الفصل العاشر 10

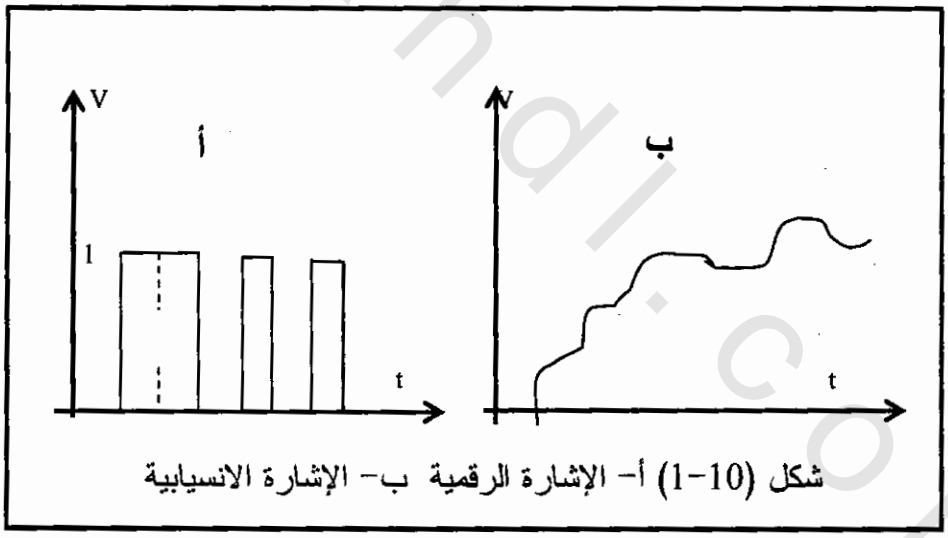
التحويل من رقمى إلى انسيابى والعكس

Analog to Digital and Digital to Analog Conversion

obeikandi.com

10-1 مقدمة

إن عصر الإلكترونيات الذى نعيشه الآن قد فرض علينا التشابك بين الإشارات الرقمية والإنسيابية بصورة لم يسبق لها مثيل . لذلك كانت الحاجة ملحة جدا لإيجاد الوسائل التى تقوم بعملية تحويل الإشارات من الصورة الرقمية إلى الصورة الإنسيابية 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 الإنسيابية فهى الإشارة التى من الممكن أن تأخذ مالانهاية من القيم ، أو ينساب شكلها أو مقدارها بين مستوييها الأعلى والأدنى . فمثلا لو أن لدينا إشارة انسيابية يتراوح جهدها ما بين الصفر وثمانية فولتات فإن ذلك يعنى أن جهد هذه الإشارة يمكن أن يأخذ مالانهاية من القيم (3,12 و 4,005 و 7,999.... وهكذا) بين هاتين القيمتين . شكل (10-1) يوضح مثالا لشكل إشارة رقمية وأخرى انسيابية .



شكل (10-1) أ- الإشارة الرقمية ب- الإشارة الانسيابية

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 بإستخدام المحول

الانسيابى/الرقمى Analog to Digital Converter, A/D وأحيانا أيضا يرمز له بالرمز ADC . كذلك فإن أى إشارة تحكم خارجة من الحاسب وقبل أن تصل إلى تلك التقطير فإنه لابد من تحويلها إلى الصورة الانسيابية عن طريق المحول الرقمى/الانسيابى 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 الرقمى/الانسيابى أولا لبساطته .

10-2 المحول الرقمى/الانسيابى D/A أو DAC

مهمة المحول الرقمى/الانسيابى هى تحويل الدخل الرقمى إلى خرج انسيابى . شكل (10-2أ) يوضح رسم صندوقى لمحول رقمى/انسيابى ذى 4 بتات ، أى أن دخله يتكون من 4 بتات ، وبالطبع فإن له خرجا واحدا فقط وهو الخرج الانسيابى . أما علاقة الخرج بهذه الدخول فهى أن الخرج يأخذ قيمة انسيابية تتناسب مع القيمة العددية للدخل والتى تتراوح بين القيمة 0000 وهى القيمة الصغرى والقيمة 1111 وهى القيمة العظمى وذلك على حسب الوحايد والأصفار فى شفرة الدخل . شكل (10-2ب) يبين جميع القيم النسبية المختلفة (وليست قيما مطلقة كما سنرى) التى يمكن أن يأخذها الخرج . شكل (10-3) عبارة عن رسم توضيحى 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 سيساوى 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/انسيابى D/A ذو 4 بتات القيمة العظمى لخرجه هى 5 فولت فما هى قيمة الخرج إذا كانت بتات الدخل عليها الشفرة 1001 .

الشفرة 1001 تمثل العدد 9 والشفرة العظمى هى 1111 وهى تمثل العدد 15 وهذه تقابل القيمة الانسيابية 5 فولت ، لذلك فإن الخرج يمكن حسابه من العلاقة التالية :

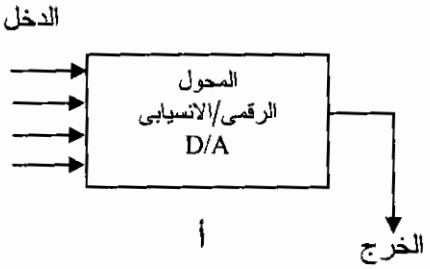
$$\text{الخرج الانسيابى} = \frac{\text{القيمة العظمى للخرج الانسيابى} \times \text{القيمة العددية الشفرة المطلوب تحويلها}}{\text{القيمة العددية للشفرة العظمى للدخل}}$$

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

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

الدخل الرقمى	الخرج الانسيابى Vo
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	2
0 0 1 1	3
0 1 0 0	4
0 1 0 1	5
0 1 1 0	6
0 1 1 1	7
1 0 0 0	8
1 0 0 1	9
1 0 1 0	10
1 0 1 1	11
1 1 0 0	12
1 1 0 1	13
1 1 1 0	14
1 1 1 1	15

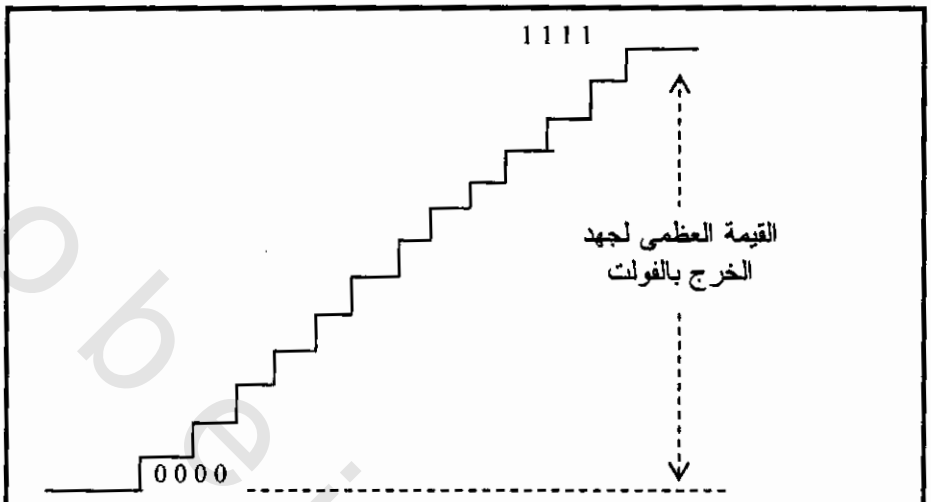
ب



أ

شكل (10-2) المحول الرقمى الانسيابى أ- رسم صندوقى ب- الخرج النسبى للمحول فى مقابل جميع شفرات الدخل

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 الخروج كل منها لا يأخذ إلا القيمة (واحد أو صفر) ويكون واحدا فقط من هذه الخروج فعالا وباقى الخروج خاملة على حسب شفرة الدخل ، هذا مع العلم أن n هى عدد بتات فاكك الشفرة أو المنتخب .



شكل (10-3) المستويات الممكنة لمحول رقمى/انسيابى ذى 4 بتات

جدول 10-1 قيمة الخرج بالفولت لكل شفرة من شفرات الدخل لمحول رقمى انسيابى 4 بتات ، القيمة العظمى لجهد الخرج له هى 5 فولت

الدخل الرقمى	الخرج الانسيابى بالفولت Vo
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 الرقمى/الانسيابى D/A تتكون دائما من شبكة مقاومات ومجمع للتيار . شبكة المقاومات تكون مهمتها هى تحقيق التيار الذى يتناسب مع القيمة

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

10-2-1 المحول الرقمى/الانسيابى باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائيا

شكل (10-4) يوضح دائرة هذا المحول الرقمى/الانسيابى حيث المفاتيح b0 إلى b3 هى عبارة عن مفاتيح اليكترونية ويمكنك اعتبارها ترانزستورات . عندما يكون أى من هذه المفاتيح يساوى واحدا فإنه يكون متصلا بالجهد V أما عندما يكون هذا المفتاح يساوى صفرا فإنه يكون متصلا بالأرضى . لاحظ أن هذه المفاتيح b0 إلى b3 تمثل فى الحقيقة الدخل الرقمى للمحول . التيار I الداخل لمكبر العمليات يمكن حسابه من المعادلة التالية :

$$I=(V/R1)b3 + (V/2R1)b2 + (V/4R1)b1 + (V/8R1)b0 \qquad (1-10)$$

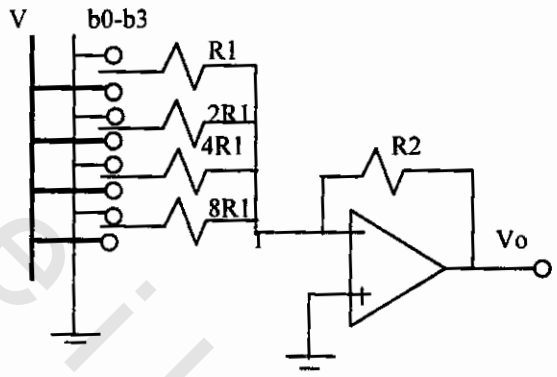
وأما جهد الخرج Vo فإنه يساوى حاصل ضرب التيار السابق فى (-R2) كما نعلم من خواص مكبر العمليات . مع بعض الإختصارات للمعادلة (10-1) يمكن كتابة الصورة النهائية لمعادلة جهد الخرج Vo كما يلى :

$$Vo=(-VR2/8R1)\ [8b3 + 4b2 + 2b1 + b0] \qquad (2-10)$$

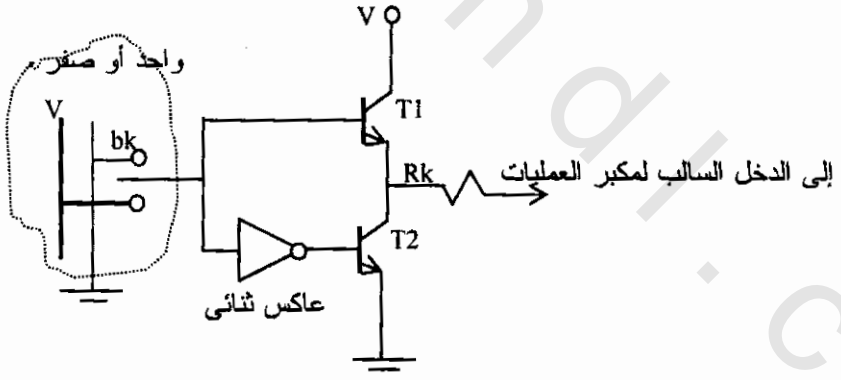
لاحظ من المعادلة (10-2) أنه بالتحكم فى قيم كل من R1, R2, V يمكن التحكم فى مستوى أو قيمة جهد الخرج Vo . فمثلا لو أخذنا قيم المتغيرات R1 و R2 و V بحيث أن القيمة (VR2/8R1) تساوى 1- فإنه بالتعويض عن قيم bo إلى b3 بواحد أو صفر فإنه يمكننا إيجاد جميع القيم الممكنة لجهد الخرج Vo . فمثلا إذا كانت 0000=b3b2b1b0 فإن الخرج Vo سيساوى صفر فولت وأما إذا كانت الشفرة 1111=b3b2b1b0 فإن الخرج Vo فى هذه الحالة سيكون 15 فولت ، وهكذا يمكن حساب جهد الخرج لأى شفرة دخل . حاول أيضا تغيير قيم المتغيرات R1, R2, V بحيث تتحكم فى القيمة العظمى لجهد الخرج .

شكل (10-5) يبين تركيب واحد من المفاتيح الإليكترونية bk الموجودة فى شكل (10-4) . عندما يكون bk=1 فإن الترانزستور T1 يكون موصلا أى ON وبذلك يتم توصيل الجهد V على الطرف الأيسر للمقاومة Rk , لاحظ أنه فى هذه الحالة ونتيجة وجود العاكس فإن الترانزستور T2 يكون غير موصل أى OFF

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



شكل (10-4) المحول الرقمى/الانسيابى باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائيا

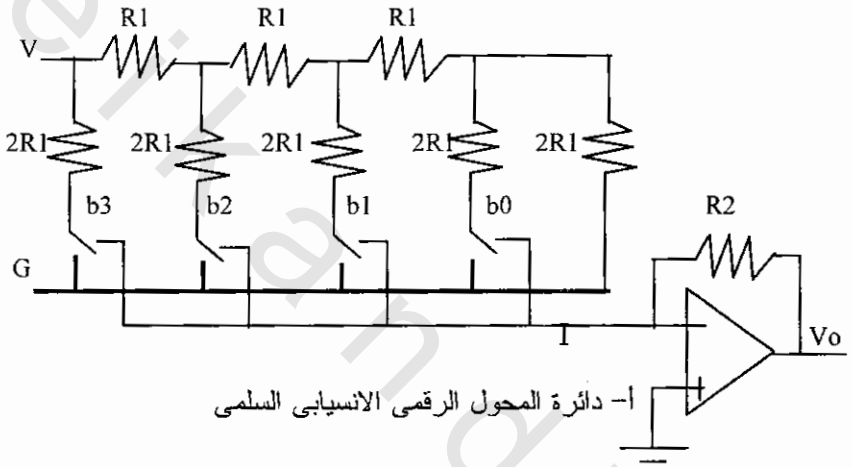


شكل (10-5) التركيب الإلكترونى لأحد المفاتيح فى شكل (10-4)

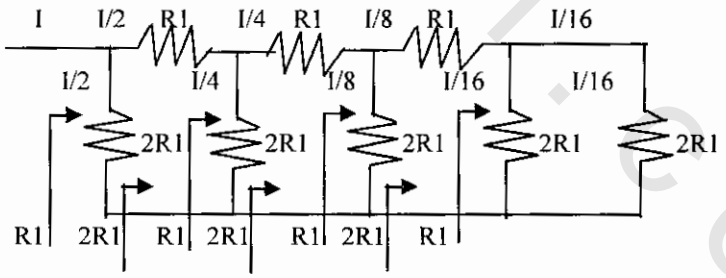
10-2-2 المحول الرقمى/الانسيابى باستخدام شبكة المقاومات السلمية ، Ladder network

(سلمية نسبة إلى سلم أو سلالم Ladder)

من عيوب دائرة المحول الرقمى/الانسيابى السابقة أن النسبة بين أصغر مقاومة وأكبر مقاومة كبيرة جدا وهذه النسبة تزداد بزيادة عدد البتات فى دخل المحول ، فمثلا فى حالة المحول ذى الثمانية بتات فإنه لو كانت أصغر مقاومة هى R فإن أكبر مقاومة ستكون 128R . هذه النسبة الكبيرة سوف تضطر المصنع إلى تصنيع قيم كبيرة للمقاومات وكما نعلم فإن التفاوت فى قيمة المقاومة يزداد بزيادة قيمتها مما سيؤدى إلى عدم دقة فى خرج المحول الرقمى/الانسيابى . 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 فى تقليل كثافة المكونات على الشريحة وصعوبة فى تصنيعها .



أ- دائرة المحول الرقمى الانسيابى السلمى



ب- شبكة المقاومات السلمية موزعا عليها التيارات فى جميع الأفرع

شكل (10-6) المحول الرقمى الانسيابى السلمى

شكل (10-6أ) يبين دائرة المحول الرقمى/الانسيابى الجديدة ، شبكة المقاومات السلمية ، والتى تستخدم قيمتين فقط للمقاومات هما R1 و 2R1 . شكل (10-6ب) يبين هذه الشبكة على حدة وقد وزعت عليها التيارات فى الأفرع المختلفة ، وكذلك وضحت على هذا الشكل قيمة المقاومة عند النقط المختلفة على الشبكة . أهم ملاحظة على هذه الشبكة هى أنها استخدمت قيمتين فقط من المقاومات وهما R1 و 2R1 وبذلك تم التغلب على التفاوت الكبير فى قيم المقاومات الموجود فى الطريقة السابقة .

بالنظر إلى شكل (10-6ب) نلاحظ أن التيار فى كل فرع من أفرع الشبكة موزع بالطريقة الثنائية المطلوبة ، فمثلا فى الفرع الأول التيار يساوى I1/2 وفى الفرع الثانى I1/4 وفى الفرع الثالث I1/8 وهكذا بحيث أن مجموع التيارات الداخلة لمكبر العمليات ستكون :

$$I=(I1/2)b3 + (I1/4)b2 + (I1/8)b1 + (I1/16)b0 \qquad (3-10)$$

من هذه المعادلة وبعد بعض الإختصارات البسيطة يمكن حساب قيمة جهد الخرج Vo فى هذه الحالة والذى سيعطى بالمعادلة الآتية :

$$Vo=(-R2\ I1/16)\ [8b3 + 4b2 + 2b1 + b0] \qquad (4-10)$$

وهى نفس المعادلة التى حصلنا عليها فى الحالة السابقة . لاحظ أن قيمة جهد الخرج Vo فى هذه الحالة يمكن التحكم فيه بالمتغيرات R2, I1 حيث التيار I1 يمكن أن يعطى بالعلاقة :

$$I1 = (V/R1) \qquad (5-10)$$

حيث R1 هى مقاومة دخل الشبكة عند طرفى الجهد V .

10-2-3 تصنيفات المحولات الرقمية/الانسيابية

هناك العديد من العوامل التى يمكن تصنيف المحولات الرقمية/الانسيابية على أساسها ومنها ما يلى :

10-2-3-1 مستوى جهد الخرج

كما رأينا فإن مستوى جهد الخرج فى المحولات الرقمية/الانسيابية يتوقف على قيم المقاومات فى الشبكة المستخدمة R1 وكذلك المقاومة المستخدمة كتغذية

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

10-2-3-2 المقدرة التحليلية Resolution

فى المثال السابق عرضنا محولا رقميا/انسيابيا ذا 4 بتات وكانت القيمة العظمى لجهد الخرج هى 5 فولت ورأينا فى جدول 10-1 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 الرقمى/الانسيابى كان 8 بتات فى الدخل بدلا من 4 ، فى هذه الحالة فإن أصغر جهد يمكن تمييزة بالمحول سيكون جزء من 256 من الفولت وهذه بالطبع كمية صغيرة وذلك يوضح لنا مدى اعتماد المقدرة التحليلية للمحول على عدد البتات فى هذا المحول . تعرف النسبة المئوية للمقدرة التحليلية بالعلاقة الآتية :

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

حيث n هى عدد بتات الدخل . فمثلا للمحول ذى 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 .

10-2-3-3 الخطية Linearity

من المتوقع أن يكون المحول الرقمى/الانسيابى خطى ، بمعنى أن جهد الخرج Vo يكون عبارة عن دالة خطية فى الدخل الثنائى للمحول ، فمثلا إذا كان الدخل الثنائى هو العدد 3 وكان جهد الخرج فى 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 فى قيم المقاومات

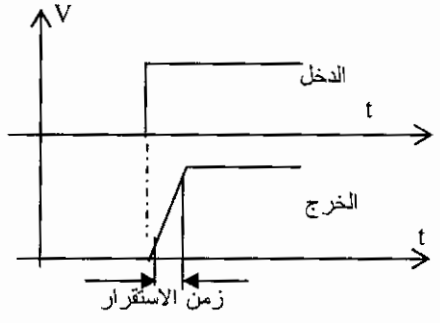
المستخدمة ، وكذلك فإن المفاتيح الإلكترونية التى تمثل ثنائيات الدخل والتى هى عبارة عن ترانزستورات هى فى الحقيقة مصدر لعدم الخطية حيث أنها تضيف قيما جديدة لقيم المقاومات . هذه المفاتيح عندما تكون ON لا تكون مقاومتها صفرا بالضبط كما ذكرنا ولكنها تكون مقاومة صغيرة ، وكذلك عندما تكون OFF فإن مقاومتها لا تكون مالانهاية كما هو متوقع ولكنها تكون قيمة كبيرة . كل هذه عوامل تؤثر فى خطية المحول الرقمى/الانسيابى .

10-2-3-4 الدقة Accuracy

إذا كنت تتوقع أن يكون خرج المحول الرقمى/الانسيابى يساوى مثلا 1,50 فولت ولكن بدلا من ذلك وجدته 1,55 فولت ، فى هذه الحالة فإننا نقول أن هناك عدم دقة فى 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 فى 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 الرقمى للمحول الرقمى/الانسيابى فإن خرجه لا يتغير إلى القيمة المناظرة للدخل الجديد لحظيا ولكنه يأخذ بعض الوقت وقد يكون هناك Over shoot فى 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 .



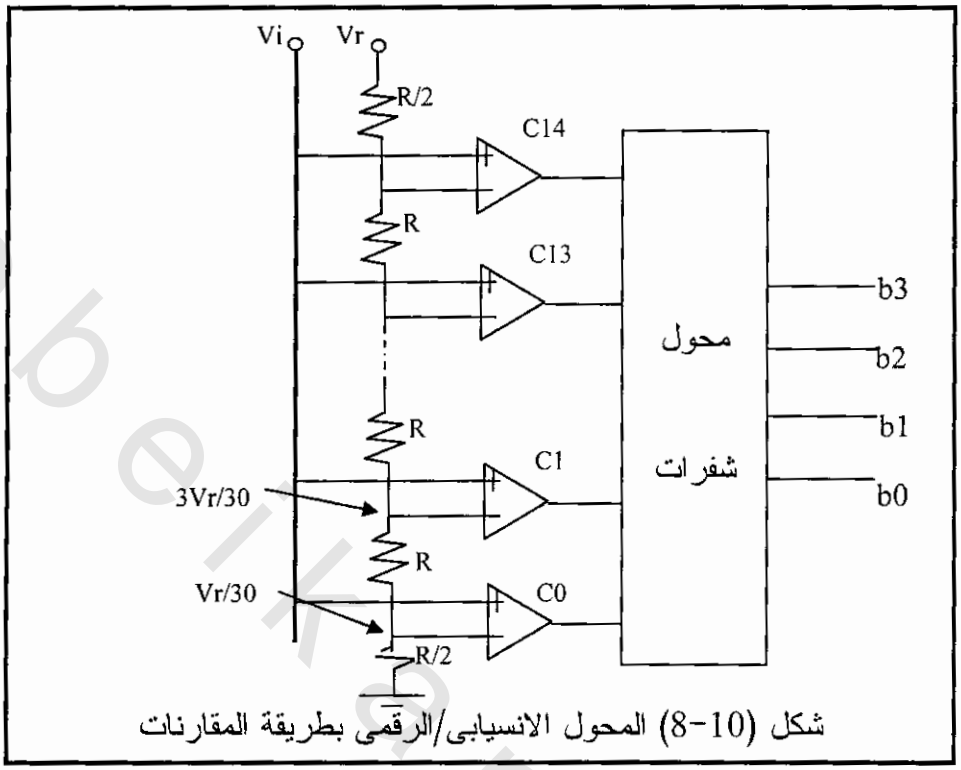
شكل (10-7) زمن الاستقرار للمحول الرقمى/الانسيابى

10-3 التحويل من انسيابى إلى 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 Vi وهو الجهد الانسيابى المطلوب تحويله إلى الصورة الرقمية والجهد الآخر هو جهد المرجع Vr . 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 Co يساوى Vr/30 وللمقارن C1 يساوى 3Vr/30 وللمقارن C3 يساوى 5Vr/30 وهكذا . لاحظ أن أى واحد من هذه المقارنات يكون خرجه واحدا (ثنائيا) إذا كان دخله الموجب المتصل بجهد الدخل Vi 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 Co إلى C15 كما يلى :



شكل (10-8) المحول الانسيابى/الرقمى بطريقة المقارنات

إذا كان $Vr/30 < Vi < 3Vr/30$	Co=1
إذا كان $3Vr/30 < Vi < 5Vr/30$	Co=1, C1=1
إذا كان $5Vr/30 < Vi < 7Vr/30$	Co=1, C1=1, C2=1
إذا كان $7Vr/30 < Vi < 9Vr/30$	Co=1, C1=1, C2=1, C3=1

وهكذا .....

لاحظ أن خرج المقارنات لا يمثل الخرج الثنائى المطلوب ، لذلك فقد تم وضع محول شفرات يقوم بتحويل خرج المقارنات الذى يعتبر شفرة ذات 15 بتا إلى الشفرة الثنائية المعروفة ذات 4 بتات . جدول 10-2 يوضح جدول الحقيقة Truth table لهذا المشفر . إن المقدرة التحليلية Resolution لهذا المحول تساوى Vr/15 وهى أصغر جزء من جهد الدخل يمكن تمييزه ، لاحظ أن المقدرة التحليلية تتحسن بزيادة عدد بتات المحول ، فمثلا للمحول ذى 8 بتات ستكون المقدرة التحليلية Vr/255 ، لاحظ أيضا أن عدد المقارنات يزداد جدا بزيادة عدد بتات المحول فللمحول ذى 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 هى السرعة فإن

هذه الطريقة تعتبر أسرع الطرق على الإطلاق فإنه بمجرد وضع الدخل الانسيابى Vi فإنه يحول فورا إلى الصورة الرقمية فى زمن يكاد يكون صفرا وهو زمن مرور الإشارة فى المقاومات والمقارنات ثم المشفر ، لذلك فإن المحولات التى تستخدم هذه الطريقة تكون أغلى الأنواع سعرا .

جدول 10-2 جدول الحقيقة لمحول الشفرات الموجود فى 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	1		0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1		0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1		0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1		0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	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	1
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	1	1
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	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1

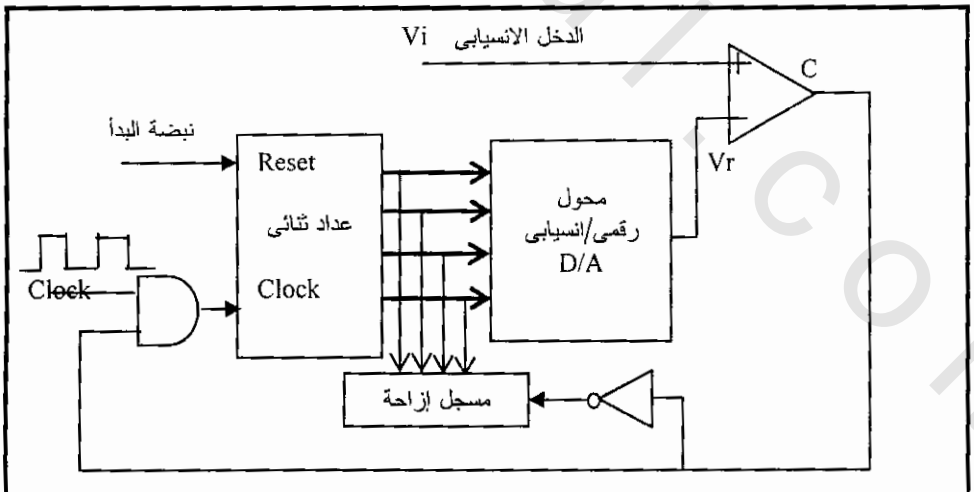
10-3-2 المحول الانسيابى الرقمى باستخدام العداد الثنائى

شكل (10-9) يبين رسما صندوقيا لدائرة هذا المحول . الإشارة المطلوب تحويلها إلى الصورة الرقمية هى الجهد Vi وكما نرى فإنه موصل على الدخل الموجب للمقارن C ، والمقارن C يعمل بنفس طريقة المقارنات التى شرحت فى الطريقة السابقة . عند إعطاء نبضة على الطرف Start (ابدأ) فإن خرج العداد يصبح صفرا وبالتالى يكون خرج D/A صفرا أيضا ويكون Vi > Vr وعلى ذلك يكون خرج المقارن واحدا . هذا الواحد من المقارن يجعل بوابة AND تسمح بمرور Clock وبالتالى يبدأ العداد فى العد بنفس سرعة التزامن Clock . فى هذه الأثناء يقوم D/A بتحويل خرج العداد من الصورة الرقمية إلى الصورة الانسيابية باستمرار ومع كل نبضة من نبضات التزامن Clock . عندما يصل

خرج D/A بحيث يكون أكبر بقليل أو يساوى جهد الدخل Vi عندها يتغير خرج المقارن من واحد إلى صفر مما يتسبب فى أن بوابة AND لن تسمح بمرور نبضات التزامن إلى العداد وبالتالى تتوقف عملية العد ويكون فى هذه الحالة خرج العداد هو القيمة الرقمية المساوية للدخـل الانسيابى Vi . لاحظ أنه عندما يكون خرج المقارن يساوى صفرا فإن مسجل الإزاحة يأخذ واحدا وبالتالى يقوم بتخزين خرج العداد لأنه هو الخرج المطلوب . لتحويل قيمة جديدة للدخل فإن نبضة بداية أخرى Start تعطى وتكرر نفس العملية السابقة .

كما نرى فإن هذه الطريقة أبطأ بكثير من الطريقة السابقة (طريقة المقارنات) وذلك لأنها طريقة تتابعية تعتمد على نبضات تزامن تعطى للعداد ثم إنتظار العداد حتى يصل إلى القيمة المطلوبة . لذلك فإنه كلما كان جهد الدخل Vi صغيرا كلما كان زمن التحويل من انسيابى إلى رقمى أقل لأن العدات التى سيعدها العداد يكون صغيرا . إن ذلك يعنى أن زمن التحويل سيتوقف على قيمة الجهد المطلوب تحويله إلى الصورة الرقمية ، وهذه أحد العيوب الأخرى لهذه الطريقة بجانب سرعتها القليلة .

إذا كانت إشارة الدخل من النوع المتغير مع الزمن فإن هذه الطريقة يمكن زيادة سرعتها قليلا إذا استخدم عداد تصاعدى/تنازلى بدلا من العداد التصاعدى فقط المستخدم . فى هذه الحالة فإن هذا العداد يمكن التحكم فى اتجاه العد له عن طريق خرج المقارن بحيث إذا كان خرج المقارن يساوى واحد فإن العداد يعد تصاعديا أما إذا كان خرج المقارن يساوى صفر فإن العداد يعد تنازليا وبذلك يصبح العداد متتبعا لإشارة الدخل سواء بالزيادة أو النقص بدلا من عمل Reset له عند كل تغيير كما شرحنا سابقا وكما هو فى الشكل (10-9) .



شكل (10-9) محول انسيابى/رقمى باستخدام العداد الثنائى

10-3-3 طريقة التقريب المتتالى
Successive Approximation A/D Conversion

تعتمد هذه الطريقة على عمل عدة تقريبات متتالية إلى أن يساوي الجهد الرقمي الجهد التماثلي Vi . شكل (10-10) يبين رسما صندوقيا لهذه الطريقه مفترضا 4 بتات . في بداية التشغيل يكون جميع ال 4 بتات غير معلومة القيمة لذلك سنفترضها X3X2X1X0 . نبدأ عملية التقريب بافتراض أن البت زات القيمة العظمى X3 تساوي واحدا وباقي البتات تساوي صفرا كما يلى :

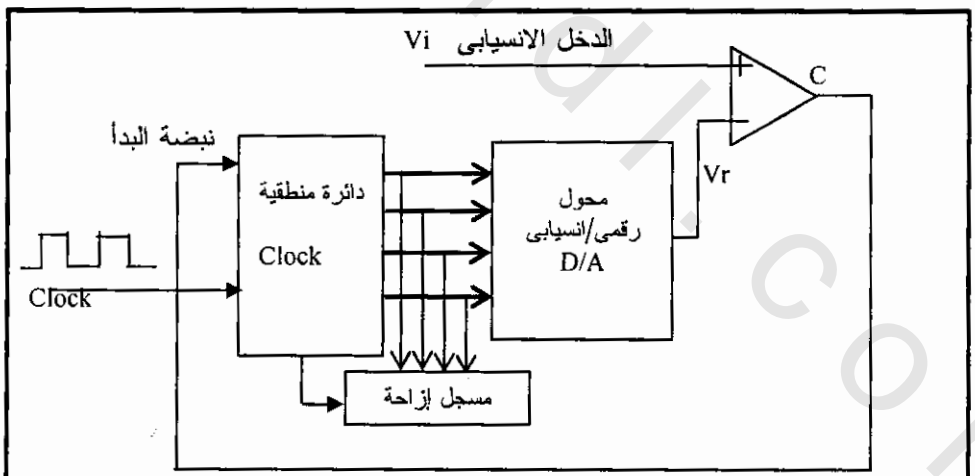
1000 = X3X2X1X0

هذه القيمه الرقميه تدخل إلى ال D/A ليحولها إلى الصورة الانسيابية Vr حيث يقوم المقارن C بمقارنة الجهد Vr مع الدخل Vi فإذا كان Vr>Vi فإن ذلك يعني أن الرقم 1000 كبيرا وعلى ذلك فإن البت X3 لا يمكن أن تكون واحدا ولابد أن تكون صفرا ، أما إذا كان Vr<Vi فإن ذلك يعني أن الرقم 1000 مازال صغيرا وعلى ذلك فإن البت X3 لابد وأن تكون واحدا . أى أنه بعد المقارنة الأولى فإن قيمة البت X3 تتحدد تماما إذا كانت واحدا أو صفرا ، ولنفترض أنها تحددت بالقيمه b3 حيث b3 إما واحد أو صفر ، وعلى ذلك فإن الصوره الرقمية تصبح b3X2X1X0 حيث X2,X1,X0 مازالت غير معروفة . في المحاولة الثانية توضع البت X2=1 وتبقى البتات X1X0=00 والبت b3 تبقى كما هى فى المحاولة السابقة وتتم مقارنة خرج ال D/A وهو Vr مع الدخل Vi فإذا كان Vr>Vi فإن هذا يعنى أن الواحد فى البت X2 كبير ولذلك فإنه يستبدل بصفر ، أما إذا كان Vr<Vi فإن ذلك يعنى أن الواحد فى هذه البت X2 مناسب ولذلك يبقى كما هو . وهكذا تستمر عملية التقريب ثم المقارنة مع البتات الباقية وهى X1, X0 , أى أنه بعد أربع تقريبات (تساوى عدد البتات فى ال D/A) تكون القيمة الرقمية الصحيحة b3b2b1b0 قد تم التوصل إليها وتم التحويل المطلوب .

إن الدائرة المنطقية الموجودة فى 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 يساوى واحد فإن البت المفروضة تبقى كما هى واحد وإذا كان خرج المقارن يساوى صفر فإن البت المفروضة تتغير من واحد إلى صفر قبل أن تبدأ عملية التقريب الجديدة . لاحظ أن عملية التحويل فى هذه الطريقة تتم بعد عدد من نبضات التزامن يساوى 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 الانسيابى كما رأينا فى طريقة العداد الثنائى . شكل (10-11)

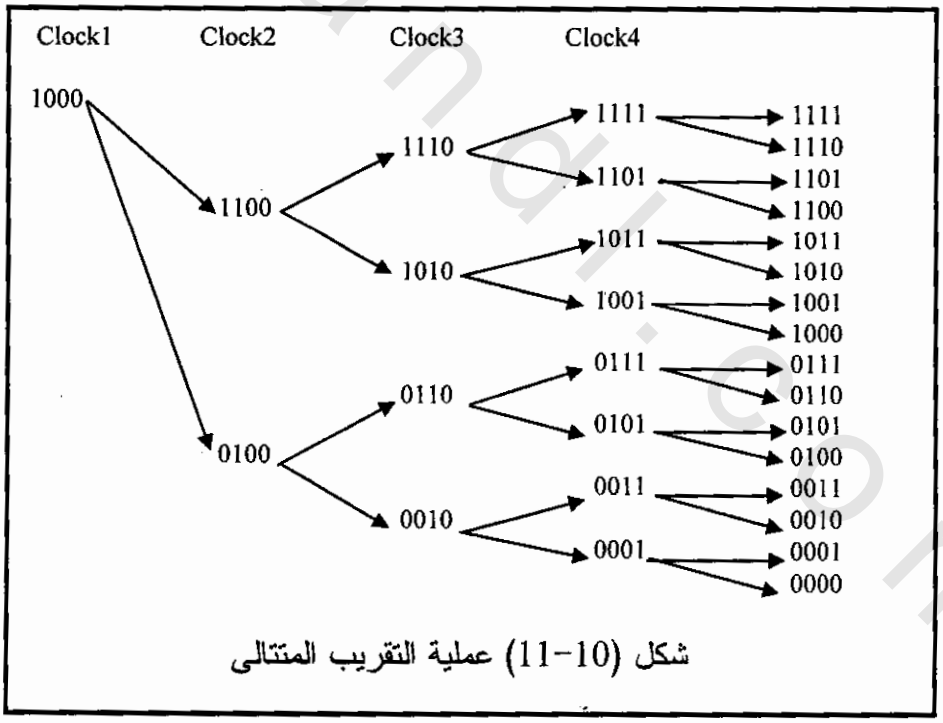
يبين كيف تتم عملية التقريب المتتالية إلى أن يتم التوصل إلى القيمة الرقمية بعد أربع نبضات تزامن .

من الملاحظ أن عملية التحويل من انسيابى إلى رقمى 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 رقمى إلى انسيابى والتى لا تحتاج لإشارة تزامن فى أغلب الأحوال . أيضا فإن أى محول انسيابى رقمى لابد وأن تدخل إليه إشارة بدء التحويل start conversion, SC والتى على ضوئها يبدأ المحول فى عملية التحويل حيث يعطي هو أيضا فى نهاية هذه العملية إشارة نهاية تحويل End Of Conversion , EOC تدل على أنه قد إنتهى من عملية التحويل والتى يستفاد منها فى إعطاء القيمة الجديدة للدخل . الكثير من المحولات لا تتيح الخرج الرقمى 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 أى مشاكل مع الإشارات الأخرى ولكن فى اللحظة التى يريد فيها المعالج قراءة خرج المحول فإنه يقوم بإعطاء نبضة تنشيط لبوابات الفصل buffer التى فى خرج المحول من خلال طرف يسمى عادة بخط تنشيط الخرج Output Enable, OE فتضع خرج المحول على مسار البيانات فى اللحظة المناسبة التى حددها المعالج .



شكل (10-10) محول انسيابى/رقمى باستخدام التقريب المتتالى

إن سوق الإلكترونيات فى هذه الأيام مليئة بأنواع كثيرة من المحولات الانسيابية/الرقمية A/D والرقمية/الانسيابية D/A المتعددة الإمكانيات والمتعددة الأسعار أيضا وبالذات المحولات الانسيابية الرقمية التى يوجد منها البطىء وبالتالى رخيص الثمن والسريع جدا وبالتالى يكون سعره مرتفعا جدا . وتقع على المستخدم مهمة اختيار المحول المناسب للتطبيق الذى يتعامل معه . فمثلا بالنسبة لتحويل الإشارات الثابتة (dc) التى لا تتغير مع الزمن أو التى تتغير ولكن بترددات بسيطة فإنه يمكن فى هذه الحالة استخدام المحولات البطيئة التى تفى بالغرض والتى تكون رخيصة الثمن أيضا . أما فى 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 لكى يتم الحفاظ على جميع المعلومات التى تحتويها الإشارة الانسيابية ولا يفقد منها شىء وبالذات عند تحويلها إلى الصورة الانسيابية مرة أخرى فإنه لابد وأن يكون التردد الذى تؤخذ به العينات من الإشارة sampling frequency ضعف أكبر تردد موجود فى الإشارة الانسيابية على الأقل ، أى أنه يمكن أن يكون أكثر ولكن لا يجب أن يكون أقل .



شكل (10-11) عملية التقريب المتتالى

كمثال على ذلك نفترض مثلا أننا نريد تحويل إشارة صوتية كلامية إلى الصورة الرقمية بهدف تخزينها فى الذاكرة . من المعروف أن الصوت الآدمى يبلغ أعلى تردد فيه حوالى 3,5 كيلوهرتز باعتبار أن هذا هو التردد الذى عنده يتم تمييز الشخص من صوته والذى تكتفى 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 فى هذه الحالة تساوى واحدا مقسوما على 7 كيلوهرتز وذلك يعطى حوالى 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 .

4-10 تمارين

1- ما هو الفرق بين المحول الرقمى/الانسيابى والمنتخب أو فاك الشفرة decoder ؟

2- محول رقمى/انسيابى ذو 8 بتات شفرة دخله هى 00101100 ، ما هى قيمة خرجه الانسيابى إذا كانت أعظم قيمة للخرج هى 5 فولت ؟

3- ارسم جدولا وبين فيه قيمة الخرج الانسيابى المقابلة لعشر شفرات ثنائية متتالية على الدخل ابتداء من الشفرة 00000000 لنفس المحول السابق فى المسألة 3.

4- اشرح مع الرسم طريقة التحويل من رقمى إلى انسيابى باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائيا .

5- ارسم دائرة محول رقمى/انسيابى ذى 8 بتات باستخدام شبكة المقاومات المتضاعفة ثنائيا ، واكتب قيم جميع المقاومات إذا كانت أصغر مقاومة تساوى 50 كيلوأوم .

6- اشرح مع الرسم طريقة التحويل من رقمى إلى انسيابى باستخدام شبكة المقاومات السلمية .

7- عرف المقدرة التحليلية وأوجد النسبة المئوية لها وذلك لمحول ذى 6 بتات وآخر ذو 12 بتا .

8- لديك محول رقمى/انسيابى موصل على بوابة الإخراج رقم 00 ، ارسم شكل الخرج مع الزمن لهذا المحول نتيجة تنفيذ البرنامج التالى :

```
     MOV A,00
xx:  OUT 00
     INC A
     JMP xx
```

9- أعد التمرين السابق إذا كان البرنامج المنفذ كالتالى :

```
     MOV A,00
xx:  OUT 00
     INC A
     CP A, FF
     JNZ xx
xxx: OUT 00
     DCR A
     CP 00
     JNZ xxx
     JMP xx
```


obeikandl.com

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