

La medida de tensiones continuas muy débiles

310

Jaime Carreras de la Fuente

MAR 54

54

Jefe del departamento de Instrumentación de Unitronics, S. A.

La medida de tensiones continuas muy débiles ha sido considerada siempre como muy delicada. Así, no es raro encontrar en el mercado más que pocos instrumentos que permitan efectuar cómodamente medidas en el dominio del nanovoltio.

El voltímetro numérico de modulación y detección sincrónica aparece como el primer aparato de medida capaz de suministrar resultados precisos bajo forma numérica, sin requerir, por tanto, una puesta a punto delicada. Después de un ejemplo de aplicación de este nuevo instrumento en calorimetría, el autor muestra cuáles son las soluciones técnicas que permiten obtener los resultados necesarios de este género de medida. Teniendo en cuenta precauciones de empleo, principalmente en lo que concierne a la temperatura y el ruido, se verá las grandes posibilidades de aplicación de tal aparato.

Instrumento de base: El nanovoltímetro

De cara a su presentación exterior, un nanovoltímetro se parece al voltímetro numérico

de presión; lo que podría hacer suponer que su principio de medida es el de la doble rama, como es generalmente el caso. De hecho, no es nada de esto: para obtener buenos resultados en ruido y en sensibilidad, el aparato está equipado de un modulador estático de células foto-resistentes (frecuencia de modulación, 85 Hz); un amplificador de detección sincrónica con realimentación en corriente continua proporciona al conjunto su linealidad y su estabilidad. El esquema de principio del aparato se da en la figura 1. Se ve también que el nanovoltímetro numérico es un voltímetro que posee a la vez las cualidades del amplificador de corriente continua de muy bajo nivel y muy débil ruido y una gran estabilidad, así como las cualidades de un voltímetro numérico de precisión, dotado de una gran dinámica.

Es solamente a la salida del amplificador cuando se utiliza un convertidor analógico-digital (voltímetro con presentación de cristal líquido).

El aparato ofrece simultáneamente una salida analógica de 1 V y una salida digital BCD. Estas dos salidas están aisladas. Puede estar,

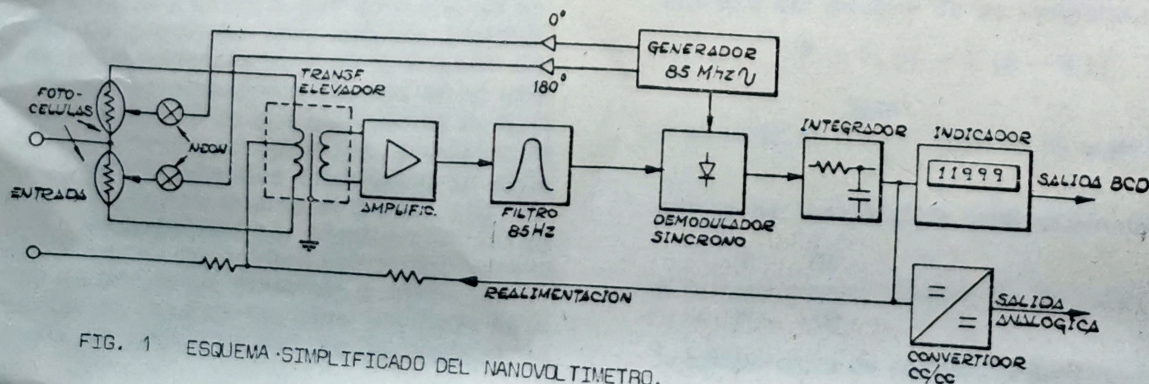


FIG. 1 ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL NANOVOLTIMETRO.

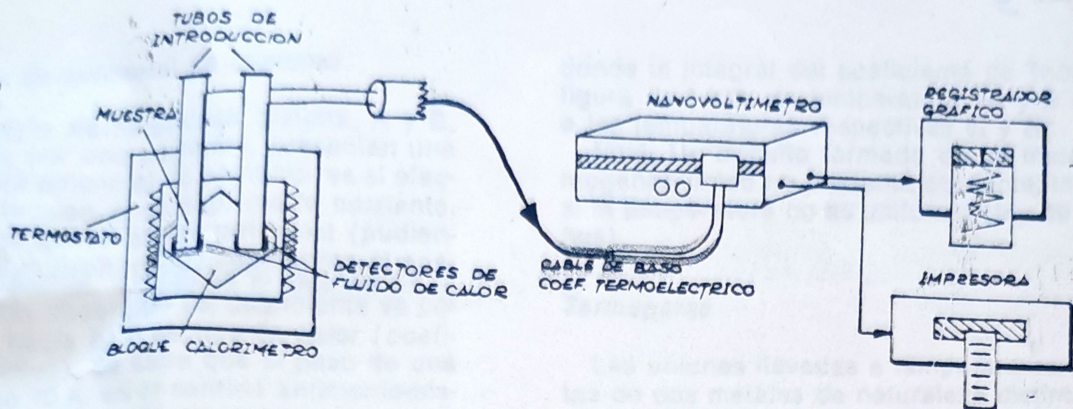


Fig. 2
Principio de registro microcalorimétrico

por tanto, asociado también a un registrador $x = f(t)$, una impresora o todo un sistema lógico.

La resolución del instrumento es de 1 nV, lo que permite al aparato satisfacer en las condiciones requeridas para las medidas termométricas y calorimétricas de precisión; la amplitud del ruido residual asociado a la entrada permanece inferior a 2 nV p. a p.

Aplicación en calorimetría

El microcalorímetro Calvet (derivado del aparato Tian), utilizable entre -200°C y 1.000°C , constituye el aparato más extendido para las medidas calorimétricas fundamentales de alta sensibilidad.

Se conocen las siguientes aplicaciones:

- en físico-química: interacciones líquido-sólido, cristalización, calor de las soluciones;
- en electro-química: polarización, rendimiento de electrodos;
- en bioquímica: macromoléculas, microorganismos, metabolismo de bioorganismos;
- en física: conductividad, capacidad calorífica, calor específico, interacciones moleculares, calor de las reacciones de entalpía;
- en metalurgia: corrosión, calor de formación de aleaciones.

El aparato está constituido generalmente de una envoltura externa que contiene un termostato de precisión muy estable (estabilidad de la temperatura de $0,05^{\circ}\text{C}$ a $0,001^{\circ}\text{C}$).

El bloque calorimétrico, situado en el interior, está equipado de dos captadores de flujo de calor montados en oposición, provistos de termopares diferenciales dispuestos en serie y acoplados térmicamente al bloque (fig. 2). El calor se transfiere por conducción. Es en el interior de los detectores cilíndricos huecos donde se ponen las muestras a medir.

El flujo de calor permanente originado en la muestra se convierte por los termopares en

una señal eléctrica proporcional a la potencia P (expresada en vatios):

$$U = \epsilon/\gamma P$$

donde ϵ (en $\text{V}/^{\circ}\text{C}$) y γ (en $\text{W}/^{\circ}\text{C}$) representan, respectivamente, el coeficiente termoelectrónico de los termopares y la conductancia térmica.

La variación de la potencia, algunos microvatios por cm^3 , puede medirse gracias al nanovoltímetro numérico, seguido de un registrador analógico o de una impresora.

La elevada sensibilidad del nanovoltímetro ligada a su gran estabilidad ($3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$) permite efectuar medidas calorimétricas muy precisas (umbral de detección: $1 \text{ mJ}/\text{cm}^3$). Si fuera necesario, es posible efectuar una calibración por efecto Joule y efecto Peltier.

Cuando quiere conocer la energía total (en joules) que se ha intercambiado en un tiempo dado, es suficiente hacer seguir el instrumento de un registrador.

Antes de dar una descripción tecnológica de este nuevo nanovoltímetro de concepción francesa, haremos un llamamiento sobre las principales propiedades térmicas de los conductores.

Breve reseña acerca de las propiedades técnicas de los conductores.

Conductividad intrínseca de los metales

La resistividad de un conductor (valor inverso de la conductividad) depende de la naturaleza del metal y de su temperatura θ :

$$P = P_0 [1 + \alpha (\theta - \theta_0)]$$

P se mide en $\frac{\Omega \text{ m}^2}{\text{m}}$ o en $\Omega \cdot \text{m}$, α es el coeficiente de temperatura (del orden de 10^{-3});

$$\alpha = \frac{1}{P} \frac{dP}{d\theta}$$

representa la resistividad a

la temperatura de referencia θ_0 .

Diferencias de potencial de contacto

Dos metales de naturaleza distinta, A y B, atravesados por una corriente, presentan una diferencia de potencial de contacto: es el efecto Peltier. Incluso si se suprime la corriente, subsiste una diferencia de potencial (pudiendo llegar al milivoltio) que representa el coeficiente de Peltier. Si la corriente es positiva de A hacia B, hay absorción (el coeficiente es positivo de A hacia B) o escape de calor (coeficiente negativo). Se sabe que el paso de una corriente de 10 A, en el sentido antimonio-bismuto, produce un enfriamiento del agua puesta en contacto de algunos grados por hora.

Cadena metálica isoterma

Si la cadena está cerrada, no hay corriente: la suma de las diferencias de potencial de Peltier es nula.

Cuando se abre el circuito, la diferencia de potencial entre los metales extremos es la misma que los que están directamente en contacto. Por tanto, si los metales extremos son idénticos, tienen el mismo potencial.

En el caso de metales muy próximos, pero no en contacto, existe en el espacio libre un campo eléctrico correspondiente a una diferencia de potencial: es el efecto Volta. La diferencia de potencial de Volta es prácticamente igual a la diferencia de potencial de extracción de los metales $V(A) - V(B)$ (fig. 3).

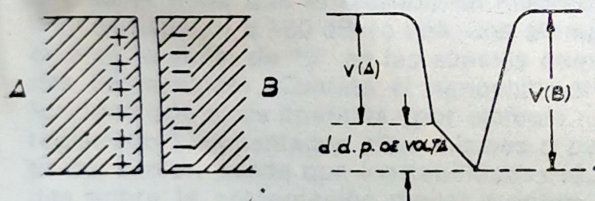


Fig. 3

Dos piezas metálicas próximas crean un campo eléctrico: efecto Volta

Generadores termoeléctricos

Cuando un conductor homogéneo, recorrido por una corriente, no tiene temperatura uniforme, presenta un cambio de calor con el exterior: es el efecto Thomson, que cambia de signo cuando la corriente cambia de sentido.

Este efecto se añade al efecto Joule, independiente del sentido de la corriente.

$$dP \text{ (en vatios)} = I^2 dR - \tau Id\theta$$

donde τ es el coeficiente de Thomson (en $V/^\circ C$); es negativo para el platino, por ejemplo.

La diferencia de potencial entre dos puntos A y B es de la forma

$$\Delta V = \int_{\theta_A}^{\theta_B} \tau d\theta - \Omega I$$

donde la integral del coeficiente de Thomson figura de f.e.m. de temperatura (A y B están a las temperaturas respectivas θ_A y θ_B).

Nota: Un circuito formado de un metal homogéneo único no presenta corriente, incluso si la temperatura no es uniforme (ley de Magnus).

Termopares

Las uniones llevadas a temperaturas distintas de dos metales de naturaleza distinta dan lugar a una diferencia de potencial termoeléctrica: es el efecto Seebeck.

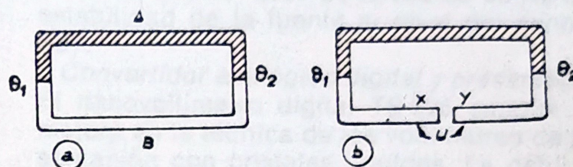


Fig. 4

Caracterización de la F. E. M. de un termopar: a) Circuito cerrado. b) Circuito abierto

La f.e.m. del termopar, contado positivamente en el sentido de A hacia B a través de la soldadura a θ_2 grados es (fig. 4a):

$$U = F(\theta_2) - F(\theta_1)$$

relación en la que

- F = f.e.m. de Peltier.
- f.e.m. de Thomson del metal A.
- f.e.m. de Thomson del metal B.

Abriendo el circuito de uno de los metales (fig. 4b) se observa la tensión U a condición de que los dos extremos X e Y estén a la misma temperatura.

Nota: Intercalando entre X e Y uno o varios metales, la f.e.m. total permanece igual con tal que las soldaduras intermedias estén todas a la misma temperatura.

Los coeficientes termoeléctricos son muy variables en función de dos metales en presencia; por ejemplo:

Cobre - plata	= 0,3 $\mu V/^\circ C$
Cobre - latón	= 4 $\mu V/^\circ C$
Cobre - óxido de cobre	= 1 $\mu V/^\circ C$

Se puede disminuir el efecto termoeléctrico asociando dos uniones en serie con polaridades opuestas.

El cuadro siguiente nos da los valores de las tensiones termoeléctricas de algunos metales en relación al cobre (valores expresados en $V/^\circ C$).

Oro:	0,2	Carbono:	4
Plata:	-0,3	Latón:	4
Manganeso:	-1,5	Hierro:	-11
Aluminio:	-3,4	Constantano:	42

Este cuadro muestra la importancia que



pueden tomar las tensiones termoeléctricas de contacto en una medida cuando se busca una resolución de nanovoltios. Así, la calidad de las conexiones y su protección son primordiales para efectuar medidas correctas.

Reseña tecnológica

El nanovoltímetro ha sido muy estudiado, particularmente en lo que concierne a los elementos siguientes:

Bornes de entrada.—En cobre puro, los bornes de las entradas se utilizan a partir del mismo barrote de cobre, con objeto de obtener una perfecta identidad, tanto mecánica (geometría, masa, martilleo) como química (composición).

En el bloque de entrada encerrando el modulador no hay ninguna soldadura, tanto de estaño como eléctrica; todas las conexiones están hechas por simple fijación mecánica cobre-sobre cobre de diferentes hilos.

Esa técnica permite obtener un falso cero "natural" del aparato de una veintena de nanovoltios, sólo que se puede compensar fácilmente: a título de ejemplo: una conexión latón-cobre daría 0,4 V por 0,1° C, sobre la gama 10 V, 400 dígitos para una variación de temperatura de una décima de grado.

Cable de unión con la fuente.—Se trata de un doble hilo de cobre puro, retorcido y blindado; está equipado de pinzas de bajo coeficiente termoeléctrico y de un sistema de fijación mecánica en los bornes de entrada. Hay que hacer notar que el rechazo en modo común es superior a 180 dB (o sea, una atenuación en la señal de 10° en las señales comunes indeseables). Cuando el nanovoltímetro funciona con otros aparatos (por ejemplo, un registrador) alimentados ellos mismos a partir del sector, puede que inestabilidades rápidas sobre la presentación digital o sobre el registrador se hagan patentes. Para eliminar estos fenómenos, que son debidos a los parásitos inducidos por el sector a través de las capacidades de los transformadores de alimentación, se recomienda:

- desenchufar todas las masas unidas al sector de todos los aparatos; es decir, no utilizar más que la fase y el neutro;
- conectar todas las masas de todos los aparatos, la masa de referencia será la de la señal.

Alimentación.—Para los problemas de ruido a la frecuencia de la red de 50 Hz y de bucles de masa, el aparato lleva esencialmente, además de la alimentación clásica en el sector, una alimentación a batería con cargador incorporado. El funcionamiento en batería se utiliza cada vez que se desee obtener un aislamiento perfecto con el sector.

Doble salida analógica y digital.—El nanovoltímetro posee una salida analógica aislada para evitar igualmente los bucles de masa. En

este caso, la precisión, la resolución y la linealidad son de la clase 10^{-3} , que es suficiente cuando se utiliza, por ejemplo, un registrador gráfico.

Una salida no aislada, conservando la precisión nominal del aparato, permite eventualmente funcionar como detector de cero con un galvanómetro u otro sistema analógico cuya sensibilidad de entrada es compatible con el nivel de salida del aparato (1 V, consumo hasta 1 mA para 10.000 puntos).

Inhibición del dispositivo de "gama automática".—La posibilidad de inhibir una de las tres primeras gamas más sensibles permite evitar la lectura o el registro de medidas inestables, en función de las condiciones externas (esencialmente ruido de la red de 50 Hz o inestabilidad de la fuente al nivel del nanovoltio).

Convertidor analógico-digital y presentación. El nanovoltímetro digital TE 925 supone una mejora en la técnica de los voltímetros de presentación con cristales líquidos. La débil potencia requerida por el circuito MOS-LSI lógico y la misma presentación hacen que el indicador disipe pocas calorías en el interior de la caja; esto contribuye a permanecer estable (particularmente en función de las variaciones de tensión del sector) el equipo potencial térmico interno necesario para una buena estabilidad del cero.

Recordemos que la presentación de cristales líquidos constituye un claro progreso con relación a los dispositivos de tubos Nixie, de diodos electroluminiscentes o de proyección. El elemento esencial está constituido por una película delgada (10 mm) de sustancia orgánica anisótropa (nemática en hélice, torsión 90°), encerrada entre dos placas de vidrio, sobre los que están dispuestos unos electrodos transparentes representando las cifras de siete segmentos. Unas pantallas polarizadas permiten suprimir la transmisión de la luz "producida" por una lámpara incandescente situada detrás, cuando los electrodos no están sujetos a una tensión.

La aplicación de una tensión muy débil (del orden de 5 V) restablece el paso de la luz y las cifras aparecen en claro sobre fondo oscuro. La potencia que se necesita no es más de unos microwatios.

Precauciones de empleo para las medidas de señales muy débiles.—Tres fenómenos principales son susceptibles de perturbar la medida:

- la tensión termoeléctrica de contacto en el bucle de entrada;
- el ruido producido por la fuente que se mide (en particular, 50 Hz);
- el ruido de 50 Hz producido por la alimentación del sector.

Más arriba hemos visto cómo evitar los eventuales errores debidos a los parásitos, a la frecuencia de 50 Hz generados por la alimentación del sector. Insistiremos, pues, aquí en el primer fenómeno.

Hemos visto en lo que precede que una conexión entre un borne de la fuente en latón y un hilo de cobre de 0,4 V solamente por 0,1°C, o sea 400 dígitos en la gama 10 V (el latón se toma como ejemplo porque a menudo se utiliza, y tiene, por otra parte, uno de los más débiles coeficientes termoeléctricos, en relación con el cobre). Sería pues, imprudente ~~medir la resistencia con bananas aisladas.~~

La calidad de las conexiones y su protección es esencial para poder medir de forma efectiva la fuente útil y no efectos parásitos. Un conexionado directo, sin piezas de empalme (bananas, pinzas, etc.) entre la entrada del nanovoltímetro y la fuente es muy recomendado. Por otra parte, una protección térmica de las conexiones es indispensable; esta protección puede realizarse fácilmente con materiales como el poliuretano, el algodón o un trozo de tela, simplemente.

Es preciso no olvidar que incluso una conexión cobre-cobre genera una tensión nada despreciable al nivel del nanovoltio, en razón a las diferencias de masa, de homogeneidad de estado de la superficie, etc. Ninguna conexión, por perfecta que sea, debe ser despreciable, desde el punto de vista de protección térmica.

Cada vez que un cambio o simplemente una inversión de la conexión se hace a la entrada del aparato o en la fuente, el calentamiento producido por los dedos es suficiente para provocar una deriva en un sentido y en otro; la lectura, antes de estabilizarse, puede requerir al menos cinco minutos. Pero prácticamente las conexiones se hacen para varios días, incluso varias semanas, y este fenómeno no tiene mayor importancia.

Si el aparato está puesto en servicio en una habitación, cuando se encuentra ya varias horas, el tiempo de puesta en marcha necesario para obtener una buena estabilidad del cero es de hora y media para la gama más sensible. Si el aparato viene del exterior, más grande será la diferencia de temperatura exterior-interior y mayor será el tiempo necesario para la puesta en marcha; este tiempo es el necesario para obtener un equipotencial térmico del bucle de entrada. Esta condición se cumple cuando la suma de los termopares de contacto en serie-oposición tiende a cero, siendo el circuito de entrada perfectamente simétrico. De hecho, un cero perfecto no se obtendría nunca en la gama más sensible: 10 μV (presentación: 10.000 nV); cada aparato tiene un cero "natural": hemos visto que está comprendido entre cero y 20 nV, aproximadamente.

Ello tiene poca importancia si este cero permanece estable; podrá compensarse por la tensión de desajuste del aparato, regulable manualmente.

Las notas, aquí abajo, podrían hacer suponer que una pieza estabilizada en temperatura es indispensable para el buen funcionamiento del aparato. Esto no es imperativo, pues la temperatura puede variar, a condición

de que su velocidad de variación sea claramente más débil que la inercia térmica del aparato y en particular de la del bucle de entrada.

Primer ejemplo de medida.—Para medir el valor diferencial de pilas patrones:

pila X: 1,0182342 V
pila Y: 1,0182305 V

Valor diferencial: 3,7 V, o sea, 3.700 nV.
Se opera de la forma siguiente:

- efectuar la puesta en cero del aparato con la ayuda de una barrita de cobre que sirva de corto-circuito, a la entrada del aparato. Vamos a ver que en una medida diferencial esta puesta en cero no es obligatoria;
- establecer en seguida las conexiones con las pilas;
- esperar la estabilización de la medida (unos cinco minutos);
- efectuar la medida: 3.720 nV, por ejemplo.

Esta última cifra no puede considerarse como el valor diferencial verdadero, pues a este valor se suman o restan las tensiones termoeléctricas de contacto de las conexiones. Para evitar la duda, se invierten las conexiones, simplemente:

- inversión de las conexiones y ;
- se espera la estabilización de la medida;
- después se hace la medida: — 3.680 nV, por ejemplo.

El valor verdadero será:

$$V \text{ diferencial} = 3.720 + 3.680/2 = 3.700 \text{ nV.}$$

Se ve que incluso si no se tenía "hecho el cero" del aparato, el desajuste no habría tenido más importancia que las tensiones termoeléctricas de contacto; estas dos perturbaciones serían eliminadas por diferencia.

Notas:

1. la práctica de los cambios rápidos de las conexiones permite estabilizaciones al cabo de treinta segundos a un minuto sólo, sobre todo si se trabaja, como es generalmente el caso, al nivel de una decena de nanovoltios y no a la del voltio, como en el ejemplo precedente.

La medida con un nanovoltímetro tal como el TE 925 es, pues, mucho más rápida y sobre todo más estable que con un puente de medida clásico.

2. En tal ejemplo, el utilizador habría podido constatar una rápida inestabilidad de la presentación (que no se puede confundir con un fenómeno de deriva, que es siempre lento). Para remediarlo se puede desenchufar del sector la alimentación de la envoltura termotática que contienen generalmente las pilas patrón.

En efecto, este género de regulación es el origen de un ruido de 50 Hz que puede llegar



fácilmente a los 10 mV, lo que representa, en relación al nanovoltio, una relación de 140 dB; entonces, el rechazo serie del nanovoltímetro TE 925 es de 70 dB (correspondiente ya a una atenuación de tales perturbaciones del orden de 3.000).

Un segundo ejemplo, más sencillo, ilustra todavía mejor la asociación de dos fenómenos de contacto y ruido de 50 Hz que se producen frecuentemente, cuando se utiliza el aparato.

Segundo ejemplo de medida.—Los últimos resultados del instrumento (ruido residual, estabilidad del cero) son controlados a menudo, estando puesta la entrada en corto-circuito por un "shunt" de cobre; esto lleva a una resistencia de la fuente nula y a muy débiles coeficientes termoeléctricos de contacto; éstas son, evidentemente, las mejores condiciones de utilización.

En la práctica, las resistencias de la fuente no son nulas y en el dominio de la utilización del nanovoltio están comprendidas generalmente entre 10 y 1 k (termopares, captadores resistivos, termopilas, etc.).

Para efectuar un control de ruido residual se pueden presentar dos casos:

- la resistencia equivalente está conectada directamente a los bornes del nanovoltímetro;
- la puerta de acceso a los bornes de entrada está cerrada, la resistencia está blindada y en principio ninguna señal parásita de 50 Hz viene a turbar la medida;
- pero, en general, los hilos de salida de las resistencias están en aleación con base de níquel; en seguida, para evitar fenómenos de deriva, es preciso proteger térmicamente (algodón, lana de vidrio) la resistencia, incluso a lo largo de los bornes de entrada del aparato;
- de todas maneras, se asistirá a un fenómeno de deriva temporal debido al calentamiento que se produce cuando se conecta.
- la resistencia se enchufa al extremo del cable de medida, en las condiciones de funcionamiento del montaje. Aquí, además de las protecciones térmicas es necesario blindar correctamente esta resistencia.

Caracterización en ruido.—El aparato permite medir con una resolución del nanovoltio y una banda pasante equivalente del ruido de 0,01 Hz, aproximadamente. Es, pues, importante asegurarse que el ruido "blanco" propio de la fuente en la banda pasante considerada es muy inferior a la resolución deseada.

Toda resistencia a la entrada del nanovoltímetro es una fuente de ruido que viene a sumarse al ruido propio del aparato. Es necesario, por tanto, conocer la impedancia de salida de la fuente que se desea medir, y asegurarse que esta impedancia es compatible con la sensibilidad buscada.

Se sabe que todo elemento resistivo es ge-

nerador él mismo de un ruido (ruido blanco o ruido Johnson), cuyo valor se da por la relación de Nyquist:

$$U = \sqrt{4kRT\Delta f}$$

- k: cte. de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$);
- R: resistencia (partida real de la impedancia);
- T: temperatura ambiente (en $^\circ\text{Kelvin}$), 300°K ;
- Δf : banda pasante (en hercios);

A título de ejemplo, una resistencia de fuente de $1 \text{ k}\Omega$ será generadora de una tensión de ruido de 4 nV eficaces por raíz de herzio, lo que suministra un ruido del orden de 20 nV p. p. para una banda pasante de 1 Hz. Será preciso, por tanto, tener en cuenta este fenómeno para apreciar el valor del ruido propio introducido por el nanovoltímetro.

De cara al ruido, el nanovoltímetro puede sintetizarse por el esquema equivalente, representado en la figura 5.

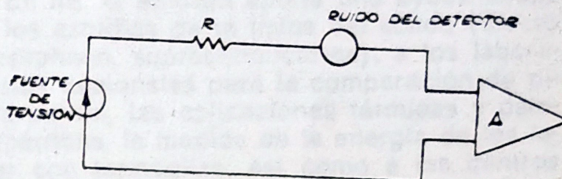


Fig. 5

Esquema equivalente «en ruido» del nanovoltímetro

La fuente de tensión se conecta por medio de una resistencia, R, sobre un detector, cuyo ruido de entrada es E_d^2 .

La resistencia R se compone de la resistencia interna de la fuente y de la resistencia de entrada del detector.

En estas condiciones la tensión de ruido u se da por la relación:

$$u = \sqrt{4kRT\Delta f + E_d^2}$$

de donde $u^2 = 1,6 \cdot 10^{-20} R\Delta f + E_d^2$.

En el caso del nanovoltímetro, la fuente del ruido se sitúa al nivel del preamplificador, y este ruido se lleva a la entrada en relación a la ganancia del transformador de adaptación.

El preamplificador presenta un factor de ruido F de alrededor de 0,8 dB sobre una resistencia óptima próxima de $10 \text{ M}\Omega$, y el rendimiento debido al transformador es del orden de 250.

$$\text{Ahora, } F = 1,2 = \frac{E_a^2}{4kRT\Delta f}, \text{ siendo } E_a \text{ el}$$

ruido del preamplificador;

pues $E_a^2 = 2 \cdot 10^{-13} R\Delta f$ y $E_d^2 = 3,2 \cdot 10^{-18} \Delta f$,

$$\text{pues } E_d = \frac{E_a}{250}.$$

$$u^2 = 1,6 \cdot 10^{-20} R \Delta f + 3,2 \cdot 10^{-18} \Delta f$$

En el caso del nanovoltímetro, la resistencia en serie con la entrada del detector se sitúa alrededor de los 100 Ω . Por otra parte, un análisis de la densidad del ruido da una relación de 5 entre el valor p. p. y el valor eficaz.

De donde

$$u_{cc} = 5 \sqrt{1,6 \cdot 10^{-20} (R+100) \Delta f + 3,2 \cdot 10^{-18} \Delta f}$$

Esta expresión permite establecer el cuadro siguiente, dando, en nanovoltios p. p., la amplitud de la señal mínima detectable en función de la resistencia interna de la fuente y de la banda pasante equivalente del amplificador.

De este cuadro se pueden deducir las conclusiones siguientes:

- para "resolver" el nanovoltio, la banda pasante equivalente del ruido del detector debe permanecer inferior a 0,01 Hz y la resistencia de la fuente no debe pasar de alrededor de 100 Ω para la gama más sensible;
- para una resolución de 10 nV, la banda pasante equivalente del ruido debe estar comprendida entre 0,1 y 1 Hz para una resistencia máxima de fuente del orden de 1 k Ω ;
- para las resoluciones superiores, una banda pasante equivalente del orden de 1 Hz es válida hasta resistencias de la fuente de 10 k Ω (tabla II).

CONCLUSION

Aplicando las precauciones que se han indicado, es posible medir así, en buenas condiciones, las señales muy débiles del dominio del nanovoltio.

El nanovoltímetro numérico es susceptible de rendir grandes servicios en las aplicaciones de la microcalorimetría, pero puede ser

muy utilizado también en aplicaciones, tales como:

- detección del cero en los puentes de medida de corriente continua a muy alta resolución;
- medida de la resistencia de las uniones de las guías de onda;
- ~~medida de los efectos de la corrosión en las metales~~ medida de los efectos de la corrosión;
- medida de las resistencias de los contactos de los relés, conectores, contactos deslizantes, fusibles calibrados y "shunts" calibrados;
- en termometría (por ejemplo, control de la estabilidad en temperatura de un horno), medidas con los termopares.

De una forma general, en la medida de las resistencias el nanovoltímetro permite aplicar el método por corriente continua, que presenta sobre el método por corriente alterna la ventaja de no tener en cuenta compuestos reactivos del circuito controlado (capacitancia o inductancia).

En fin, el aparato aporta una ayuda eficaz a los estudios de la física del sólido (efecto Josephson, supraconductores), a los laboratorios nacionales para la comparación de pilas patrón, las aplicaciones térmicas y calorimétricas, la medida de la energía de los láser con termopilas, así como a los centros de investigación atómica, para las medidas de corriente a distancia con las líneas de débil aislamiento.

RESISTENCIA DE LA FUENTE

Banda equivalente	0	10 ohm	100 ohm	1 Kohm	10 Kohm
0,01 Hz	1,1 nV	1,1 nV	1,3 nV	2,4 nV	6 nV
0,1 Hz	3,5 nV	3,5 nV	4 nV	7 nV	20 nV
1 Hz	11 nV	11 nV	13 nV	23 nV	60 nV
10 Hz	35 nV	35 nV	40 nV	70 nV	200 nV