شبكة المقاومات السلمية ، والتي تستخدم قيمتين فقط للمقاومات هما $R1$ و $2R1$. شكل (10-16) ك ب) يبين هذه الشبكة على حدة وقد وزعت عليها التيارات في الأفرع المختلفة ، وكذلك وضحت على هذا الشكل قيمة المقاومة عند النقاط المختلفة على الشبكة . أهم ملاحظة على هذه الشبكة هي أنها استخدمت قيمتين فقط من المقاومات وهما $R1$ و $2R1$ وبذلك تم التغلب على التفاوت الكبير في قيم المقاومات الموجود في الطريقة السابقة .

بالنظر إلى شكل (10-16) نلاحظ أن التيار في كل فرع من أفرع الشبكة موزع بالطريقة الثنائية المطلوبة ، فمثلا في الفرع الأول التيار يساوى $I/2$ وفي الفرع الثاني $I/4$ وفي الفرع الثالث $I/8$ وهكذا بحيث أن مجموع التيارات الداخلة لمكبر العمليات ستكون :

$$I = (I/2)b_3 + (I/4)b_2 + (I/8)b_1 + (I/16)b_0 \quad (3-10)$$

من هذه المعادلة وبعد بعض الإختصارات البسيطة يمكن حساب قيمة جهد الخرج V_0 في هذه الحالة والذي سيعطى بالمعادلة الآتية :

$$V_0 = (-R_2 I/16) [8b_3 + 4b_2 + 2b_1 + b_0] \quad (4-10)$$

وهي نفس المعادلة التي حصلنا عليها في الحالة السابقة . لاحظ أن قيمة جهد الخرج V_0 في هذه الحالة يمكن التحكم فيه بالمتغيرات R_2 , I حيث التيار I يمكن أن يعطى بالعلاقة :

$$I = (V/R_1) \quad (5-10)$$

حيث R_1 هي مقاومة دخل الشبكة عند طرفي الجهد V .

10-2-3 تصنيفات المحولات الرقمية/الانسيابية

هناك العديد من العوامل التي يمكن تصنيف المحولات الرقمية/الانسيابية على أساسها ومنها ما يلي :

10-2-3-1 مستوى جهد الخرج

كما رأينا فإن مستوى جهد الخرج في المحولات الرقمية/الانسيابية يتوقف على قيم المقاومات في الشبكة المستخدمة R_1 وكذلك المقاومة المستخدمة كتغذية

عكسية في مكبر العمليات R2 وأيضا على جهد المصدر V . إذا تم بناء المحول باستخدام عناصر منفصلة فإنه في هذه الحالة ستكون الفرصة كبيرة لاستخدام أى من المقاومتين R1 أو R2 في عملية التحكم في مستوى جهد الخرج ، أما إذا تم بناء المحول بدائرة تكاملية فإن عملية التحكم في جهد الخرج في هذه الحالة ستكون صعبة إذا لم تكن مستحيلة في الوقت الحاضر وفي هذه الحالة سيكون جهد المصدر V هو الوحيد الممكن استخدامه في عملية التحكم في جهد الخرج Vo .

10-2-3-2 المقدرة التحليلية Resolution

في المثال السابق عرضنا محولا رقميا/انسيابيا ذا 4 بتات وكانت القيمة العظمى لجهد الخرج هي 5 فولت ورأينا في جدول 1-10 كيف أنه كلما ازدادت شفرة الدخل بمقدار عدد واحد فإن الخرج يزيد بمقدار ثلث فولت تقريبا . أى أن أصغر جهد يمكن لهذا المحول أن يميزه أو يتعرف عليه هو ثلث فولت فقط . بالطبع فإنه كلما كان هذا الجهد الممكن تمييزه صغيرا كلما كان هذا المحول أفضل . هذا الأصغر جهد الذى يمكن تمييزه بواسطة المحول هو ما يسمى بمقدرة المحول التحليلية Resolution . لنفس المثال السابق افترض أن المحول الرقمية/الانسيابي كان 8 بتات في الدخل بدلا من 4 ، في هذه الحالة فإن أصغر جهد يمكن تمييزه بالمحول سيكون جزء من 256 من الفولت وهذه بالطبع كمية صغيرة وذلك يوضح لنا مدى اعتماد المقدرة التحليلية للمحول على عدد البتات في هذا المحول . تعرف النسبة المئوية للمقدرة التحليلية بالعلاقة الآتية :

$$\text{النسبة المئوية للمقدرة التحليلية} = \frac{1}{2^n - 1} \times 100\%$$

حيث n هي عدد بتات الدخل . فمثلا للمحول ذي 4 بتات فإن هذه النسبة ستكون %6,7 . وهكذا يمكن حساب هذه النسبة لأى محول وبالطبع كلما قلت هذه النسبة كلما كانت المقدرة التحليلية للمحول أحسن كلما كان المحول أفضل .

10-3-2-3 الخطية Linearity

من المتوقع أن يكون المحول الرقمية/الانسيابي خطى ، بمعنى أن جهد الخرج Vo يكون عبارة عن دالة خطية في الدخل الثنائى للمحول ، فمثلا إذا كان الدخل الثنائى هو العدد 3 وكان جهد الخرج في هذه الحالة يساوى 0,3 فولت فإنه عندما يكون الدخل الثنائى هو العدد 9 فيجب إذا كان المحول خطيا أن يكون جهد الخرج يساوى 0,9 فولت . ولكن عادة ما تحيد معظم المحولات عن هذه الخطية وذلك نتيجة لمصادر كثيرة منها عدم الخطية في قيم المقاومات

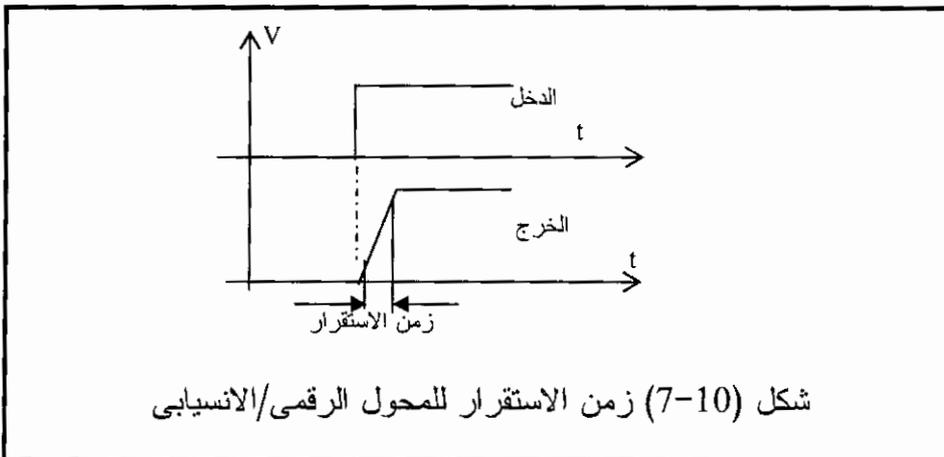
المستخدمة ، وكذلك فإن المفاتيح الإلكترونية التي تمثل ثنائيات الدخل والتي هي عبارة عن ترانزستورات هي في الحقيقة مصدر لعدم الخطية حيث أنها تضيف قيما جديدة لقيم المقاومات . هذه المفاتيح عندما تكون ON لا تكون مقاومتها صفرا بالضبط كما ذكرنا ولكنها تكون مقاومة صغيرة ، وكذلك عندما تكون OFF فإن مقاومتها لا تكون مالا نهاية كما هو متوقع ولكنها تكون قيمة كبيرة . كل هذه عوامل تؤثر في خطية المحول الرقمي/الانسيابي .

10-2-3-4 الدقة Accuracy

إذا كنت تتوقع أن يكون خرج المحول الرقمي/الانسيابي يساوى مثلا 1,50 فولت ولكن بدلا من ذلك وجدته 1,55 فولت ، في هذه الحالة فإننا نقول أن هناك عدم دقة في خرج المحول . ومن مصادر عدم الدقة المقاومات المستخدمة فكلها بها نسبة تفاوت معينة ، وكذلك جهد المرجع V يكون مصدرا لعدم الدقة لتغير قيمته نتيجة مرور الزمن ، هناك أيضا التغير في درجة حرارة الوسط الموجود فيه المحول ومن المعلوم أن أى مقاومة تتأثر قيمتها بتغير درجة حرارتها ، وكذلك أيضا فإن مكبر العمليات المستخدم يتأثر بعوامل كثيرة منها درجة الحرارة ولذلك يكون مصدرا أيضا لعدم دقة المحول .

10-2-3-5 زمن الإستقرار Settling time

عندما يتغير الدخل الرقمي للمحول الرقمي/الانسيابي فإن خرجه لا يتغير إلى القيمة المناظرة للدخل الجديد لحظيا ولكنه يأخذ بعض الوقت وقد يكون هناك Over shoot في الخرج أيضا . ولقد استقر الرأى على أن زمن الاستقرار هو الزمن الذى يأخذه المحول حتى يصل خرجه إلى 90 % من القيمة التى من المفروض أن يصل إليها . يوضح شكل (10-7) هذا الزمن وعادة ما يكون هذا الزمن فى حدود خمسمائة نانوثانية 500 ns .



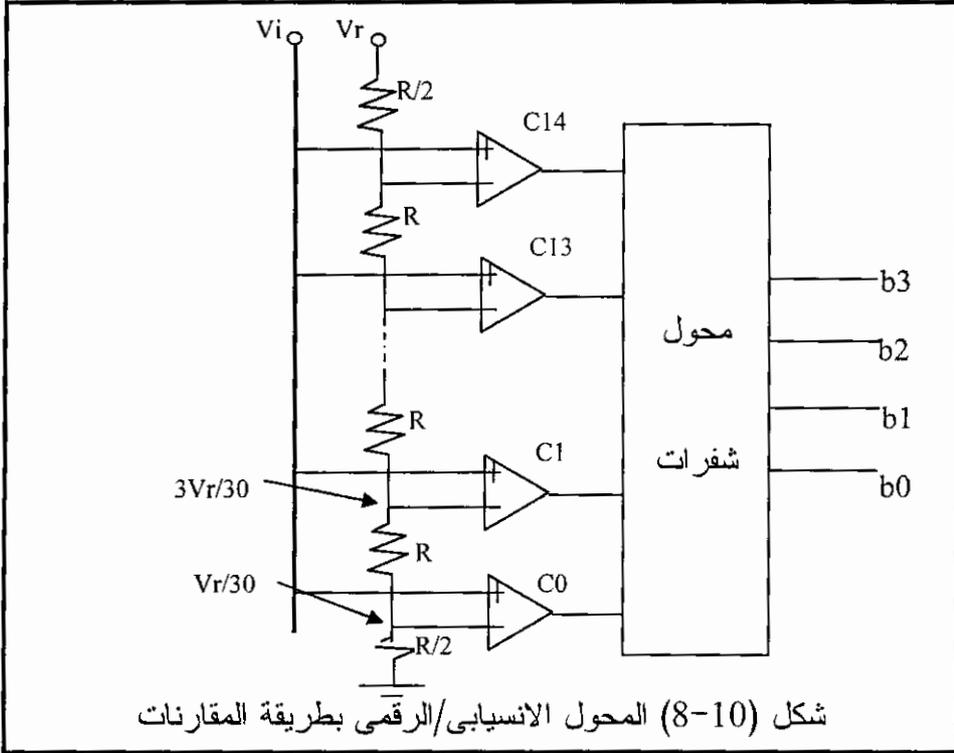
10-3 التحويل من انسيابى رقمى A/D أو ADC

يقوم المحول الانسيابى الرقمى بتحويل الإشارة الانسيابية إلى إشارة رقمية وعلى ذلك فإنه سيكون له دخل واحد وهو الإشارة الرقمية وعدد n من البتات فى الخرج وذلك على حسب نوع المحول ، والمتاح فى السوق والشائع الإستخدام هى المحولات ذات 8 بتات و 10 بتات و 12 بتا . يجب أن نتذكر هنا أنه معنى أن الخرج 4 بتات مثلا فإن ذلك يعنى أن الخرج الرقمى يمكن أن يأخذ 2^4 أى 16 شفرة مختلفة وكل واحدة من هذه الشفرات تقابل قيمة معينة من جهد الدخل الانسيابى . أنواع المحولات الانسيابية/الرقمية كثيرة ويتوقف سعر (وبالتالى جودة) الواحد منها على عدد بتات الخرج وعلى سرعة تحويل المحول من جهد انسيابى إلى جهد رقمى . إنه بالطبع كلما زاد عدد بتات خرج المحول كلما ازداد سعره لأن دائرته تكون أكثر تعقيدا وتكون مقدرته التحليلية Resolution أفضل . تحدد سرعة المحول بالزمن الذى يأخذه لتحويل الإشارة الانسيابية إلى الصورة الرقمية وعلى هذه السرعة يتوقف سعر المحول بدرجة كبيرة وعلى حسب هذه السرعة توجد أنواع كثيرة وطرق عديدة للتحويل من الصورة الانسيابية إلى الرقمية وسنشرح بعض هذه الطرق فيما يلى .

10-3-1 المحول الانسيابى الرقمى باستخدام المقارنات

Comparator A/D Converter

شكل (10-8) يبين دائرة محول انسيابى/رقمى ذى 4 بتات بطريقة المقارنات . إن هذا النوع من المحولات يعتمد على تخصيص مقارن لكل مستوى من مستويات الجهد ، وكما هو مبين فى هذا الشكل فإن هذا المحول سيكون له 2^4 أى 16 مستوى منها مستوى الصفر . بالنظر لهذا الشكل نجد أن هناك مصدرين للجهد أحدهما هو الجهد V_i وهو الجهد الانسيابى المطلوب تحويله إلى الصورة الرقمية والجهد الآخر هو جهد المرجع V_r . جهد المرجع هذا قد تم تقسيمه إلى 16 مستوى باستخدام 16 مقاومة كلها لها القيمة R ما عدا مقاومتى الطرفين فإن كلا منهما قيمتها $R/2$. لذلك فإن هذا التوزيع للمقاومات سيجعل جهد المرجع للمقارن C_0 يساوى $V_r/30$ وللمقارن C_1 يساوى $3V_r/30$ وللمقارن C_3 يساوى $5V_r/30$ وهكذا . لاحظ أن أى واحد من هذه المقارنات يكون خرج واحد (ثنائيا) إذا كان دخله الموجب المتصل بجهد الدخل V_i أكبر من دخله السالب المتصل بجهد المرجع ويكون خرج هذا المقارن صفرا إذا كان دخله السالب أكبر من دخله الموجب . ولذلك فإننا نستطيع استنتاج خرج جميع المقارنات C_0 إلى C_{15} كما يلى :



- إذا كان $V_r/30 < V_i < 3V_r/30$ $C_0=1$
 إذا كان $3V_r/30 < V_i < 5V_r/30$ $C_0=1, C_1=1$
 إذا كان $5V_r/30 < V_i < 7V_r/30$ $C_0=1, C_1=1, C_2=1$
 إذا كان $7V_r/30 < V_i < 9V_r/30$ $C_0=1, C_1=1, C_2=1, C_3=1$
 وهكذا

لاحظ أن خرج المقارنات لا يمثل الخرج الثنائي المطلوب ، لذلك فقد تم وضع محول شفرات يقوم بتحويل خرج المقارنات الذي يعتبر شفرة ذات 15 بتا إلى الشفرة الثنائية المعروفة ذات 4 بتات . جدول 2-10 يوضح جدول الحقيقة Truth table لهذا المشفر . إن المقدرة التحليلية Resolution لهذا المحول تساوي $V_r/15$ وهي أصغر جزء من جهد الدخل يمكن تمييزه ، لاحظ أن المقدرة التحليلية تتحسن بزيادة عدد بتات المحول ، فمثلا للمحول ذي 8 بتات ستكون المقدرة التحليلية $V_r/255$ ، لاحظ أيضا أن عدد المقارنات يزداد جدا بزيادة عدد بتات المحول فللمحول ذي 8 بتات مثلا سنحتاج إلى 255 مقارن وهذا يعتبر عددا كبيرا وذلك يعتبر أحد عيوب هذه الطريقة ، هذا بخلاف العدد الكبير من المقاومات بالإضافة إلى المشفر . إن أهم ميزة لهذه الطريقة هي السرعة فإن

هذه الطريقة تعتبر أسرع الطرق على الإطلاق فإنه بمجرد وضع الدخل الانسيابي V_i فإنه يحول فوراً إلى الصورة الرقمية في زمن يكاد يكون صفراً وهو زمن مرور الإشارة في المقاومات والمقارنات ثم المشفر ، لذلك فإن المحولات التي تستخدم هذه الطريقة تكون أغلى الأنواع سعراً .

جدول 10-2 جدول الحقيقة لمحول الشفرات الموجود في شكل (10-8)

الدخل														الخرج				
c14	c13	c12	c11	c10	c9	c8	c7	c6	c5	c4	c3	c2	c1	c0	b3	b2	b1	b0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

10-3-2 المحول الانسيابي الرقمي باستخدام العداد الثنائي

شكل (10-9) يبين رسماً صندوقياً لدائرة هذا المحول . الإشارة المطلوب تحويلها إلى الصورة الرقمية هي الجهد V_i وكما نرى فإنه موصل على الدخل الموجب للمقارن C ، والمقارن C يعمل بنفس طريقة المقارنات التي شرحت في الطريقة السابقة . عند إعطاء نبضة على الطرف Start (ابداً) فإن خرج العداد يصبح صفراً وبالتالي يكون خرج D/A صفراً أيضاً ويكون $V_i > V_r$ وعلى ذلك يكون خرج المقارن واحداً . هذا الواحد من المقارن يجعل بوابة AND تسمح بمرور Clock وبالتالي يبدأ العداد في العد بنفس سرعة التزامن Clock . في هذه الأثناء يقوم D/A بتحويل خرج العداد من الصورة الرقمية إلى الصورة الانسيابية باستمرار ومع كل نبضة من نبضات التزامن Clock . عندما يصل

10-3-3 طريقة التقريب المتتالي

Successive Approximation A/D Conversion

تعتمد هذه الطريقة على عمل عدة تقريبات متتالية إلى أن يساوي الجهد الرقمي الجهد التماثلي V_i . شكل (10-10) يبين رسما صندوقيا لهذه الطريقة مفترضا 4 بتات . في بداية التشغيل يكون جميع ال 4 بتات غير معلومة القيمة لذلك سنفترضها $X_3X_2X_1X_0$. نبدأ عملية التقريب بافتراض أن البت ذات القيمة العظمى X_3 تساوي واحدا وباقي البتات تساوي صفرا كما يلي :

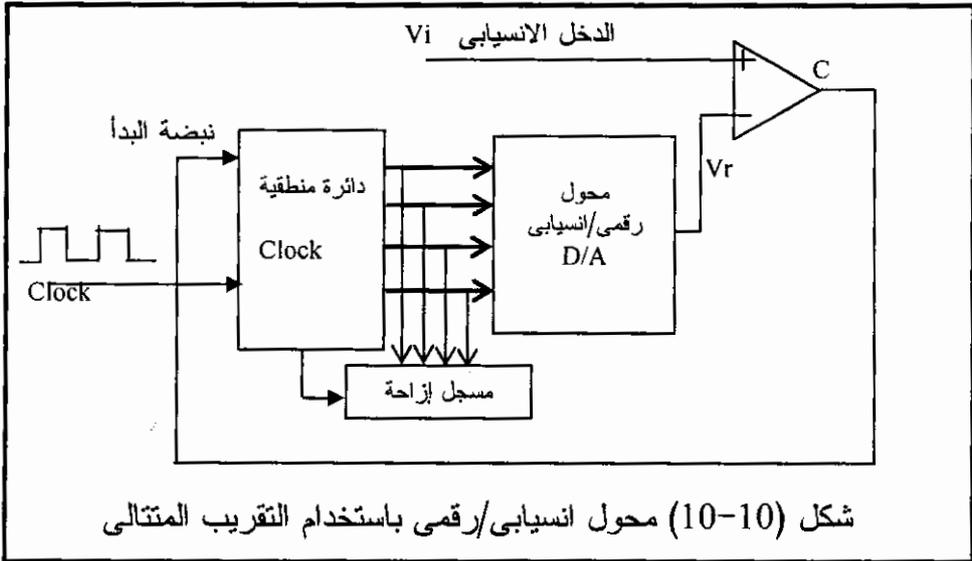
$$1000 = X_3X_2X_1X_0$$

هذه القيمة الرقمية تدخل إلى ال D/A ليحولها إلى الصورة الانسيابية V_r حيث يقوم المقارن C بمقارنة الجهد V_r مع الدخل V_i فإذا كان $V_r > V_i$ فإن ذلك يعني أن الرقم 1000 كبيرا وعلى ذلك فإن البت X_3 لا يمكن أن تكون واحدا ولا بد أن تكون صفرا ، أما إذا كان $V_r < V_i$ فإن ذلك يعني أن الرقم 1000 مازال صغيرا وعلى ذلك فإن البت X_3 لا بد وأن تكون واحدا . أي أنه بعد المقارنة الأولى فإن قيمة البت X_3 تتحدد تماما إذا كانت واحدا أو صفرا ، ولنفترض أنها تحددت بالقيمة b_3 حيث b_3 إما واحد أو صفر ، وعلى ذلك فإن الصورة الرقمية تصبح $b_3X_2X_1X_0$ حيث X_2, X_1, X_0 مازالت غير معروفة . في المحاولة الثانية نوضع البت $X_2=1$ وتبقى البتات $X_1X_0=00$ والبت b_3 تبقى كما هي في المحاولة السابقة ويتم مقارنته خرج ال D/A وهو V_r مع الدخل V_i فإذا كان $V_r > V_i$ فإن هذا يعني أن الواحد في البت X_2 كبير ولذلك فإنه يستبدل بصفر ، أما إذا كان $V_r < V_i$ فإن ذلك يعني أن الواحد في هذه البت X_2 مناسب ولذلك يبقى كما هو . وهكذا تستمر عملية التقريب ثم المقارنة مع البتات الباقية وهي X_1, X_0 ، أي أنه بعد أربع تقريبات (تساوي عدد البتات في ال D/A) تكون القيمة الرقمية الصحيحة $b_3b_2b_1b_0$ قد تم التوصل إليها وتم التحويل المطلوب .

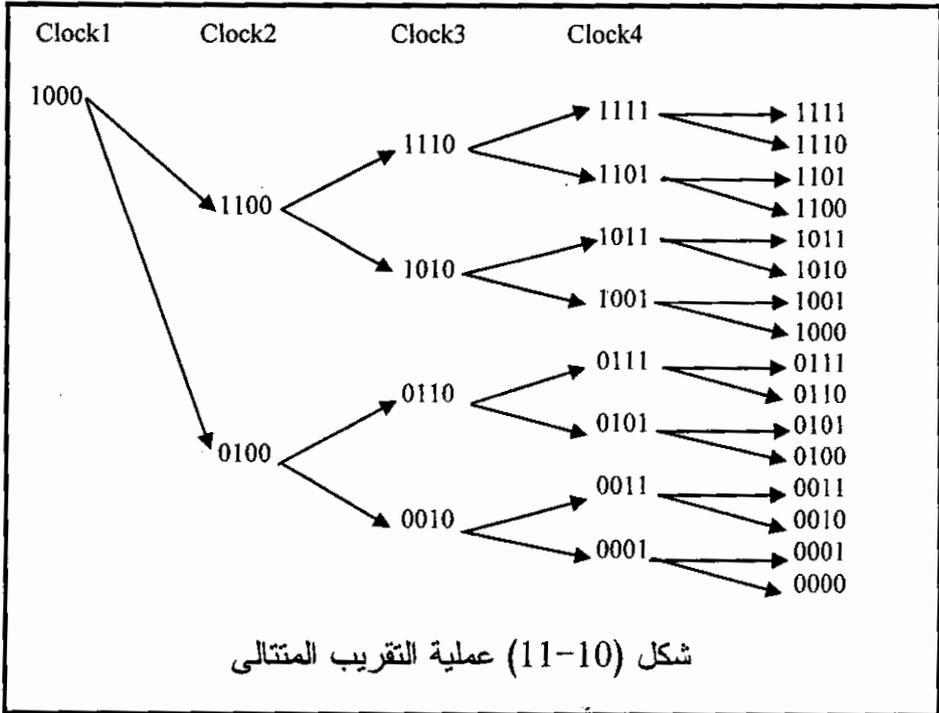
إن الدائرة المنطقية الموجودة في شكل (10-10) عليها إخراج الإشارة الرقمية الداخلة إلى ال D/A مع كل نبضة تزامن ، كما تقوم هذه الدائرة أيضا على ضوء ما إذا كان خرج المقارن يساوي واحد فإن البت المفروضة تبقى كما هي واحد وإذا كان خرج المقارن يساوي صفر فإن البت المفروضة تتغير من واحد إلى صفر قبل أن تبدأ عملية التقريب الجديدة . لاحظ أن عملية التحويل في هذه الطريقة تتم بعد عدد من نبضات التزامن يساوي عدد البتات المستخدمة وهذا ما يجعل هذه الطريقة مناسبة جدا للكثير من التطبيقات حيث أنها ليست بالبطيئة جدا كما أنها ليست مرتفعة الثمن مثل طريقة المقارنات ولا يعتمد زمن التحويل فيها على قيمة الدخل الانسيابي كما رأينا في طريقة العداد الثنائي . شكل (10-11)

يبين كيف تتم عملية التقريب المتتالية إلى أن يتم التوصل إلى القيمة الرقمية بعد أربع نبضات تزامن .

من الملاحظ أن عملية التحويل من انسيابي إلى رقمي تحتاج دائما إلى Clock أو إشارة تزامن فيما عدا فقط طريقة المقارنات فإنها لا تحتاج لهذه الإشارة ، وذلك بالطبع على العكس من عملية التحويل من رقمي إلى انسيابي والتي لا تحتاج لإشارة تزامن في أغلب الأحوال . أيضا فإن أي محول انسيابي رقمي لابد وأن تدخل إليه إشارة بدء التحويل start conversion, SC والتي على ضوءها يبدأ المحول في عملية التحويل حيث يعطي هو أيضا في نهاية هذه العملية إشارة نهاية تحويل End Of Conversion , EOC تدل على أنه قد إنتهى من عملية التحويل والتي يستفاد منها في إعطاء القيمة الجديدة للدخل . الكثير من المحولات لا تتيح الخرج الرقمي مباشرة على الأطراف إلا من خلال فاصل buffer لتسهيل عملية مواجهتها مع المعالج حيث يمكن توصيلها على مسار البيانات للمعالج لأن خرجها يكون دائما مفصولا عن مسار البيانات فلا يسبب أي مشاكل مع الإشارات الأخرى ولكن في اللحظة التي يريد فيها المعالج قراءة خرج المحول فإنه يقوم بإعطاء نبضة تنشيط لبوابات الفصل buffer التي في خرج المحول من خلال طرف يسمى عادة بخط تنشيط الخرج Output Enable, OE فتضع خرج المحول على مسار البيانات في اللحظة المناسبة التي حددها المعالج .



إن سوق الإلكترونيات في هذه الأيام مليئة بأنواع كثيرة من المحولات الانسيابية/الرقمية A/D والرقمية/الانسيابية D/A المتعددة الإمكانيات والمتعددة الأسعار أيضا وبالذات المحولات الانسيابية الرقمية التي يوجد منها البطيء وبالتالي رخيص الثمن والسريع جدا وبالتالي يكون سعره مرتفعا جدا . وتقع على المستخدم مهمة اختيار المحول المناسب للتطبيق الذي يتعامل معه . فمثلا بالنسبة لتحويل الإشارات الثابتة (dc) التي لا تتغير مع الزمن أو التي تتغير ولكن بترددات بسيطة فإنه يمكن في هذه الحالة استخدام المحولات البطيئة التي تفي بالغرض والتي تكون رخيصة الثمن أيضا . أما في حالة ما إذا كانت الإشارة المطلوب تحويلها إلى الصورة الرقمية ذات تردد عال فإنه لابد من وقفة هنا لاختيار المحول المناسب لهذه العملية . هناك نظرية تسمى نظرية التقطيع sampling theory مفادها أنه عند تحويل إشارة ذات تردد معين من الصورة الانسيابية إلى الصورة الرقمية فإنه لكي يتم الحفاظ على جميع المعلومات التي تحتويها الإشارة الانسيابية ولا يفقد منها شيء وبالذات عند تحويلها إلى الصورة الانسيابية مرة أخرى فإنه لابد وأن يكون التردد الذي تؤخذ به العينات من الإشارة sampling frequency ضعف أكبر تردد موجود في الإشارة الانسيابية على الأقل ، أي أنه يمكن أن يكون أكثر ولكن لا يجب أن يكون أقل .



كمثال على ذلك نفترض مثلا أننا نريد تحويل إشارة صوتية كلامية إلى الصورة الرقمية بهدف تخزينها في الذاكرة . من المعروف أن الصوت الآدمي يبلغ أعلى تردد فيه حوالي 3,5 كيلوهرتز باعتبار أن هذا هو التردد الذي عنده يتم تمييز الشخص من صوته والذي تكفى به نظم التليفونات تقريبا . لذلك فإنه عند تقطيع sampling هذه الإشارة فإنه لابد وأن تقطع بتردد مقداره 7 كيلوهرتز على الأقل على حسب النظرية السابقة . من ذلك تكون سرعة المحول المطلوب استخدامه في هذه الحالة تساوى واحدا مقسوما على 7 كيلوهرتز وذلك يعطى حوالي 140 ميكروثانية تقريبا على الأكثر .

إنه فى مثل هذه التطبيقات التى يتم فيها تخزين الصورة الرقمية للإشارة الانسيابية يجب أن تكون هناك حكمة وتأنى فى سرعة تقطيع الإشارة الانسيابية ، فلا يجب أن تكون السرعة بطيئة جدا عن حد نظرية التقطيع فنفقد كمية من المعلومات التى تحتويها الإشارة ولا يجب أن تكون السرعة عالية جدا عن ما حددته النظرية السابقة لأن ذلك سيكون إسرافا فى الذاكرة المستخدمة . لكى نشعر بأهمية هذا الموضوع انظر إلى المثال التالى :

- افترض أن تردد الصوت الكلامى كما ذكرنا = 3,5 كيلوهرتز .
- افترض أننا سنقطع هذه الإشارة بتردد = 7 كيلوهرتز على حسب نظرية التقطيع sampling theory وهى نظرية نيكويست .
- افترض أيضا أننا ننطق بكلمة مثل "محمد" ، فكم بايت من الذاكرة نحتاج لتخزين هذه الكلمة .
- إن نطق هذه الكلمة يستغرق حوالى نصف الثانية تقريبا إذا نطقها الشخص العادى وطالما أن كل عينة sample تخزن فى بايت ذاكرة فإن هذه الكلمة ستحتاج إلى $0,5 \times 7 = 3,5$ كيلوبايت لكى يتم تخزينها ، والأمر متروك للمستخدم فى النهاية لكى يقلل من كمية الذاكرة على حساب المعلومات (كأن يصعب تحديد صاحب الصوت مثلا عند السماع للإشارة المسترجعة من الذاكرة ثم تحويلها إلى الصورة الانسيابية) أو يحاول الحفاظ على أكبر قدر من المعلومات وذلك سيكلفه كمية هائلة من الذاكرة ، وبالطبع فإن الحد المعقول هو حد نظرية التقطيع كما ذكرنا .

10-4 تمارين

- 1- ما هو الفرق بين المحول الرقمي/الانسيابي والمنتخب أو فاك ك الشفرة decoder ؟
- 2- محول رقمي/انسيابي ذو 8 بتات شفرة دخله هي 00101100 ، ما هي قيمة خرج الانسيابي إذا كانت أعظم قيمة للخروج هي 5 فولت ؟
- 3- ارسم جدولاً وبين فيه قيمة الخرج الانسيابي المقابلة لعشر شفرات ثنائية متتالية على الدخل ابتداء من الشفرة 00000000 لنفس المحول السابق في المسألة 3.
- 4- اشرح مع الرسم طريقة التحويل من رقمي إلى انسيابي باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائياً .
- 5- ارسم دائرة محول رقمي/انسيابي ذي 8 بتات باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائياً ، واكتب قيم جميع المقاومات إذا كانت أصغر مقاومة تساوي 50 كيلو أوم .
- 6- اشرح مع الرسم طريقة التحويل من رقمي إلى انسيابي باستخدام شبكة المقاومات السلمية .
- 7- عرف المقدرة التحليلية وأوجد النسبة المئوية لها وذلك لمحول ذي 6 بتات وآخر ذو 12 بتاً .
- 8- لديك محول رقمي/انسيابي موصل على بوابة الإخراج رقم 00 ، ارسم شكل الخرج مع الزمن لهذا المحول نتيجة تنفيذ البرنامج التالي :

```
MOV A,00
```

```
xx: OUT 00
```

```
INC A
```

```
JMP xx
```

- 9- أعد التمرين السابق إذا كان البرنامج المنفذ كالتالي :

```
MOV A,00
```

```
xx: OUT 00
```

```
INC A
```

```
CP A, FF
```

```
JNZ xx
```

```
xxx: OUT 00
```

```
DCR A
```

```
CP 00
```

```
JNZ xxx
```

```
JMP xx
```

- 10- اشرح مع الرسم طريقة المقارنات للتحويل من انسيابي إلى رقمي .
- 11- كم عدد المقارنات اللازمة لبناء محول انسيابي رقمي ذي 8 بتات .
- 12- هل تحتاج طريقة المقارنات إلى نبضات تزامن clock لتشغيلها ؟
- 13- اشرح مع الرسم طريقة العداد الثنائي للتحويل من انسيابي إلى رقمي .
- 14- ارسم الدائرة الكاملة للمحول الانسيابي/الرقمي باستخدام عداد تصاعدي/تنازلي مع الشرح .
- 15- إذا كانت القيمة العظمى لجهد الدخل هي 2,5 فولت احسب زمن التحويل لقيم الجهد الآتية : 0,5 , 1 , 1,5 , 2 , 1,5 , 1 , 0,5 وذلك باستخدام طريقة العداد التصاعدي فقط ثم باستخدام طريقة العداد التصاعدي/التنازلي وذلك لمحول تماثلي رقمي ذي 4 بتات .
- 16- اشرح مع الرسم طريقة التقريب المتتالي للتحويل من انسيابي إلى رقمي .
- 17- محول تماثلي رقمي بطريقة التقريب المتتالي يعمل بنبضات تزامن clock مقدارها 500 كيلوهرتز ، ما هو زمن التحويل الذي يمكن الحصول عليه من هذا المحول .
- 18- استخدم المعالج أو الحاسب بدلا من الدائرة المنطقية الموجودة في الشكل (10-10) ليعطى التقريبات المتتالية ثم يقرأ قيمة المقارن وعلى ضوء هذه القراءة يعطى التقريب التالية وهكذا ، ارسم خريطة تدفق واكتب برنامجا بلغة الأسمبلى أو لغة C يقوم بهذه المهمة مع رسم الدائرة اللازمة بالكامل.
- 19- لديك محول تماثلي رقمي خرج من خلال بوابات ثلاثية المنطق يتم تنشيطها بخط تنشيط output enable, OE وآخر خرج مباشر ، أيهما أفضل للتعامل مع المعالج ، أشرح مع الرسم .
- 20- مطلوب توصيل محول تماثلي رقمي ذي 12 بتا مع المعالج حيث يقوم المعالج بقراءة خرج المحول ثم يرسله إلى محول رقمي/انسيابي ذي 12 بتا أيضا ، ارسم شكلا صندوقيا لهذا النظام و اشرح طريقة التوصيل موضحا ببرنامج بسيط .