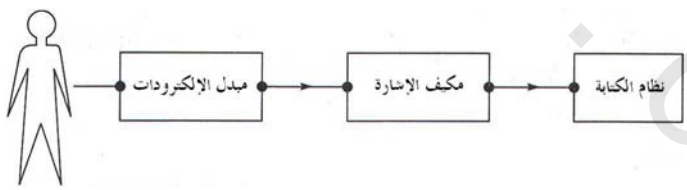
الفصل الرابع

أنظمة التسجيل
RECORDING SYSTEMS

(٤,١) نظام التسجيل الأساسي
Basic Recording System

تؤمن المسجلات تتبعاً مرئياً أو تسجيلاً مستمراً للإشارات الكهربائية المُطبقة. توجد عدة أنواع من المسجلات مستخدمة تقنيات متنوعة لأغراض الكتابة. يبين الشكل رقم (٤,١) أكثر أنظمة التسجيل الالكترونية بساطة. ويتألف هذا النظام من ثلاثة مكونات مهمة. أولاً ، الإلكترود أو المبدل. يلتقط الإلكترود الكمونات الكهربائية الحيوية في حين يحول المبدل الإشارة الفيزيولوجية المراد قياسها إلى خرج كهربائي قابل للاستخدام. يحول مكيف الإشارة خرج الإلكترود/المبدل إلى كمية كهربائية مناسبة لتشغيل نظام الكتابة. يؤمن نظام الكتابة تمثيلاً فوتوغرافياً مرئياً لكمية المتغير الفيزيولوجي ذي الأهمية.



الشكل رقم (٤,١). نظام تسجيل الكتروني أساسي.

تتألف مكيفات الإشارة في المسجلات الطبية عادةً من المضخم الأولي والمضخم الأساسي. ويجب على كلا النوعين من المضخمات تحقيق متطلبات تشغيل خاصة مثل ممانعة الدخل وربح وخصائص الاستجابة الترددية من أجل إعادة إنتاج إشارة الدخل بشكل صحيح.

obeikandi.com

لصنع الإشارة من أي مبدل منسجم مع إشارة الدخل المطلوبة من أجل لمضخم القائد لنظام العرض أو التسجيل، فإنه من المعتاد ترتيب وتسوية الإشارات الكهربائية التي يتم إنتاجها بواسطة كل مبدل. يتم إجراء ذلك في مكيف الإشارة الذي يُضبط خرجه على مستوى إشارة عامة تساوي فولت واحد تقريباً. يتم تأمين عمليات الضبط الضرورية للربح والاستجابة الترددية بواسطة مكيفات الإشارة. ويمكن بواسطة هذه الوسائل تغيير القيم الداخلية لمكيفات الإشارة من أجل تسجيل أي حدث من الأحداث الفيزيائية أو الكهربائية الحيوية على نفس قناة الكتابة.

تشكل أنظمة الكتابة المتوفر بعدة أشكال الجزء الرئيسي لجهاز التسجيل. إن أنظمة الكتابة المُستخدمة عموماً هي المسجل القلمي من نوع المقياس الغلفاني ومسجل النفاث الحبري والمسجل بمقياس الجهد. بما أن توصيف الإلكترودات والمبدلات تم في الفصلين الثاني والثالث، فإنه يتم في هذا الفصل توضيح طرق الكتابة ومكيفات الإشارة.

(٤,٢) الاعتبارات العامة لمكيفات الإشارة

General Consideration for Signal Conditioners

غالباً ما تكون المعلومات التي يتم الحصول عليها من الإلكترودات/المبدلات على شكل شدة تيار أو مستوى جهد أو تردد أو طور إشارة بالنسبة إلى معيار ما. بالإضافة إلى معالجة مخارج خاصة من هذه الأجهزة فإن مكيفات الإشارة المُستخدمة في الأجهزة الطبية الحيوية تنجز وظائف تكييف ذات أغراض عامة متنوعة من أجل تحسين الجودة والمرونة والوثوقية لنظام القياس. يتم فيما يلي توضيح الوظائف المهمة المُنجزة بواسطة مكيفات الإشارة قبل أن تُعطى الإشارة إلى جهاز العرض أو التسجيل:

تضخيم الإشارة: غالباً ما تكون الإشارات المتوفرة من المبدلات صغيرة جداً من حيث المقدار. ترفع المضخمات مستوى إشارة الدخل لتلائم متطلبات نظام التسجيل/العرض أو لتلائم مجال المحول تمثيلي إلى رقمي، ومن ثمَّ زيادة دقة التمييز والحساسية للقياس.

إن القياسات الكهربائية الحيوية هي قياسات ذات مستو منخفض بشكل أساسي وتشمل تضخيم وتسجيل إشارات على الأغلب من مستويات المايكرو فولت. تجعل مشكلة الضجيج الكهربائي من هذه القياسات قضية صعبة تتطلب معالجة بارعة ومعرفة تقنية خبيرة بالإشارة في تصميم الدارة. يمكن أن ينتج الضجيج أخطاء في القياسات وأن يخفي بيانات مفيدة بالكامل. توجد مشكلة خاصة في التطبيقات حيث يتم تسجيل إشارات ذات مستوى منخفض عند جهود عالية غير مؤرضة أو منقولة عبر مسافات أو يتم الحصول عليها في بيئة ضجيج كهرومغناطيسية. يحسِّن استخدام مكيفات الإشارة الموضوعة بالقرب من منبع الإشارة أو المبدل من نسبة الإشارة إلى الضجيج للقياس من خلال زيادة مستوى الإشارة قبل أن تتأثر بالضجيج البيئي.

الاستجابة الترددية : تُصَمَّم الأجهزة الطبية الحيوية الحديثة لتعالج بيانات ذات عروض حزمة تمتد من التيار المستمر (dc) إلى عدة مئات من الدورات في الثانية. لا تستطيع المرشحات الكهربائية أو الميكانيكية فصل الإشارات المفيدة عن الضجيج عندما تتراكب عروض حزمها. إن التجهيزات وأنظمة التسجيل التي تعمل بشكل مناسب من أجل بيانات بحالة مستقرة أو ذات تردد منخفض غير ملائمة عموماً لتحقيق هذه المتطلبات. من ناحية أخرى ، فإن أنظمة التسجيل التي سوف تعيد إنتاج مثل هذه البيانات بشكل صحيح هي بالأصل أكثر حساسية للضجيج الخارجي ولذلك يجب تصميمها للتخلص من إمكانية تلوث الإشارة بالضجيج.

غالباً ما تحتوي الإشارات الكهربائية الحيوية على مركبات ذوات تردد منخفض جداً. ومن أجل إعادة إنتاج صحيحة للإشارة يجب أن تمتلك المضخمات على استجابة ترددية في المجال الترددي تحت السمعي. وينبغي أن تنخفض هذه الاستجابة إلى أقل من هرتز واحد وهو مطلب متكرر كثيراً.

إن الاستجابة الترددية المنخفضة في جميع المضخمات المُترابطة بواسطة العنصرين RC محدودة بواسطة مفاعلة مكثفات الترابط بين المراحل. يجب أن يمتلك المضخم قيماً كبيرة لسعة الترابط للحصول على الاستجابة الترددية المنخفضة المطلوبة من أجل التطبيقات الطبية. إن سيئة استخدام مكثفات كبيرة هي أنها يمكن أن تسبب حجباً للمضخم في الحالات التي يكون فيها الدخل ذو مستوى عالي أو الارتفاع بسبب تحويل العابرات أو مداخل أخرى ذات مستوى عالي. يمكن أن تنقضي عدة ثواني قبل أن يتم تفريغ المكثفات و عودتها إلى المستويات الطبيعية وذلك بسبب الثابت الزمني الطويل الذي تقدمه مكثفات الترابط الكبيرة هذه. لذلك يصبح المضخم غير قادر على الاستقبال آنياً بعد كل حادثة للإشارات المتعاقبة بسرعة كبيرة. وببساطة لا يوجد هذا النوع من المشاكل في المضخمات المترابطة مباشرة ؛ وذلك لعدم وجود مكثفات ترابط.

تتجه المضخمات المترابطة مباشرة إلى الانحراف بالرغم من أنها تعطي استجابة ترددية ممتازة عند الترددات المنخفضة. إن الانحراف هو تغير بطيء في الخرج ليس له علاقة بإشارة الدخل المطبقة على المضخم. بما أن الاستجابة الترددية للمضخم المترابط بواسطة العنصرين RC لا تمتد إلى كل النقاط وصولاً إلى التيار المستمر فإنه لا ينحرف. يمكن الحصول على ميزات النوعين من الترابط معاً بمضخم واحد في المضخمات الطبية. وبشكل نموذجي فإن كل المراحل مترابطة مباشرة ماعدا واحدة. تمنع المرحلة الوحيدة المترابطة بواسطة العنصرين RC انحراف الخرج. يتم أخذ قياسات مناسبة لمنع حجب المضخم بسبب القيادة السريعة من خلال التفريغ السريع لمكثف الترابط آلياً بعد حدوث الدخل المتعاقب بسرعة.

من غير المرغوب فيه أن تكون الاستجابة الترددية للمضخم أكبر بكثير من تردد الإشارة الأعلى ذات الاهتمام. ويسمح عرض الحزمة الزائد بتمرير جهود الضجيج التي تؤدي إلى حجب الإشارة الكهربائية الحيوية. إن السبب الآخر للحد من استجابة المضخم إلى عرض الحزمة هو التقليل إلى أبعد حد من اتجاه المضخم نحو

التذبذب بسبب التغذية الراجعة الشاردة. لذلك تكون الاستجابة الترددية العالية محدودة بتعمد كوسيلة لتخفيض الضجيج.

الترشيح: المرشح هو دارة تضخم بعض الترددات المطبقة على دخله وتخمد الأخرى. توجد أربعة أنواع شائعة: تمرير عالي، وهو الذي يضخم فقط الترددات الأعلى من قيمة معينة؛ تمرير منخفض، وهو الذي يضخم فقط الترددات الأدنى من قيمة معينة؛ تمرير حزمة، وهو الذي يضخم فقط الترددات ضمن حزمة معينة؛ إيقاف حزمة، وهو الذي يضخم كل الترددات ما عدا تلك التي تقع ضمن حزمة معينة.

يمكن أن تُصَمَّم المرشحات باستخدام عدة طرق مختلفة. يشمل ذلك المرشحات غير الفعالة التي تستخدم فقط المكونات غير الفعالة مثل المقاومات والمكثفات والمُحَرِّضات. تستخدم المرشحات الفعالة مضخمات بالإضافة إلى مكونات غير فعالة بهدف الحصول على أداء أفضل يصعب الحصول عليه بواسطة المرشحات غير الفعالة. تُستخدم المضخمات العملياتية بشكل متكرر كوحدات ربح في المرشحات الفعالة. وتستخدم المرشحات الرقمية محولات تمثيلية - رقمية لتحويل الإشارة إلى شكل رقمي وبعد ذلك تستخدم تقنيات حساب رقمية عالية السرعة من أجل الترشيح.

بالإضافة إلى ذلك يمكن أن تضم مكيفات الإشارة مرشحات لرفض الضجيج غير المرغوب فيه ضمن مجال ترددي معين. إن كل تطبيقات التسجيل والقياس مُعرَّضة تقريباً إلى درجة ما للضجيج ٥٠ هرتز المُلتقط من آلات أو خطوط الطاقة. لذلك تتضمن معظم مكيفات الإشارة مرشحات تمرير منخفض مُصَمَّمة خصيصاً لتأمين رفض أعظمي للضجيج ٥٠ هرتز. تدعى مثل هذه المرشحات بمرشحات "نوتش" "notch".

يمكن تصنيف المرشحات إلى مرشحات رقمية و تمثيلية. وتختلف المرشحات بطبيعة إشارة الدخل والخرج. يعالج المرشح التمثيلي مداخل تمثيلية ويولِّد مخارج تمثيلية. يعالج المرشح الرقمي ويولِّد بيانات رقمية. إن تقنيات المعالجة المُتبعة مختلفة أيضاً. إن المرشحات التمثيلية مبنية على أساس العامل الرياضي للتفاضل ولا تحتاج المرشحات الرقمية إلى أكثر من عوامل الجمع والضرب والتأخير.

تملك المرشحات الرقمية حسنات متعددة أكثر من المرشحات التمثيلية. المرشحات الرقمية غير حساسة نسبياً للحرارة والتقادم وانحراف الجهد والتداخل الخارجي عندما تُقارن مع المرشحات التمثيلية. إن استجابتها قابلة للإعادة والتقدير المسبق تماماً ويمكن للمحاكاة البرمجية أن تعكس بدقة أداء المُنتَج.

العزل: إن التأريض غير المناسب للنظام هو أحد أكثر الأسباب الشائعة لمشاكل القياس والضجيج. يمكن لمكيفات الإشارة مع العزل منع هذه المشاكل. تمرر مثل هذه الأجهزة الإشارة من مصدرها إلى جهاز القياس بدون اتصال فيزيائي أو غلفاني باستخدام المحولات أو تقنيات الترابط الضوئي أو السعوي. بالإضافة إلى قطع حلقات الأرضي، يحجب العزل نبضات الجهد العالي ويرفض جهود النمط المشترك العالية.

الإثارة: إن مكيفات الإشارة مطلوبة في بعض الأحيان لتوليد الإثارة لبعض المبدلات. تتطلب مقاييس الإجهاد والمقاومات الحرارية (ثرموستورات) على سبيل المثال جهداً خارجياً أو إثارة بالتيار. ويؤمن جزء تكييف الإشارة لنظام القياس عادة إشارة الإثارة. إن مقاييس الإجهاد هي عناصر مقاومات في ترتيب جسر وتستون Wheatstone الذي يحتاج إلى نظام دارات كهربائية لإكمال الجسر وإلى مصدر إثارة.

الخطية: إن وظيفة تكييف الإشارة الأخرى الشائعة هي جعل النظام خطياً. يمتلك العديد من المبدلات مثلاً المزدوجات الحرارية والمقاومات الحرارية استجابة غير خطية للتغيرات في الحادثة المراد قياسها. ولهذا الغرض تتضمن مكيفات الإشارة طرقاً محددة للحصول على الخطية مبنية إما على أساس البيئة الصلبة أو على أساس البيئة البرمجية.

بناءً عليه تؤدي مكيفات الإشارة وظيفة مفيدة للغاية في نظام القياس والتسجيل حيث إنها تحدد المجال والدقة والوضوحية للنظام.

(٤,٣) المضخمات الأولية

Preamplifiers

تُصَمَّم التجهيزات الطبية الحيوية متعددة الأقنية والمسجلات الحديثة عادةً على شكل موديولات لتحقق متطلبات الوجود والسبق معاً. يشترط عدد كبير من الترتيبات من أجل كل ضرورة قياس، مع أو بدون مضخمات أولية قابلة للوصل والتبديل، تؤمن إمكانية لاختيار مكيفات الإشارة من أجل انتقاء واسع للقياسات التمثيلية. تقدم المضخمات الأولية التقليدية مجالاً واسعاً لحساسيات الدخل لتغطي عملياً جميع مصادر الإشارة. يتوفر في هذه المضخمات كبت صفري مُعايَر ليتسع لأجزاء مطلوبة من إشارة دخل أو خصائص ترشيح تمرير منخفض قابلة للاختيار لرفض الضجيج أو مكونات الإشارة غير المطلوبة.

تتضمن المضخمات المُستخدمة من أجل القياسات الفيزيائية الحيوية: (١) مضخم عام للتيار المتناوب/للتيار المستمر (ac/dc) بخصائص مميزة مثل التحييد السعوي وحقن التيار وتيار التسريب المنخفض والانحراف dc المنخفض المناسب للقياسات داخل الخلية من خلال إلكترودات مملوءة بالسوائل ذات مقاومة عالية أو لأخذ تسجيلات من خارج الخلية بواسطة إلكترودات ميكروية معدنية من أجل تخطيط كهربية العين (EOG) وتخطيط كهربية الدماغ (EEG) وتخطيط كهربية العضلات (EMG)... الخ. (٢) مضخم تخطيط كهربية القلب (ECG) مع انتقاء اقتباس أثني عشري كامل وعزل المريض. (٣) مضخم مبدل مناسب للقياسات الجسرية في مقاييس الإجهاد ومقياس الإجهاد المبني على أساس مبدلات ضغط الدم ومبدلات القوة وأجهزة درجة الحرارة المقاومة وإشارات الدخل dc بمستوى منخفض مباشره. و(٤) مضخم dc مُستخدم في الوصل مع مجسات المقاومة الحرارية المعيارية من أجل قياسات دقيقة للحرارة ضمن مجال التطبيقات الطبية.

obeikandi.com

إن الأنواع المتعددة للمضخمات المُستخدمة بشكل عام هي كالتالي :

المضخم التفاضلي : وهو المضخم الذي يرفض أية إشارة نمط مشترك تظهر في وقت واحد على نهايتي دخل المضخم معاً ويُضخم فقط فرق الجهد الذي يظهر عبر نهايتيه. إن معظم المضخمات المُستخدمة لقياس الإشارات الكهربائية الحيوية هي من النوع التفاضلي.

المضخمات المترابطة بالتيار المتناوب (AC) : تمتلك هذه المضخمات استجابة ترددية محدودة ولذلك تُستخدم فقط من أجل تطبيقات طبية خاصة مثل آلة تخطيط كهربية القلب. يُستخدم من أجل مخططات كهربية القلب مضخم ac بحساسية تعطي ٠,٥ ميلي فولت/سنتيمتر واستجابة ترددية حتى ١ كيلو هرتز وممانعة دخل من ٢ إلى ٥ ميغا أوم. ومن أجل تطبيقات مثل تخطيط الشبكية والـ EEG والـ EMG فإن مضخمات أكثر حساسية تكون مطلوبة بحيث تعطي حساسية رسم بياني تساوي ٥٠ ميكروفولت/سنتيمتر تقريباً مع ممانعة دخل عالية أعلى من ١٠ ميغا أوم.

المضخمات الحاملة : تُستخدم هذه المضخمات مع المبدلات التي تحتاج إلى مصدر خارجي للإثارة. تتميز هذه المضخمات بالربح العالي والانحراف المهمل والضجيج المنخفض جداً والقدرة على العمل مع مبدلات من نوع المقاومة أو من النوع التحريضي أو السعوي. تحتوي هذه المضخمات بشكل أساسي على مذبذب حامل ودارة معايرة وتوازن جسرية و مضخم ac بربح عالي وكاشف حساس للطور ومضخم خرج dc.

مضخمات التيار المستمر (DC) : هي بشكل عام من نوع التغذية الراجعة السالبة وتُستخدم من أجل تطبيقات بربح متوسط نزولاً إلى مستويات إشارة بحدود ١ ميلي فولت من أجل تدريج كامل. إن هذه المضخمات غير عملية من أجل التطبيقات ذات المستوى المنخفض جداً بسبب الانحراف dc وضعف إمكانيات رفض النمط المشترك. وتُستخدم هذه المضخمات عادةً كمضخمات قيادة للقلم في مسجلات الكتابة المباشرة.

مضخمات dc الدخلية المُقَطَّعة : وهي مُفضلة من أجل مداخل بمستوى منخفض لأنظمة التجهيزات بسبب حساسيتها العالية وانحرافها المهمل ومقدرتها الممتازة على رفض النمط المشترك. إن استجابتها الترددية العالية محدودة إلى حوالي نصف تردد التقطيع للدخل.

مضخمات dc المستقرة المُقَطَّعه : تُستخدم هذه المضخمات من أجل مستوى منخفض ولكنها مُفضلة في تطبيقات الحزمة العريضة مثل راسمات الإشارة ومسجلات الشريط ومسجلات راسم الإشارة ذو الحزمة الضوئية. هذه المضخمات هي مضخمات معقدة وتحتوي على ثلاث مضخمات مدمجة في الموديول. يتضمن هذا مضخم ac من أجل الإشارات التي هي أكبر من حوالي ٢٠ هرتز ومضخم dc دخلي مُقَطَّع من أجل إشارات حوالي الـ ٢٠ هرتز وصولاً إلى نبضة dc و مضخم dc مستقر بتغذية راجعة عريض الحزمة.

المضخمات الجسرية DC : تُستخدم هذه المضخمات مع المبدلات المقاومة التي تحتاج إلى مصدر خارجي للإثارة. يتشكل المضخم بشكل أساسي من مصدر إثارة dc مستقر ووحدة معايرة وتوازن جسريه ومضخم تيار

مستمر تفاضلي بربح عالي ومضخم خرج تيار مستمر. يمكن استخدام هذه المضخمات كمضخمات للتيار المستمر بربح عالي وتوفر بساطة في التشغيل و استجابة ترددية عالية. إن هذه المضخمات ضرورية للمبدلات المُستعمَلة لقياس الحرارة وضغط الدم. ويمكن أن تكون الحساسية في هذه الحالات ٥٠ مايكرو فولت/سنتمتر عند ممانعة دخل ٥٠ كيلو أوم.

(٤,٣,١) المضخم التفاضلي Differential Amplifier

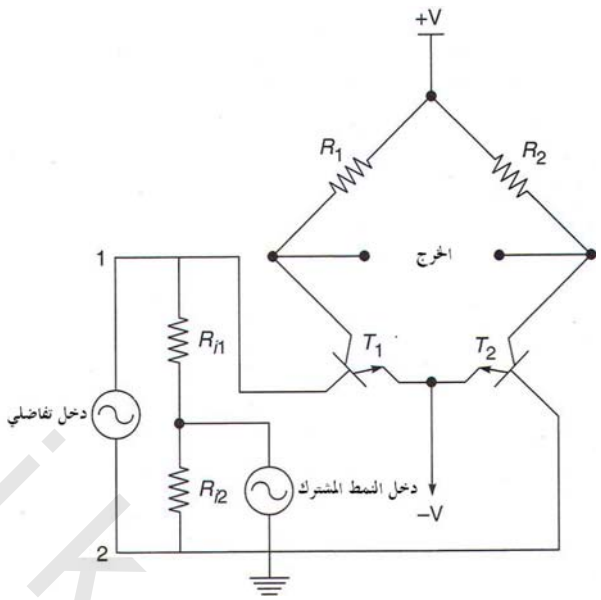
إن المضخمات الطبية المُصَمَّمة للاستخدام في مرحلة الدخل (المضخمات الأولية) هي على الأغلب من النوع التفاضلي. يملك هذا النوع من المضخمات ثلاثة نهايات دخل خارجية يتم تنظيم أحدها للكمون المرجعي والاثنين الآخرين تكون نهايات حية. يُستخدم المضخم التفاضلي عندما يكون من الضروري قياس فرق الجهد بين نقطتين يتغير كل منهما بالمطال بمعدلات مختلفة وبأشكال متعددة. إن الجهود المتولدة في القلب والمُلتقطة بواسطة الإلكترودات على الذراعين والساقين والجهود المتولدة في الدماغ والمُلتقطة بواسطة الإلكترودات على فروة الرأس هي أمثلة نموذجية للإشارات التي يتطلب قياسها استخدام المضخمات التفاضلية.

إن المضخم التفاضلي هو جهاز ممتاز للاستخدام في أنظمة التسجيل ويكمن تفوقه في قدرته على رفض إشارات تداخل النمط المشترك التي تُلتقط بشكل ثابت بواسطة الإلكترودات من الجسم بالإضافة إلى الإشارات الكهربائية الحيوية المفيدة. وكمضخم مترابط بشكل مباشر فأنه متعدد الجوانب ويملك استقراراً عالياً أيضاً.

يتم تحقيق الاستقرار العالي لأنه يمكن أن يكون غير حساس للتغيرات الحرارية التي غالباً ما تكون مصدر الانحراف الزائد في الترتيبات الأخرى. إن هذا المضخم متعدد الجوانب من حيث أنه يمكن تهيئته من أجل تطبيقات عديدة، مثلاً التطبيقات التي تتطلب مداخل ومخارج عائمة أو من أجل التطبيقات التي يُفضل أن تكون فيها المداخل و/أو المخارج مؤرضة.

يُمكن شرح العمل للمضخم التفاضلي بمساعدة الشكل رقم (٤,٢) حيث يشكل الترانزستورين مع مقاومات المجمع الخاصة بهما (R_1 و R_2) دارة جسريه. فإذا كانت المقاومتين وخصائص الترانزستورين متطابقة يكون الجسر متوازناً تماماً ويكون فرق الكمون عبر نهايات الخرج مساوياً للصفر.

لنطبق الآن إشارة على نهايتي الدخل ١ و ٢ من هذه الدارة. يجب أن تكون الإشارة عند كل نهاية دخل متساوية في المطال ولكنها متعاكسة بالطور استناداً إلى الأرضي. تُعرف هذه الإشارة بإشارة النمط التفاضلي. فإذا ازداد تيار المجمع للترانزستور T_1 بسبب هذه الإشارة فإن تيار المجمع للترانزستور T_2 سوف ينقص بنفس الكمية، وسوف ينقص جهد المجمع للترانزستور T_1 بينما جهد المجمع للترانزستور T_2 سوف يزداد. ينتج عن هذا اختلاف في الجهد بين نهايتي الخرج يكون متناسباً مع ربح الترانزستورات.



الشكل رقم (٤,٢). ترتيب لمضخم تفاضلي مثالي.

من ناحية أخرى إذا كانت الإشارة المُطبقة على كل نهاية دخل متساوية في المطال ولها نفس الطور (تُدعى إشارة الدخل ذات النمط المشترك)، فإن التغير في جريان التيار من خلال الترانزستورين معاً سوف يكون متطابقاً، وسيبقى الجسر متوازناً، وسيبقى الجهد بين نهايات الخرج صفراً. وهكذا تؤمن الدارة ربحاً عالياً لإشارات النمط التفاضلي ولا تعطي أي خرج على الإطلاق لإشارات النمط المشترك. إن المقاومات Ri_1 و Ri_2 مقاومات مُحَدِّدَة لإشارات النمط المشترك.

تُعرف قدرة المضخم على رفض هذه الجهود المشتركة من على مسريي الدخل برفض النمط المشترك وتُعيَّن بنسبة دخل النمط المشترك إلى الدخل التفاضلي لاستخراج نفس الاستجابة. تُختصر هذه النسبة بـ CMRR (نسبة رفض النمط المشترك). إن الـ CMRR هي مواصفة هامة عائدة للمضخم التفاضلي ويعبر عنها عادة بالديسبل. ينبغي أن تكون نسبة رفض النمط المشرك للمضخمات الأولية عالية قدر الإمكان بحيث تمر فقط الإشارات المطلوبة من خلال المضخم وكل الإشارات غير المطلوبة تصبح مرفوضة في مرحلة التضخيم الأولي.

يتم عادة تحقيق نسبة رفض عالية باستخدام زوج متلائم من الترانزستورات في مرحلة الدخل للمضخم الأولي وسلسلة كبيرة من المقاومات في الزوج المتسلسل الطويل لتأمين تغذية راجعة سالبة أعظمية من أجل الإشارات المتفقة في الطور. تحسِّن تقنية التسلسل الطويل (تقنية مستخدمة لقيادة التيار لجهاز فعال ما) نسبة رفض النمط المشترك في المضخمات التفاضلية دون اضطراب في الربح من أجل الإشارة المرغوبة. يُمكن تحقيق نسبة رفض نمط مشترك عالية جداً باستخدام سلسلة طويلة فعالة.

بهدف القدرة على تخفيض آثار التغيرات الحاصلة في ممانعات الإلكترودات إلى الحد الأدنى، فإنه من الضروري استخدام مضخمات أولية بممانعة دخل عالية. لقد وُجد أن القيمة المنخفضة لممانعة الدخل تعطي زيادةً بالتشويه الجدير بالاعتبار للتسجيلات (Hill and Khandpur, 1969).

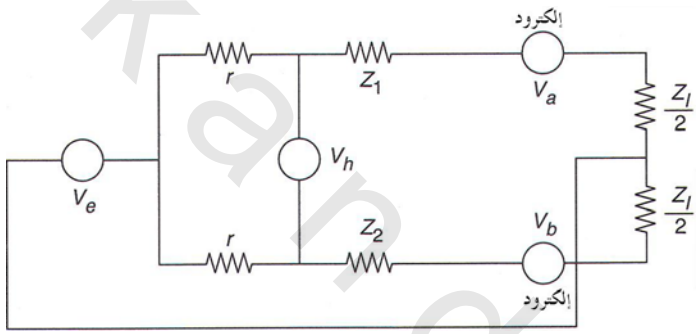
إن الشكل رقم (٤,٣) هو دارة مكافئة للدخل لمضخم ECG وفيها:

V_h تمثل إشارة الجهد المُولَّدة بواسطة القلب.

V_e تمثل الإشارة المتفقة في الطور غير المطلوبة والملتقطة من شبكة الأسلاك الرئيسية ومصادر أخرى.

Z_I ممانعة الدخل الكلية للمضخم الأولي.

Z_1 و Z_2 ممانعات اتصال الجلد للإلكترودات.



الشكل رقم (٤,٣). دائرة مكافئة للدخل لمضخم ECG.

تمثل المقاومة r مقاومة الدم والنسيج التي تكون منخفضة إلى حد يمكن إهمالها عند المقارنة مع الممانعات الأخرى.

إذا تمت موازنة المضخم تماماً بواسطة جهود متفقة في الطور متساوية، V_a و V_b، عند الإلكترودات فمن الممكن أن يعطي ذلك ارتفاعاً لإشارة الخرج الصفرية. من ناحية ثانية تعتمد الجهود V_a و V_b في الواقع على قيم Z_1 وZ_2. يمكن تبيان أن إشارة التداخل الكهربائية V_e سوف تعطي ارتفاعاً لنفس إشارة كما لو إنها الإشارة المطلوبة من المريض من حيث المطال.

$$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1/2} . V_e$$

لهذا السبب يُعطى عامل التمييز بين الإشارات المرغوبة وغير المرغوبة من خلال :

$$\frac{Z_1/2}{Z_2 - Z_1}$$

بفرض أن نسبة رفض النمط المشترك هي ١ : ١٠٠٠ وفرق ممانعات اتصال الجلد بالإلكترود هي ١ كيلو أوم (Z_2-Z_1=1 kΩ) بعدئذ :

$$CMRR = \frac{Z_1}{2(Z_2 - Z_1)}$$
$$1000 = \frac{Z_1}{2 \times 1000}$$
$$Z_1 = 2\,M\Omega$$

فإذا كانت $Z_2 - Z_1 = 5\ k\Omega$

فإن $Z_1 = 10\ M\Omega$

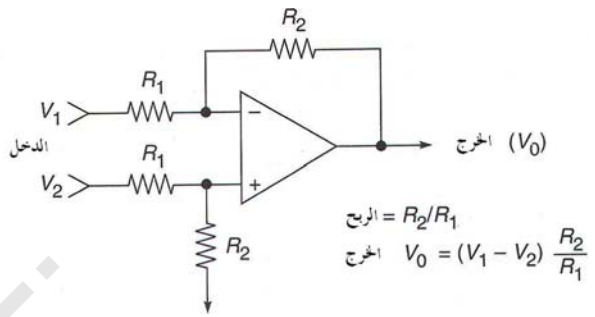
يبين هذا أن ممانعة الدخل العالية ضرورية جداً بهدف الحصول على نسبة رفض نمط مشترك عالية. كذلك ينبغي أن تكون مقاومة الجلد- إلكترود منخفضة و متعادلة تقريباً قدر الإمكان. راجع Winter and Webster, 1983 طرق تصميم متعددة لتخفيض تداخل جهد النمط المشترك في مضخمات الكمون الحيوية.

يتضمن التصميم الجيد للمضخم التفاضلي بشكل أساسي استخدام مكونات متلائمة مع بعضها البعض إلى حد بعيد وهذا ما تم تحقيقه على أحسن وجه في شكل الدارة المتكاملة. تُسمى مضخمات dc المتكاملة ذات الربح العالي، مع وصلات دخل تفاضلية واحتياطية للتغذية الراجعة الخارجية، بالمضخمات العملياتيه بسبب مقدرتها على إنجاز عمليات رياضية. تُطبق هذه المضخمات من أجل بناء المضخمات ac أو dc والمرشحات الفعالة وعواكس الطور والهزازات المتعددة والمقارنات... الخ. لذلك تجد هذه المضخمات عدداً كبيراً من التطبيقات في المجال الطبي من خلال تنظيم تغذية راجعة مناسبة.

يبين الشكل رقم (٤,٤) مضخماً عملياتياً وحيداً بترتيب تفاضلي. إن رفض النمط المشترك لمعظم المضخمات العملياتيه هو بين ٦٠ ديسبل و٩٠ ديسبل نموذجياً. من الممكن أن يكون هذا غير كاف لرفض ضجيج النمط المشترك الذي تتم مصادفته عموماً في القياسات الطبية الحيوية. إضافة إلى ذلك فإن ممانعة الدخل ليست عالية جداً لمعالجة إشارات من مصادر ذات ممانعة عالية. إن إحدى طرق زيادة ممانعة دخل المضخم العملياتي هي استخدام

obeikandl.com

ترانزستورات الأثر الحقلي (FET) في المرحلة التفاضلية للدخل. وتوجد طريقة أكثر شيوعاً هي استخدام مضخم تجهيزاتي في مرحلة المضخم الأولية.



الشكل رقم (٤,٤). مضخم عملياتي وحيد بترتيب تفاضلي.

(٤,٣,٢) المضخم التجهيزاتي Instrumentation Amplifier

إن المضخم التفاضلي مناسب جداً لمعظم التطبيقات في التجهيزات الطبية الحيوية. مع ذلك فهو يملك المحددات التالية :

- يملك المضخم ممانعة دخل محدودة ولذلك يسحب بعض التيار من منبع الإشارة ويحمِّل المنبع إلى حد ما.
- من الممكن أن لا تتجاوز الـ CMRR للمضخم في معظم الحالات ٦٠ ديسبل وهذا غير كاف عادة في أنظمة التجهيزات الطبية الحيوية الحديثة.

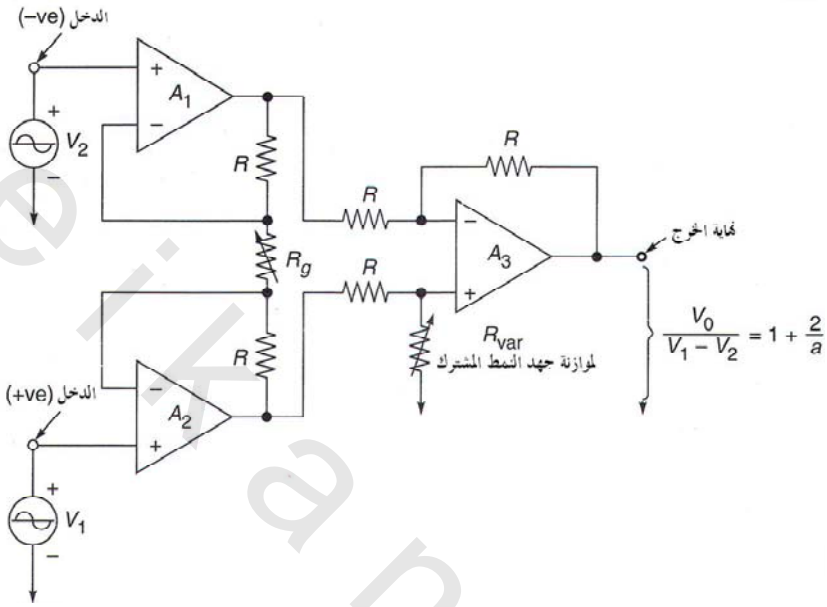
تم التغلب على هذه المحددات من خلال توفير نموذجٍ مُطَّورٍ من المضخم التفاضلي الذي يبين الشكل رقم (٤,٥) ترتيباً له. إن المضخم التجهيزاتي هو جهاز ربح جهد تفاضلي دقيق تم تحقيقه للعمل في بيئة غير ودية من أجل قياس بالغ الدقة. ويتألف المضخم التجهيزاتي جوهرياً من ثلاثة مضخمات عملياتية وسبعة مقاومات. إن وصل مضخم مدروء إلى المضخم التفاضلي الأساسي يصنع مضخم تجهيزاتي بشكل أساسي.

يشكل المضخم العملياتي A_3 ومقاوماته الأربع المتساوية R المُبينة في الشكل رقم (٤,٥) مضخماً تفاضلياً بربح مقداره واحد. ومن أجل ذلك يجب فقط ملائمة مقاومات المضخم A_3. يتم تغيير المقاومة المتغيرة R_{var} لتوازن أي جهد نمط مشترك. تُستخدم مقاومة أخرى R_g لضبط الربح باستخدام الصيغة التالية :

$$\frac{V_o}{V_1 - V_2} = 1 + \frac{2}{a}$$

حيث $a = R_g / R$

يُطبق الجهد V_1 على نهاية المدخل V_e+ و الجهد V_2 على نهاية المدخلV_e-. إن الجهد V_o متناسب مع الفرق بين جهود المدخلين.



الشكل رقم (٤,٥). رسم تخطيطي لمضخم تجهيزاتي.

إن الخصائص الهامة للمضخم التفاضلي هي :

- يتم ضبط ربح الجهد من المدخل التفاضلي (V_2-V_1) إلى الخرج وحيد النهاية بواسطة مقاومة وحيدة.
- مقاومة الدخل لكلا المدخلين عالية جداً ولا تتغير عندما يتم تغيير الربح.
- لا يعتمد الجهد V_o على جهد النمط المشترك بل يعتمد فقط على فرقهما.

إذا كانت المداخل عُرضةً لنبضات حادة ذات جهود عالية أو لتأرجحات سريعة لا تستطيع المضخمات التغلب عليها بنجاح فإنه من الممكن حمايتها باستخدام ثنائيات متصلة عكسياً (ظهر لظهر) عند مداخلها. من ناحية ثانية يخفض هذا قيمة ممانعة الدخل بقوة و يحد من عرض الحزمة أيضاً.

يقدم المضخم التجهيزاتي الميزات التالية من أجل تطبيقاته في المجال الطبي الحيوي :

- ممانعة دخل عالية جداً.
- تيارات انزياح عن الصفر وتيارات انحياز منخفضة.
- تدهور أقل في الأداء في حال تغيرت ممانعة المصدر.

obeikandl.com

- إمكانية لمستويات مرجعية مستقلة للمصدر وللمضخم.
- CMRR عالية جداً.
- معدل عالي لتغير الجهد بالنسبة للزمن.
- استهلاك منخفض للقدرة.

أصبحت المضخمات التجهيزاتية ذات النوعية الجيدة متوفرة على شكل دارة متكاملة (IC) وحيدة مثل μA725 وICL7605 و LH0036 ... الخ.

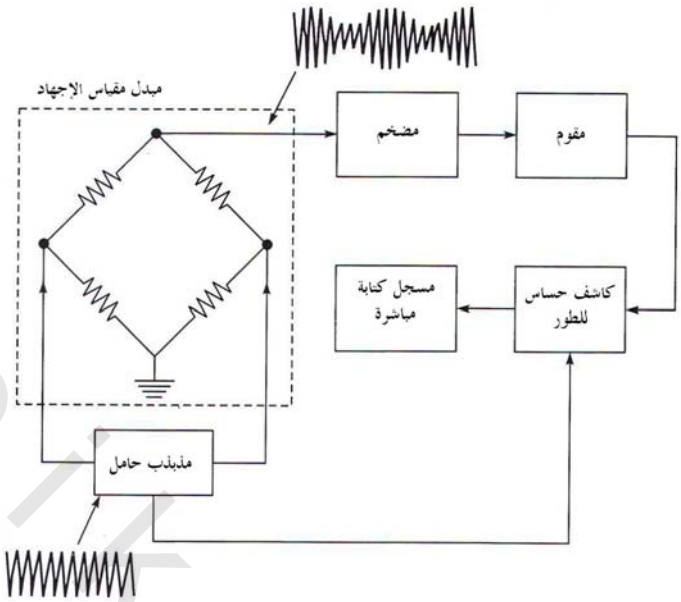
(٤,٣,٣) المضخمات الحاملة Carrier Amplifiers

للحصول على استجابة ترددية صفرية لمضخم التيار المستمر و على استقرار متأصل للمضخم المترابط سعوياً يتم عادة استخدام مضخم من النوع الحامل. يتألف المضخم الحامل من مذبذب و مضخم مترابط سعوياً. يُستخدم المذبذب لتزويد المبدل بالطاقة من خلال جهد حامل متناوب. إن المبدلات التي تحتاج إلى إثارة بالتيار المتناوب هي تلك التي لا تكون ممانعاتها مقاومة أومية صرفة. مثال على ذلك يمكن أن يكون مبدل الضغط المبني على أساس السعة والذي تكون ممانعته أساساً سعوية مع مُكَوِّن مقاوم صغير. إن تردد جهد الإثارة هو حوالي ٢,٥ كيلو هرتز عادة. سوف يغير المبدل مطال جهد الحامل بالنسبة إلى التبدلات في المتغير الفيزيولوجي المراد قياسه. ولذلك سوف يكون خرج المبدل إشارة معدّلة مطالياً (AM) كما هو مبين في الشكل رقم (٤,٦).

يُمكن بعد ذلك تقديم إشارة التيار المتناوب المُعدّلة مطالياً إلى مضخم مترابط سعوياً متعدد المراحل. تُنتِج المرحلة الأولى تضخيماً للإشارة المعدَّلة مطالياً. إن المرحلة الثانية مبنية بحيث تستطيع الاستجابة فقط إلى تردد الإشارة الواردة من الحامل. ويمكن لهذه الإشارة أن تُضخَّم إلى حد أبعد في المرحلة التالية. بعد التضخيم يتم فك تعديل الإشارة في دارة مفكك تعديل حساس للطور ويساعد ذلك في استخلاص جهد الإشارة المضخمة بعد دارة المرشح. يمكن بعدئذ تطبيق الجهد الذي تم إنتاجه بواسطة مفكك التعديل إلى المرحلة القائدة من نظام الكتابة.

يُمكن استخدام المضخمات الحاملة مع مبدل مقياس الإجهاد ذو المقاومة مثل مقياس الإجهاد نصف الناقل. وعندما تستخدم المضخمات الحاملة مع مقاييس الضغط يُشترط وجود تحكم بالمعايرة في المضخم الحامل. وهذا يُمكّن من إجراء قياسات مباشرة لضغط الدم من مسجل الرسم البياني المُعايَر.

إن مضخم الإشارات الغائرة نموذج مفيد لتقنية الحامل المُصَمَّمة لقياس الإشارات ذات المستوى المنخفض المخفية في الضجيج. ويُخَفِّض هذا النوع من المضخمات ضجيجاً عريضة الحزمة كما يزيد من نسبة الإشارة إلى الضجيج من خلال حمل الإشارة في حزمة خرج ذات عرض ضيق إلى أبعد حد. وهكذا يكون الفرق بين المضخم الحامل ومضخم الإشارة الغائرة بأن الأول هو مضخم جهاز للأغراض العامة بينما يُصَمَّم الأخير لقياس إشارات في خلفيات مليئة بالضجيج.



الشكل رقم (٤,٦). مخطط صندوقي لمضخم حامل.

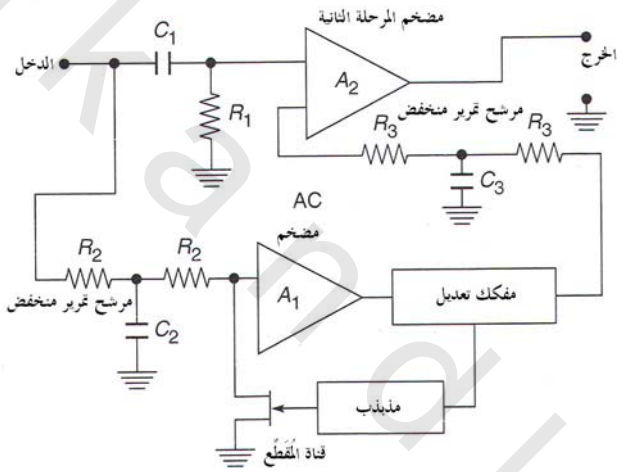
يعمل مضخم الإشارات الغائرة من حيث المبدأ من خلال التزامن مع تردد وحيد يدعى التردد المرجعي. يتم بناء هذا التردد ليحتوي الإشارة ذات الاهتمام. تُعدَّل الإشارة بواسطة التردد المرجعي بطريقة تكون فيها كل البيانات المطلوبة عند التردد المرجعي الوحيد بينما يكون الضجيج العريض الحزمة والذي لا يمكن تجنبه عند كل الترددات. ويسمح هذا باسترداد الإشارة من خلفيتها المليئة بالضجيج.

(٤,٣,٤) المضخم المُقطع Chopper Amplifier

المضخم المُقَطِّع هو جهاز مفيد في مجال الإلكترونيات الطبية حيث يقدم حلاً آخراً لمشكلة تحقيق استجابة ترددية منخفضة كافية في حين يتجنب مشكلة الانحراف المتأصلة في المضخمات المترابطة مباشرة. يستخدم هذا النوع من المضخمات جهاز تقطيع يحوِّل التيار المستمر المتغير ببطء إلى شكل متناوب بمطال متناسب مع التيار المستمر للدخل وبطور يعتمد على قطبية الإشارة الأصلية. يتم بعدئذ تضخيم الجهد المتناوب بواسطة مضخم ac تقليدي ويتم تقويم خرجه فيما بعد للحصول على تيار مستمر مُضَخَّم. إن المضخم المُقَطِّع جهاز ممتاز للإشارات ذات عرض الحزمة الضيق ولتقليل مشكلة الانحراف.

يُبين الشكل رقم (٤,٧) مخططاً صندوقياً مُبسطاً لمضخم مستقر مُقَطِّع وحيد النهاية. يحقق المضخم تيار انحياز وجهد انحراف dc فائقي الانخفاض خاصين به من خلال تقطيع المركبات الترددية المنخفضة لإشارة الدخل وتضخيم هذه الإشارة المُقَطَّعه في مضخم ac (A_1) و بعد ذلك فك تعديل خرج المضخم ac. يتم اشتقاق مركبات التردد

المنخفض من إشارة الدخل من خلال تمريرها عبر مرشح تمرير منخفض يتألف من R_2, C_2 و R_2. يتم توليد إشارة التقطيع بواسطة المذبذب. بعد ذلك يتم تضخيم الخرج المُرشَّح إلى حد أبعد في مرحلة ثانية من التضخيم dc (A_2). إن إشارات التردد العالي، التي تم ترشيحها خارجاً عند مدخل قناة المُقَطِّع، مترابطة مباشرة مع مضخم المرحلة الثانية. إن نتيجة هذه التقنية هي تخفيض انزياحات dc عن الصفر وانحراف المضخم الثاني بعامل مساوي لربح قناة المُقَطِّع. لا يقدم مضخم التيار المتناوب أية انزياحات عن الصفر. توجد تيارات انحياز وانزياحات عن الصفر ثانوية بسبب التقطيع غير التام، لكنها صغيرة إلى أقصى حد. يحتوي موديول المضخم على قناة المُقَطِّع متضمناً المفاتيح ومذبذب تحويل قيادة مدمج بالموديول، ويتم فقط التزود بالطاقة dc من الخارج.



الشكل رقم (٤,٧). مخطط صندوقي مبسط لمضخم عملياتي مستقر مقطع وحيد النهاية.

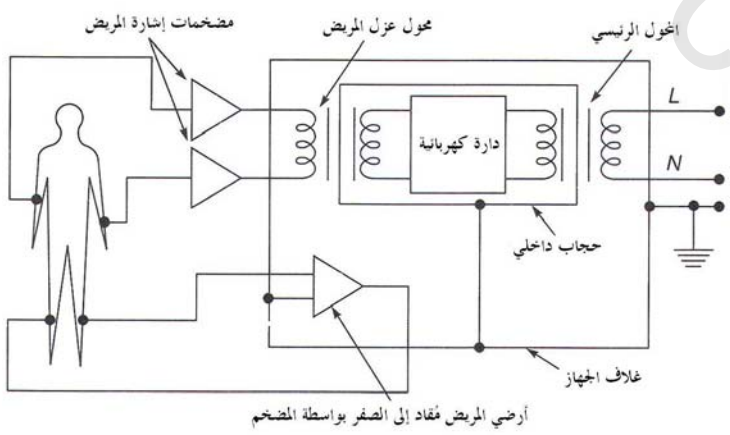
إن دقة تمييز الإشارة محدودة فقط بالضجيج الموجود في الدارة؛ بسبب الانحراف dc والانزياح dc عن الصفر المنخفضين إلى أقصى حد المترافقين مع المضخم المستقر المُقَطِّع. وهكذا فإنه من المرغوب فيه تصميم شبكات التغذية الراجعة وشبكة الأسلاك الخارجية لتقليل ضجيج الدارة الكلي إلى الحد الأدنى. عندما لا يكون عرض حزمة المضخم مطلوباً بالكامل فإنه يُنصح باستخدام مكثف تغذية راجعة للحد من عرض الحزمة الإجمالي وللتخلص من ضجيج التردد العالي قدر المستطاع. إن التحجيب لمكونات التغذية الراجعة مرغوب فيه في المضخمات المُقَطِّعة. وهو ضروري خصوصاً في البيئات المليئة بالضجيج الكهربائي. كما يُنصح أيضاً باستخدام سلك مُحجَّب لجميع مساري الاتصال. إن انحراف الجهد النموذجي في المضخمات المستقرة المُقَطِّعة هو ٠,١ مايكرو فولت/درجة مئوية وانحراف التيار عادة ٠,٥ بيكو أمبير/درجة مئوية.

إن القوة العظمى للمضخم المستقر المُقَطّع هي عدم حساسيته لتغيرات المُكوِّن بسبب التقادم أو تغير درجة الحرارة. أو اختلاف التزود بالطاقة أو أية عوامل بيئية أخرى. وبالتالي يكون هذا المضخم عادة الخيار الأفضل حيثما يجب أن يكون كلاً من تيار الانحياز وجهد الانحراف صغيرين على فترات طويلة من الزمن أو عندما توجد تغيرات بيئية مهمة. يُمكن جعل كلاً من تيار الانحياز وجهد الانزياح عن الصفر عديمي القيمة إلى أبعد حد. تتوفر المضخمات المُقَطّعة بالترتيب ذو النهاية الوحيدة بالإضافة إلى الترتيب ذو المدخل التفاضلي. تجد المضخمات المُقَطّعة تطبيقات في المجال الطبي في تضخيم إشارات التيار المستمر الصغيرة المساوية لبضعة مايكرو فولت. يمكن الحصول على مثل هذه المرتبة من المطالات من مبدلات مثل مبدلات الضغط بمقياس الإجهاد و حساسات الحرارة مثل المقاومات الحرارية وأجهزة تخطيط العضلات بمقياس الإجهاد وذلك عندما تُستخدم كأذرع في جسر وتستون ذو التيار المستمر. المضخم المُقَطّع مناسب للاستخدام أيضاً مع المزدوجة الحرارية.

(٤,٣,٥) مضخمات العزل Isolation Amplifiers

تُستخدم مضخمات العزل عموماً لتأمين الحماية ضد تيارات التسريب. وهي تقطع الاستمرارية الأومية للإشارات الكهربائية بين الدخل والخرج للمضخم. يتضمن العزل مصادر جهود تغذية مختلفة ونقاط للأرضي مختلفة على كل من جانبي حاجز العزل. تُستخدم ثلاثة طرق في تصميم مضخمات العزل: (١) العزل بالمحول، (٢) العزل الضوئي، (٣) العزل السعوي.

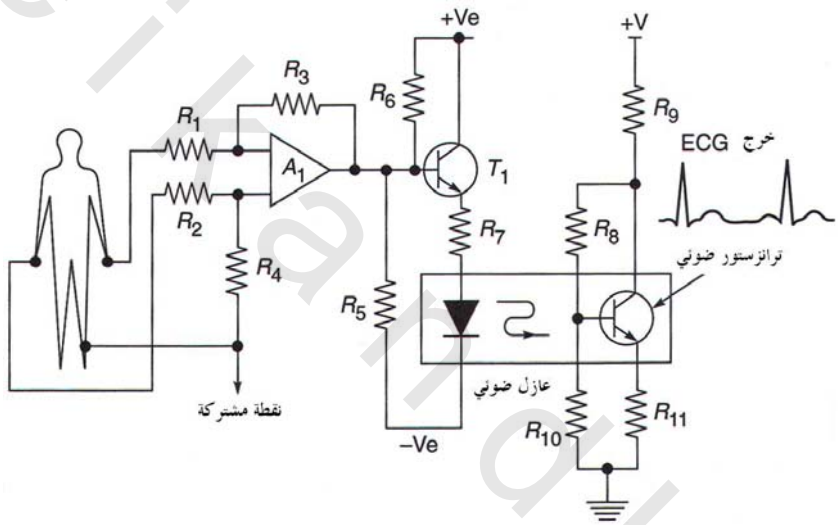
يُبين الشكل (٤,٨) طريقة العزل بالمحول. وهي تستخدم إما إشارة حاملة مُعدَّلة ترددياً وإما إشارة حاملة مُعدَّلة بعرض النبضة بعروض حزمة إشارة صغيرة تصل حتى ٣٠ كيلو هرتز لِحَمل الإشارة. يستخدم هذا النوع من العزل محول dc- إلى-dc داخلي متضمناً مذبذب تردده ٢٠ كيلو هرتز ومحول ومقوّم ومرشح لتزويد طاقة معزولة.



الشكل رقم (٤,٨). مضخم عزل (نوع المحول).

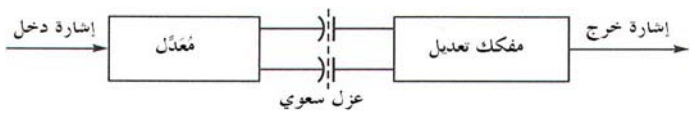
يمكن تحقيق العزل أيضاً بالوسائل الضوئية التي يكون فيها المريض غير متصل كهربائياً مع خط المستشفى ولا مع خط الأرضي. يتم تغذية دارة المريض بالطاقة بواسطة دارة تعمل على بطارية مستقلة وتحويل الإشارة ذات الاهتمام إلى ضوء بواسطة مصدر ضوئي (LED).

يسقط هذا الضوء على ترانزستور ضوئي من جهة الخرج يحول الإشارة الضوئية ثانية إلى إشارة كهربائية (الشكل رقم (٤,٩)) لها تردد الإشارة الأصلية ومطالها وخَطّيتها. ليس هناك حاجة إلى مُعدِّل/مفكك تعديل ؛ لأنه يتم نقل الإشارة ضوئياً على طول الخط.



الشكل رقم (٤,٩). مضخم عزل معزول ضوئياً.

تستخدم الطريقة السعوية [الشكل رقم (٤,١٠)] ترميزاً رقمياً لجهد الدخل وتعديلاً ترددياً لإرسال الإشارة عبر الحاجز السعوي التفاضلي. هناك حاجة إلى تغذية بالقدرة منفصلة على كلا الجانبين من الحاجز. يمكن في هذا الترتيب معالجة إشارات بعرض حزمة يصل حتى ٧٠ كيلو هرتز وبشكل ملائم.



الشكل رقم (٤,١٠). مضخم عزل مترابط سعوياً.

إن المزايا النسبية للأنواع الثلاثة من تقنيات العزل هي :

- الأنواع الثلاثة كلها قيد الاستخدام بشكل عام على الرغم من أن مضخم العزل بالمحول هو الأكثر شعبية.
- تستخدم المضخمات المترابطة ضوئياً عدداً أقل من المكونات وهي فعّالة من حيث الكلفة، يتبعها المضخم المترابط بواسطة المحول. المضخم المترابط سعوياً هو الأغلى.
- تقدم المضخمات المعزولة ضوئياً جهد العزل الأخفض بين الدخل والخرج (٨٠٠ فولت مستمر)؛ والمترابط بواسطة المحول ١٢٠٠ فولت والمترابط سعوياً ٢٢٠٠ فولت.
- إن مستويات مقاومة العزل هي من الدرجة $١٠^{١٠}$ و $١٠^{١٢}$ و $١٠^{١٢}$ أوم للمضخمات المترابطة بواسطة المحول والمترابطة ضوئياً والمترابطة سعوياً على الترتيب.
- إن استقرار الربح والخطية أفضل في النماذج المترابطة سعوياً-٠,٠٠٥ ٪ ومتساوية من أجل المضخم ذو المحول والمضخم المُترابط ضوئياً-٠,٠٢ ٪.

إن العزل الكهربائي هو أكثر تقنية مُستخدمة عموماً لضمان حماية المريض ضد المخاطر الكهربائية. يتم تصميم الأجهزة مثل أجهزة تخطيط كهربية القلب ومونيتورات الضغط ومبدلات الضغط وناظمات خطى القلب وأجهزة أخرى لتفصل كهربائياً جزء الدارة الموصول إليه المريض عن جزء الدارة الموصول إلى خط الطاقة ac والأرضي.

(٤,٤) مصادر الضجيج في القياسات ذات المستوى المنخفض

Source of Noise in Low Level Measurements

(٤,٤,١) الترابط الكهرومغناطيسي و الكهروستاتيكي لإشارات الـ ac

Electrostatic and Electromagnetic Coupling to ac signals

تؤمن السعة الموزَّعة بين نواقل الإشارة ومن نواقل الإشارة إلى الأرضي ممر ac بممانعة منخفضة ينتج عنه تلويث الإشارة من مصادر خارجية مثل خطوط القدرة والمحولات. بشكل مشابه يسبب التدفق المغناطيسي المتناوب من أسلاك خطوط الطاقة المجاورة جهداً في حلقة الإشارة متناسباً مع معدَّل التغير لتيار التشويش ومع مقدار تيار التشويش والمناطق المحصورة بحلقة الإشارة. وهذا الجهد متناسب عكساً مع المسافة من سلك التشويش إلى دارة الإشارة. تؤدي المسافات غير المتساوية للناقلين الحاملين للإشارة عن سلك تيار التشويش إلى تحريضات متبادلة غير متساوية تجعل الحقل المغناطيسي ينتج جهد ضجيج عبر نهايات دخل المضخم.

إن الإشارات ذات المستوى المنخفض حساسة للتلوث الخارجي خصوصاً في حالة ممانعة المنبع العالية. وبالرجوع إلى الشكل رقم (٤,١١) فإنه من الواضح بأن التيارات المتولدة بواسطة إشارات الضجيج المتنوعة سوف تجري من خلال ممانعة مصدر الإشارة Z وتؤدي إلى زيادة غير مرغوبة في الإشارة الكهربائية الحيوية أو إشارة المبدل.

يمكن أن يتضمن هذا التقاط الضجيج الكهرومغناطيسي والتقاط الضجيج الكهروستاتيكي والتيار غير المطلوب المتولد في حلقة الأرضي بين أرضيين منفصلين في دارة الإشارة نفسها. إن مقدار هذه الإشارات غير المطلوبة سوف يكون متناسباً مباشرةً مع ممانعة مصدر الإشارة كما هو مبين في العلاقة التالية :

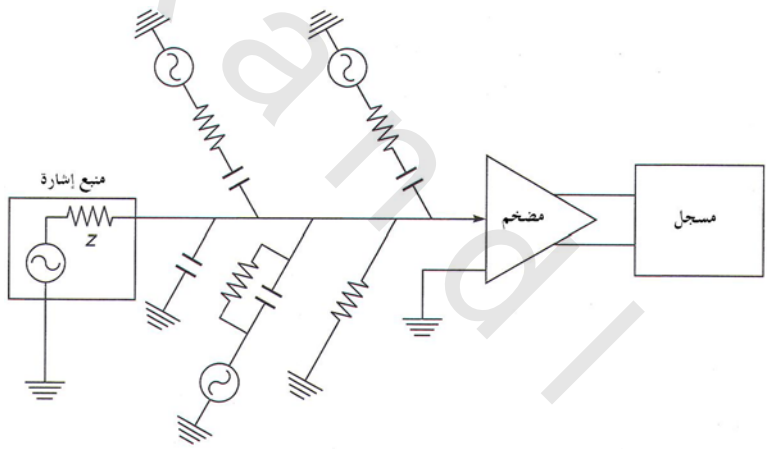
إشارة دخل المضخم= $E+IZ$

حيث : E= مطال الإشارة العادية

Z= ممانعة مصدر الإشارة

I= التيار المتولد بواسطة الضجيج

من الواضح أنه عندما تقترب ممانعة مصدر الإشارة إلى الصفر فسيدخل الضجيج إلى المضخم. في الواقع ، تُحوِّل ممانعة المصدر المنخفضة الضجيج إلى الخارج بشكل فعّال.



الشكل رقم (٤,١١). تيارات يتم إنتاجها من خلال أشكال متعددة للضجيج تجري من خلال ممانعة مصدر الإشارة وتصبح زيادة غير مطلوبة على الإشارة المفيدة. مطال الضجيج متناسب مباشرة مع ممانعة مصدر الإشارة. عن (Courtesy: Gould Inc.)

لمنع التقاط الضجيج من الحقول الكهروستاتيكية تُحاط نواقل الإشارة ذات المستوى المنخفض بحجاب فعّال. ويكون عادةً جديلة معدنية مُحاكة حول زوج الإشارة الموضوع تحت الطبقة الخارجية للعزل. يتم تأمين تحجيب فعّال أكثر بواسطة نوع خاص من كابلات الإشارة لها أحجبة ذات طبقة معدنية ملتفة إضافة إلى سلك تصريف ذي مقاومة منخفضة عوضاً عن الحجاب السلكي المجدول التقليدي.

إن الطريقة الأسهل وبشكل عام الأفضل لحماية كابل الإشارة ضد التشويشات الإلكترومغناطيسية الخارجية هي تجديل نواقل الدارة مع بعضها ببعض بإحكام لتلغي كهربائياً أثر الحقل المغناطيسي الخارجي. وكلما كانت طبقة

التجديل أقصر كلما كان رفض الضجيج أكبر. وهكذا يتم تخفيض الترابط الإلكترومغناطيسي بواسطة التحجيب وجدل الأسلاك والتأريض المناسب الذي يؤمن زوج إشارة متوازن مع خصائص رفض ضجيج مُرضيَة.

(٤,٤,٢) التأريض المناسب (ترابط الممانعة المشترك)

Proper Grounding (Common Impedance Coupling)

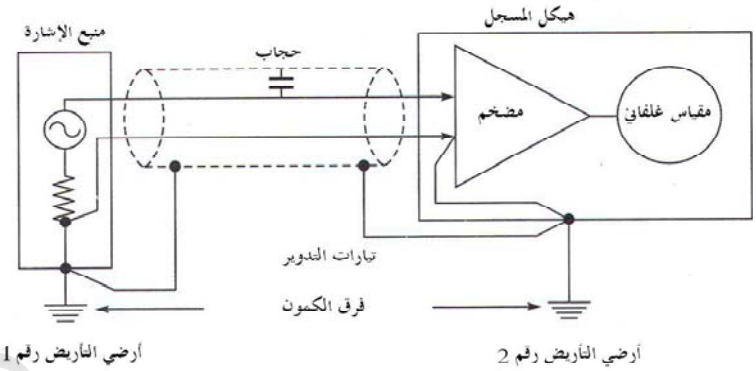
يُنتج وضع أكثر من أرضي في دارة الإشارة حلقة أرضية تستطيع توليد الكثير من الضجيج الذي يمكنه أن يحجب الإشارة المفيدة تماماً. يعني مصطلح "التأريض" الاتصال المعدني بممانعة منخفضة إلى شبكة أرضي مُصَمَّمة بدقة وموضوعة في الأرض. إن التأريض المستقر ضروري لتحقيق تحجيب فعّال لدارات المستوى المنخفض لتأمين مرجع مستقر للقيام بقياسات الجهد و لتأسيس قاعدة صلبة لرفض إشارات النمط المشترك غير المرغوب فيها. يوجد نظامين للتأريض عموماً - أرضي النظام وأرضي الإشارة.

ينبغي أن تُجهَّز جميع القياسات ذات المستوى المنخفض وأنظمة التسجيل بأرضي نظام مستقر للتأكد من بقاء المحتويات الإلكترونية وهيكل الجهاز التي تعمل في بيئة إلكترومغناطيسية عند كمون صفري. في معظم الأمثلة فإن الناقل النحاسي الثالث في جميع الدارات الكهربائية المربوط بشكل متين إلى أرضيي الطاقة الكهربائية معاً- أرضي البناء والنظام المائي- سوف يؤمن أرضي نظام مُرضٍ.

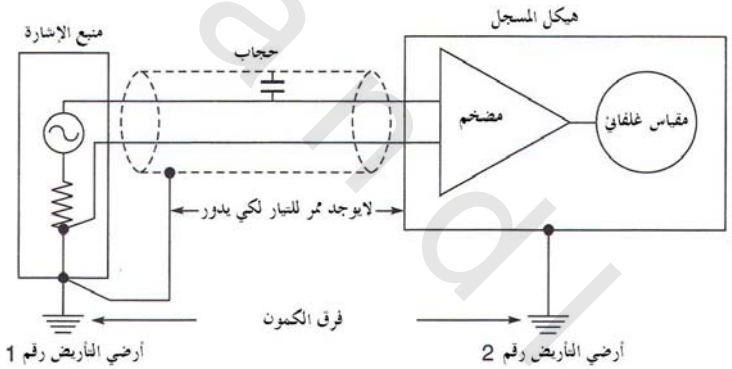
من ناحية أخرى فإنه من الضروري في أرضي الإشارة ضمان مرجع إشارة بضجيج منخفض بالنسبة إلى الأرضي. ينبغي أن يكون هذا الأرضي ممراً ذا ممانعة منخفضة إلى الأرض الرطبة لتقليل دخول الجهود الزائفة إلى دارة الإشارة إلى أدنى حد. ومن المهم الملاحظة بأنه ينبغي أن تكون دارة الإشارة مؤرضة إلى نقطة واحدة فقط.

من النادر وجود أرضيين منفصلين عند نفس الجهد المطلق. إذا وصلنا أكثر من أرضي إلى نفس دارة الإشارة، فسوف يجري تيار غير مرغوب فيه في حلقة الأرضي التي تم إحداثها. يوحِّد هذا التيار نفسه مع الإشارة المفيدة، كما هو مبين في الشكل رقم (٤,١٢). توجد أيضاً حلقة أرضي ثانية من خلال حجاب كابل الإشارة من مصدر الإشارة إلى المضخم. إن التيار في الحجاب مُترابط مع زوج الإشارة بواسطة السعة الموزَّعة في كابل الإشارة.

يجري هذا التيار بعدئذ من خلال ممانعة الخرج لمصدر الإشارة ويعود إلى الأرضي، وبالتالي يضيف مصدراً ثانياً للضجيج إلى الإشارة المفيدة. تولِّد كل واحدة من حلقات الأرضي هذه إشارة ضجيج أكبر من إشارة مفيدة بميلي فولت نموذجية. يتم التخلص من حلقات الأرضي بواسطة تعويم نهاية الدخل السفلية للمضخم. تبقى محتويات المضخم مؤرضة بمتانة إلى أرضي التأريض رقم ٢ ولكن ذلك لن يُحدث حلقة أرضي نظراً لأن محتويات المضخم معزولة عن دارة الإشارة. يتم إبعاد حلقة الأرضي بسبب كابل الإشارة بواسطة تأريض الحجاب فقط عند مصدر الإشارة وهو الترتيب الصحيح لالتقاط الحد الأدنى من الضجيج (الشكل رقم (٤,١٣)).



الشكل رقم (٤,١٢). حلقة الأرضي الناتجة بواسطة أكثر من أرضي في دارة الإشارة. يسبب فرق الكمون بين أرضـي التـأريض رقـم ١ وأرضي التأريض رقم ٢ دوراناً للتيار في حجاب كابل الإشارة وفي ناقل الإشارة السفلي أيضاً منتجاً حلقتي أرضـي منفصلتين.



الشكل رقم (٤,١٣). التخلص من الأرضي المتعدد. يتم قطع حلقة الأرضي في مسرى الإشارة السفلي من خلال نقل السلك الوثـاب إلى أرضي التأريض رقم ٢. يتم قطع حلقة الأرضي في حجاب الكبل من خلال نقل وصلته إلى أرضي التأريض رقـم ٢. عن (Courtesy: Gould Inc.).

(٤,٥) تقنيات تحليل الإشارة الطبية الحيوية

Biomedical Signal Analysis Techniques

(٤,٥,١) تحويل فورييه Fourier Transform

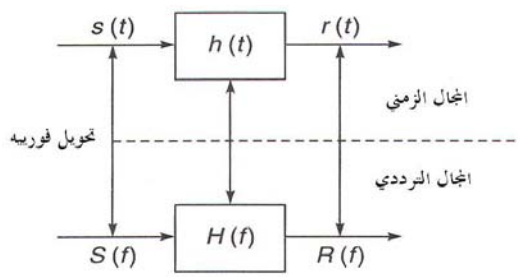
تلتقط المبدلات و الحساسات في التجهيزات الطبية الحيوية الإشارات من النسيج البيولوجي بهدف اكتشاف صحتها وسلامتها. تستخدم معالجة الإشارة أدوات تحليل رياضية متطورة واللوغاريتم لاستخلاص معلومات مخبأة في هذه الإشارات التي يتم استقبالها من مبدلات وحساسات متعددة. تحاول لوغاريتمات معالجة الإشارة التقاط

مواصفات الإشارة والمكونات المهمة للتشخيص. وبما أن معظم الإشارات ذات المنشأ الحيوي متغيرة بالزمن فإنه توجد ضرورة إلى التقاط ظاهرة العبور عند دراسة سلوك الإشارات الحيوية.

يوجد عرضان مختلفان لنفس البيانات التجريبية يُعرفان بالمجالات. وهما المجال الزمني الذي تُسجل فيه البيانات كسلسلة من القياسات عند فواصل زمنية متعاقبة والمجال الترددي الذي يتم فيه تمثيل البيانات بواسطة مطال مركباتها الجيبية والتجيبية عند ترددات مختلفة. على سبيل المثال يتم من أجل أغراض الإظهار والتسجيل تمثيل الإشارات الطبية الحيوية في مجال الزمن، هذا يعني، أنه يتم تمثيل الإشارة بواسطة قيمتها (المحور-y) على محور الزمن (المحور-x). يُمكن وصف أية إشارة طبية حيوية في المجال الترددي عندما تتألف من أمواج جيبية وتمتلك مطالات وأطوار مختلفة (المحور-y) كتابع للتردد (المحور-x). يُعطى التحويل بين طريقتي التمثيل بواسطة تحويل فوريه (FT).

إن الدافع الأساسي لتطوير أدوات التحليل الترددي هو تأمين تمثيل تصويري ورياضي للمركبات الترددية المُحتواة في أية إشارة مُعطاة. يُستخدم مصطلح الطيف عند الدلالة على محتوى التردد لإشارة ما. تُعرف عملية الحصول على الطيف لإشارة مُعطاة باستخدام أدوات رياضية أساسية بالتحليل الطيفي أو الترددي. يمكن تحليل معظم الإشارات الطبية الحيوية ذات الاهتمامات العملية إلى مجموع من مركبات الإشارة الجيبية. يُدعى مثل هذا التحليل بسلسلة فوريه من أجل صنف الإشارات الدورية. ويُدعى التحليل من أجل صنف الإشارات ذات الطاقة المنتهية بتحويل فوريه.

بالإشارة إلى الشكل رقم (٤,١٤) يمكن وصف استجابة النظام بالنسبة إلى إشارة دخل متغيرة *s(t)* مع طيف ترددي *S(f)* بأنها قابلة للتبادل بشكل أساسي من خلال الاستجابة *r(t)* في المجال الزمني (كقصة زمنية) أو من خلال الاستجابة *R(f)* في المجال الترددي (كطيف ترددي).



الشكل رقم (٤,١٤). تابع النقل لمنظومة، تميز h(t) وH(f) استجابتها r(t) في المجال الزمني وR(f) في المجال الترددي لاســتقبال المنبــهات s(t) وS(f). إن المجالين متصلين بواسطة تحويلات فوريه.

openkandil.com

تعمل خصائص النظام الأساسية على الإشارة لإنتاج استجابة وفقاً للتنبيه. يمكن التعبير عن العملية في المجال الترددي كجداء بسيط. تُدعى نسبة الاستجابة إلى التنبيه بتابع النقل *H(f)* حيث :

$$H(f)=R(f)/S(f)$$

إن المجال الزمني والمجالات الترددية مترابطة إلى حد بعيد بواسطة تحويل فورييه.

(٤,٥,٢) تحويل فورييه السريع Fast Fourier Transform (FFT) (FFT)

يُمكن أن يصبح استعمال تحويل فورييه مضجراً ومستهلكاً للوقت حتى عند استخدم الكمبيوترات وخصوصاً عندما يجب الأخذ بعين الاعتبار عدد كبير من النقاط. ولقد تم تسهيل الوضع كثيراً مع إدخال لوغاريتم تحويل فورييه السريع (FFT) الذي ينشر الإشارة إلى توابع جيبية وتجيبية. يتم حساب الطيف الترددي لكل مقطع منفصل من الإشارة. إن خرج لوغاريتم تحويل فورييه السريع هو مجموعة من المعاملات، أثنان لكل مركبة ترددية في طيف الإشارة. يتم ضرب أحد المعاملات (A) بتجيب الزاوية أو بجزء من مطال المركبة. ويتم ضرب المعامل الآخر (B) بجيب الزاوية أو بجزء من طور المركبة. بعد ذلك يمكن تمثيل كل مركبة في السلسلة FFT كما يلي :

$$A\cos(\omega t)+i\,B\sin(\phi)$$

حيث : ω = التردد الزاوي للمركبة

A = أحد معاملات تحويل فورييه السريع

B = أحد معاملات تحويل فورييه السريع

$\emptyset$ = زاوية الطور المركبة

i = العدد التخيلي، $\sqrt{-1}$

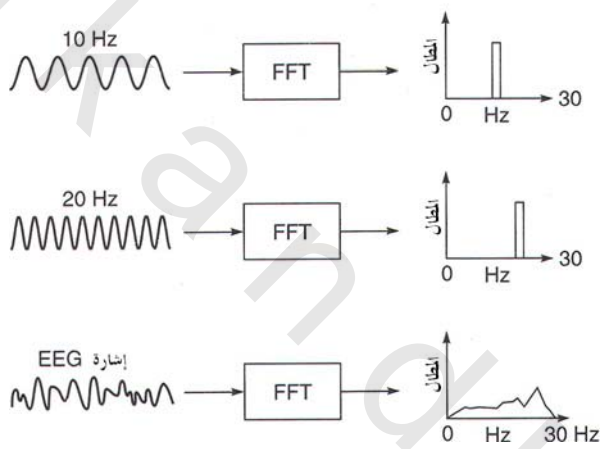
t = الزمن

إن عدد المركبات الترددية وأزواج معاملات تحويل فورييه السريع الضرورية لتمثيل شكل موجة مُعطى هو تابع للتردد الأعلى الواجب تمييزه ولمعّدل أخذ العينات المُستخدم.

يُوضح الشكل رقم (٤,١٥) التحليل لإشارة كهربائية حيوية نموذجية (شكل موجة EEG) إلى مركباتها الترددية الأساسية وبعد ذلك إظهارها كطيف ترددي. يبين الرسم البياني المركبات الترددية بالإضافة إلى المطال الموجود في كل تردد. وحالما يتم حساب الطيف الترددي للمقطع المُعطى من الإشارة فإنه يتوفر عدد من التقنيات لإظهار المعلومات.

obeikandl.com

تفترض طريقة تحويل فورييه السريع أن تكون الإشارة مستقرة وبناء عليه تكون غير حساسة لميزاتها المتغيرة. من ناحية ثانية فإن معظم الإشارات الطبية الحيوية غير مستقرة وتملك خصائص ترددية زمنية معقدة جداً. يمكن أن يكون شرط الاستقرار للإشارة غير المستقرة مُقنعاً من خلال تقسيم الإشارة إلى مجموعات من المقاطع القصيرة التي يمكن فيها الافتراض بأن مقطع الإشارة مستقر. تدعى هذه الطريقة بتحويل فورييه قصير الزمن (STFT). من ناحية ثانية فإن المشكلة في هذه الطريقة هي طول المقطع المطلوب. يمكن أن يسبب اختيار نافذة تحليل قصيرة دقة تمييز ترددية سيئة. من ناحية أخرى يمكن لنافذة التحليل الطويلة تحسين دقة التمييز الترددية ولكنها تُعَرِّض افتراض الاستقرار ضمن النافذة للخطر.



الشكل رقم (٤,١٥). إشارة EEG محللةً إلى المركبات الترددية الأساسية.

(٤,٥,٣) تحويل الموجة الصغيرة (ويفلت) Wavelet Transform

توجد طريقة حديثة لتحليل الإشارات الطبية الحيوية غير المستقرة هي تحويل الموجة الصغيرة. تعمل طريقة الموجة الصغيرة كمجهر رياضي يمكن فيه مراقبة أجزاءً مختلفة من الإشارة بواسطة ضبط المركز فقط. في الواقع ليس من الضروري من أجل تحويل الموجة الصغيرة امتلاك بارامترات بتردد مستمر (تدريج) لتسمح بتنفيذ عمليات عددية سريعة ؛ ويمكن تغيير التدريج أثناء التحرك على طول المتتالية. بناءً عليه يملك تحويل الموجة الصغيرة دقة تمييز زمنية جيدة جداً عند الترددات العالية ودقة تمييز ترددية جيدة عند الترددات المنخفضة. يُستخدم تحويل الموجة الصغيرة في الهندسة الطبية الحيوية في العديد من مجالات البحث متضمناً الترشيح الحيزي وكشف الحواف واستخلاص المزايا وضغط البيانات والتعرف على الشكل والتعرف على النطق و ضغط الصورة وتحليل البنية. وعلى سبيل المثال طوَّرَ Sahambi et al, 2000 لوغاريتماً من أجل تغيُّر الفاصلة *QT* نبضة بنبضة باستخدام طريقة الموجة الصغيرة.

إن الموجات الصغيرة هي طريقة لمعالجة الإشارة حديثة نسبياً. ويتم تنفيذ تحويل الموجة الصغيرة بشكل دائم تقريباً على شكل صف من المرشحات التي تحلل الإشارة إلى حزم إشارة متعددة. ويقوم بفصل واحتجاز مزايا الإشارة في واحدة أو في بعض من هذه الحزم. وهكذا فإن واحدة من أكبر حسنات استخدام تحويل الموجة الصغيرة هي أنه يمكن بسهولة استخلاص مزايا الإشارة. يحقق تحويل الموجة الصغيرة في عدة حالات نتائج أفضل من تحويل فوريه السريع التقليدي عندما تكون العملية استخلاص الميزة وتخفيض الضجيج.

الطريقة الأخرى لتحليل الإشارة هي **المرشح التلاؤمي** الذي يستطيع ضبط نفسه باستمرار ليعمل بشكل أمثل تحت الظروف المُتغيرة. يتم تحقيق هذا من خلال تصحيح الإشارة وفقاً للتطبيق الخاص. ويمكن أن يكون التصحيح تحسيناً أو تغيراً في الشكل إلى حد ما ومن أجل هذا يكون لوغاريتم التصحيح مطلوباً. يمكن تنفيذ هذا على أحسن وجه بشكل رقمي. وبناءً عليه يتم تنفيذ معظم المرشحات التلاؤمية بواسطة الكمبيوترات أو بواسطة رقاقات معالجة إشارة رقمية خاصة.

(٤,٦) تقنيات معالجة الإشارة

Signal Processing Techniques

عند تمرير إشارة خلال جهاز ينفّذ عملية ما، مثل الترشيح، يُقال بأنه تمت معالجة الإشارة. يمكن أن يكون نوع العملية المُنفَّذة خطياً أو غير خطياً. ويُشار عادة إلى مثل هذه العمليات بمعالجة الإشارة.

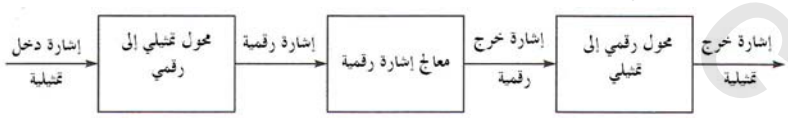
يمكن إنجاز العمليات بواسطة جهاز فيزيائي أو برنامج ما. على سبيل المثال يمكن برمجة كمبيوتر رقمي لانجاز الترشيح الرقمي. ففي حالة عمليات البيئة الصلبة الرقمية (الدارات المنطقية)، يكون لدينا جهاز فيزيائي ينجز عملية معينة. وعلى العكس ففي المعالجة الرقمية للإشارات في كمبيوتر رقمي فإن العمليات المُنفَّذة على إشارة ما تتألف من عدد من العمليات الرياضية كما هو محدد خلال البرنامج.

إن معظم الإشارات المُكتشفة في التجهيزات الطبية الحيوية تمثيلية في طبيعتها، هذا يعني أن الإشارات توابع لمتغير مستمر مثل الزمن أو المسافة. يمكن معالجة مثل هذه الإشارات بواسطة الأنظمة التمثيلية مثل المرشحات أو أجهزة تحليل التردد أو مضاعفات التردد. حتى حوالي العقدين الماضيين كانت معظم عمليات معالجة الإشارة تتم باستخدام معالجات تمثيلية مُتخصصة. وعندما أصبحت الأنظمة الرقمية متوفرة وتم تطوير لوغاريتمات المعالجة الرقمية أصبحت المعالجة الرقمية أكثر انتشاراً. تم تنفيذ المعالجة الرقمية في البداية في معالجات صغريه للأغراض العامة. من ناحية ثانية ومن أجل تحليل إشارة أكثر تطوراً كانت هذه الأجهزة بطيئة إلى حد كبير ووُجدت بأنها غير مناسبة للتطبيقات في الزمن الحقيقي. أدت التصاميم المتخصصة في المعالجات الصغريه إلى تطوير معالجات الإشارة الرقمية التي بالرغم من أنها تنجز عدداً محدوداً تماماً من الوظائف لكنها تفعل هذا أيضاً عند سرعات عالية.

يحتاج معالج الإشارة الرقمي (المعروف عموماً بـ DSP) إلى واجهة ربط (الشكل رقم (٤,١٦)) بين الإشارة التمثيلية والمعالج الرقمي الذي يتم عادة تأمينه بواسطة محول تمثيلي- إلى- رقمي. حالما يتم تحويل الإشارة إلى رقميه يمكن عندها برمجة معالج الإشارة الرقمي لينفّذ العمليات المطلوبة على إشارة الدخل. تؤمن سهولة البرمجة المرونة لتغيير عمليات معالجة الإشارة من خلال تغيير في البرنامج في حين أنه من الصعب تشكيل الآلات المبنية داخل النظام الدائم وغير المتوفرة على شكل برنامج.

لهذا السبب تكون معالجات الإشارة القابلة للبرمجة شائعة الاستخدام عملياً. من ناحية أخرى عندما يتم تحديد عمليات معالجة الإشارة بشكل جيد، في بعض التطبيقات، فإنه يمكن تحقيق تنفيذ أمثل للعمليات بواسطة الأدوات المبنية داخل النظام الدائم وغير المتوفرة على شكل برنامج بحيث ينتج عنه معالجات إشارة أسرع وأرخص. هناك حاجة إلى استخدام محول تمثيلي- إلى- رقمي (DA) في الحالات التي يجب أن يُعطى فيها الخرج الرقمي من المعالج بشكل تمثيلي إلى المستخدم.

تتوفر معالجات الإشارة الرقمية على شكل رقاقة وحيدة وهي متوفرة تجارياً. إن عائلة معالج الإشارة الرقمية الأكثر استخداماً على نحوٍ واسع هي TMS320 من شركة Texas Instruments. ويتوفر صنف آخر من المعالجات من شركة Motorola هو DSP56001. وبقصد مقارنة السرعة يستطيع المعالج الصغري ١٦- بت Motorola 68000 معالجة ٢٧٠٠٠٠ عملية ضرب بالثانية في حين أن النوع DSP56001 قادر على ١٠٠٠٠٠٠٠ عملية ضرب بالثانية ومن ثمَّ إعطاء زيادة في السرعة بمقدار ٣٧ مرة. وبسبب المرونة في إعادة ترتيب عمليات معالج الإشارة الرقمي فهو يُستخدم في معظم التجهيزات الطبية الحيوية الحديثة من أجل تطبيقات معالجة الإشارة مثل التحويل إلى المجال الترددي وإيجاد المتوسط ومجموعة متنوعة من تقنيات الترشيح.



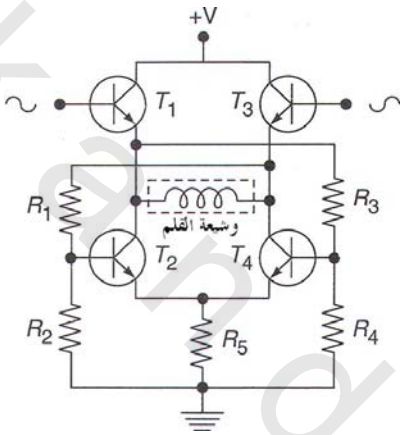
الشكل رقم (٤,١٦). العناصر الأساسية لنظام معالج إشارة رقمي (DSP).

(٤,٧) المضخم الرئيسي ومرحلة القيادة

The Main Amplifier and Driver Stage

إن الممارسة العادية في تصميم المسجلات هي احتواء مضخم أولي يتبعه مضخم رئيسي متصل بدوره إلى مرحلة القيادة. وبالتالي يُشكل المضخم الرئيسي مرحلة متوسطة بين المضخم الأولي ومرحلة الخرج. يتم ضبط الاستجابة الترددية والربح للمضخم الرئيسي لتعطيان انحرافاً للقلم واستجابة ترددية كافيين.

يتم قيادة محرك القلم بواسطة مرحلة قيادة بالتيار المستمر تغذي مرحلة خرج بأربعة ترانزستورات تقوم بتشغيل المقياس الغلفاني. إن الترتيبة الجسرية مُفضلة بسبب فعالية الطاقة المنخفضة لمضخمات الاستطاعة من النوع دفع- سحب التقليدية. بالرجوع إلى الشكل رقم (٤,١٧) فإن التيار المار من خلال الترانزستورات T_1 و T_4 يزداد عندما ينقص التيار المار من خلال الترانزستورات T_2 و T_3. وهكذا عندما تقترب الترانزستورات T_1 و T_4 من دارات القصر، تكون الترانزستورات T_2 و T_3 مقطوعة تقريباً ويمر كل تيار الدارة من خلال وشيعة المقياس الغلفاني. تعمل الترانزستورات T_1 و T_2 كأحمال بواعث. وتعمل الترانزستورات T_1 و T_4 كمضخمات تحتوي على الترانزستورات T_1 و T_3 كأحمال مجمعات. وتؤمن المقاومات R_1 و R_4 الانحياز الصحيح للترانزستورات T_2 و T_4.



الشكل رقم (٤,١٧). مرحلة خرج جسرية من أجل وشيعة المقياس الغلفاني الفائد في مسجلات الكتابة المباشرة.

إن مراحل خرج المضخم مطلوبة لإنتاج خرج إضافي من أجل مستوى إشارة دخل مُعطى عندما يزداد تردد الإشارة. يتم تحقيق هذا في مضخمات الخرج بواسطة استخدام شبكة انتقاء ترددية في خط التغذية الراجعة السالبة لمراحل الخرج والقيادة بحيث يزداد ربح المضخم مع التردد.

كذلك يمكن المحافظة على دقة الإشارة في نظام التسجيل الخطي فقط عندما يملك النظام ميزة انزياح طور خطية وربحاً ثابتاً على كامل حزمة الترددات في الإشارة ذات الاهتمام. تحتاج محركات الأقلام إلى الحماية من الطاقة العابرة الزائدة المُطبقة أثناء التشغيل أو الإطفاء. تحافظ دارة التأخير على ربح محرك القلم منخفضاً لزمن قصير بعد التشغيل. وعند قطع التغذية بالطاقة يسعى الخرج بسرعة إلى الصفر مُخفِّضاً ربح محرك القلم قبل هبوط الطاقة. يتم الحد من الانحراف الزائد للقلم كهربائياً بواسطة محددات تأرجح خرج قابلة للضبط وميكانيكياً بواسطة موقفات قلم، معاً.

(٤,٨) أنظمة الكتابة

Writing Systems

إن المرحلة النهائية والأكثر أهمية في أي نظام هي نظام الكتابة. ومن أجل إعادة إنتاج صحيحة لإشارة الدخل يجب تحقيق ثلاثة شروط أساسية بواسطة الأجزاء المستقلة للنظام. هذه المتطلبات هي: خطية مطالات الإشارة على كامل المجال المطلوب وحزمة تمرير كافية للترددات المشمولة بدون إنتاج أي إزاحة طوريه بين إشارة الدخل والإشارة المُسجلة. يتم اختيار المسجلات استناداً إلى الاستجابة الترددية للبيانات ومتطلبات الدقة ونوع التسجيل البياني المطلوب وعدد قنوات البيانات التي يجب تسجيلها على قطعة واحدة من ورق الرسم البياني. استناداً إلى الاستجابة الترددية تقع المسجلات في المجموعات التالية:

المسجلات بمقياس الجهد: تؤمن هذه المسجلات عادةً استجابة ترددية مقدارها ١ هرتز عند ٢٥ سنتيمتر من القمة إلى القمة أو حتى ٦ هرتز عند مطال مُخفَّض. إن ورق الرسم البياني رخيص وطريقة الكتابة هي عموماً قلم حبر ذو أنبوب شعري أو قلم برأس ليفي.

مسجلات ac *ذات الكتابة المباشرة*: تؤمن استجابة ترددية حتى ٦٠ هرتز عند ٤٠ ميليمتر من القمة إلى القمة أو حتى ٢٠٠ هرتز عند مطالات مُخفَّضة. إن النوع الأكثر شيوعاً من المسجلات المباشرة هو نوع قلم الرسم الذي يكتب مباشرة على الورق المتحرك تحته. ويمكن جعل قلم الرسم يكتب بعدة طرق ولكن الطريقة المستخدمة والأكثر شيوعاً هي قلم الرسم المُسخَّن الذي يكتب على ورق مُعد خصيصاً حساس للحرارة. يمكن أيضاً استخدام نظام حبري ولكن تم مواجهة صعوبة في الحصول على تدفق منتظم مع المشكلة الإضافية لتخثر الحبر في القلم إذا لم يتم استخدام المسجل لفترات طويلة.

مسجل النفاث الحبري: يعطي استجابة ترددية حتى ١٠٠٠ هرتز. ويستخدم هذا المسجل ورقاً عادياً (غير مخطط) رخيصاً كما يستخدم نظام الكتابة نفاثة من الحبر.

المسجل الكهروستاتيكي: يستخدم عملية كتابة كهروستاتيكية ويعمل من أجل ترددات حتى ١٠ كيلو هرتز. إن دقة المطال من القمة إلى القمة هي ٠,١ ٪ عند ١٠٠٠ هرتز و ٠,٢ ٪ عند ١٥٠٠ هرتز و ٢ ٪ عند ٥٠٠٠ هرتز و ٢٠ ٪ عند ١٥ كيلو هرتز. وهذا المسجل غير تابع لمطال الإشارة ولعدد القنوات.

مسجل المصفوفة الحرارية: يستخدم رأس مصفوفة حرارية خطي مُصَمَّم خصيصاً و بالتالي تحل محل الأقلام أو محرك القلم أو الوصلات. إن الاستجابة الترددية غير تابعة لمطال الرسم ولعدد القنوات. يتم تحديد موجة جيبيه ترددها ٢٠ هرتز بواسطة ١٠ مقاطع متجاورة. إن دقة المطال من القمة إلى القمة هي ٠,٢ ٪ حتى ٣٢ هرتز و ٢ ٪ عند ١٠٠ هرتز و ٢٠ ٪ عند ٣٢٠ هرتز. وسوف يتم تسجيل نبضة وحيدة مدتها أكبر من ٦٢٥ مايكرو ثانية بمطالٍ كامل. يستخدم هذا المسجل ورقاً حساساً للحرارة غير مخطط.

المسجلات بالأشعة فوق البنفسجية : تعطي هذه المسجلات بترتيب المقياس الغلفاني، وبمرآة و مصدر لضوء فوق بنفسجي، استجابة ترددية حتى ٢٠٠٠ هرتز. تستخدم هذه المسجلات ورقاً حساساً للأشعة فوق البنفسجية (UV) يحتاج إلى عناية في التخزين. تستخدم المسجلات بالأشعة فوق البنفسجية أنبوب أشعة مهبطيه ليفي- ضوئي من أجل تسجيلات بترددات أعلى. تسعى الاستجابة في هذا النوع من المسجلات حتى عدة ميغا هرتز. ولم تعد هذه المسجلات تُستخدم منذ فترة طويلة.

راسمات الإشارة بالأشعة المهبطية : تُستخدم بشكل واسع من أجل إظهار أشكال الأمواج المُكتشفة في المجال الطبي. يمكن تسجيل أشكال الأمواج هذه من شاشة راسم الإشارة بالأشعة المهبطية (CRO) بواسطة تشغيل فلم تصوير فوتوغرافي من خلال كاميرا تسجيل مثبتة أمام الشاشة. هذه المسجلات إما أن تكون من نوع القناة الوحيدة أو من النوع الذي يسجل عدة قنوات في وقت واحد. وتحمل كل قناة عادة نظام تسجيلها الخاص والمستقل لتجنب التداخل من القنوات الأخرى.

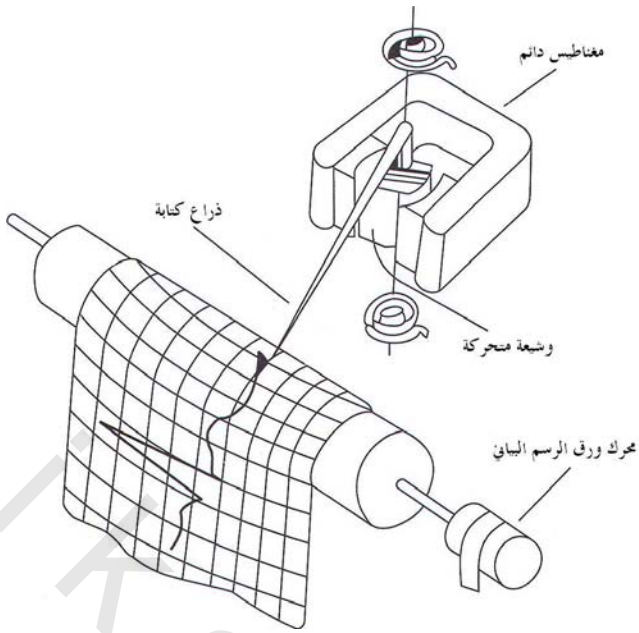
(٤,٩) مسجلات الكتابة المباشرة

Direct Writing Recorders

يُفعِّل المقياس الغلفاني في معظم مسجلات الكتابة المباشرة المُستخدمة بشكل عام ذراع الكتابة الذي يُدعى القلم أو قلم الرسم. تم تعديل الآلية بحركة مقياس D'Arsonval. وتعود شعبية هذا الترتيب إلى اتحاده المتنوع مع الصلابة والدقة و البساطة المعقولة.

يتم تركيب وشيعة من سلك رفيع ملفوف على إطار من الألمنيوم مستطيل الشكل ضمن الفراغ الهوائي بين أقطاب مغناطيس دائم كما هو مبين في الشكل رقم (٤,١٨). ويتم لصق مرتكزات فولاذية مُقساة إلى إطار الوشيعة تلاءم سطوح ارتكاز مُجوهرة Jewelled bearings بحيث تدور الوشيعة بالحد الأدنى من الاحتكاك. وفي كثير من الأحيان يتم استبدال المرتكز والجواهر بنظام ذو حزام مشدود. يتم وصل قلم خفيف الوزن إلى الوشيعة. إن النوابض المربوطة إلى الإطار تعيد القلم والوشيعة إلى نقطة مرجعية ثابتة دائماً.

عندما يجري التيار خلال الوشيعة ينشأ حقلاً مغناطيسياً يتفاعل مع الحقل المغناطيسي للمغناطيس الدائم. وهذا يجعل الوشيعة تغير وضعيتها الزاوية كما في المحرك الكهربائي. يعتمد اتجاه الدوران على اتجاه جريان التيار في الوشيعة. إن مقدار انحراف القلم متناسب مع التيار المار خلال الوشيعة. يمكن لقلم الكتابة أن يملك رأساً حبرياً أو رأساً يلامس ورقاً حساساً للكهرباء أو حساساً للضغط أو حساساً للحرارة. إذا تم استخدام ذراع كتابة بطول ثابت فسوف يكون محور الإحداثيات العمودي منحني. وبهدف تحويل الحركة منحنية الخطوط لقلم الكتابة إلى حركة مستقيمة الخطوط تم ابتكار آليات تصحيح متعددة لتغيير الطول الفعّال لذراع الكتابة عندما يتحرك على ورق التسجيل البياني.



الشكل رقم (٤,١٨). مبدأ مسجل الكتابة المباشرة بالقياس الغلفاني.

تُفضل أجهزة الحزام المشدود على الأجهزة ذات النوع المرتكز والمجوهر ؛ لأنها تملك المزايا التالية : الحساسية الكهربائية أكبر والتخلص من الاحتكاك والتكرارية أفضل وعمر الخدمة أطول.

تُستخدم طريقة التسجيل الحبري بشكل واسع في مسجلات السرعة البطيئة و بنفس القدر في مسجلات السرعة العالية وذلك من بين جميع طرق الكتابة المتنوعة المتوفرة. يعتمد أداء قلم الكتابة على عمل الأنبوب الشعري للحبر. ويمكن أن يكون رأس القلم من الستانلس ستيل (الفولاذ المقاوم للصدأ) أو التنغستين أو فوهة زجاجية صغيرة. يوضع خزان الحبر عادة أعلى من مستوى الكتابة بقليل ليسهل تدفق الحبر. يجب أن يتدفق الحبر المُستخدم من رأس القلم بطريقة منتظمة بحيث يكون الرسم مستمراً ولا يتم إنتاج أية ثغرات.

إن جودة الكتابة لأي مسجل مهمة لضمان رسومات واضحة وغير ملطخة بعرض منتظم في التسجيل ذي الحالة المستقرة والديناميكية معاً. ينبغي أن يكون الرسم رفيعاً ، بل ومُحدداً بشكل جيد وغير متقطع ليسمح بدقة تمييز أفضل للقياسات. حثت هذه المشاكل على تطوير نظام للحبر المضغوط. يستعمل هذا النظام ضغطاً عالياً وحبراً ذا لزوجة عالية للتغلب على آثار الجمود ضمن أنبوب القلم ولضمان جريان مستمر للحبر حتى عند سرعات عالية للقلم. يتم التزويد بسائل الكتابة في هذه الأنظمة من خلال خزان حبر مركزي يُنتج ضغطاً من ١٥ وحتى ٢٠ باوند لكل أنش مربع (psi) ويجبر الحبر اللزج إلى داخل المسامات المجهرية في سطح ورق الرسم البياني. يتم قطع أي حبر على السطح بواسطة ترك رأس القلم للرسم المتواصل الذي يكون جاف ومنتظم عند كل سرعات الكتابة. إن

أونصتين من الحبر اللزج سوف تؤمِّنان بشكل نموذجي حتى ٥٠٠ ساعة تسجيل بدون إعادة تعبئة. يُستخدم هذا النظام في سلسلة مسجلات الكتابة المباشرة التي تُدعى Brush Mark 200.

تستخدم معظم المسجلات المحمولة نظام الكتابة ذو القلم المُسخَّن حيث يتحرك ورق التسجيل فوق حافة شفرة فولاذية موضوعة عند الزوايا القائمة لحركة الورق ويتحرك قلم الرسم على طول حافة الشفرة. يحرق قلم الرسم الساخن السيلولوز الأبيض المُغطى بالورق الحساس للحرارة كاشفاً السواد تحت سطح الورق وبذلك مُشكِلاً الرسم.

قيادة الورق: تتم قيادة الورق المعتادة بواسطة محرك تزامني وعلبة تروس. تحدد سرعة الورق خلال المسجل بواسطة نسبة التروس. فإذا كان المطلوب تغيير سرعة الورق فإنه يجب تعديل ترس واحد أو أكثر. توجد أجهزة معينة من نوع السرعة الثابتة، هذا يعني أنه لا توجد تدابير احتياطية من أجل تغيير معدل تحريك الورق تحت القلم. عدة تطبيقات تملك سرعة واحدة فقط، على سبيل المثال آلات الـ ECG.

إن المتطلب الأساسي لقيادة الورق هو السرعة الثابتة وذلك لأن الأحداث التي يتم تسجيلها متعلقة بالزمن. يمكن تحديد المركبات الترددية لشكل الموجة المُسَّجلة إذا تم معرفة المسافة التي تحرك فيها الورق من نقطة توضع القلم عند إجراء عملية التسجيل. تتضمن بعض أنواع المسجلات الطبية ترتيبات من أجل سرعات ورق رسم بياني متعددة. وفي مثل هذه الحالات تملك علبة التروس نسبة تخفيض ثابتة وحيدة ويتم تحقيق تغيير السرعة على كامل المجال بواسطة وسائل إلكترونية رقمية. تعطي هذه التقنية دقةً مُتحكماً بها بالبلورات واسعة المجال مع نسب سرعة دقيقة، وبدون استهلاك عالي للطاقة، وخطوات كبيرة نسبياً لنظام الخطو والوثوقية الإضافية للأجزاء القليلة المتحركة مقارنة مع نظام تغيير الترس الميكانيكي. تحتوي معظم المسجلات على آلية توقيت إضافية تطبع سلسلة من النقاط الصغيرة على حافة الورق عندما يتحرك خلال المسجل. وينتج هذا "المَعْلَم الزمني" علامة واحدة كل ثانية أو عند بعض الفواصل الزمنية الأخرى الملائمة.

(٤,٩,١) ميزات الأداء للمقاييس الغلفانية المُستخدمة في مسجلات الكتابة المباشرة

Performance Characteristics of Galvanometers Used in Direct Writing Recorders

تشبه المقاييس الغلفانية المُستخدمة في المسجلات عموماً الأنواع المتطابقة في التجهيزات ذات المؤشر ماعدا تلك التي تملك ذراعاً خفيفاً يحمل قلماً عوضاً عن المؤشر. يستند القلم بشكل خفيف على ورقة الرسم البياني التي تتحرك بسرعة منتظمة باتجاه عمودي على اتجاه انحراف القلم. يجب تعديل تصميم المقياس الغلفاني إلى حد ما إذا تم استخدامه لأغراض التسجيل وذلك بسبب احتكاك القلم على ورق الرسم البياني وبسبب الوزن الأكبر الضروري لنظام التحريك.

توجد في مسجلات الكتابة المباشرة قوى متعددة تُحدث تغييراً في نظام التحريك. والقوى الأساسية الثلاثة هي: (١) قوة الانحراف و(٢) قوة التحكم و(٣) قوة التخميد.

تنتج قوة الانحراف من التيار الذي يجري في الوشيعة والمُقدم لها من مضخم القيادة. تسبب هذه القوة تحريك نظام التحريك في المسجل عن موضعه الصفري. إن قوة التحكم المُطبقة عليه سوف تحدُّ من الحركة غير المحددة المختلفة لمحرك القلم وتضمن بأنه سيتم الحصول دائماً على نفس المقدار من الانحراف من أجل قيمة معطاة للكمية التي يجب تسجيلها.

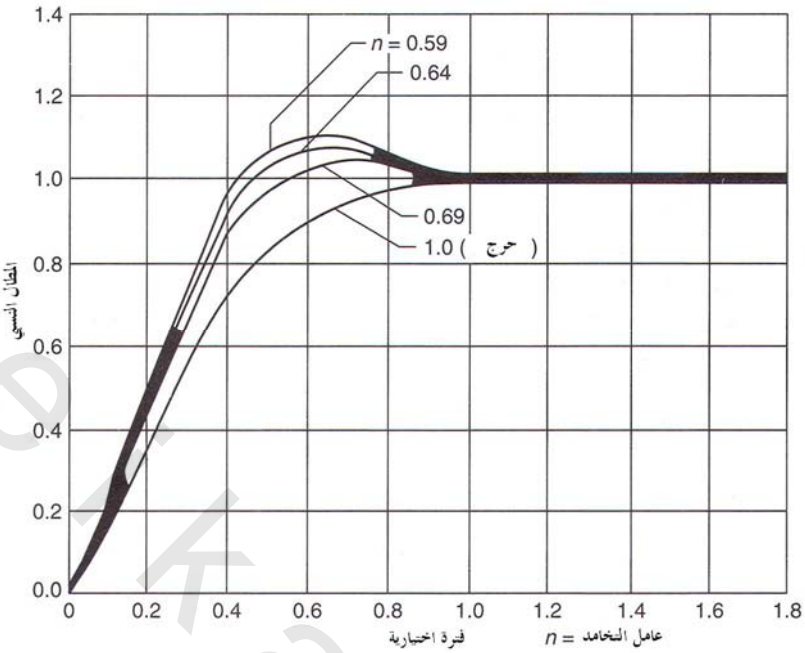
إن قوة التخميد ضرورية بهدف إعادة نظام الحركة إلى السكون بسرعة من وضعيته المنحرفة. وفي غياب التخميد سوف يتذبذب القلم حول وضعية الانحراف النهائية لبعض الوقت قبل أن يصل إلى حالة السكون بسبب القصور الذاتي للأجزاء المتحركة. إن وظيفة التخميد هي امتصاص الطاقة من النظام المتذبذب وإعادته فوراً إلى وضعية توازنه.

التحكم بالتخميد والاستجابة الترددية لمحركات الأقلام: يتم تمييز المقاييس الغلفانية بخمس بارامترات مهمة هي: الاستجابة الترددية والحساسية (التيار، الجهد الكهربائي والاستطاعة) وزاوية الطور والتخميد وتبديد القدرة. إن كل واحد من هذه البارامترات ليس فقط غير مهم بمفرده ولكنه يعتمد أيضاً على البارامترات الأخرى. وهكذا يجب بناءً على ذلك أن يكون المقياس الغلفاني المُختار للحصول على النتائج المطلوبة، تحت شروط محددة معينة، حلاً وسطاً لجميع هذه الخصائص (Mercier, 1973).

استجابة تابع الخطوة: إن المقياس الغلفاني القلمي غير قادر على أن يتبع ارتفاع الانحراف بشكل لحظي عندما يتم تطبيق تغير خطوي في التيار عليه كالذي سيحدث عندما يتم تطبيق إشارة المعايرة. تتخلف استجابة وشيعة التحريك عن إشارة القيادة بسبب القصور الذاتي الميكانيكي للحركة. إن زمن الصعود بمسجل الكتابة المباشرة الجيد هو من مرتبة ٣ ميلي ثانية لبلوغ انحراف مقداره ١ سنتيمتر عندما يتم ضغط زر المعايرة ١ ميلي فولت. ويسبب أثر القصور الذاتي اتجاه ميلان الوشيعة لتتجاوز انحرافها النهائي.

ويعتمد مقدار التجاوز على قيمة عامل التخميد. ويُؤخذ ذلك كواحدة عندما يتم تخميد المقياس الغلفاني "بشكل حرج". تحت هذه الشروط سوف تنحرف الوشيعة بلطف لتأخذ وضعيتها النهائية في أقصر زمن ممكن بدون تجاوز الحد النهائي. إذا كان عامل التخميد أقل بكثير من القيمة الحرجة سوف يتجاوز ذراع الكتابة وضعية انحرافه النهائية وتنتج تردداً توافقياً بسيطاً مُخمَّداً مساوياً للتردد الطبيعي للوشيعة ولمجموعة الذراع تقريباً.

يوضح الشكل رقم (٤,١٩) استجابة تابع الخطوة لمقياس غلفاني بتخميد أسمي مقداره ٦٥ ٪. ولجعل المنحي قياسياً يتم تبيان الاستجابة مقابل فترة اختيارية مقدارها ١/التردد الطبيعي بحيث يمكن التخلص من الاختلاف في حساسيات المقياس الغلفاني. إن الانحرافات مُبينة كنسب من انحرافات التيار المستمر. يعتمد الأسلوب الذي يتبع فيه المقياس الغلفاني ارتفاع التيار المفاجئ على نسبة التخميد.

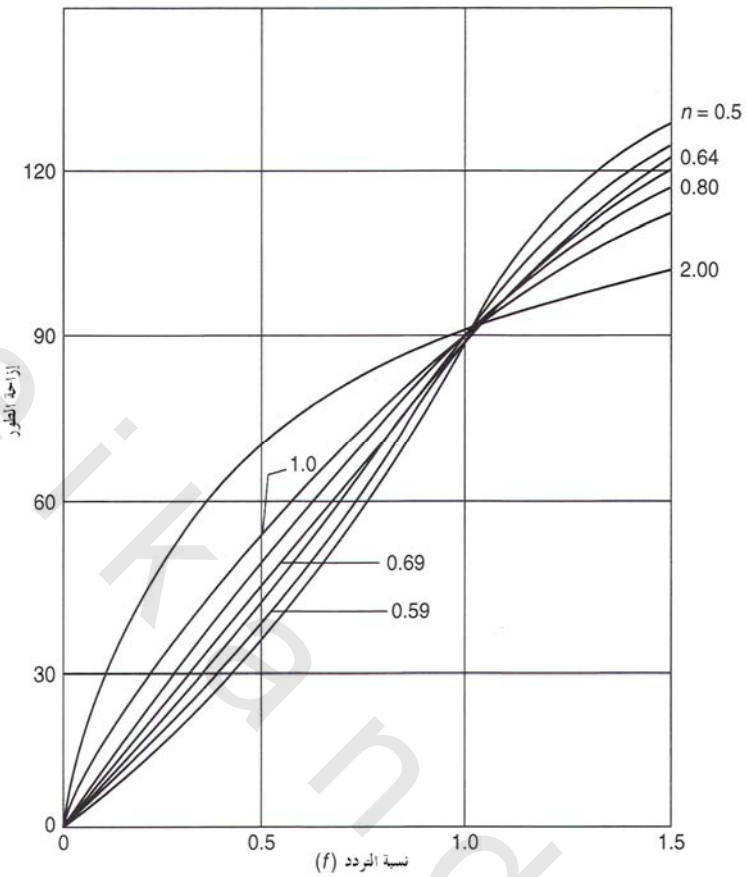


الشكل رقم (٤,١٩). تأثير تطبيق تيار دخل خطوي على مقياس غلفاني بدرجات تخميد متغيرة. إن محور الإحداثيات العمودي هـو نـسبة الانحراف عند زمن جزئي بالنسبة إلى الانحراف ذو الحالة المستقرة. إن محور الإحداثيات الأفقي هو نسبة الـزمن إلى زمن الدور للتردد الطبيعي للمقياس الغلفاني.

تعتمد درجة التخميد على المقاومة في دارة الوشيعة. إن قيمة المقاومة المطلوبة التي يجب وضعها على التوازي مع مقياس غلفاني مُعطى من أجل تخميد صحيح تُحدد من قِبل المُصنِّعين. من ناحية ثانية عند استخدام مثل هذا المقياس الغلفاني في نظام تسجيل ما وتتم قيادته بواسطة مضخم استطاعة، فإنه من الضروري إعادة ضبط مقاومة التخميد بحيث يتم أخذ ممانعة خرج المضخم بعين الاعتبار.

زاوية الطور: يبين الشكل رقم (٤,٢٠) زاوية الطور النظرية بين تيار جيبي مُطبق على المقياس الغلفاني وأي تردد طبيعي غير مُخَّمد. يتم تبيان تردد التيار كنسبة من هذا التردد إلى التردد الطبيعي غير المُخَّمد للمقياس الغلفاني. وتعتمد زاوية الطور أيضاً على مقدار التخميد. يتم تبيان زاوية الطور مباشرة وذلك من أجل أية نسبة للتردد ومقدار للتخميد.

الاستجابة الترددية والحساسية: ينبغي أن تعطي المقاييس الغلفانية عندما تكون مُخمَّدة استجابة ترددية مسطحة ضمن المجال ±٥ ٪ من التيار المستمر و حتى ٦٠ ٪ من ترددها الطبيعي غير المُخمَّد. يتم حساب التردد الطبيعي من خلال ضرب الاستجابة الترددية المطلوبة بالعدد ١,٦. يمكن أن يكون، تحت شروط معينة، استخدام مقياس غلفاني ما بتردد طبيعي أعلى من المحسوب بالشكل المختصر أعلاه شيئاً مرغوباً فيه ولكن يمكن عند ذلك الملاحظة بأن الحساسية المنخفضة ستكون نتيجة للاستجابة الترددية العالية المرافقة.

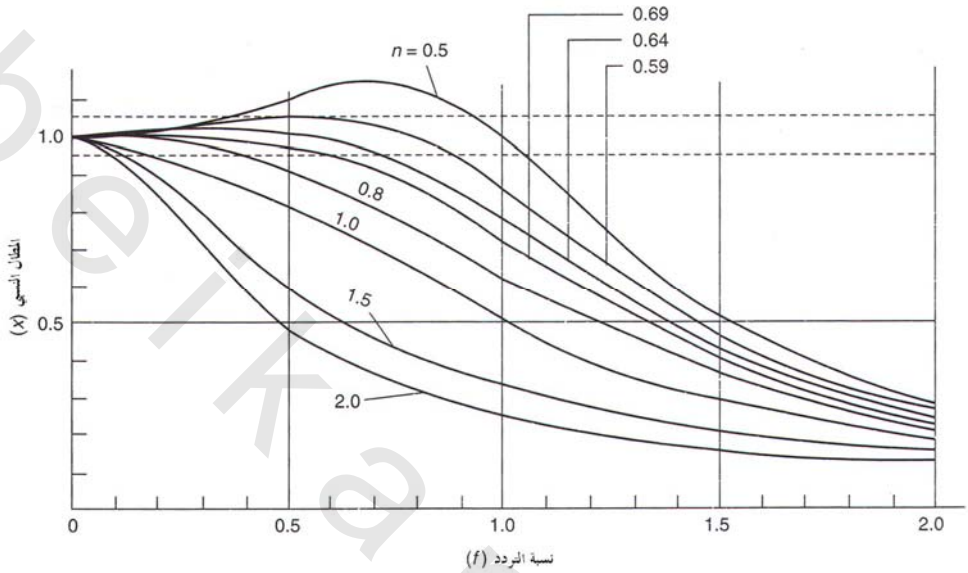


الشكل رقم (٤,٢٠). انزياح الطور بين إشارة القيادة الجيبية وحركة الوشيعة الناتجة كتابع لتردد الإشارة بالنسبة إلى التردد الطبيعي.

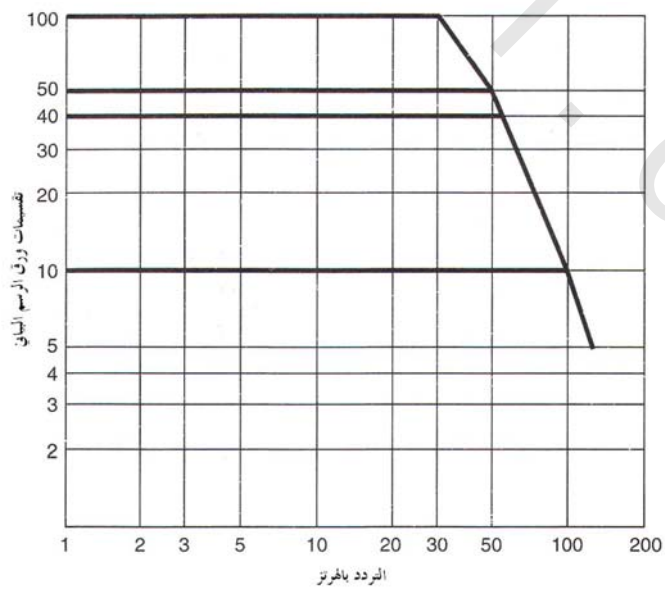
يمثل الشكل رقم (٤,٢١) الانحراف النظري لمقياس غلفاني ما بالنسبة لإشارة جيبية ثابتة المطال ولكنها متغيرة في التردد. ولجعل المنحنيات قابلة للتطبيق على المقياس الغلفاني عند أية حساسية وتردد غير مُخمَّدين تم عرض تردد التيار كنسبة من هذا التردد إلى التردد الطبيعي غير المُخَّمد للمقياس الغلفاني. ويعتمد الانحراف أيضاً على مقدار التخميد في النظام. يمكن التحكم بالتخميد الفعّال لمجموعة وشيعة التحريك بواسطة ترتيب ممانعة الخرج لمضخم الانحراف بحيث تنخفض مع التردد بطريقة ما لتأمين التخميد المطلوب.

إن الحزمة الأعظمية للاستجابة الترددية المسطحة لأي مسجل كتابة مباشرة محدودة دائماً ببعض المطالات المعينة من القمة- إلى- القمة على ورق الرسم البياني. يبين الشكل رقم (٤,٢٢) تردداً نموذجياً مقابل منحني المطال لمسجل كتابة مباشرة. إن المسجل قادر على كتابة مطال التدريج بالكامل (عرض ورق الرسم البياني ٥٠ ميليمتر) حتى ٤٠ هرتز تقريباً و٥٠ ٪ من مطال التدريج بالكامل حتى ٦٠ هرتز و٢٠ ٪ من مطال التدريج بالكامل عند ١٠٠ هرتز وحوالي ١٠ ٪ من مطال التدريج بالكامل عند ٢٠٠ هرتز. إن هذا المنحني المميِّز نموذجي لكل المسجلات المباشرة ويشير إلى أن زيادة

قدرة محرك القلم لن تساعد كثيراً. بناءً عليه يصبح إلزامياً الذهاب إلى شكل من أشكال المسجلات ذات الحزمة الضوئية حيث أن كتلة العنصر المتحرك فيها أصغر بكثير من أجل استجابة ترددية أعلى.



الشكل رقم (٤,٢١). نسبة انحراف المقياس الغلفاني عند أي تردد للإشارة إلى الانحراف الساكن (الستاتيكي) كتابع لنسبة تردد الإشارة إلى التردد الطبيعي من أجل درجات تخميد مختلفة.



الشكل رقم (٤,٢٢). منحني التردد مقابل السطال لمسجل كتابة مباشرة.

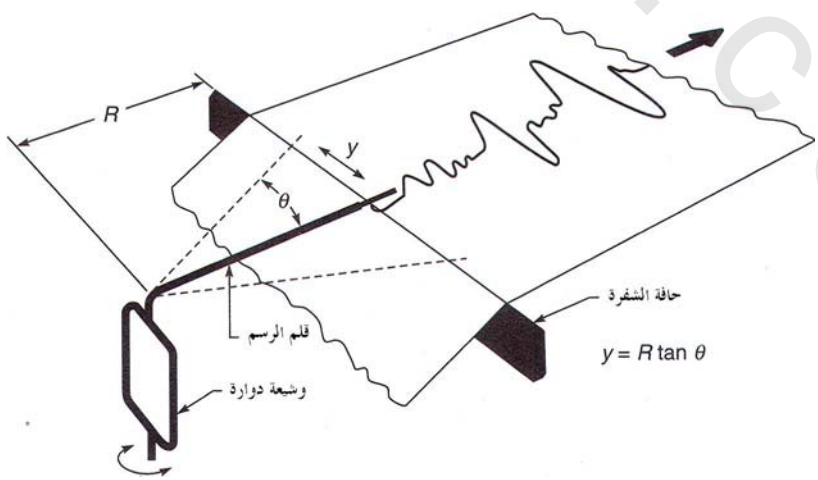
(٤,٩,٢) اعتبارات الخطية في مسجلات الكتابة المباشرة

Linearity Considerations in Direct Writing Recorders

ينبغي أن ينتج نظام الكتابة الخطي بشكل مثالي انحرافاً للقلم متناسباً مباشرة مع تيار الدخل المُقدم إلى محرك القلم. ويتضمن ذلك أن التزايدات المتساوية للدخل سوف تسبب تغيرات متساوية لمطال الرسم في أي منطقة من ورق الرسم البياني.

ينتج القلم رسومات منحنية الخطوط في العديد من المسجلات الصناعية و المسجلات ذات الأغراض العامة. يرسم رأس القلم في مثل هذه الحالات قوساً على ورق التسجيل البياني من خلال انحراف وشيعة المقياس الغلفاني. إن هذا النظام بسيط وموثوق ورخيص و لكنه يمكن أن يكون غير مقبول بسبب المساوئ التالية: (١) يتطلب ورق رسم بياني خاص مسطر ليلاءم نصف قطر القلم و(٢) غالباً ما تكون الرسومات منحنية الخطوط صعبة لتترابط مع أشكالها الرياضية. وهذا ما يجعل التحليل أكثر صعوبة إلى حد ما.

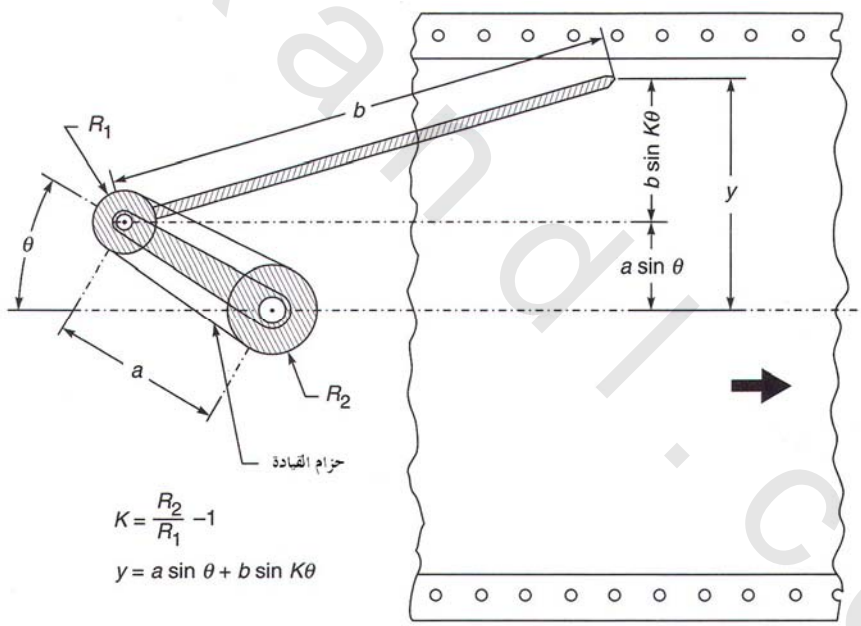
يمكن تحويل القوس ذو الخطوط المنحنية عند رأس القلم إلى رسم مستقيم الخطوط بواسطة إحداثيات متعامدة قابلة للتفسير أكثر سهولة. توجد طريقتين شائعتي الاستخدام. في الطريقة الأولى يتحرك قلم الرسم المُسخَّن كهربائياً على قوس فوق ورق حساس للحرارة خاص عندما يتم سحب الورق على طول حافة شفرة مثبتة مستقيمة [الشكل رقم (٤,٢٣)]. يلامس الجزء الآخر من نهاية قلم الرسم الورق من أجل كل زاوية إزاحة. يعطي هذا الترتيب خطاً مستقيماً على عرض الورقة مع ثبات الورق. من ناحية ثانية تخضع هذه الطريقة إلى درجة من عدم الخطية الهندسية التي يمكن أن تكون حوالي ٣٠ ٪ من أجل دوران وشيعة مقداره ١٨ درجة من خط مركز ورق الرسم البياني إلى حافته.



الشكل رقم (٤,٢٣). نظام قلم الرسم المُسخن من أجل الكتابة مستقيمة الخطوط على ورق حساس للحرارة فوق حافة شفرة.

تستخدم الطريقة الثانية [الشكل رقم (٤,٢٤)] جزءاً دواراً للترابط الخطي الذي يلغي الأخطاء الهندسية المتأصلة في الأنظمة ذات حافة الشفرة التقليدية. عندما تدور حافظة محرك القلم فإنها تقود معها ذراع دعم القلم. يسبب الترابط الذي يتم تأمينه بواسطة حزام معدني مرن دوراناً لعمود القلم عند النهاية العليا لذراع دعم القلم بالاتجاه المعاكس لأن النهاية السفلية للحزام المرن موصولة بشكل متين إلى حلقة ثابتة في أعلى غلاف محرك القلم. عندما يتأرجح ذراع دعم القلم على شكل قوس حول محور حافظة محرك القلم ينتقل رأس القلم بخط مستقيم وينتج انحرافاً متناسباً مباشرة مع الحركة الزاوية لحافظة محرك القلم.

تُترجم الإزاحة الزاوية لوشيعة محرك القلم إلى حركة بخط مستقيم عند رأس القلم من خلال مسار منحني الخطوط المساوي والمعاكس لذراع دعم القلم. يتم تحقيق هذا بدقة تصل إلى ٠,٢ ٪ في المسجلات التي تستخدم هذا النوع من الترتيب.



الشكل رقم (٤,٢٤). آلية تحريك متوازية من أجل كتابة مستقيمة الخطوط. تحافظ هذه الآلية على رأس القلم عمودياً تقريباً على اتجاه حركة ورق الرسم البياني.

يتم تحقيق درجة عالية من الخطية والدقة والاستجابة السريعة باستخدام أنظمة التغذية الراجعة لوضعية القلم بحلقة مغلقة، مثل ذلك المُستخدم في جهاز Brush Recorder Mark 200. وهذه هي النتيجة لأربع أجهزة منفصلة لكنها ذات اعتماد تبادلي:

obeikandl.com

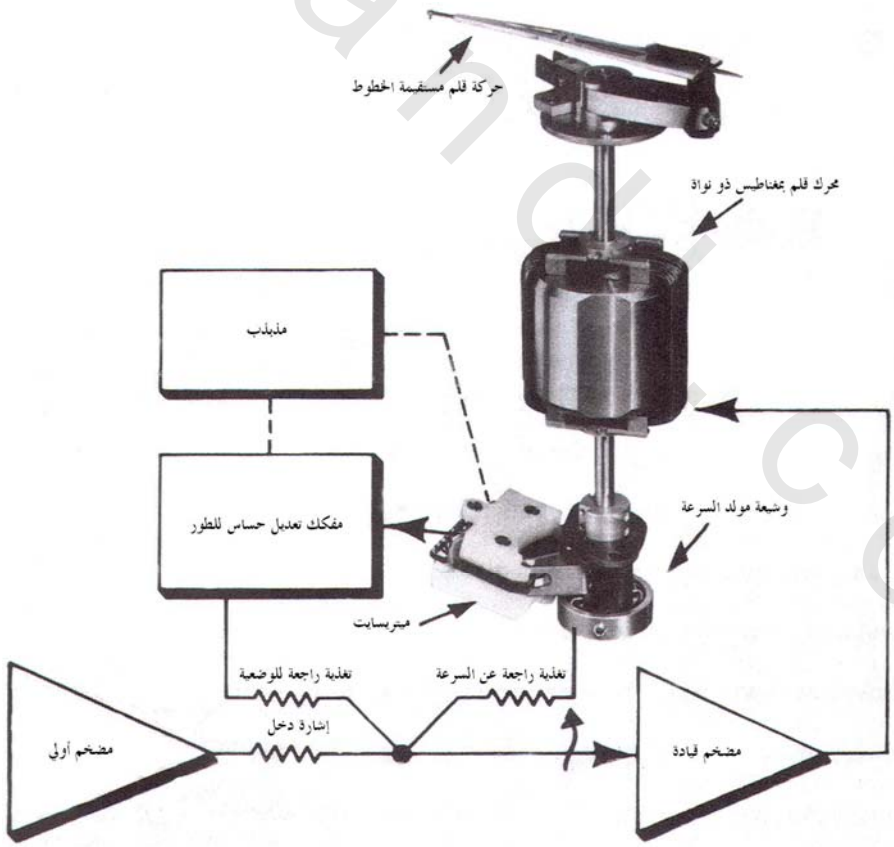
١- محرك قلم بتغذية راجعة للوضعية ينتج أكثر من ٢٥٠ تسارع أرضي (G's) عند رأس القلم ويحافظ على دقة الوضعية ضمن ٠,٢٥ ٪ .

٢- يدعى مبدل التحسس لوضعية القلم ذات التلامس غير الدقيق مع دقة تمييز لانهائية بالمبدل ميتريسايت (Metrisite).

٣- يترجم رابط النقل مستقيم الخطوط حركة محرك القلم الزاوية إلى انتقال القلم بخطوط مستقيمة بدون تقديم ظاهرة الهستِريسِس (hysteresis).

٤- نظام كتابة بالسائل المضغوط يضمن رسومات منتظمة عند كل سرعات الكتابة.

يوضح الشكل رقم (٤,٢٥) مبدأ التغذية الراجعة لوضعية القلم بحلقة مغلقة الذي يُلغي عملياً و بشكل آلي كل مصادر الخطأ بين الإشارة القادمة ووضعية القلم. يتم التحسس لوضعية القلم الفعلية باستمرار على ورق الرسم البياني بواسطة المبدل ميتريسايت عديم التلامس الموضوع داخل محرك القلم.



الشكل رقم (٤,٢٥). نظام محرك قلم بتغذية راجعة ذو حلقة سيرفو من أجل تسجيلات سريعة و دقيقة. عن (Courtesy: Gould Inc.)

يتم تغذية خرج المبدل ميتريسايت إلى وصلة جمع في مضخم قيادة القلم حيث تُقارن مع إشارة الدخل. يُنتج الفرق بين خرج المبدل ميتريسايت والإشارة القادمة جهد "خطأ" يتم تضخيمه ويصحح وضعية القلم لحظياً لتتطابق مع الإشارة القادمة. إن الميزة الهامة للتغذية الراجعة لوضعية القلم بحلقة مغلقة هي أنها تستطيع إنتاج ثبات في الوضعية عند رأس القلم يكون من ١٠ إلى ١٠٠ مرة أكبر من المسجلات التقليدية التي يتم إرجاعها بالنابض.

يتم التخلص فعلياً من الأخطاء الناتجة عن الاحتكاك كما يتم تخفيض تسخين محرك القلم. ويتم المحافظة على الخطية المطلقة عبر كامل ورق الرسم البياني نظراً لأن محرك القلم لا يحتوي على نابض فتل ولا يعمل أبداً ضد الكبح الميكانيكي ويستخدم طاقة التشغيل فقط من أجل تغيير وضعية القلم. وهكذا تكون دقة التسجيل عند رأس القلم محدودة فقط من خلال دقة الخرج لمبدل ميتريسايت وقدرة محرك القلم على تطبيق قوى التصحيح الضرورية.

تعتمد الكثير من الأمور على خاصية مبدل وضعية القلم. ففي النظام المتحرك بسرعة مثل مسجل ما فإن أي ميل إلى الاستهلاك سوف يُخفِّض الدقة ؛ بسبب الأوساخ وملوثات أخرى يمكنها أن تدمر الوثوقية بسرعة. إن حساس وضعية القلم الجيد هو شيء أساسي بهدف ضم الاستجابة الديناميكية السريعة ودقة التسجيل الجيدة في جهاز واحد.

(٤,١٠) مسجل النفاث الحبري

The Ink Recorder

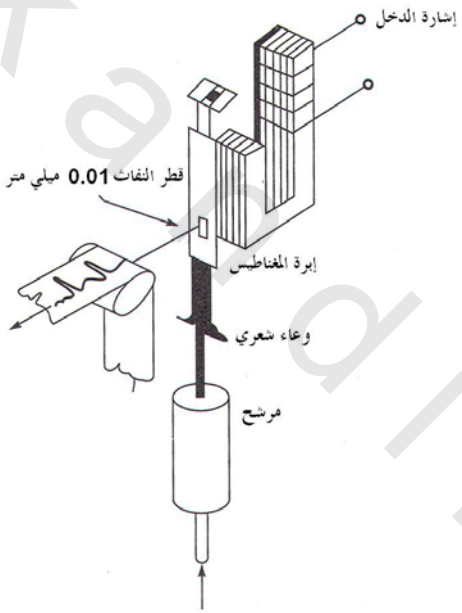
تحتاج تطبيقات طبية حيوية معينة مثل تخطيط أصوات القلب وتخطيط كهربية العضلات إلى تسجيل إشارات يمتد طيفها الترددي إلى أعلى بكثير من الاستجابة الترددية العالية للمسجلات القلمية التقليدية. إن الاستجابة الترددية العالية للمسجلات المباشرة بقلم رسم محدودة من خلال عزم القصور الذاتي الكبير للأجزاء المتحركة واحتكاك ذراع الكتابة فوق الورق. علاوة على ذلك تستطيع أنظمة قلم الرسم عادة تسجيل مطالات حتى ٣٠ ميليمتر فقط بدون أن تتعارض مع بعضها البعض وإحداث الضرر. لذلك فإن تراكب الرسومات المتجاورة والمتقاربة غير ممكن. هذا يعني أنه في المسجلات متعددة القنوات يحتاج نظام التسجيل بقلم الرسم إلى ورق عريض جداً لرسم مطالات كبيرة لأنه يجب تسجيل الانحراف الأعظمي بدون تراكب.

تم تجسيد طريقة ممتازة في نظام التسجيل النفّاث لزيادة الاستجابة الترددية لتمتد إلى عدة مئات من الدورات وتوحيد مزايا إشارة دخل المسجل المباشر مع مزايا مسجل التصوير الفوتوغرافي.

تتألف التقنية من نفَّاث حبري دقيق جداً يحل محل الحزمة الضوئية في مسجل التصوير الفوتوغرافي أو قلم الرسم في المسجل المباشر. يتم إنتاج النفث الحبري عندما يتم نفث الحبر من فوهة ذات ثقب دقيق إلى أقصى حد

بضغط عالي. يتم بخ الحبر فوق ورق الرسم البياني المتحرك تحت النفَّاث. يمكن استخدام الطريقة بترددات حتى حوالي ١٠٠٠ هرتز. يتألف الترتيب [الشكل رقم (٤,٢٦)] من أنبوب شعري زجاجي موضوع بين أقطاب مغناطيس كهربائي. يتم توصيل وشائع المغناطيس الكهربائي إلى مضخم الخرج وقيادتها بواسطة الإشارة المُضخمة. يتم وصل مغناطيس دائم اسطواني صغير جداً إلى هذه الأنابيب الشعرية.

تنتج تغيرات التيار المرافق لتغير الإشارة في وشيعة المغناطيس الكهربائي حقلاً مغناطيسياً متغيراً يتفاعل مع حقل المغناطيس الدائم. ينتج عن هذا التفاعل انحراف الأنبوب الشعري. يتم تشكيل الأنبوب الشعري على شكل فوهة من أحد النهايتين ويتم تزويد الحبر إلى هذا الأنبوب بضغط عالي من النهاية الأخرى. يضرب الحبر الخارج من الفوهة الورق ويتم رسم شكل الإشارة.



الشكل رقم (٤,٢٦). آلية كتابة بالنفاث الحبري.

يتطلب العمل الموثوق لنظام النفث ترشيح الحبر بدقة لضمان منع مرور حتى الجزيئات الصغيرة لكي لا تؤدي إلى انسداد الفوهة. يتم إنتاج الضغط العالي الضروري للتسجيل بالنفاث بواسطة مضخة ويكون قابلاً للضبط بين ٢٠-٥٠ ضغط جوي.

إن الاستجابة الترددية العالية المتأصلة في نظام التسجيل بالنفاث هي بسبب التخفيض الهام في الكتلة الجامدة لمجموعة التحريك. إن هذه الكتلة في الواقع منخفضة حيث أنها تُقارن مع تلك التي في نظام التصوير الفوتوغرافي

obeikandl.com

المستخدم في الأيام الماضية. وبسبب الأجزاء المتحركة ذات الكتلة الصغيرة جداً تحتاج آلية التسجيل النفاث فقط إلى طاقة قيادة منخفضة جداً بالرغم من التردد المتأصل العالي. وبناء عليه يمكن تسجيل انحرافات بمقدار ±٣٠ ميليمتر مُقاسة من خط الأساس. يبدو من هذا أنه يمكن رسم مطالات أكبر من ٦٠ ميلي متر بواسطة المسجل النفَّاث. لا يسبب تراكب الإشارات المتجاورة أية صعوبة ؛ لأن النفثات السائلة لا يمكن أن تنفذ إلى بعضها كما هي الحال مع الحزم الضوئية. نظرياً لا تقع نقاط التأثير للنفثات المستقلة على نفس الأحداثي الزمني لورق التسجيل. من ناحية ثانية لا يتم ملاحظة الانزياح عملياً لأنه أقل من دقة التقييم. بما أن المسجل النفاث يستطيع الكتابة على ورق التسجيل من دون احتكاك فإن الرسم الخطي مضموناً حتى للمطالات الصغيرة جداً.

إن تسجيل المطالات الكبيرة يعني وجود انحراف خطي كبير عند النهايتين البعيدتين على ورق التسجيل. وهذا بسبب خطأ ظل الزاوية. تم اعتماد تقنيات مناسبة لتعويض هذا الخطأ عند الانحرافات الأكبر. يتم تحقيق التعويض باستخدام حقل مغناطيسي خطي بدلاً من الحقل نصف القطري العادي. يكون الحقل المغناطيسي الفعال عندئذ متناسباً مع تجيب زاوية الانحراف وبالتالي يخفض الحساسية عند الانحرافات الأكبر.

آلية التسجيل في المسجل النفاث تكون مُرطبة بالسائل مثل الموجودة في مسجلات التصوير الفوتوغرافية. وهذا للحصول على رسم متوازن على كامل المجال الترددي. يتم وصل وسط الترطيب إلى أنبوب محكم الإغلاق عند إحدى النهايات. وتكون لزوجته عالية جداً بحيث لا يخرج وسط الترطيب حتى عندما تُقلب آلية التسجيل رأساً على عقب.

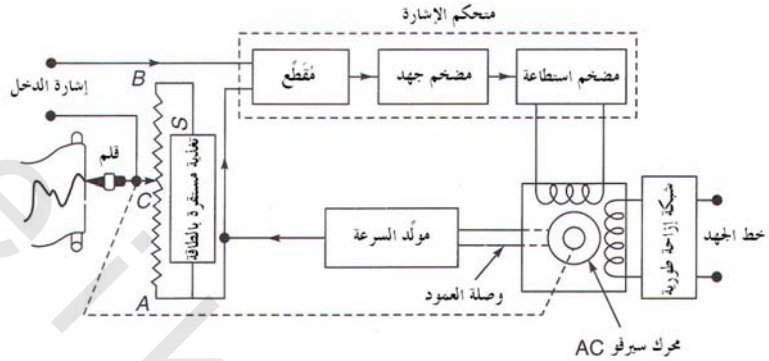
يستخدم المسجل النفاث ورقاً عادياً غير مُعالج أرخص بكثير من الورق الحساس للحرارة المستخدم في مسجلات الورق بالقلم المُسخَّن. وبناءً عليه فإنه يؤمن طريقة تسجيل اقتصادية خصوصاً من أجل التطبيقات متعددة القنوات.

(٤,١١) المسجل بمقياس الجهد

Potentiometric Recorder

تُستخدم مسجلات الرسم البياني الشريطية المبنية على أساس مبدأ التوازن الصفري بمقياس الجهد عموماً من أجل تسجيل الظواهر ذات التردد المنخفض. يبين الشكل رقم (٤,٢٧) مبدأ التشغيل لمسجل بمقياس الجهد. يتم تغذية السلك المنزلق AB بتيار ثابت من البطارية S. يُركَّب السلك المنزلق من طولٍ لسلك مقاوم ذو استقرارية عالية ومقطع عرضي منتظم بحيث تكون المقاومة بواحدة الطول ثابتة. يتم تغذية جهد dc غير معروف بين التلامس المتحرك C وإحدى النهايات A من السلك المنزلق. يتم ضبط التلامس المتحرك بحيث يكون التيار الجاري خلال الكاشف مساوياً للصفر. عند تلك اللحظة يكون جهد الدخل غير المعروف متناسباً مع طول السلك AC. عملياً

يكون السلك المنزلق مُعاير بالنسبة لجهود ممتدة والامتداد النموذجي الموجود هو ١٠٠ أو ١٠ أو ١ ميلي فولت. يتم صنع التلامس المتحرك من السلك المنزلق ليحمل قلماً يكتب على ورق رسم بياني مُعاير يتحرك تحته.



الشكل رقم (٤,٢٧). رسم تخطيطي لمسجل بمقياس جهد ذاتي التوازن.

يُستخدم بشكل عام مقياس جهد من النوع ذاتي التوازن للحصول على التوازن الصفري. يتم تحقيق توازن جهد الدخل غير المعروف مقابل الجهد المرجعي باستخدام نظام سيرفو. يُعطى فرق الكمون بين التلامس المنزلق C والجهد dc للدخل إلى مضخم تيار مستمر من النوع المُقَطّع بدلاً من المقياس الغلفاني. يتم قيادة المضخم المُقَطّع عند التردد الأساسي ويحوّل فرق الجهد إلى إشارة موجة مربعة. تُضخم هذه الإشارة بواسطة مضخم سيرفو وبعدئذ تُطبق على ملف التحكم لمحرك سيرفو. إن محرك السيرفو هو محرك ثنائي الطور يتم تغذية ملفه الثانوي بتغذية رئيسية ٥٠ هرتز تعمل كملفات طور مرجعية. إن المحرك مترابط ميكانيكياً مع التلامس المنزلق.

يدور المحرك ليحرك القلم وبنفس الوقت يغير جهد التلامس المنزلق بحيث يكون فرق الكمون بين جهد الدخل والجهد المرجعي مساوياً للصفر. تعمل الدارة بطريقة بحيث يتحرك المحرك في أحد الاتجاهات إذا كان الجهد عبر AC أكبر وفي الاتجاه المعاكس إذا كان أقل من جهد الدخل. إن محرك السيرفو مُترابط بواسطة عمود مع مولد السرعة الذي يؤمن التخميد المطلوب لمحرك السيرفو. وهو يتباطأ حتى يصل إلى وضعية التوازن وهكذا يُخفّض تجاوزات الحد إلى أدنى قدر ممكن.

إن محرك السيرفو المُستخدم عموماً لقيادة القلم في المسجلات بمقياس الجهد ذات التوازن الذاتي هو محرك تحريضي ثنائي الطور بتيار متناوب. يملك المحرك اثنين من الملفات الساكنة المنفصلة التي تكون فيزيائياً متعامدة مع بعضها البعض. تنتج التيارات المتناوبة المختلفة في الطور المارة في الملفين الساكنين حقلاً مغناطيسياً دواراً. ويحدث هذا الحقل المغناطيسي الدوار جهداً في الجزء الدوار وينتج التيار الناتج في الحافظة حقلاً تفاعلياً يجعل الجزء الدوار يدور

obeikandl.com

في نفس الاتجاه لدوران الحقل المغناطيسي الدوار. ولإنتاج حقل مغناطيسي دوار ينبغي أن يكون الجهد ac المُطبق على أحد الملفات الساكنة مختلفاً بالطور ٩٠ درجة عن الجهد المُطبق على الملف الآخر.

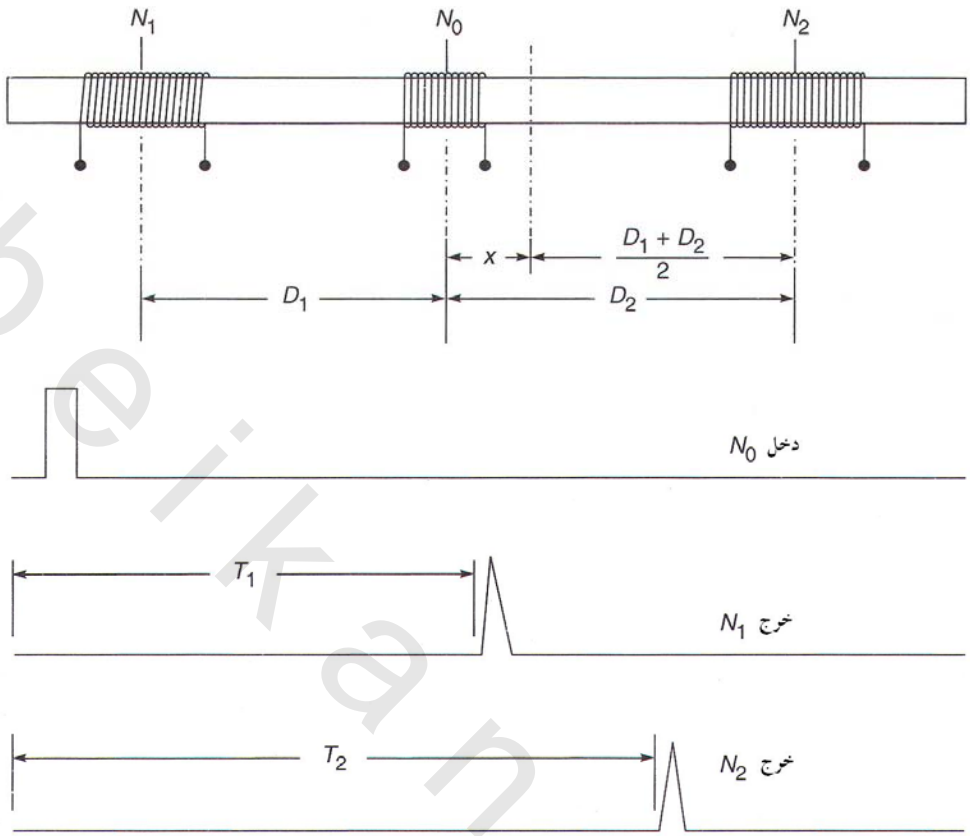
يمكن إجراء ذلك إما في مضخم الاستطاعة الذي يغذي ملفات التحكم أو في شبكة إزاحة طورية لملفات الخط. من الواضح أنه في حال عدم وجود إشارة دخل فإن الجزء الدوار لن يدور. عند تطبيق جهد على الدخل فإن الجزء الدوار سوف يدور ببطء وسوف تزداد سرعته بمقدار جهد الدخل. إن مضخمات الاستطاعة مطلوبة لتغذي بالتيار المتناوب الضروري ملفات التحكم لمحرك السيرفو. وهي بشكل أساسي مضخمات دفع- سحب من الصنف B.

تتم قيادة ورق الرسم البياني بواسطة محرك ذو سرعة ثابتة لتأمين محور الزمن. بناءً عليه يتم رسم إشارة الدخل مقابل الزمن. تدعى المسجلات من هذا النوع بالمسجلات T-Y. إذا تم تحريك ورق الرسم البياني بالنسبة إلى متغير آخر سوف يتحرك القلم عندئذ تحت التحكم بالمتغير الثاني في الاتجاه X. تدعى مثل هذه الأنواع من المسجلات بالمسجلات X-Y. يمكن تأمين قيادة ورق الرسم البياني أيضاً بواسطة محرك خطوي يتم التحكم فيه بواسطة تردد مرجعي من مذبذب مستقر.

يتم تحقيق إمكانية اختيار السرعات بواسطة مقسم تردد قابل للبرمجة ومُطبق على المحرك. لذلك تكون دقة قيادة ورق الرسم البياني غير تابعة لتردد خط الطاقة. إن استخدام المحرك الخطوي بدلاً من المحرك المتزامن يلغي الحاجة إلى جهاز نقل الحركة الميكانيكي لتأمين سرعات ورق رسم بياني مختلفة ويزيد الوثوقية بشكل أكبر.

تُستخدم مقاييس الجهد السلكية الملفوفة أو البلاستيكية التحريضية كعناصر تغذية راجعة للوضعية في معظم مسجلات السيرفو. من ناحية ثانية يحد التلامس الكهربائي الميكانيكي بين أداة الانزلاق وسلك الانزلاق من الوثوقية لمثل هذه المسجلات ويتطلب صيانة منتظمة. يسمح مبدل وضعية القلم فوق الصوتي عديم التلامس بوثوقية عالية وبتشغيل لا يحتاج إلى صيانة بمقياس جهد التسجيل. يقيس المبدل فوق الصوتي نسب المسافات كنسبة أزمنة الانتشار لنبضة فوق صوتية منتقلة من المرسل مروراً بحساسين على خط تأخير تقبض مغناطيسي.

يبين الشكل رقم (٤,٢٨) البنية الأساسية لمبدل فوق صوتي بتغذية راجعة للوضعية. يتم توليد النبضات فوق الصوتية وكشفها باستخدام وشائع يمر من خلالها خط التقبض المغناطيسي. يتم استخدام ثلاثة وشائع (N_1, N_0, N_2). تُوصل الوشيعة N_0 إلى قلم المسجل وتُستخدم لتوليد نبضات التقبض المغناطيسي في الخط. عند تطبيق نبضة كهربائية على N_0 ينتج حقلها المغناطيسي نبضة تقبض مغناطيسي في الخط. وتنتشر نبضة الإجهاد هذه بسرعة فوق صوتية على طول الخط. تصل هذه النبضة إلى الوشائع الثابتة N_1 و N_2 بعد أزمنة مقدارها T_1 و T_2 على الترتيب ويتم إحداث النبضات في الوشائع كما هو مبين في المخطط.



الشكل رقم (٤,٢٨). مبدل فوق صوتي بتغذية راجعة للوضعية من أجل المسجلات بمقياس الجهد.

تتطابق أزمنة الانتشار T_1 وT_2 مع المسافات D_1 وD_2 مقسومة على سرعة انتشار النبضة فوق الصوتية V في الخط. تساوي نسبة أزمنة الانتشار نسبة المسافات المتطابقة المُشتقة كما يلي:

$$X = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 + T_2)} = \frac{2x}{D_1 + D_2}$$

حيث $T_1 = D_1/V$, $T_2 = D_2/V$

x= انحراف N_0 عن نقطة المركز بين N_1 و N_2

X= نسبة الزمن المحسوب (والمسافة)

يشرح Stegena, 1980 الدارة المُستخدمة مع مبدل التغذية الراجعة فوق الصوتي المُستعمل في مقاييس جهد التسجيل. لقد وُجد أن المبدل فوق الصوتي يمكن أن يكون عنصر تغذية راجعة للوضعية قابل للاستخدام.

obeikandl.com

يُمكن استخدام المسجلات بمقياس الجهد بشكل ملائم لتسجيل عدد من الإشارات الفيزيولوجية المتغيرة ببطء. ويمكن بشكل خاص إنتاج تسجيلاً لحالة المريض على مدى ٢٤ ساعة. يقوم مفتاح تتم قيادته كهربائياً بتوصل إشارات الدخل على التوالي إلى المسجل الذي سوف يطبع عندئذ نقطة على ورق الرسم البياني المُعاير. يعطي موضع النقطة على ورق الرسم البياني قيمة البارامتر عند تلك اللحظة.

(٤,١٢) المسجلات الرقمية

Digital recorders

تستخدم المسجلات الرقمية مصفوفة ثابتة خطية من عناصر التسجيل الصغيرة التي يتحرك تحتها الورق. وهذا على عكس المسجلات التقليدية التي تستخدم قلماً متحركاً أو قلم رسم. يتكون قلم الرسم في هذه المسجلات من عدد كبير من أقلام الرسم الثابتة وكل واحد منها يتوافق مع مطال واحد للإشارة التي يجب تسجيلها. وهكذا يتم إعادة إنتاج الإشارة كقيم منفصلة عند أزمنة منفصلة. يمكن معالجة الإشارات الرقمية بالإضافة إلى الإشارات التمثيلية. إن أخذ العينات والتحويل إلى رقمي هما جزء من عملية التسجيل في حالة الإشارات التمثيلية. تُحدد دقة المسجلات ذات المصفوفة من خلال عمل أخذ العينات وعملية التحويل إلى رقمي.

بما أن جميع عمليات المعالجة تحدث بشكل رقمي وبما أن التسجيل هو مسألة توليد العناوين الصحيحة لنقاط الكتابة لكي يتم تفعيلها، فإنه لا توجد مشكلة في كتابة الأشكال بالإضافة إلى رسومات الإشارة. كما يمكن إضافة معلومات مؤلفة من أرقام وحروف إلى الرسم البياني عن طريق لوحة المفاتيح. ويمكن تأمين وحدة إظهار تعرض الرسومات المخزنة في الذاكرة قبل أن يتم تسجيلها على ورق الرسم البياني وبذلك تعطي فرصة للمحافظة على الورق. إن انضغاط أو اتساع الزمن ممكناً كما يمكن تقطيع البيانات بمعدل عالي (اتساع) وتخزينها في الذاكرة وبعد ذلك تسجيلها كما لو إنه تم تحريريها عند معدل مُخَّفض. يمكن تحقيق عرض حزمة أعلى من ذلك المُحدد بواسطة تردد الكتابة. يمكن بهذه الطريقة إعادة إنتاج العابرات السريعة التي لا يمكن معالجتها مباشرة، بدقة. يُمكن توفير عدد كبير من قنوات الدخل من خلال نظام اقتباس بيانات متعدد القنوات (Collier, 1991).

إن الميزة الواضحة للمسجل ذا المصفوفة الخطية هي غياب الأجزاء المتحركة- حيث أنه لا شيء يتحرك إلاّ الورق. إن الإزعاجات الناتجة عن الأجزاء المتحركة الميكانيكية غير موجودة ولا توجد مشكلة تجاوز الحد. إن التقنيتين المُستخدمتين عموماً في تقنية التسجيل بالمصفوفة الخطية هي: الحرارية والكهروستاتيكية.

(٤,١٢,١) المسجل ذو المصفوفة الحرارية Thermal Array Recorder

تساعد تقنية الكتابة بالمصفوفة الحرارية على تسجيل الرسومات التمثيلية وخطوط الشبكة وتحديد الرسم والأحرف والأرقام على ورق حساس حراري عادي. المصفوفة مُركبة من ٥١٢ قلم رسم حراري متباعدة عن

بعضها البعض بحيث تكون بمعدل أربعة لكل ميليمتر في مصفوفة خطية. إن طول المصفوفة ١٢٨ ميليمتر بعرض ٠,٢٥ ميليمتر.

إن الكتابة بالمصفوفة هي عملية من ثلاث خطوات. أولاً، يتم اختيار وتوصيل السواقات المنفردة لأقلام الرسم المراد تسخينها. ثانياً، يتم تسخين جميع أقلام الرسم المُراد قيادتها بنفس الوقت بواسطة جهد مُطبق. وأخيراً، يتم تحريك الورق بتزايد مساوي أو أقل من عرض العنصر الواحد. يتم إعادة هذه العملية حتى ٢٠٠ مرة في الثانية. يمكن بواسطة تقنية الكتابة هذه كتابة أية تركيبة من النقاط في أي مكان من التسجيل. إذا غيرت إشارة الدخل التمثيلية القيمة أثناء دور الكتابة فإنه يتم طباعة قطعة من خط توصل بين المطال الأعلى والمطال الأدنى للإشارة أثناء دور الكتابة التالي. وهكذا فإن موجة جيبية من ٢٠ هرتز يتم تركيبها من ١٠ مقاطع خط منفصلة. من ناحية أخرى فإن موجة مربعة من ٢٠ هرتز تظهر كأنها إعادة إنتاج دقيقة بسبب مقدرة هذه الطريقة على وضع الخط العابر كله في خط واحد.

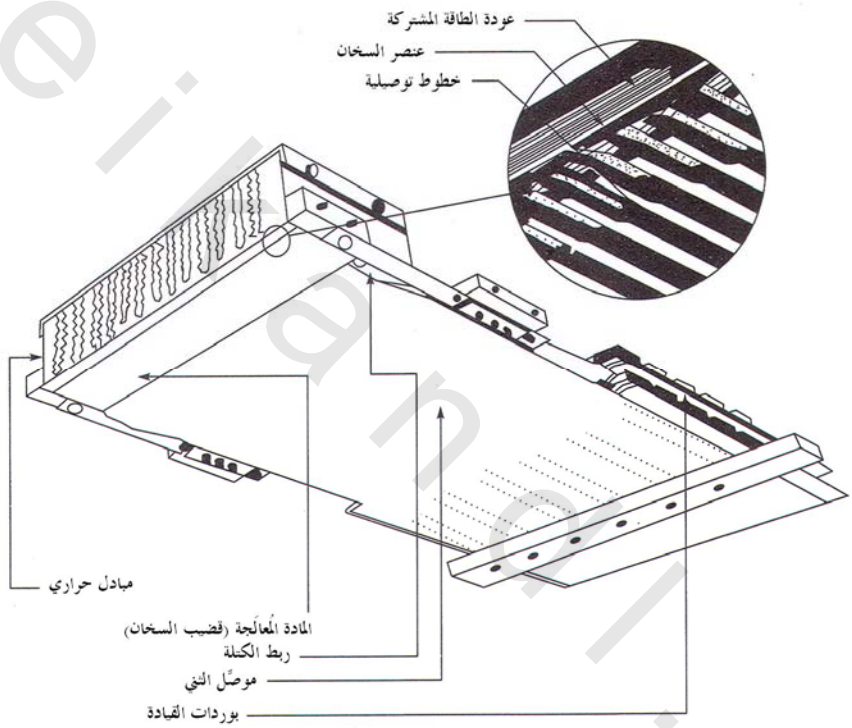
تحدث الكتابة الحرارية عندما يتم تسخين ورقاً حساساً للحرارة و معالج بشكل خاص إلى ٩٠-١١٠ درجة مئوية. يتحول الورق الذي يكون بشكل أولي أبيض أو مغطى بالأبيض إلى لون غامق (عادة أزرق أو أسود) في المكان الذي يتم تسخينه. ينتج اللون الغامق بواسطة تفاعل كيميائي ناتج عن تسخين الورق. إن عمل نظام الكتابة بالمصفوفة الحرارية رقمي بشكل أساسي.

يتم تغذية خط المسح (سلسلة مكونة من الرقم (١) والرقم (٠) حيث يتطابق واحد من هذه الأرقام مع كل واحد من الـ ٥١٢ قلم رسم حراري ويشير الرقم (١) إلى التشغيل والرقم (٠) إلى الإغلاق) إلى نظام الدارات القائدة التي تُفَعِّل أقلام الرسم المفردة التي يجب تسخينها. إن كل خط مسح مُغذَّى إلى دارة القيادة هو مجموع خطوط المسح من مصادر متعددة. يصنع خط المسح المولِّد للشبكة النقاط مُشَكِّلاً خطوط الشبكة. يسمح خط المسح الوارد من القسم التوضيحي بطباعة إعدادات المضخم الأولي وسرعة ورق الرسم البياني. تقبل كل قناة تمثيلية يمكن وصلها دخلاً واحداً وتحوله إلى خط مسح.

يتم أخذ عينات الإشارة التمثيلية بواسطة محول تمثيلي- إلى- رقمي منفصل بمعدل ١٦٠٠ مرة في الثانية. تنتج كل عينة خط مسح يحتوي على ٥١٢ بت جميعها أصفار باستثناء بت واحد يأخذ الرقم (١) ممثلاً موقعاً في المصفوفة الحرارية متطابقاً مع قيمة الإشارة التمثيلية. تقوم التوصيلة على الأقل بثمانية تحويلات بين الطباعات مُقارِنَة كل خط مسح جديد مع خط المسح القديم معبأة ما بين القيمة الأعلى والقيمة الأصغر بالرقم (١). بعد ثمانية تحويلات أو أكثر يُقارَن خط المسح من هذه التوصيلة مع كل خطوط المسح الأخرى ويُغذّى إلى نظام دارات قيادة المصفوفة الحرارية.

إن قلب النظام هو رأس المصفوفة الحرارية الفريد [شكل رقم (٤,٢٩)] و نظام دارات القيادة المرافقة. يُركَّب الرأس من ثلاثة مكونات ؛ قضيب التسخين والمبادل الحراري ونظام دارات القيادة. إن قضيب التسخين هو بشكل

أساسي دارة ميكروية ذات فلم سميك. ويتشكل هذا القضيب من نواقل بطول ٥ مل (mil) (وحدة قياس طول وكل ١ مِل = ٢٥,٤ ميكرو متر) على مراكز بطول ١٠ مِل موصولة إلى ناقل مشترك بواسطة مقاومات ذات فلم سميك. وتشكل المقاومات مصفوفة خطية تحتوي على ٥١٢ عنصر تسخين فعال متباعدة عن بعضها ببعض بمعدل ٤ لكل ميليمتر. يسمح استخدام مادة ما ذات ناقليه حرارية عالية بتوصيل سريع للحرارة الزائدة إلى المبادل المُلتصق بالجهة الخلفية لهذه المادة.



الشكل رقم (٤,٢٩). مبدأ مسجل ذو مصفوفة حرارية. عن (Courtesy: Gould Inc.)

يتم تبريد المبادل الحراري باستخدام الهواء القسري. تسمح فعالية المبادل الحراري بأن يحتوي الرأس على ٢٥ ٪ من دورة الواجب. حتى عندما يطبع المسجل كل شيء بالأسود عند أعلى سرعة لورق الرسم البياني فإنه لا توجد مشكلة في زيادة حرارة الرأس. يوجد نظام دارات قيادة الرأس في دارتين مطبوعتين (بوردين) تكونان نصف مرنة و نصف قاسية. يتم طباعة شكل الربط البيني مباشرة على الجزء المرن للدارة المطبوعة والذي يوصل بعد ذلك مباشرة إلى قضيب التسخين. وهكذا توجد فقط نقطة ربط بينية بكتلة واحدة مُحسِّنةً الوثوقية ومؤمِّنَةً سهولة لتبديل الرأس.

من الممكن إزالة قضيب التسخين بسهولة من المصرف الحراري وفصله عن نظام دارات القيادة. ويمكن للاستبدال أن يتم بنفس سهولة التركيب والتوصيل بدون أدوات أو مثبتات خاصة جاعلاً حقل الرأس قابلاً للاستبدال. لا يحتوي نظام الكتابة ذو المصفوفة الحرارية على قلم يتم استهلاكه ولا على حبر تتعامل معه ولا على محركات أقلام أو روابط تسبب المشاكل. إن الجزء المتحرك الوحيد هو آلية قيادة الورق. لهذا السبب يتم تجنب العيوب الملازمة للارتباطات الميكانيكية مثل تجاوز الحد و ظاهرة الهستِريسِس والوثوقية المنخفضة. ولنفس السبب فإن زمن استجابة عابرة سريعة يساوي ٦٢٥ ميكرو ثانية للتدريج الكامل يكون ممكناً. يمكن لجميع الرسومات أن تمتد إلى تدريج كامل وتتراكب بأية علاقة مرغوبة عند عدم وجود روابط في مسارها. يمكن استخدام ورق حراري غير مخطط منخفض الكلفة ؛ لأنه يتم اختيار وطباعة الشبكات مع الرسومات.

تحتاج الاستجابة الترددية إلى إعادة تحديد و ذلك بسبب مجيء المسجلات ذات المصفوفة. يتم تحديد الاستجابة الترددية في مسجلات القلم المتحرك بالنسبة إلى موجة جيبية عند مطال مُحدد تقريباً. تُستخدم موجة جيبية ؛ لأنه يتم إعادة إنتاجها بسهولة أكثر بواسطة نظام كتابة ذي أجزاء متحركة ذات قصور ذاتي مرافق. لا يوجد قصور ذاتي في المسجلات ذات المصفوفة و يمكنها في الواقع إعادة إنتاج أمواج مربعة عند تردد أعلى من الأمواج الجيبية.

يجب استخدام ثلاثة بارامترات في تحديد الاستجابة الترددية للمسجلات ذات المصفوفة. بمعزل عن هذه البارامترات هناك واحداً أكثر أهمية يعتمد على التطبيق الخاص. هذه البارامترات هي : "التقاط القمة" و"عرض الحزمة" و"استجابة شكل الموجة". يتم تعريف التقاط القمة بأنه النبضة ذات المدة الأقصر التي يمكن تمثيلها بقيمة حقيقة من خلال المسجل. يملك المسجل ذو المصفوفة معدل التقاط قمة يساوي ٦٢٥ ميكرو ثانية، حيث إنه سيتم تسجيل أية نبضة تدوم أكثر من ٦٢٥ ميكرو ثانية بقيمة كاملة. يتم تعريف عرض الحزمة بأنه تردد الموجة الجيبية الأعظمي الذي يمكن أن يُسجَّل بدقة معينة.

ومن نظرية أخذ العينات التقليدية يمكن أن يحدث تموُّج للغلاف قبل الوصول إلى نقطة -٣ ديسبل المعتادة و يعتبر تموُّج الغلاف شيء غير مرغوب فيه إلى درجة عالية. وهكذا يجب التحدث عن عرض الحزمة بأنه تردد الموجة الجيبية الأعظمي بدون تموج غلاف أكبر من ±٠,٥ من قلم الرسم. في هذه الحالة سيتم فقط طباعة شريط أسود عرضه يساوي مطال الإشارة لأنه حتى عند سرعة ورق قصوى تكون مقاطع الخط متلامسة. إن إجراء تحليل لشكل الموجة أو التردد سوف لن يكون ممكناً ولكن تبقى استجابة الغلاف (والقمة العابرة) مفيدة جداً. إن عرض حزمة المسجل هو ١٠٠ هرتز بدقة تساوي ٢ ٪. يتم تعريف استجابة شكل الموجة بأنها ذلك التردد الذي تحتوي عنده الموجة الجيبية مقاطع خط كافية لتكون مُقنِعة فنياً.

ويتم تعيينه بالتردد الذي تتركب عنده كل دورة من بعض الأعداد الأصغرية من مقاطع الخط (عادة ١٠ أو ٢٠). يتم تركيب كل شكل موجة من مقاطع خط كما تم وصفه سابقاً. إن إشارة ذات تردد ٢٠ هرتز سوف تمتلك

بشكل نموذجي ١٠ مقاطع خط في الدورة. يصف Brimbal and Robillard, 1990 المسجلات ذات المصفوفة الحرارية من أجل تطبيقات بسرعة عالية، بينما يشرح Gaskill, 1991 العلاقة بين دقة تمييز المسجل وكثافة رأس الطباعة.

تفضل جميع الأجهزة الطبية التي تتطلب مسجلات ذات تخطيط تذبذبي في الوقت الحالي الطابعات ذات المصفوفة الحرارية. وتهدف هذه المسجلات إلى إنشاء وتخزين خلفيات اعتباطية وطباعة قنوات متعددة بتدريج كامل وتراكب كامل لأشكال الأمواج وتخزين وطباعة قنوات توضيحية وإنشاء الرسوم البيانية ويتم هذا كله في نفس الوقت. تؤمن البرمجيات المبنية في هذه المسجلات الحرية لإنشاء خرج بأية طريقة يرغب بها المستخدم ليشاهد الخرج ويغير الطريقة التي تبدو عليها فوراً.

(٤,١٢,٢) الطابعات الفيديوية Video Printers

إن التقاط الصور الطبية في العقدين الماضيين كان محدوداً بقسوة على طباعات فوتوغرافية بالأشعة السينية مأخوذة بواسطة كاميرا مركبة على مقدمة مونيتور إظهار. أحدث إدخال تقنية الفيديو إلى الطب ثورة في التصوير الطبي من خلال كلٍ من شريط الفيديو والفيديو الذي ما يزال يُستخدم لتسجيل كل إجراء طبي تقريباً. إن المستخدمين الأوائل للتصوير الطبي الإلكتروني كانوا أطباء التوليد والأطباء النسائيين الذين استخدموا هذه التقنية لإنتاج صور فوق صوتية للجنين. لقد تم إدخال التقنية الفيديوية في أوائل الثمانينات مع توافر الطابعات الفيديوية الحرارية بالأبيض والأسود ذات الكلفة المنخفضة. لقد حلت الطابعات محل الكاميرات ذوات الأفلام من خلال تأمين صور نوعية بكلفة أقل.

صُمِّمت طابعات الأبيض والأسود خصيصاً للاستخدام مع التجهيزات الطبية، مثل الأنظمة فوق الصوتية ومختبرات القثطرة القلبية. يمكن وصل هذه الطابعات بسهولة إلى الأجهزة الطبية بإشارة فيديوية معيارية وإنتاج صور مطبوعة على الورق في زمن مقداره من ٤ إلى ٢٥ ثانية. يمكن أن يطبق كل عنصر تسخين في الرأس الحراري لطابعة بالأبيض والأسود ٢٥٦ درجة مختلفة من الحرارة التي تنتج ٢٥٦ كثافة مختلفة لكل بقعة (عنصر صورة، (بيكسل)) ينتج عنها ٢٥٦ تدرج لكل بيكسل.

جاءت الخطوة الرئيسية التالية في آواخر الثمانينيات مع تطوير الطابعة الفيديوية الملونة. كانت تُستخدم خصيصاً في التسجيل فوق الصوتي بالدوبلر ذو التدفق الملون وفي التنظير الجراحي. تستخدم الطابعات الفيديوية طريقة الطباعة الحرارية بتصعيد النقل اللوني التي تلامس فيها آلاف من عناصر التسخين الأصفر والأحمر الأرجواني والصباغ الأزرق المُخضر في فيلم بلاستيكي مطلي كيميائياً. تتحكم كمية الحرارة المنبعثة من خلال كل عنصر تسخين بكمية اللون المنقولة إلى الورق. معظم الطابعات الفيديوية تدعم ٢٥٦ طيف لوني لكل لون أساسي يُترجم إلى أكثر من ١٦ مليون ($٢٥٦^٣$) لون. النتيجة هي صورة واقعية وصورة ملونة تحتوي على ٢٤ بت كاملة.

قدمت طابعات الجيل الأول ذاكرة ذات إطار وحيد فقط. كان معنى هذا بأن الواحدة استطاعت التقاط الصور وطباعتها، إلاّ أن الطابعة بقيت عديمة الفائدة أثناء زمن الطباعة. تأتي الطابعات الحديثة بذاكرة ذات إطارات متعددة والتي تستمر فيها الطابعات بالتقاط الصور بينما تتم طباعة الصور الأخرى. يُمكّن ذلك الدكتور من مشاهدة صور متعددة وطباعة فقط الصورة التي تكون مناسبة إكلينيكياً إلى أبعد حد.

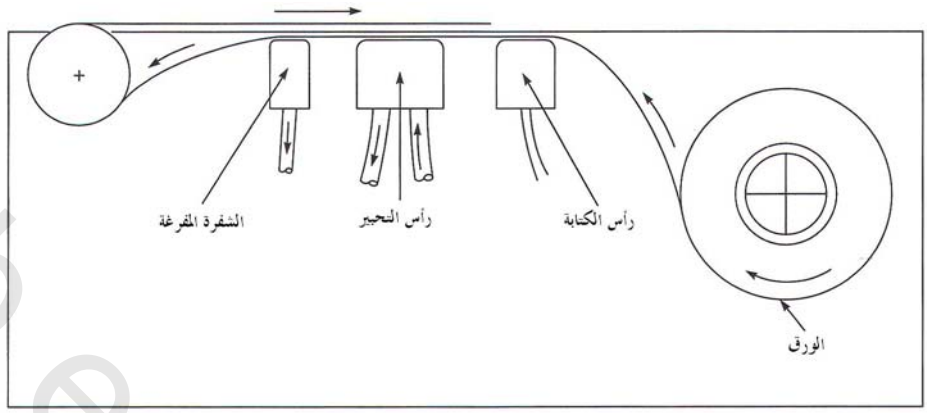
(٤,١٢,٣) المسجل الكهروستاتيكي Electrostatic Recorder

إن المسجلات الكهروستاتيكية هي مسجلات تمثيلية ذات تردد عالي تستخدم جهازاً كهروستاتيكياً ذا حساسية عالية لإنتاج تسجيلات على ورق عريض منخفض الكلفة عند سرعات ورق رسم بياني حتى ٢٥٠ ميليمتر في الثانية. تتخلص عملية الكتابة الكهروستاتيكية، من خلال إزالة أجزاء الكتابة المتحركة، من مشاكل القلم المتحرك المميز مثل: تأثيرات القصور الذاتي مثل تجاوز الحد أو محددات الاستجابة الترددية المنخفضة وتأثيرات الارتباط مثل عدم الخطية وظاهرة الهستِريسِس وعدم القدرة على تراكب الرسومات والشبكات المطبوعة مسبقاً التي تتحرك مع حركة الورق وتتمدد أو تتقلص مع تغير شروط الرطوبة.

يتألف نظام الكتابة الكهروستاتيكي Gould ES 1000 المُبين في الشكل رقم (٤,٣٠) من ثلاثة عناصر: رأس التصوير ورأس التحبير والشفرة المفرغة. يتألف رأس التصوير من مصفوفة خطية تحتوي على ١٠٠٠ عنصر سلكي متباعدة عن بعضها البعض بمعدل ٤ لكل ميليمتر بطول كلي قدره ٢٥٠ ميليمتر. ويوجد على كل جانب من المصفوفة ٣٢ قضيباً نحاسياً تدعى النعلات. عند تحريك الورق فوق رأس الصورة يتم تطبيق جهد سالب على عناصر سلكية مختارة وتطبيق جهد موجب على النعلات الأقرب. يضع هذا شحنة بنقطة سالبة على الورق بالنقطة التي كان عندها العنصر السلكي. يمر بعد ذلك الورق على رأس الحبر وتلتصق جزيئات الحبر المشحونة إيجابياً على مكان وجود الشحنة السالبة على الورق. تزيل الشفرة المفرغة في النهاية كل الحبر والجزيئات الزائدة صانعة الصورة من الجزيئات المشحونة. يسبب التعرض للهواء ارتباطاً دائماً للجزيئات المطلية الملتصقة بالورق ويخرج التسجيل جافاً تماماً من الآلة.

يتقدم الورق بتزايدات أقل أو مساوية إلى عرض عنصر وحيد أو ٠,٢٥ ميليمتر. ويتم تزويد عناصر التصوير بالطاقة بمعدل ثابت مقداره ١٠٠٠ مرة/الثانية. إذا غيرت الإشارة التمثيلية القيمة أثناء فترة التزايد، يتم عندئذ طباعة قطعة من خط توصل بين المطال الأعلى والمطال الأدنى أثناء تلك الفترة. وهكذا فإن موجة جيبية من ١٠٠ هرتز يتم تركيبها في الواقع من ١٠ مقاطع خط منفصلة.

من ناحية أخرى فإن موجة مربعة من ١٠٠ هرتز تظهر وكأنها إعادة إنتاج دقيق للموجة بسبب مقدرة النظام على وضع الخط العابر كله في خط واحد. يسمح نظام الكتابة الكهروستاتيكي بإنتاج أية تركيبة من النقاط في أي مكان على ورق الرسم البياني. ويُستخدم ورقاً كهروستاتيكياً عادياً مع خطوط شبكة مطبوعة مثلما يتم اختيارها، بالإضافة إلى تحديد الرسم وكل الحروف والأرقام المطلوبة.



الشكل رقم (٤,٣٠). مبدأ المسجل الكهروسانيكي. عن (Courtesy: Gould Inc.)

إن التباعد بين النقاط على طول محور المطال هو ٠,٢٥ ميليمتر. يسمح هذا بدقة تمييز مقدارها ٠,١٪. تنتج سرعة ورق الرسم البياني العليا المساوية ٢٥٠ ميليمتر/الثانية تباعداً بين النقاط مقداره ٠,٢٥ ميليمتر على طول محور الزمن. على سبيل المثال، تزداد دقة التمييز هذه حتى ٤٠ نقطة/الميليمتر عند سرعة ورق رسم بياني مقدارها ٢٥ ميليمتر/الثانية وذلك لأن معدل الطباعة ثابت. تتم قيادة ورق الرسم البياني عند سرعة مُختارة مستمرة بواسطة محرك dc مُتحكم به بنظام سيرفو. يتم تأمين ٦ إمكانيات لاختيار السرعة من ٥ إلى ٢٥٠ ميليمتر/الثانية. يمكن التحكم بالسرعة إما يدوياً أو عن بعد بواسطة إشارة كلمة مؤلفة من ٣ بت.

يجب استخدام ثلاثة قياسات مشابهة لتلك التي في المسجلات ذات المصفوفة الحرارية عند تحديد الاستجابة الترددية للمسجلات الكهروستاتيكية. تلك القياسات هي "التقاط القمة" و"عرض الحزمة" و"استجابة شكل الموجة".

إن معدل التقاط القمة للمسجل الكهروستاتيكي هو ٤٠ مايكرو ثانية. إن عرض الحزمة لنظام التسجيل هو ٥٠٠٠ هرتز بدقة تساوي ٢ ٪ أو ١٥ كيلو هرتز بدقة تساوي ٢٠ ٪. من ناحية ثانية سيتم في هذه الحالة فقط طباعة شريط أسود عرضه يساوي مطال الإشارة. إن إجراء تحليل لشكل الموجة أو التردد سوف لن يكون ممكناً. يتم تركيب كل شكل موجة من مقاطع خط وسوف تمتلك إشارة من ١٠٠ هرتز ١٠ مقاطع خط لكل دورة.

(٤,١٣) مسجلات الشريط التجهيزاتية

Instrumentation Tape Recorders

وجدت تقنيات التسجيل بالشريط المغناطيسي استخداماً واسعاً في إعداد المستشفى. إن الحقيقة بأن الإشارة متوفرة دائماً بشكل كهربائي يجعل من الممكن تسجيل الإجراء التجريبي كاملاً على شريط وبعد ذلك إعادة تشغيله من أجل الإظهار على أنبوب الأشعة المهبطية (CRT) في وقت لاحق. وسَّع استخدام الكمبيوتر في المجال الطبي مجال

التسجيل على شريط مغناطيسي إلى حد أبعد مما هو عليه. يتم ترميز المعلومات التي تُغذى إلى الكمبيوتر وتخزينها على شريط مغناطيسي مُشكِّلة بذلك صفوف الذاكرة للكمبيوترات الرقمية.

يُقدم التسجيل على الشريط المغناطيسي بعض الصفات المفيدة زيادة عن طرق التسجيل الأخرى. وتسمح هذه الطريقة بتسجيل الإشارات، من خلال تقنيات مناسبة، من الـ dc لتصل إلى عدة ميغا هرتز. بما أنه يمكن محي تسجيلات الشريط عدداً غير محدود من المرات يصبح الشريط قابل لإعادة الاستخدام ومن ثمَّ تقديم تدبير اقتصادي في عملية التسجيل. إن القدرة على تغيير القاعدة الزمنية للأحداث المُسجلة على الشريط هو شيء لا تستطيع تأمينه أية وسيلة تسجيل أخرى. يمكن إعادة تشغيل الأحداث إما أسرع وإما أبطأ أكثر مما حدثت به في الواقع.

يسمح هذا باستخدام مسجلات ذات شريط مُصغَّرة من أجل المراقبة المتنقلة. نظراً لأنه يمكن إعادة تشغيل الشريط عدد غير محدود من المرات، فإن ذلك يسمح باستخلاص كل بت من المعلومات المفيدة من التسجيل. يمكن أيضاً امتلاك مجال ديناميكي واسع جداً للتسجيل يمكن أن يتجاوز ٥٠ ديسبل. يسمح هذا بتسجيل دقيق وخطي من مستوى إشارة ذات تدريج كامل تزولاً إلى ٣/١ ٪ منه.

إن أكثر الطرق المألوفة لإشارات التسجيل على الشريط المغناطيسي هي عملية التسجيل المباشر. يتم تضخيم الإشارة الكهربائية المراد تسجيلها بواسطة مضخم التسجيل وبعد ذلك تُغذى إلى رأس التسجيل حيث يتم إنتاج الحقول المغناطيسية المتطابقة. يتم نقل الحقل المغناطيسي المتغير إلى الشريط على شكل أنماط مغناطيسية مع الأخذ بعين الاعتبار تغيرات الإشارة بالنسبة إلى حركة الشريط المار على الرأس. عند الإعادة يتم إعادة عملية التسجيل بترتيب معاكس. يتم سحب الشريط الممغنط سابقاً ويقدم الحقل المغناطيسي تياراً في وشيعة رأس إعادة العرض. بعد ذلك يتم تضخيم هذا التيار قبل تمريره إلى مكبر الصوت أو المسجل أو أي جهاز إظهار آخر.

(٤,١٣,١) التسجيل على شريط بواسطة التعديل الترددي

Tape Recording with Frequency Modulation

إن التقييد الملازم لعملية التسجيل المباشر على الشريط المغناطيسي هو عدم قدرتها على تسجيل الإشارات ذات الترددات المنخفضة جداً. يتغير المجال الترددي للإشارات التي تحدث في المجال الطبي من التيار المستمر dc إلى عدة مئات من الهرتز. توجد طريقة لمعالجة هذه الإشارات من خلال استخدام تردد حامل يكون مُعدَّلاً ترددياً بواسطة الإشارة المراد تسجيلها. ويجب عند الإعادة فك تعديل الإشارة وتمريرها خلال مرشح تمرير منخفض من أجل إزالة التردد الحامل والترددات الأخرى غير المطلوبة. قدم Smith et al, 1979 تفاصيل الدارة لنظام التسجيل على الشريط بالتعديل الترددي (FM) من أجل التطبيقات الطبية الحيوية.

إن إحدى التطبيقات الهامة لتقنية التسجيل FM هي مرونته في استخدام "المضاعفة بانحراف التردد" حيث يتم تعديل عدد من ترددات الحامل بشكل منفصل بواسطة إشارات دخل مختلفة. يمكن بعدئذ مزج الإشارات الناتجة خطياً كما يمكن تسجيل الإشارة المُركبة باستخدام عملية التسجيل المباشر. تقدم هذه الطريقة السهولة لتسجيل عدة

قنوات لمعلومات الإشارة على مسار واحد من الشريط والاستفادة من عرض الحزمة العريض والخطية لتقنية التسجيل المباشر.

تتطلب تقنية التسجيل FM أنه ينبغي تحريك الشريط على الرؤوس بسرعة منتظمة تماماً ؛ لأن أية تغيرات في السرعة يتم إدخالها إلى الشريط سوف تتسبب بتعديل غير مطلوب للتردد الحامل. سوف يؤدي هذا إلى ضجيج في إشارة الخرج كما إنه سوف يحد من الدقة والمجال الديناميكي للنظام FM. يمكن أن يسبب التغير في سرعة حركة الشريط اهتزازاً مسموعاً ورفرفة وهذه المشكلة خطيرة خصوصاً في النظام المضاعف ترددياً.

(٤,١٣,٢) التسجيل على شريط بواسطة التقنية الرقمية

Tape Recording with Digital Technique

إن الطريقة الأخرى لتسجيل المعلومات على شريط مغناطيسي هي عملية التسجيل الرقمية. برزت هذه الطريقة بسرعة من حيث الأهمية كنتيجة للتطبيق الواسع الانتشار للكمبيوترات الرقمية. تُستخدم في هذه الطريقة تقنية أخذ العينات لقياس الإشارة المتغيرة. يتم بعدئذ تحويل قراءات العينات المأخوذة إلى شِفرة مؤلفة من مجموعة من الأرقام الثنائية. يتم إنجاز التسجيل من خلال مغنطة الشريط إلى حد الإشباع في كلا الاتجاهين المحتملين للشريط عند نقاط منفصلة على كامل طول الشريط.

إن مزايا عملية التسجيل الرقمي هي مقدرتها المتأصلة على إعطاء دقة بمراتب عالية جداً وعدم تحسسها لتغيرات سرعة الشريط والتسجيل البسيط ونظام الدارات الإلكترونية التي تعيد الإنتاج.

إن المشكلة الرئيسية في عملية التسجيل الرقمية هي حساسيتها لأخطاء رفض الشريط. وبما أن جميع المعلومات محتواة في وجود أو غياب النبضات ، فإنه لا يمكن عند الإعادة التسامح بضياع النبضات أو بتوليد نبضات زائفة تولدها عيوب الشريط. يضع هذا تقييداً على المدة الأصغرية الفعلية للنبضات وبالتالي التأثير على كثافة تحزيم النبضات. تحتاج العملية أيضاً إلى تحويل البيانات إلى رقمية عند المصدر أو يجب استخدام مبدلات رقمية خاصة.

obeikandl.com