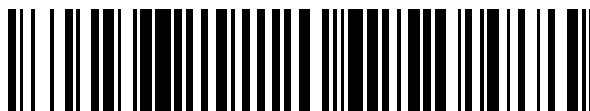


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 401 594**

51 Int. Cl.:

**B23H 7/04**

(2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.08.2006** **E 06016866 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.01.2013** **EP 1886755**

54 Título: **Dispositivo y método para mecanizado por descarga eléctrica de alta frecuencia**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la  
traducción de la patente:  
**22.04.2013**

73 Titular/es:

**AGIE CHARMILLES SA (100.0%)**  
**Via dei Pioppi 2**  
**6616 Losone, CH**

72 Inventor/es:

**GIANDOMENICO, NICOLA;**  
**BESSON, FRANCK;**  
**PONCET, THIERRY;**  
**JAQUES, FABRICE y**  
**ALTPETER, FRIEDHELM**

74 Agente/Representante:

**SUGRAÑES MOLINÉ, Pedro**

ES 2 401 594 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo y método para mecanizado por descarga eléctrica de alta frecuencia

## 5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un método y a un aparato para mecanizar una pieza de trabajo mediante descarga eléctrica, en particular para proporcionar superficies acabadas usando una tensión de alta frecuencia.

10 En el campo del mecanizado eléctrico con alambre se conoce bien que puede obtenerse una superficie con mecanizado fino con una rugosidad inferior a 0,1 micrómetros (Ra) generando descargas de alta frecuencia de corta duración e intensidad limitada entre un electrodo y una pieza de trabajo. Comúnmente se usan tensiones de alta frecuencia en el intervalo de 0,5 a 2 MHz en el mecanizado eléctrico con alambre para realizar operaciones de acabado de semiespejo.

15 Con las recientes mejoras en el control de procesos, ahora es posible lograr una alta precisión de forma en la pieza de trabajo. Durante el corte final con electrodos de alambre, pueden considerarse tolerancias de forma, errores de esquinas y perfiles verticales del orden de 1 micrómetro.

20 Se sabe que las fuerzas más significativas, es decir las fuerzas de atracción electrostática y electromagnética, la fuerza repulsiva de presión de plasma y la fuerza de restauración mecánica, actúan conjuntamente para poner el electrodo de alambre en una posición de reposo neutra. Siendo algunas veces atractiva, algunas veces repulsiva, dependiendo del sentido de excursión, la fuerza resultante restaura el electrodo a su posición de reposo neutra, logrando un equilibrio natural. En la mayoría de las aplicaciones hasta ahora, este último efecto de autorregulación, que proporciona un equilibrio estable, permitió diseñar por ingeniería los controles de tasa de alimentación de trayecto más sencillos como sistemas de bucle abierto.

25 Algunos de los aspectos clave para mecanizar superficies acabadas son: (i) control de eje con el fin de lograr condiciones de mecanizado constantes, (ii) medición apropiada de las desviaciones de estas condiciones de mecanizado, (iii) reducción de la energía de descarga de medición con el fin de mantener un acabado de superficie perfecto.

30 (i) Ahora que los cortes directos y los modos de primer acabado están bien controlados, la tendencia se dirige hacia una rugosidad de superficie aún más fina (semiespejo), conocida como modos de superacabado, en los que el electrodo trabaja lateralmente solapándose con el material para eliminar por erosión algunos micrómetros. Debido a las energías extremadamente débiles de las descargas, ya no hace falta corregir la precisión de forma. Esto requiere un servocontrol de eje mejorado para permitir eliminar material sólo donde es necesario y lograr una velocidad de desplazamiento considerable a pesar de una tasa de eliminación por descarga reducida.

35 Además de los modos de superacabado en los que el electrodo de alambre trabaja lateralmente, otra tendencia principal es mecanizar piezas de trabajo submilimétricas usando pequeños alambres con diámetros inferiores a 50 micrómetros y de hasta tan sólo 15 micrómetros. De manera similar, debido a la fragilidad de tales alambres, se requieren tensiones de mecanizado de alta frecuencia con energías de descarga reducidas. En estas últimas aplicaciones el electrodo de alambre logra cortes directos y debe controlar un hueco frontal.

40 En ambas situaciones, el modo de estabilidad mencionado anteriormente sólo existe en una región muy estrecha del ancho de hueco. Mover el alambre a velocidad constante se vuelve ineficaz, de modo que tiene que desarrollarse un servocontrol muy reactivo. Desafortunadamente, tal como se menciona a continuación, actualmente no está disponible la señal de entrada necesaria o al menos su medición sigue siendo engorrosa. Falta una imagen precisa del hueco real y entonces es imposible un control por realimentación.

45 (ii) Cuando se aplica una tensión constante en los límites de un hueco de trabajo, se reconoce unánimemente que el retardo de encendido TD es la señal más fiable correlacionada con el ancho de hueco real. Se conoce experimentalmente que la medición del retardo de encendido TD se ve menos afectada por las imperfecciones o tolerancias de cualquier sistema y que es más fácil medir con precisión un tiempo que una tensión. En el ámbito de la fabricación industrial convencional, el retardo de encendido permite una mejor repetibilidad de un dispositivo al siguiente.

50 Medir un retardo de encendido dentro de descargas de alta frecuencia requeriría dispositivos electrónicos caros, lo que presenta la complicación más incómoda en temas relacionados. Un tratamiento electrónico barato implica un periodo de encendido razonablemente largo, normalmente superior a 1 microsegundo.

55 Además, en tales condiciones de funcionamiento, medir un retardo de encendido daría lugar a resultados peligrosos porque el encendido dentro de descargas de alta frecuencia se debe esencialmente a la pendiente de la tensión  $dV/dt$  y la correlación entre el retardo de encendido y el ancho de hueco real no se conoce bien.

Introducir un periodo de retardo de encendido relativamente largo, como se ha mencionado, para proporcionar algo de fiabilidad al sensor de hueco, conduce a ralentizar la tasa de mecanizado y a desequilibrar el equilibrio de alambre con el riesgo de hacer rayas, rasguños o marcas en la superficie de la pieza de trabajo y esto aun sin tener en cuenta la pérdida de tiempo.

Suponiendo que no puede usarse el retardo de encendido, queda la opción de usar la tensión de mecanizado promedio como señal de entrada al servocontrol de velocidad. Pero desafortunadamente deben extraerse conclusiones similares: el nivel de ruido con descargas de alta frecuencia es tan alto que se vuelve más difícil distinguir correctamente entre los casos de "mecanizado inactivo", "mecanizando" y "cortocircuito". Cuando se considera la fabricación industrial, la dispersión entre la tensión de mecanizado promedio de una máquina a otra hace que sea menos económico ajustar cada máquina individual durante su fase de producción final.

(iii) Por último, el generador de erosión suministra una energía demasiado alta por descarga, incompatible con la rugosidad de superficie refinada requerida, y, además, la capacidad parásita situada en los límites del hueco de trabajo añade una dificultad a minimizar la energía de la descarga.

### Descripción de la técnica anterior

El documento US 4.447.696 trata sobre un procedimiento de conformación por descarga de una pieza de trabajo aplicando una tensión de alta frecuencia intermitente y una tensión de CC intermitente de modo que una se aplica durante el tiempo inactivo de la otra. La combinación de una tensión de CC intermitente de aproximadamente 20 voltios con ráfagas de alta frecuencia y en comparación con un valor de referencia para conseguir la entrada para la regulación del hueco. Debe suponerse en principio que el valor máximo de la tensión aplicada a través del hueco de trabajo y acumulada en un condensador es proporcional al ancho de hueco de trabajo. Pero las desventajas de este método son un desperdicio de información debido al filtrado ralentizando así la reacción del bucle; cuando se aplica a electrodos de alambre, se producen dificultades para clasificar entre cortocircuito y estado inactivo; la falta de precisión conlleva dificultades en la reproducibilidad e identidad de la máquina.

El documento US 4.798.929 enseña cómo medir la resistencia eléctrica, para detectar el grado de aislamiento eléctrico, o la resistencia dieléctrica de la distancia de chispa por medio de una fuente de corriente de CA adicional. Cuando están presentes lodo e iones, el grado de aislamiento debido sólo al lodo puede detectarse independientemente ya que la movilidad de los iones no es sensible a la alta frecuencia. Por tanto, se determinan las condiciones de hueco mediante un mecanizado basto en vez de midiendo el ancho de hueco preciso. Evitar roturas de alambre provocadas por una concentración de lodo no es una preocupación en las fases de acabado del mecanizado. Los dispositivos derivados no están diseñados para mecanizar eficazmente por medio de tensión de CA de alta frecuencia sino para realizar exclusivamente mediciones a partir de la misma.

El documento US 6.320.151 que muestra el preámbulo de las reivindicaciones independientes tiene como objetivo lograr una alta precisión de forma en la pieza de trabajo mientras se mecaniza con un electrodo de alambre y tensiones de alta frecuencia. Se corrigen imprecisiones de la pieza de trabajo durante los cortes de acabado, es decir, se borran formas huecas o curvatura dejadas por los cortes anteriores, que tienden a acentuarse si se realizan varios cortes de acabado. Las correcciones se realizan por medio de periodos de medición que siguen cíclicamente a periodos de mecanizado, de modo que se libera el alambre de las fuerzas antagonistas del periodo de mecanizado anterior y recuperará, si está curvado, una forma rectilínea tras algunas oscilaciones.

El control del avance del alambre se basa en dos valores de proceso: el retardo de encendido promedio, o tensión de mecanizado promedio, y el error comparado con los valores mencionados anteriormente. Si la flecha de la curvatura del alambre es menor que el hueco, la medición del retardo de encendido permite conocer de manera bastante simultánea la flecha y el hueco, respectivamente correlacionados con los dos valores de proceso anteriores.

Durante los periodos de medición se necesitan una serie de impulsos de erosión para poder comparar los retardos de encendido respectivos de cada impulso. El primero puede ser característico del hueco si no está demasiado retrasado con respecto al periodo de mecanizado anterior. Comparándolo con los siguientes, resulta posible deducir si el alambre está curvado y en qué dirección, midiendo el ancho de hueco de mecanizado por un lado y la flecha de la curvatura del alambre por otro lado.

Requiere mantener el alambre rectilíneo, de lo contrario aparecerán rasguños en la pieza de trabajo, dado que el alambre volverá a su posición de reposo en cada periodo de medición. Ésta es una desventaja del método porque no permite realizar un acabado fino de una pieza de trabajo con un alambre curvado sin hacer rasguños. Entonces no es posible refinar la rugosidad de la superficie de una pieza de trabajo voluntariamente convexa o cóncava sin ponerlo recto inicialmente. Tampoco es posible controlar un corte directo con un mecanizado de alta frecuencia completo porque la flecha de la curvatura del alambre es allí manifiestamente superior al hueco.

Dado que el mecanizado no es permanente, no se evita que se rompa el equilibrio del alambre durante el

mecanizado, lo que conduce a rasguños en la superficie. Durante los periodos de medición, varios impulsos de CC siguen a una baja frecuencia, deteniendo totalmente el proceso de mecanizado y durante demasiado tiempo para lograr un control fino de la velocidad mediante modos de superacabado.

- 5 El documento US 6.930.273 confirma la dificultad de controlar la homogeneidad de la superficie cuando se mecaniza con un electrodo de alambre a tensiones de alta frecuencia. Aparecen rasguños en la pieza de trabajo si se abandona el alambre a vibraciones erráticas. La más ligera vibración del electrodo de alambre afecta a la calidad de la superficie mecanizada. Las rayas pueden volverse apreciables mediante observación visual, si no se controlan la fuerza de reacción basada en las descargas y la fuerza de atracción que actúa entre el alambre y la pieza de trabajo.
- 10 Dichas rayas se caracterizan por una gran diferencia entre la rugosidad de la superficie en la dirección paralela al alambre y la rugosidad de la superficie en su dirección perpendicular. Se recuerda que en el mecanizado basto, cuando el procedimiento se controla mal, es fácil que se produzca la descarga sucesivamente en la misma ubicación; lo que sugiere una acción correctiva en la que puede aplicarse intermitentemente la tensión de alta frecuencia de CA entre pausas y su duración puede limitarse a periodos inferiores a 1 microsegundo o a un número predeterminado de alternaciones.
- 15

### Objeto y sumario de la invención

- 20 A la vista de las dificultades mencionadas anteriormente de la técnica anterior, un objeto de la presente invención es mejorar el mecanizado por descarga eléctrica preciso de una pieza de trabajo.

La invención logra este objeto con los contenidos de las reivindicaciones independientes 1 y 22, respectivamente. En las reivindicaciones dependientes se dan a conocer realizaciones preferidas.

### Breve descripción de las figuras

- La figura 1 es un gráfico que ilustra la relación entre los logaritmos de la fuerza de precarga y la frecuencia propia de cuatro electrodos de alambre dentro de su dominio de uso regular representado por cuatro paralelogramos.

- 30 Las figuras 2a-c y 3a-c son diagramas de tiempo que ilustran el desplazamiento lateral de un electrodo de alambre, en línea continua, provocado por una señal de excitación de tensión, en línea discontinua.

- Las figuras 4-6 son diagramas de tiempo que ilustran la sincronización entre descargas de tensión y de corriente en los límites del hueco de mecanizado, y a través del mismo, con el objeto de explicar tres modos de realización alternativos de la invención.
- 35

- La figura 7 es un diagrama de bloques que muestra las interconexiones eléctricas y lógicas entre los componentes principales de un sistema según la invención.

- 40 La figura 8 muestra más detalles del controlador de alta frecuencia de la figura 7.

La figura 9 muestra más detalles del detector de encendido rápido de las figuras 7 y 8.

- La figura 10 muestra más detalles de la conexión entre el hueco de mecanizado y el detector de retardo de encendido de la figura 7.
- 45

### Descripción detallada

- Haciendo referencia a la figura 7 se describe un sistema según una realización preferida de la invención para mecanizar una pieza de trabajo mediante descarga eléctrica. Antes de describir detalles adicionales de los componentes del sistema se ilustra el principio de la invención basándose en su funcionamiento general.

- Se aplican cíclicamente pulsos de mecanizado de dos tipos al hueco de mecanizado entre el electrodo y la pieza de trabajo que va a mecanizarse.
- 55

- El primer tipo es un pulso de medición en forma de un pulso de erosión específico con un tiempo de retardo de encendido estocástico comparativamente largo, preferiblemente a una tensión constante, seguido inmediatamente por una descarga de baja energía producida por un tiempo de mecanizado extremadamente corto y una pequeña corriente. Los pulsos del primer tipo pueden ser de ambas polaridades, es decir positiva o negativa, con el fin de generar tensiones promedio de valores predeterminados, preferiblemente de valor cero con el fin de evitar la electrólisis.
- 60

- El segundo tipo es un pulso de erosión constituido por una superposición de señales de tensión de alta frecuencia controladas para iniciar encendidos pero que funciona de manera ciega durante un periodo de tiempo predeterminado y posiblemente sincronizado con cualquier componente de tensión constante; siendo la sincronización o bien para evitar la electrólisis o bien para proporcionar un acabado de superficie brillante.
- 65

Cada uno de los dos tipos mencionados anteriormente de pulsos de mecanizado puede ir seguido por una pausa, formando la secuencia de un pulso de medición, un pulso de erosión y una pausa un ciclo de mecanizado completo. Se produce preferiblemente al menos una única pausa tras el pulso de erosión. Con objeto de refinar aún más la rugosidad de la superficie, se introducen posiblemente otras pausas tras el pulso de medición para evitar que el canal ionizado pueda inducir encendidos repetitivos confinados durante el pulso de erosión de alta frecuencia. Durante las pausas, se aplica una tensión nula en los límites del hueco de mecanizado por medio de un cortocircuito, de modo que cualquier canal ionizado desaparece dentro del fluido de mecanizado.

Se mide el tiempo de retardo de encendido estocástico de cada pulso de medición y se ajusta el ancho de hueco de tal manera que la duración de un tiempo de retardo de encendido relativamente largo sigue siendo todavía lo bastante pequeña como para que el electrodo de alambre no se desvíe, debido a su inercia, más que fracciones de micrómetros de su equilibrio en estado estacionario, a pesar de una fuerza de atracción electrostática temporalmente excesiva. El electrodo de alambre busca una posición de estado estacionario y permanece en estrecha proximidad al equilibrio debido a la interacción entre las fuerzas de atracción eléctricas, la fuerza de restauración mecánica y la fuerza repulsiva de presión de plasma. Por tanto se tiene en cuenta que es probable que el electrodo oscile en el hueco de mecanizado, estando este proceso de oscilación caracterizado principalmente por su primer periodo propio mecánico  $T_0$ . Entonces implica limitaciones correspondientes en primer lugar en la duración del pulso de medición y en segundo lugar en la duración de las pausas.

La primera limitación se considera controlando dentro de un ciclo de mecanizado la duración del retardo de encendido de un pulso de medición interrumpiendo la tensión de encendido constante cuando el tiempo de retardo supera un umbral dado. En un caso de este tipo, el pulso de tensión constante no va seguido ni por encendido ni por descarga de mecanizado.

El sistema determina un promedio apropiado del tiempo de retardo de encendido de un número suficiente de pulsos de medición sucesivos y lo usa como señal de entrada a un servocontrolador de eje que controla la velocidad de electrodo y/o posición de electrodo en su trayectoria de desplazamiento. El servocontrolador de eje está adaptado para el mecanizado de alta frecuencia proporcionando medios para actualizar regularmente comandos de velocidad de guía de electrodo en la dirección de trayectoria, en la dirección lateral o en una combinación de ambas. La actualización se realiza preferiblemente cada milisegundo, preferiblemente correspondiente a los comandos que actualizan el servocontrol de eje, llevando por tanto un criterio de limitación a la duración total de un ciclo de mecanizado.

El sistema tiene las siguientes funciones principales: garantiza que la intensidad del pulso de medición produce una energía erosiva inferior o igual a cualquier descarga que puede iniciarse debido a las alternaciones de alta frecuencia del pulso de erosión, limita la duración del pulso de medición en el tiempo, modifica la duración de las pausas y la duración de los pulsos de erosión de alta frecuencia en función de las muestras más recientes del tiempo de retardo de encendido, y analiza el perfil de tensión de la descarga de corriente que puede iniciarse al final del pulso de medición y deduce a partir del mismo información relacionada con el estado del fluido dieléctrico que llena el hueco de mecanizado.

La secuencia representada en la figura 4 ilustra la planificación de las señales que hace posible poner en práctica el funcionamiento tal como se describió anteriormente: el diagrama UUS representa la tensión eléctrica observada en los límites del hueco de mecanizado; el diagrama IUS representa la corriente que atraviesa el hueco.

La secuencia comienza con la aplicación de una tensión de encendido  $U_{ign}$  continua de polaridad positiva o negativa en los límites del hueco. La polaridad de  $U_{ign}$  viene dada secuencia tras secuencia según un principio conocido previsto para luchar contra la electrólisis regulando la tensión promedio en los límites del hueco. El documento EP 1 097 773 trata sobre este fenómeno cuya descripción se incorpora en el presente documento como referencia. La capacidad de hueco equivalente se cargará durante un tiempo TC al final del cual dicha tensión de encendido  $U_{ign}$  aparece en los límites del hueco. Se observa que el tiempo TC necesario para cargar la capacidad de hueco, tal como se muestra en la figura 4, se sobreproporciona voluntariamente para enfatizar un error de medición que puede estar provocado por capacidades parásitas de hueco excesivas. Cuando no es despreciable, debe restarse el tiempo TC del tiempo de retardo de encendido TD para garantizar una estimación de hueco apropiada.

Se pretende que la tensión continua  $U_{ign}$  aplicada durante el tiempo TD inicie un encendido antes de un tiempo máximo  $TD_{max}$ . Se recuerda que el tiempo de retardo de encendido TD, de naturaleza estocástica, tras el cálculo de un promedio apropiado, permite estimar en tiempo real el ancho del hueco. Según este principio, un dispositivo mide cada tiempo de retardo de encendido TD para calcular un promedio apropiado del mismo; usándose este último como valor de entrada para el control del avance del electrodo de alambre en su trayectoria.

Al final del tiempo de retardo de encendido TD comienza el tiempo de mecanizado TW con un posible encendido provocado por la tensión  $U_{ign}$ , que abre el paso a la corriente de mecanizado  $I_{ing}$ . El inicio de una descarga EDM se caracteriza por un repentino descenso de la tensión de hueco fácilmente detectable y habitualmente indexado como

el final del tiempo de retardo de encendido TD.

Hay dos enfoques principales para aplicar la corriente de trabajo tras el encendido. El primer enfoque menos preferido usa dos fuentes de alimentación: una primera fuente de encendido y una segunda fuente de mecanizado. La mayor parte del tiempo, se usa la fuente de encendido para iniciar una descarga erosiva. Entonces se conecta la fuente de mecanizado lo más rápidamente posible en el hueco en cuanto se detecta el encendido. Debe evitarse un retardo demasiado importante porque es probable que la chispa se colapse y hay riesgo de aplicar una tensión excesiva en los límites de un hueco que ha recuperado una alta impedancia; eso pegaría inevitablemente el alambre contra la pieza de trabajo provocando un cortocircuito y una interrupción del mecanizado. Por ello se mantendrá la fuente de encendido conectada aunque también se haya conectado la fuente de mecanizado en el hueco. Entonces las dos fuentes pueden emitir una corriente hasta que se interrumpen simultáneamente.

El segundo enfoque más preferido no usa la fuente de encendido para romper la impedancia del hueco con objeto de conectar la fuente de mecanizado. En lugar de eso, la fuente de encendido se usa principalmente para llevar a cabo una medición del retardo de encendido. Esto se llevará a cabo con un efecto secundario perjudicial que debe minimizarse: concretamente debe reducirse hasta el mínimo la descarga erosiva que sigue con el fin de conservar la rugosidad de la superficie refinada. En particular, se usará ventajosamente un detector de encendido tradicional que se coloca en la cabeza de un canal de detección lenta, tal como se explicará con más detalle a continuación, que ordena la conexión de la fuente de mecanizado en el hueco. También se aprovechará el mismo canal como habitualmente para calcular el retardo de encendido promedio, es decir para elaborar la señal de entrada necesaria para el servocontrolador de eje. Por otro lado, se proporciona un canal de detección rápida, tal como se explicará con más detalle a continuación, cuya única función es detener rápidamente la descarga erosiva que sigue al impulso de medición; es decir para desconectar la fuente de encendido. Este último puede reaccionar, por ejemplo, en menos de 100 ns, tal como se explicará a continuación, mientras que los canales de detección tradicionales reaccionan normalmente en aproximadamente 500 ns. Por tanto aparece entre el final del pulso de corriente de medición y el comienzo del pulso de mecanizado de alta frecuencia, una corta pausa de transición  $T_{ign\_t}$  de aproximadamente 400 ns o menos debido a la diferencia de tiempos de transición entre el canal de detección rápida y el canal de detección lenta. El lapso de tiempo de  $T_{ign\_t}$  puede no ser suficiente para establecer una tensión nula en los límites del hueco.

Tras dicha corta pausa de transición  $T_{ign\_t}$ , se prolonga el tiempo de mecanizado TW con la aplicación en los límites del hueco de una superposición de señales de tensión, por ejemplo una posible componente de una tensión continua y una señal de tensión de alta frecuencia de frecuencia fundamental preferiblemente superior a 500 KHz. El experto sabe que las señales de tensión aplicadas sólo pueden medirse en el hueco fuera de los periodos de tiempo en los que el hueco puede ser atravesado por descargas erosivas o fuera de los periodos en los que puede experimentar un cortocircuito interno o se pone artificialmente en cortocircuito. La tensión de alta frecuencia puede provocar varios encendidos de polaridad positiva o negativa, debido a las variaciones extremadamente rápidas del campo eléctrico en el hueco. Los encendidos anteriormente mencionados abren el paso a impulsos de corriente cortos de amplitud  $I_{hf}$ .

Se pretende habitualmente que la posible componente de tensión continua aplicada durante el tiempo de mecanizado TW ajuste de manera más fina la tensión promedio en los límites del hueco. En esos casos, la fuente que suministra dicha componente de tensión continua no suministrará ninguna corriente considerable. Pero en otros casos, tales como para generar un acabado de superficie brillante, dicha fuente de tensión continua puede adecuarse para suministrar una pequeña corriente de mecanizado que continúa fluyendo a través del hueco después de que las variaciones rápidas del campo eléctrico hayan iniciado un canal de plasma y hasta que este canal pueda colapsarse espontánea o artificialmente.

Al final del tiempo de mecanizado TW y hasta una aplicación renovada de una tensión de encendido  $U_{ign}$  continua y el comienzo de un siguiente retardo de encendido TD, se pone en práctica un tiempo de pausa TS durante el cual se aplica una tensión nula en los límites del hueco. El final del tiempo de pausa TS también es el comienzo de la siguiente secuencia de mecanizado.

Para entender apropiadamente la invención debe imaginarse que el alambre está bien equilibrado bajo el efecto de las fuerzas antagonistas que actúan juntas. Cuando se libera de algunas de esas fuerzas, el equilibrio del alambre se desvía, principalmente durante el tiempo de retardo de encendido TD y en menor grado durante el tiempo de pausa TS. Durante el tiempo de pausa TS, el alambre, si está curvado, sólo se somete a la fuerza de restauración mecánica. Por otro lado, si es rectilíneo, esta última fuerza de restauración es nula y el alambre no se somete a ninguna fuerza durante los tiempos de pausa. Por consiguiente, con un alambre que se mantiene rectilíneo, la duración TS de las pausas no parece ser un parámetro crítico con respecto al equilibrio del alambre; hasta cierto punto evidentemente dado que es posible que una duración larga no especificada de TS pudiera poner en peligro la estabilidad del bucle de control. Normalmente debe recogerse una cantidad de 10 muestras de TD durante un periodo de bucle de control para calcular un valor promedio  $TD_{moy}$  fiable. Con un alambre curvado tal como se mencionó anteriormente, la fuerza de restauración mecánica actúa durante las pausas y desvía el equilibrio del alambre. Pueden aparecer dificultades en dos situaciones: cuando se logran cortes directos con alambres minúsculos y cuando tiene que refinarse en su superficie una pieza de trabajo afectada por imprecisiones de forma

(convexas o cóncavas) sin eliminar dichas imprecisiones. En ambos casos, se prefiere limitar suficientemente el tiempo de pausa TS de modo que se mantenga la curvatura del alambre y no se desvíe el alambre más de una determinada tolerancia en comparación con su posición de equilibrio.

Durante el tiempo de retardo de encendido TD del pulso de medición, el movimiento del alambre desviado fuera de su equilibrio está relacionado con dos parámetros sobre los que es posible actuar instantáneamente: la duración del tiempo de retardo de encendido TD, y el valor de la tensión de encendido Uign aplicada. Durante el tiempo de retardo de encendido TD, la fuerza repulsiva de presión de plasma provocada por las descargas desaparece. Entonces el alambre se somete a la fuerza de atracción electrostática y, si está curvado, a la fuerza de restauración mecánica; sumándose o restándose la última de la anterior. El valor de la tensión de encendido Uign aplicada durante el tiempo de retardo de encendido TD no puede reducirse excesivamente, no logrando de lo contrario iniciar de manera regular el encendido dentro de un tiempo predeterminado TDmaxi, no pudiendo por tanto calcular de manera fiable un promedio apropiado. Por consiguiente, en ambos casos, alambre rectilíneo o curvado, se impone un límite sobre la duración del tiempo de retardo de encendido TD.

Los tiempos de pausa TS y/o el tiempo de retardo de encendido TD se fijan a valores de duración apropiados en todos los casos posibles ya que el equilibrio del alambre depende en su totalidad de varias variables independientes tales como: la masa del alambre por unidad de longitud, la fuerza longitudinal aplicada, la longitud del alambre entre sus dos guías de alambre, las fuerzas de atracción eléctricas, las fuerzas de repulsión provocadas por las descargas erosivas, el amortiguamiento viscoso del medio dieléctrico, etc. Con objeto de conseguir una regla sencilla y general, se usa el primer periodo propio de la oscilación del alambre como valor de referencia; un parámetro fácilmente calculable, tal como se muestra en la figura 1. Las cuatro áreas con forma de paralelogramo indican el dominio de uso regular de cuatro tipos de alambre diferentes. ST25 y ST10 son alambres revestidos con aleación de zinc con un núcleo de bronce con un diámetro respectivo de 0,25 y 0,10 mm; AT05 y AT03 son alambres con núcleo de acero con diámetros de 0,05 mm y 0,03 mm. El punto inferior izquierdo de los paralelogramos indica la fuerza de precarga longitudinal más baja y la mayor distancia entre guías de alambre. El punto superior derecho indica la precarga más alta y la menor distancia entre guías de alambre.

A continuación no se presentan las leyes físicas o los modelos matemáticos que describen el equilibrio y la dinámica de un electrodo de alambre durante el mecanizado mediante electroerosión, sino que se indica en qué campos limitados usarlos. Para encontrar la teoría sobre las cuerdas vibrantes y sus periodos propios puede recurrirse fácilmente, por ejemplo, a la física elemental o más particularmente a "Boundary and Eigenvalue Problems in Mathematical Physics" de Hans Sagan.

El experto conoce las recientes evoluciones de la electroerosión con alambre y se describen en particular en las siguientes publicaciones:

- "Funkenerosive Mikrobearbeitung von Stahl und Hartmetall durch Schneiden mit dünnen Drähten", Tobias Nöthe, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Band 5/2001.

- "Funkenerosives Feinstschneiden Verfahrenseinflüsse auf die Oberflächen- und Randzonenausbildung", Rolf Siegel, RWTH Aachen, 1994, Fortschritt-Berichte VDI.

- "Relevant topics in wire electrical discharge machining control", Friedhelm Altpeter, Roberto Perez, Charmilles Technologies SA, Journal of Material Processing Technology 149 (2004) 147-151.

Basándose en las teorías conocidas, puede calcularse el desplazamiento de un alambre bajo el efecto de las fuerzas eléctricas que se aplican al mismo durante un periodo de duración T. Los diagramas de las figuras 2a-c y las figuras 3a-c representan las variables en el eje horizontal y el vertical de una forma normalizada. En el eje horizontal aparece el tiempo de aplicación de la señal de excitación, es decir una tensión prevista para desviar el alambre lateralmente. La unidad de medición en este eje horizontal es un tiempo igual al primer periodo propio T0 del alambre. En el eje vertical aparece el desplazamiento lateral del alambre o flecha en una ubicación a medio camino entre las dos guías de alambre. La unidad de medición en este eje vertical es un desplazamiento igual a la amplitud máxima alcanzada en un estado estacionario bajo el efecto de una tensión dada aplicada de manera permanente.

Las figuras 2a-c representan los desplazamientos de desviación de un alambre sumergido en un medio no muy viscoso, por ejemplo aire. Las figuras 3a-c representan los desplazamientos de desviación de un alambre sumergido en agua. La línea discontinua indica el tiempo de aplicación de la señal de excitación, o entrada, de la que se ilustran tres valores:

1)  $T \geq 10 \cdot T_0$ , véanse las figuras 2a y 3a, es el dominio descrito por el documento US 6.320.151 mencionado anteriormente,

2)  $T \approx T_0$ , véanse las figuras 2b y 3b,

3)  $T \leq T_0/10$ , véanse las figuras 2c y 3c, es el área de funcionamiento de la presente invención.

Debe observarse que para un tiempo de aplicación  $T$  próximo o inferior a  $T_0/10$  el alambre experimenta una desviación despreciable; la viscosidad del agua reduce aún más este desplazamiento. Independientemente de los valores particulares de las numerosas variables implicadas en este fenómeno, es por tanto suficiente con limitar el tiempo de aplicación de la tensión de encendido eléctrica a un valor inferior al 10% de este periodo propio, de modo que el alambre experimenta un desplazamiento despreciable durante el tiempo de retardo de encendido TD.

Por extensión y con mayor razón, los mismos límites aplicados a los tiempos de pausa TS producirán efectos similares, en cortes directos o en aplicaciones en las que se desea llevar a cabo un mecanizado de superacabado con un alambre curvado en una pieza de trabajo cuya geometría no es perfecta tal como ya se mencionó anteriormente.

A continuación se describirá en detalle un dispositivo para reducir el tiempo de retardo de encendido TD del primer pulso de medición y para influir sólo moderadamente en el equilibrio del alambre y por tanto de ese modo el tiempo que va a medirse. Una parte de este dispositivo es un bucle de control de la velocidad de eje de la máquina conforme con normas conocidas de la práctica, para imponer el avance de las guías de alambre en la dirección de la trayectoria programada y/o en perpendicular a la misma y para lograr un valor promedio TDmoy adecuado del retardo de encendido. La ventaja de un dispositivo de este tipo es mantener un tiempo de retardo de encendido TD bastante inferior al periodo del bucle de control. De hecho, para un periodo de bucle de control típico de 2 ms, por ejemplo, es posible crear un bucle de control fuerte que puede adaptarse a las imperfecciones de la superficie que va a someterse a acabado. Pueden recogerse varias muestras de TD, hasta 10 por ejemplo, durante un periodo de bucle de modo que pueda determinarse un valor promedio TDmoy representativo del tamaño de hueco real. Además, dado que TDmoy es inferior o igual a  $T_0/10$ , el valor dado del periodo de bucle determina un intervalo de funcionamiento para electrodos de alambre usados habitualmente. La figura 1 muestra en este ejemplo que la invención puede aplicarse para cortes directos o aplicaciones de superacabado usando alambres que tienen frecuencias propias inferiores a 50 KHz.

Con el fin de superar el carácter estocástico del retardo de encendido, en otras palabras aunque puede mantenerse un valor de TDmoy, tienen que evitarse duraciones largas estadísticamente excesivas de TD (aunque tales eventos no son frecuentes), es probable que una excursión no controlada del electrodo de alambre, durante las fases de acabado, deje una marca visible en la superficie mecanizada. Por tanto, se proporciona un dispositivo que puede detener la aplicación de la tensión de encendido Uign si resulta que TD se prolonga más de un cierto TDmaxi que se ha determinado empíricamente. Un registro sistemático de los logaritmos o los retardos de encendido de un bucle de control apropiado muestra una distribución que parece una función gaussiana cuyo valor promedio es aproximadamente  $\log(\text{TDmoy})$ . La probabilidad de registrar retardos de encendido TD superiores a  $10 \cdot \text{TDmoy}$  resultó ser inferior al 0,1%. En tal caso, cuando TD se limite en consecuencia, se simplifica la secuencia descrita anteriormente, es decir falta el pulso de corriente lign y el tiempo de mecanizado TW comienza con la aplicación de la tensión de alta frecuencia alterna.

Se experimentó que la secuencia de señales ilustrada en la figura 4 puede mejorarse adicionalmente. Es probable que se produzcan descargas sucesivas de corriente durante una secuencia en el mismo lugar en la superficie mecanizada a menos que se inserten pausas adicionales durante el tiempo de mecanizado TW. Este fenómeno bien conocido con el nombre de "localización" produce una degradación de la rugosidad de la superficie. Para evitar este fenómeno y refinar la rugosidad de la superficie, preferiblemente durante TW se introducen pausas adicionales durante las cuales se pone el hueco de mecanizado en cortocircuito, tal como se muestra en la figura 5. Una pausa Tign\_s puede tener lugar inmediatamente tras la descarga de corriente lign. Tign\_s incluye la pequeña pausa de transición Tign\_t de la figura 4, lo que permite reducir la duración de la pausa TS o incluso sustituirla, experimentando así las mismas limitaciones de tiempo. También pueden colocarse varias pausas pequeñas Thf\_s dentro de las alternaciones de alta frecuencia hasta el final de TW. En la figura 5, se representa Thf\_w como la duración de un periodo completo de la tensión alterna de alta frecuencia. Dichas pequeñas pausas adicionales Thf\_s son más cortas que el tiempo de pausa real TS, preferiblemente más cortas que el equivalente de tiempo de  $2 \cdot \text{Thf}_w$ , tal como se muestra en la figura 5.

El modo anterior ilustrado por la figura 5 proporciona una rugosidad de la superficie extremadamente fina y precisa pero no obstante algo devaluada por un aspecto apagado oscurecido. Para mejorar dicho aspecto, ajustar una fuente continua para emitir una pequeña corriente durante el tiempo de mecanizado, tal como se muestra por la figura 6, permite obtener un aspecto brillante (un acabado de superficie brillante) pero con una rugosidad de la superficie menos fina. Tal como se ilustra por la figura 6, puede obtenerse un efecto brillante, por ejemplo, conectando en serie la fuente de tensión de alta impedancia auxiliar 1 de la figura 7 (que se describirá con más detalle a continuación) al hueco durante la aplicación de la señal de tensión de alta frecuencia e incluyendo pausas Thf\_s prolongadas. Un impulso de tensión de alta frecuencia 19 inicia un canal de plasma 20 que abre el paso a un impulso de corriente fuerte 21 suministrado por la fuente principal 2 de la figura 7 (que se describirá con más detalle a continuación). Al final del periodo de Thf\_w 22 el canal de plasma no se colapsa porque la fuente de tensión de alta impedancia auxiliar 1 de la figura 7 toma el relevo con una pequeña corriente 23. El canal de plasma puede colapsarse de manera prematura, en 24, antes de que la alternación de tensión 25 provoque que se detenga la corriente y que la tensión recupere el valor Uign.

La duración del tiempo de erosión TW es programable, por ejemplo, desde cero hasta 12 ms; una operación habitual consiste en hacer que la duración de TW dependa de la duración medida del tiempo de retardo de encendido TD anterior. Por ejemplo, puede ejecutarse un TW corto tras un TD corto y a la inversa. La duración del tiempo de pausa TS también puede programarse habitualmente según los valores reales de TD o las características particulares de la descarga que sigue o no a TD. Las siguientes patentes tratan sobre tales problemas, cuyas descripciones se incorporan en el presente documento como referencia: US 5.336.864, CH 644 290, CH 554 215. El perfil de la señal de tensión durante la aplicación de Uign es un indicador del nivel de contaminación dentro del hueco y puede usarse para iniciar una serie de pausas más largas.

Como ejemplo, el tamaño de un cráter de electroerosión es proporcional a la carga (en culombios) suministrada durante la descarga. Se midió la carga mencionada anteriormente en los siguientes tres modos de mecanizado de alta frecuencia (excepto el modo brillante): el modo de acabado preliminar, el modo de acabado y el modo de superacabado.

Q\_TD es la carga suministrada por una descarga de medición, y Q\_HF la carga suministrada por una descarga de mecanizado de alta frecuencia; se comprobó que en todos los casos  $Q_{TD} \leq Q_{HF}$ .

Para el modo de acabado preliminar con corriente de mecanizado mínima:

$$Q_{TD} = 0,5 [A] \cdot 0,6 [us] = 0,3 [Cb]$$

$$Q_{HF} = 2,0 [A] \cdot 0,4 [us] = 0,8 [Cb]$$

Para el modo de acabado:

$$Q_{TD} = 0,5 [A] \cdot 0,1 [us] = 0,05 [Cb]$$

$$Q_{HF} = 1,5 [A] \cdot 0,18 [us] = 0,27 [Cb]$$

Para el modo de superacabado:

$$Q_{TD} = 0,5 [A] \cdot 0,1 [us] = 0,05 [Cb]$$

$$Q_{HF} = 1,0 [A] \cdot 0,05 [us] = 0,05 [Cb]$$

Haciendo de nuevo referencia a la figura 7, los componentes principales del sistema son una fuente de tensión principal 2 que actúa como fuente de mecanizado, una fuente de tensión de alta impedancia auxiliar 1 que actúa como fuente de encendido produciendo una tensión de encendido Uign y una corriente de encendido lign, un controlador de alta frecuencia 3 y un generador de potencia 7 dedicado al mecanizado basto (que no se describirá con más detalle a continuación, dado que el experto conoce su diseño y funcionamiento). La fuente de tensión principal 2 y la fuente de tensión de alta impedancia auxiliar 1 están conectadas en paralelo a la entrada del controlador de alta frecuencia 3. La zona de mecanizado 4 está conectada a la salida de dicho controlador de alta frecuencia 3 mediante un cable axial doble HF con doble apantallamiento 5. Los cables de potencia 6 que conectan el generador de potencia 7 a la zona de mecanizado 4 pueden desconectarse usando relés 8. Por consiguiente, no añaden su capacidad a la capacidad parásita de la zona de mecanizado 4.

El sistema puede diseñarse para mecanizar superficies acabadas usando tensiones de alta frecuencia superiores a 500 KHz con el fin de producir o bien una rugosidad de la superficie inferior a 0,1 micrómetros (Ra) o bien un acabado de superficie brillante. Para el mecanizado de acabado, el cable axial doble HF de doble apantallamiento 5 puede tener una capacidad baja de 50 pF/m de impedancia típica, y la corriente de la fuente de tensión de alta impedancia auxiliar 1 está limitada a 0,5 A. Su tensión puede ajustarse en un intervalo de desde 20 hasta 100 voltios para garantizar que se produzcan encendidos en su mayor parte dentro de un retardo de tiempo predeterminado TDmaxi.

El controlador de alta frecuencia 3 controla la secuencia de mecanizado tal como se representa en las figuras 4, 5 ó 6, es decir para sincronizar la conexión de las fuentes principal 2 y auxiliar 1 a la zona de mecanizado 4, tal como se describirá a continuación. El controlador de alta frecuencia 3 se acciona por dos señales lógicas procedentes de un controlador de secuencia principal 12 para controlar las duraciones de tiempo básicas del ciclo de mecanizado, concretamente TD, TW y TS. El controlador de alta frecuencia 3 incluye una batería de transistores rápidos ensamblados en una configuración de puente tal como conoce el experto, que no se ilustran en los dibujos.

El controlador de secuencia principal 12 controla, por medio de dos señales lógicas, el controlador de alta frecuencia 3 para conectar la tensión de encendido Uign en el hueco de mecanizado 4 y para iniciar la aplicación de pulsos de erosión TW; construyendo en conjunto un canal de detección más lenta tal como se describirá con más detalle a continuación. El controlador de secuencia principal 12 no detiene la corriente de descarga lign; en vez de eso el

detector de encendido rápido 9, ilustrado con más detalle en la figura 9, asumirá la tarea de detener lign. El detector de encendido rápido 9 se instala directamente dentro del controlador de alta frecuencia 3 en la proximidad inmediata de sus transistores 17 (véase a continuación) conmutando la corriente de encendido lign y conectado a su salida. Por tanto se hace que el tiempo de transmisión de la señal de control sea lo más corto posible para detener rápidamente la corriente de descarga erosiva lign en cuanto se detecta el encendido. El detector de encendido rápido 9 permite que la energía de la descarga lign requerida para la medición no sea superior a la energía de ninguna descarga de corriente de alta frecuencia lh.

Una realización preferida del controlador de alta frecuencia 3 es tal como se muestra en la figura 8, junto con su conexión al controlador de secuencia principal 12 y la zona de mecanizado 4. Cuando se produce el encendido, el detector de encendido rápido 9 necesita, por ejemplo, aproximadamente 50 ns para reaccionar a una señal UUS procedente de la zona de mecanizado 4 y para enviar un comando a una lógica de control de puente 15. Después de, por ejemplo, aproximadamente 30 ns la lógica de control de puente 15 activa 4 optoacopladores de alta velocidad estrechamente unidos a 4 controladores MOSFET de alta velocidad 16 que actúan sobre 4 transistores Coolmos 17 acoplados en una configuración de puente completa. Se transmite la información de encendido desde el hueco de mecanizado 4 a través del canal completo que consiste en series de los componentes 9, 15, 16, 17 tal como se muestra en la figura 8 en menos de, por ejemplo, 100 ns, deteniendo por tanto rápidamente la corriente de encendido lign. Esta configuración ilustra el canal de detección rápida, tal como ya se mencionó anteriormente, que permite tiempos de reacción incluso inferiores a 50 ns usando componentes incluso más rápidos.

El detector de encendido rápido 9 de las figuras 7 y 8 se muestra con más detalle en la figura 9 comprendiendo un optoacoplador rápido 18, por ejemplo un instrumento HCPL0631 del fabricante Agilent. Aguas arriba del optoacoplador 18 las dos polaridades de la señal de entrada UUS activan un divisor de resistencia ajustable R1, R2, R3 que actúa como comparador con la tensión de suministro VCC. El optoacoplador 18 está conectado con su salida a la entrada de la lógica de control de puente 15, complementando por tanto su aislamiento galvánico.

El detector de encendido rápido 9 colocado dentro del controlador de alta frecuencia 3 en la proximidad inmediata de sus transistores 17 no está dedicado a formar una señal de entrada para el bucle de control de eje. Para este fin, una sonda diferencial específica 10 está conectada al dispositivo electrónico 12. La sonda diferencial 10 conecta la zona de mecanizado 4 al dispositivo electrónico 12 que calcula de una manera común el valor promedio real TDmoy necesario para la unidad de control de eje de velocidad 14. Esta conexión sobre los componentes 10, 11 y 12 permite un retorno de la señal con un retardo inferior a, por ejemplo, 400 ns. La conexión entre el servocontrolador de eje 14 y el proceso restante no se muestra en la figura 7 ya que la conoce el experto.

La dificultad en este caso es que la sonda 10 con una longitud de cable común 11 de, por ejemplo, 4 m, introducirá una capacidad parásita adicional en el circuito de descarga perjudicial para la rugosidad de la superficie necesaria. Con el fin de superar esta dificultad se usa el principio de la sonda de osciloscopio tradicional según la figura 10. Se introduce un divisor RC constituido por una resistencia y una capacidad en paralelo aguas arriba y aguas abajo en cada extremo del cable 11. Entonces, en el hueco de mecanizado 4, la capacidad parásita total depende sólo de la capacidad RC aguas abajo y se vuelve independiente de la capacidad del cable independientemente de su longitud. La figura 9 representa sólo una rama pero realmente se necesitan 2 sondas 10 idénticas, positiva y negativa.

La arquitectura de hardware descrita anteriormente sólo es un ejemplo. Para obtener las señales de mecanizado deseadas también pueden usarse fuentes de alta frecuencia discretas conectadas en paralelo o en serie al hueco de mecanizado 4 en asociación con fuentes de CC.

En resumen, el dispositivo de medición del retardo de encendido TD limita la energía de la medición de tal manera que la energía necesaria de la descarga de medición tras el tiempo de retardo de encendido TD no debe ser superior a la energía de cualquiera de las descargas provocadas por la aplicación de la tensión alterna de alta frecuencia. Con este fin, el dispositivo de medición comprende los siguientes dispositivos tal como se muestra en la figura 7:

- La fuente de tensión ajustable y de alta impedancia auxiliar 1 separada para producir la tensión de encendido Uign y la corriente lign.

- El detector de encendido rápido 9 ubicado en la proximidad inmediata de los transistores 17 que apagan la tensión de encendido Uign para detener la corriente lign.

- El sensor de alta impedancia 10 para medir el retardo de encendido mientras se reduce la capacidad parásita del circuito de descarga.

- Una batería de relés 8 para desconectar los cables del generador de rugosidad 7 con el fin de eliminar la parte principal 6 de las capacidades parásitas presentes en el circuito de descarga.

Evidentemente, la invención no se limita a la realización preferida anterior. La invención no sólo se aplica a las fases de acabado del mecanizado, sino también a fases anteriores.

## REIVINDICACIONES

1. Método para mecanizado por descarga eléctrica de una pieza de trabajo por medio de un electrodo de alambre, en el que  
5
  - se aplica una secuencia de pulsos de trabajo en el hueco de trabajo entre el electrodo de trabajo y la pieza de trabajo, en el que los pulsos de trabajo comprenden
  - pulsos de erosión de alta frecuencia para eliminar por erosión material de la pieza de trabajo, y
  - pulsos de medición durante los cuales se aplica una tensión de encendido (Uign) en el hueco de trabajo con el fin de iniciar una descarga dentro del hueco de trabajo y medir el tiempo de retardo de encendido (TD) correspondiente,
- 15 **caracterizado porque**
  - se estima el primer periodo propio mecánico T0 del electrodo de alambre,
  - se ajustan la tensión de encendido (Uign) y/o el ancho de hueco de tal manera que el tiempo de retardo de encendido (TD) es menor que un tiempo de oscilación del electrodo de alambre que oscila dentro del hueco de trabajo debido a la fuerza de atracción electrostática y la fuerza de restauración mecánica, en el que se usa el periodo propio mecánico T0 del electrodo de alambre como valor de referencia para ajustar el tiempo de retardo de encendido (TD), y
  - se limita el tiempo de aplicación de la tensión de encendido (Uign) a T0/10, de modo que el electrodo de alambre experimenta un desplazamiento despreciable durante el tiempo de retardo de encendido (Td).
2. Método según la reivindicación 1, en el que el ancho de hueco se ajusta durante los pulsos de erosión basándose en el tiempo de retardo de encendido (TD) medido durante los pulsos de medición.
3. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que se aplica una tensión de encendido (Uign) continua de una polaridad predeterminada al hueco de trabajo durante los pulsos de medición, en el que la polaridad se selecciona para cada pulso de medición de tal manera que la tensión promedio en el hueco de trabajo tiende a un valor constante predeterminado, preferiblemente de cero voltios.
4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los pulsos de erosión van seguidos por un tiempo de pausa (TS) durante el cual se aplica una tensión de erosión nula en el hueco de trabajo.
5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los pulsos de erosión incluyen una pluralidad de pulsos de alta frecuencia que tienen una frecuencia superior a 500 KHz.
6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la secuencia de pulsos de trabajo está constituida por una secuencia temporal periódica compuesta en sucesión por un pulso de medición (TD), un pulso de erosión (TW) y un primer tiempo de pausa (TS).
7. Método según la reivindicación 5 ó 6, en el que la corriente de encendido (Iign) que fluye tras el encendido iniciado por el pulso de medición se limita a un valor menor que las corrientes de descarga (Ihf) que fluyen dentro de los pulsos de alta frecuencia.
8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, en el que la corriente de encendido (Iign) que fluye tras el encendido iniciado por el pulso de medición (TD) se limita a una duración inferior a 100 ns.
9. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se añade un segundo tiempo de pausa (Tign\_s) tras detenerse la corriente de encendido (Iign) que fluye tras el encendido iniciado por el pulso de medición (TD).
10. Método según la reivindicación 9, en el que el primer (TS) y/o el segundo tiempo de pausa (Tign\_s) se limita a una duración cinco veces menor que la del primer periodo propio (T0) del electrodo de alambre, preferiblemente diez veces menor.
11. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 10, en el que se añade un tercer tiempo de pausa (Thf\_s) tras cada pulso de alta frecuencia o cada alternación de alta frecuencia dentro de un pulso de erosión.
12. Método según la reivindicación 11, en el que el tercer tiempo de pausa (Thf\_s) se limita a una duración

menor que la del primer tiempo de pausa (TS), preferiblemente menor que el periodo fundamental ( $2 \cdot Thfs\_w$ ) de los pulsos de alta frecuencia.

13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 12, en el que el hueco de trabajo se pone en cortocircuito durante al menos uno del primer, el segundo y el tercer tiempo de pausa (TS; Tign\_s; Thf\_s).

14. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en el que se superpone una tensión continua a la pluralidad de pulsos de alta frecuencia durante el tercer tiempo de pausa (Thf\_s), procediendo dicha tensión continua de una fuente de tensión adaptada para suministrar una corriente (Iign) menor que la corriente de descarga (Ihf) iniciada por la tensión de alta frecuencia.

15. Método según la reivindicación 14, en el que la duración de al menos una de la duración del pulso de erosión, del primer y del segundo tiempo (TW; Tign\_s; Thf\_s) se ajusta basándose en la duración medida del tiempo de retardo de encendido (TD) anterior.

16. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la potencia erosiva de la descarga que se produce al final del tiempo de retardo de encendido (TD) es inferior o igual a cualquier descarga que se produce durante el pulso de erosión.

17. Dispositivo para mecanizar por descarga eléctrica una pieza de trabajo por medio de un electrodo de alambre, que comprende

- un servocontrolador de eje (14) diseñado para controlar el ancho de hueco del hueco de trabajo (4) entre el electrodo de alambre y la pieza de trabajo,

- un generador de pulsos (1, 2) diseñado para generar pulsos de erosión de alta frecuencia que van a aplicarse en el hueco de trabajo (4) para eliminar por erosión material de la pieza de trabajo y para generar pulsos de medición que tienen una tensión de encendido (Uign) que van a aplicarse en el hueco de trabajo (4) para iniciar una descarga dentro del hueco de trabajo (4), y

- un controlador (3, 12) diseñado para detectar el tiempo de retardo de encendido (TD) dentro de un pulso de medición, para controlar el generador de pulsos (1, 2) de tal manera que se aplica una secuencia de pulsos de mecanizado en el hueco de trabajo (4) que comprende pulsos de medición (TD) y pulsos de erosión (TW),

#### **caracterizado porque**

- el controlador (3, 12) está diseñado además para actuar conjuntamente con el servocontrolador de eje (14) controlando el ancho de hueco y/o para actuar conjuntamente con el generador de pulsos (1, 2) controlando la tensión de encendido (Uign) de tal manera que el tiempo de retardo de encendido (TD) se mantiene menor que un tiempo de oscilación del electrodo de alambre que oscila dentro del hueco de trabajo (4) debido a la fuerza de atracción electrostática y la fuerza de restauración mecánica, para usar una estimación del primer periodo propio mecánico  $T_0$  del electrodo de alambre como valor de referencia para ajustar el tiempo de retardo de encendido (TD) y para limitar el tiempo de aplicación de la tensión de encendido (Uign) a  $T_0/10$ , de modo que el electrodo de alambre experimenta un desplazamiento despreciable durante el tiempo de retardo de encendido (Td).

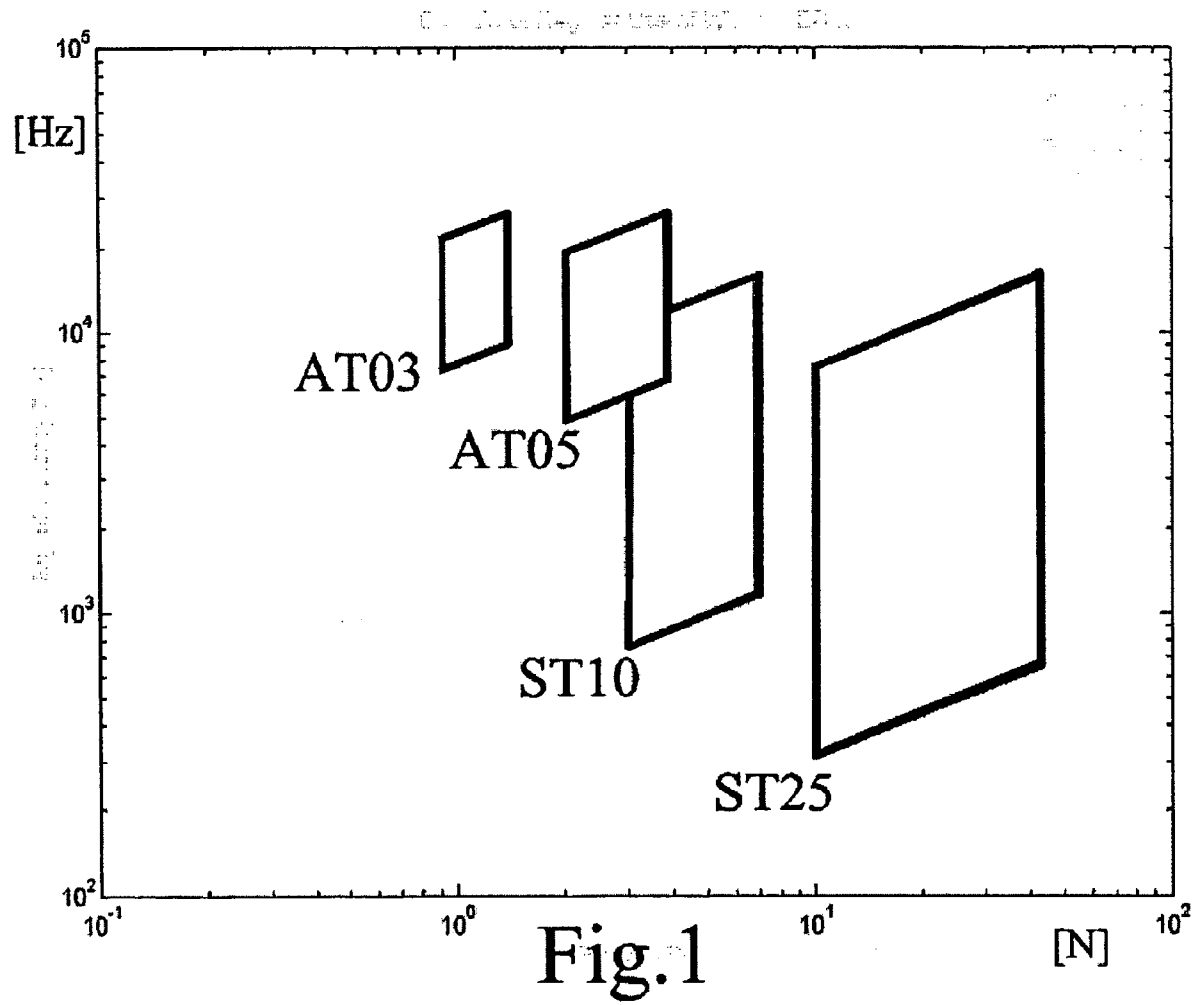
18. Dispositivo según la reivindicación 17, que comprende además

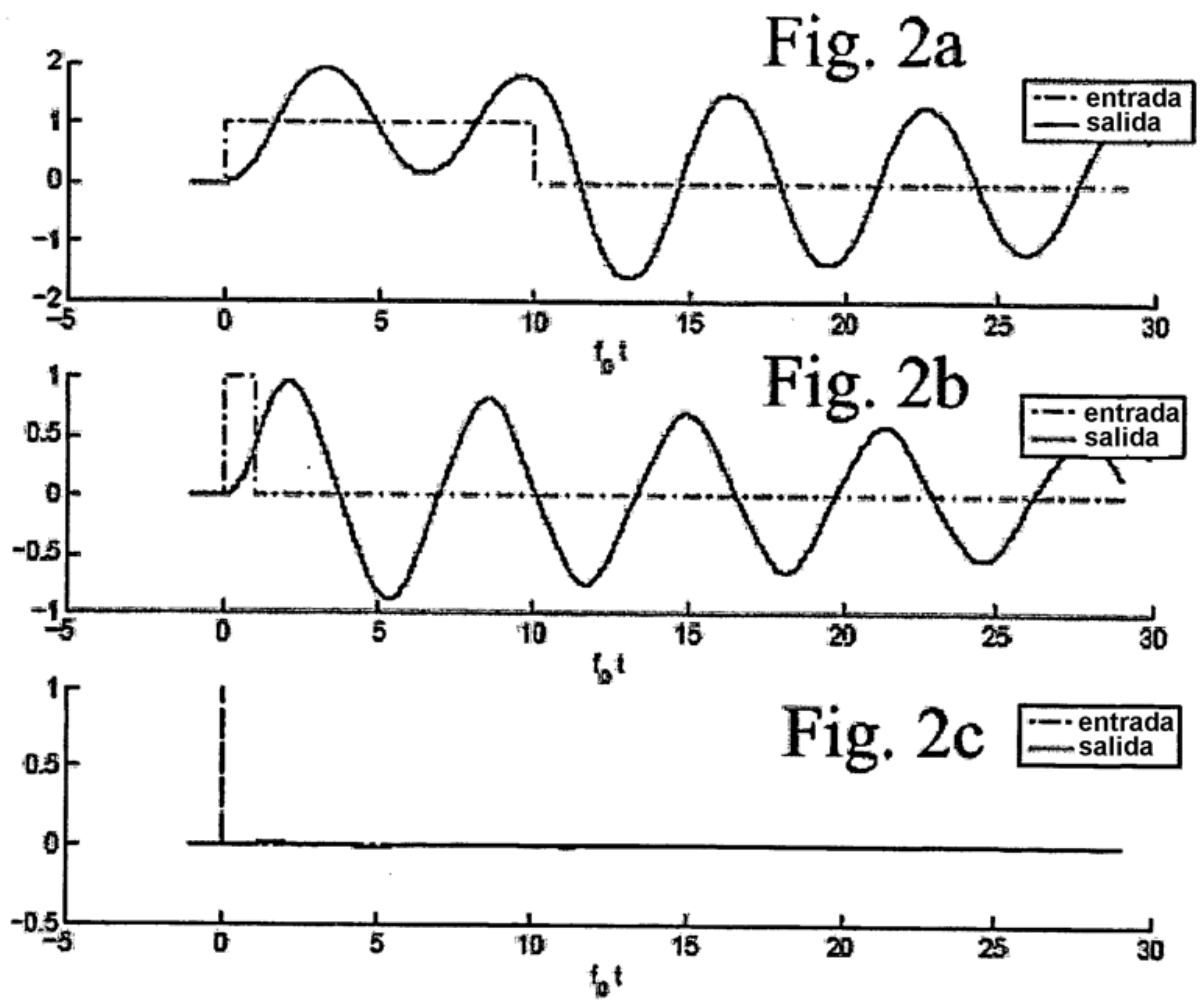
- una primera cadena de medición (10, 11, 12) que incluye el controlador (3, 12) diseñado para determinar el tiempo de retardo de encendido promedio (TDmoy) y para ajustar el ritmo del generador de pulsos (1, 2), y

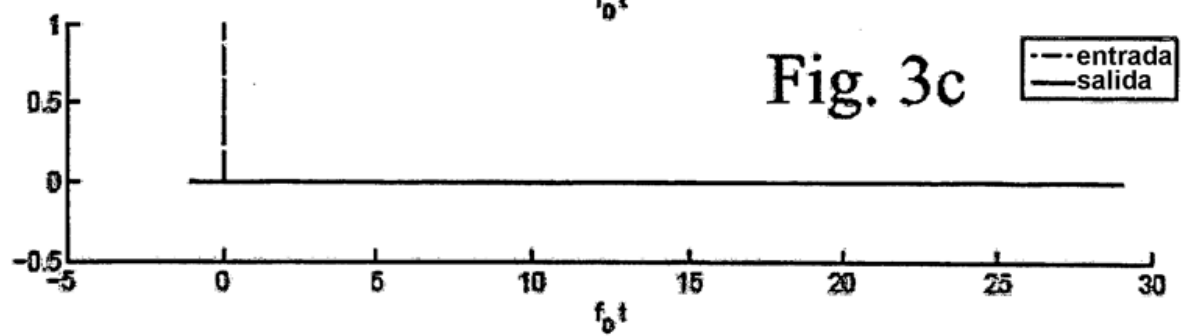
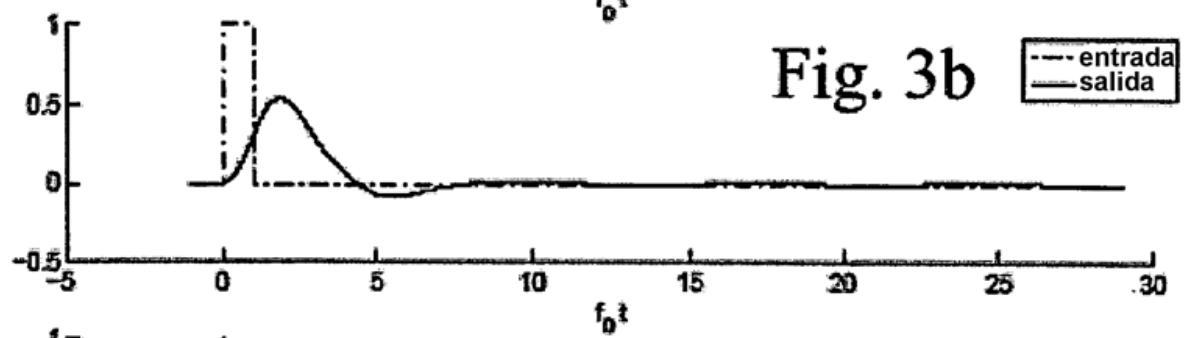
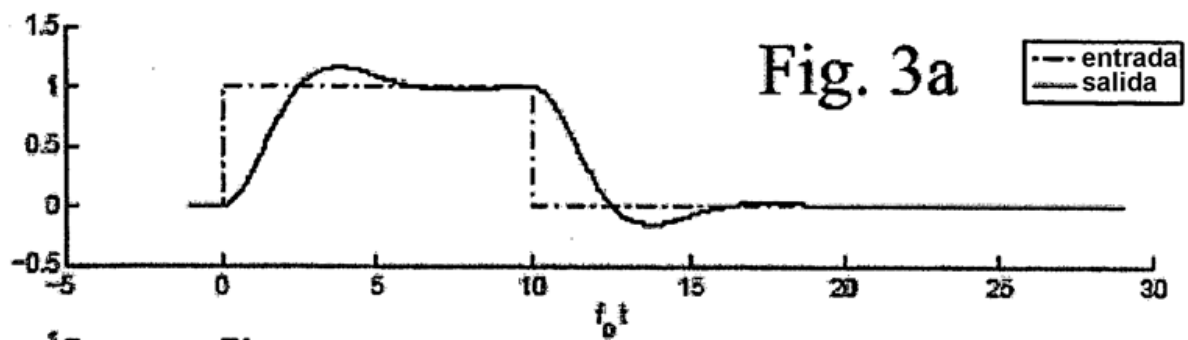
- una segunda cadena de medición que incluye un detector de encendido rápido (9) diseñado para detectar el encendido iniciado por un pulso de medición y para detener la corriente de descarga (Iign) aplicada por el generador de pulsos (1, 2) dentro de un retardo de tiempo menor que el retardo para la primera cadena de medición (10, 11, 12) para aplicar un pulso de erosión sobre el hueco de mecanizado (4) tras dicho pulso de medición.

19. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 18, en el que el controlador (3, 12) está diseñado además para muestrear una pluralidad de valores de tiempo de retardo de encendido (TD) que se producen en pulsos de medición consecutivos y para calcular un valor promedio (TDmoy) de esta pluralidad de valores de tiempo de retardo de encendido (TD) como entrada al servocontrolador de eje (14) con objeto de mantener un valor promedio nominal predeterminado del tiempo de retardo de encendido (TD) ajustando el ancho de hueco.

20. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 19, en el que el generador de pulsos (1, 2) está diseñado para crear pulsos de erosión de alta frecuencia que tienen una frecuencia por encima de 500 KHz.
- 5 21. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 20, en el que el controlador (3, 12) comprende una batería de transistores rápidos (17) ensamblados en una configuración de puente para conectar y desconectar el generador de pulsos (1, 2) al/del hueco de trabajo (4).
- 10 22. Dispositivo según la reivindicación 21, en el que el detector de encendido rápido (9) está instalado en la proximidad directa de la batería de transistores (17) del controlador (3, 12) y está diseñado para desconectar el generador de pulsos (1, 2) del hueco de trabajo (4) en menos de 100 ns en cuanto se ha detectado un encendido.
- 15 23. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 22, en el que el detector de encendido rápido (9) comprende un optoacoplador (18) conectado con su entrada al hueco de trabajo (4) y con su salida a un divisor de resistencia ajustable (R1, R2, R3) que actúa como comparador con una tensión de referencia (VCC).
- 20 24. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 23, en el que el controlador (3, 12) está conectado por medio de una sonda diferencial (10) y una sonda de osciloscopio (11) al hueco de trabajo (4).
- 25 25. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 22 a 30, en el que la tensión de encendido (Uign) del generador de pulsos (1, 2) puede ajustarse en un intervalo de desde 20 hasta 100 voltios para garantizar que se produzcan encendidos en su mayor parte dentro de un primer retardo de tiempo predeterminado (TDmaxi) y que sus corrientes (Iign) son inferiores a 0,5 A.







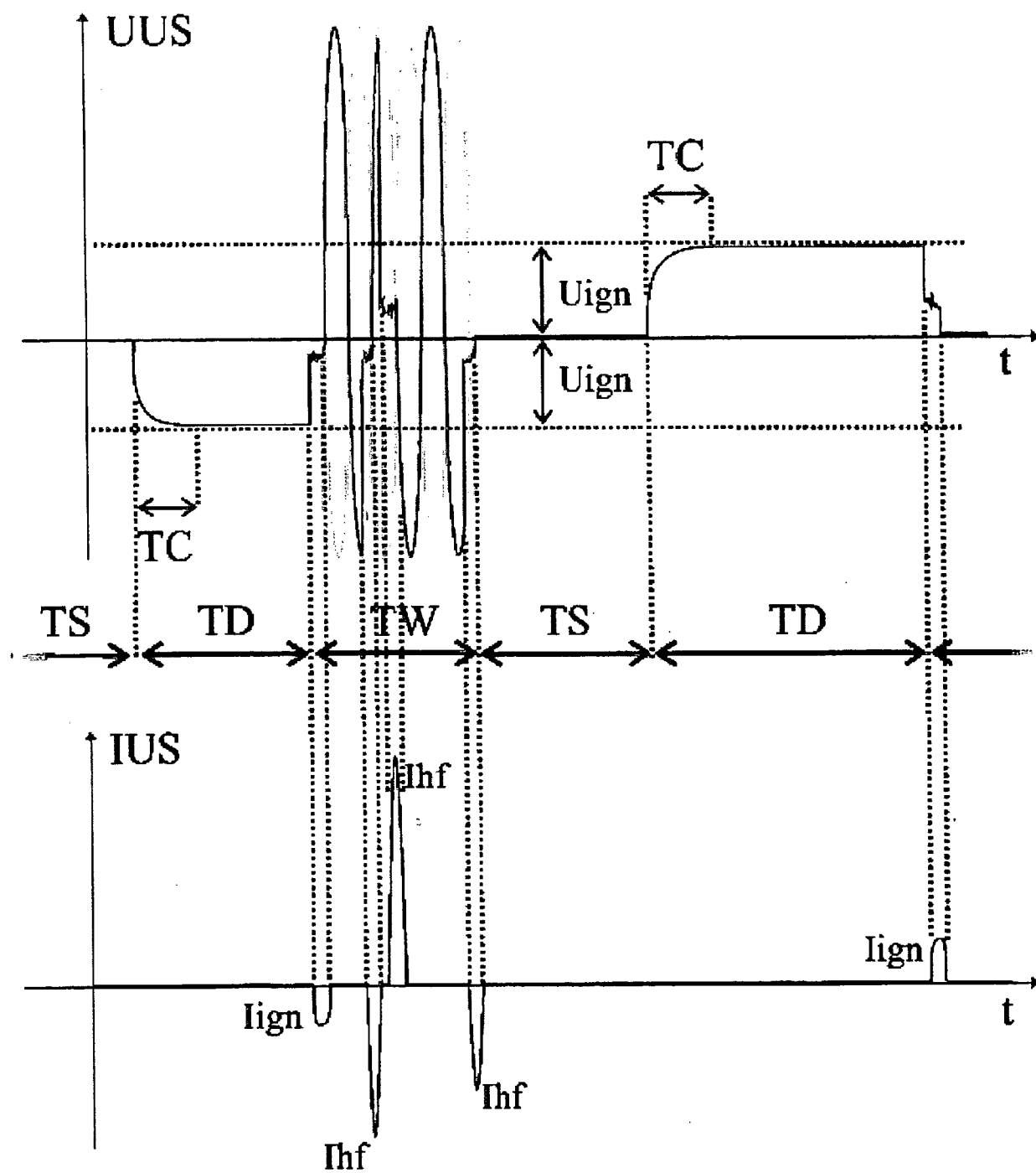


Fig.4

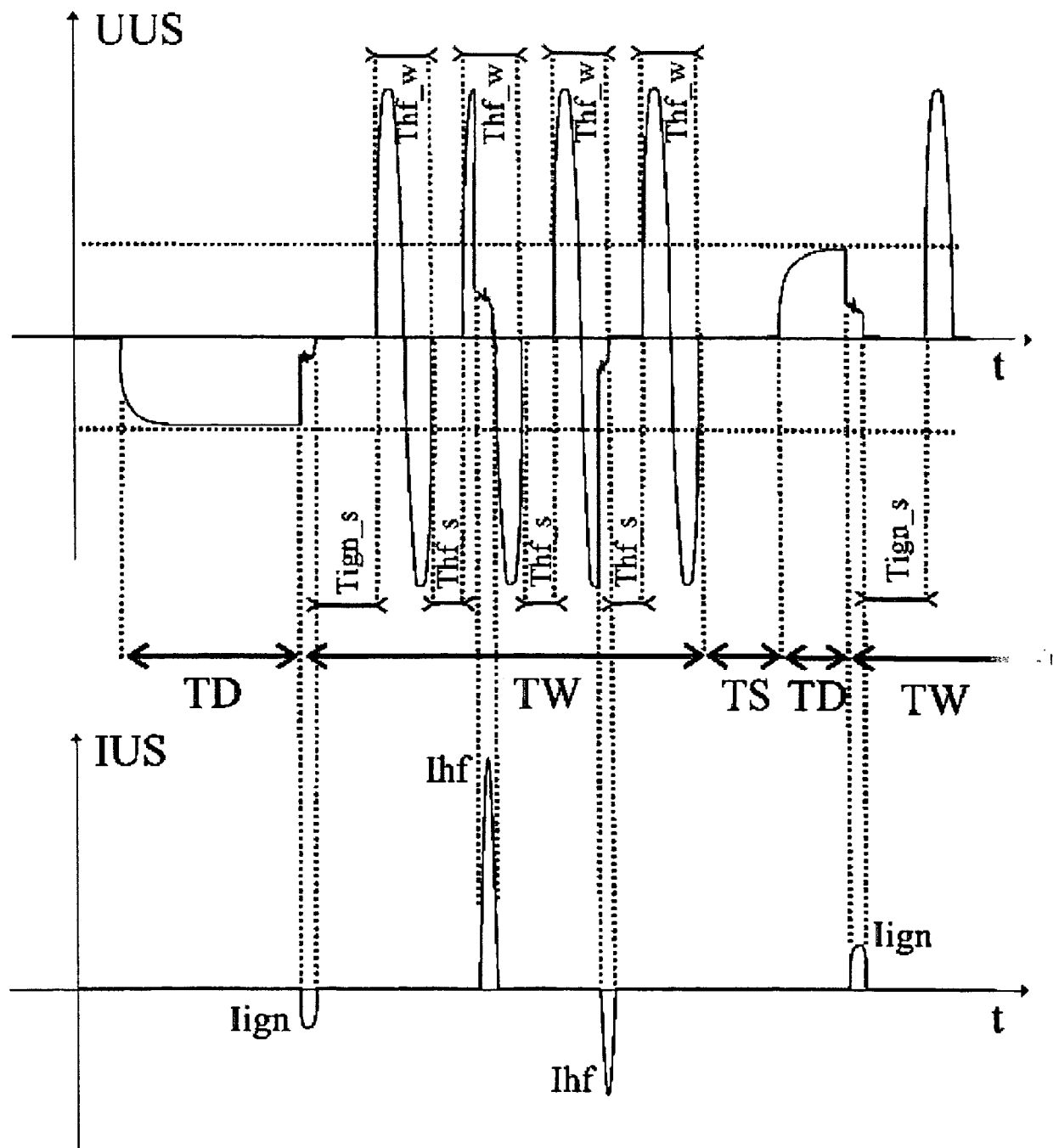


Fig.5

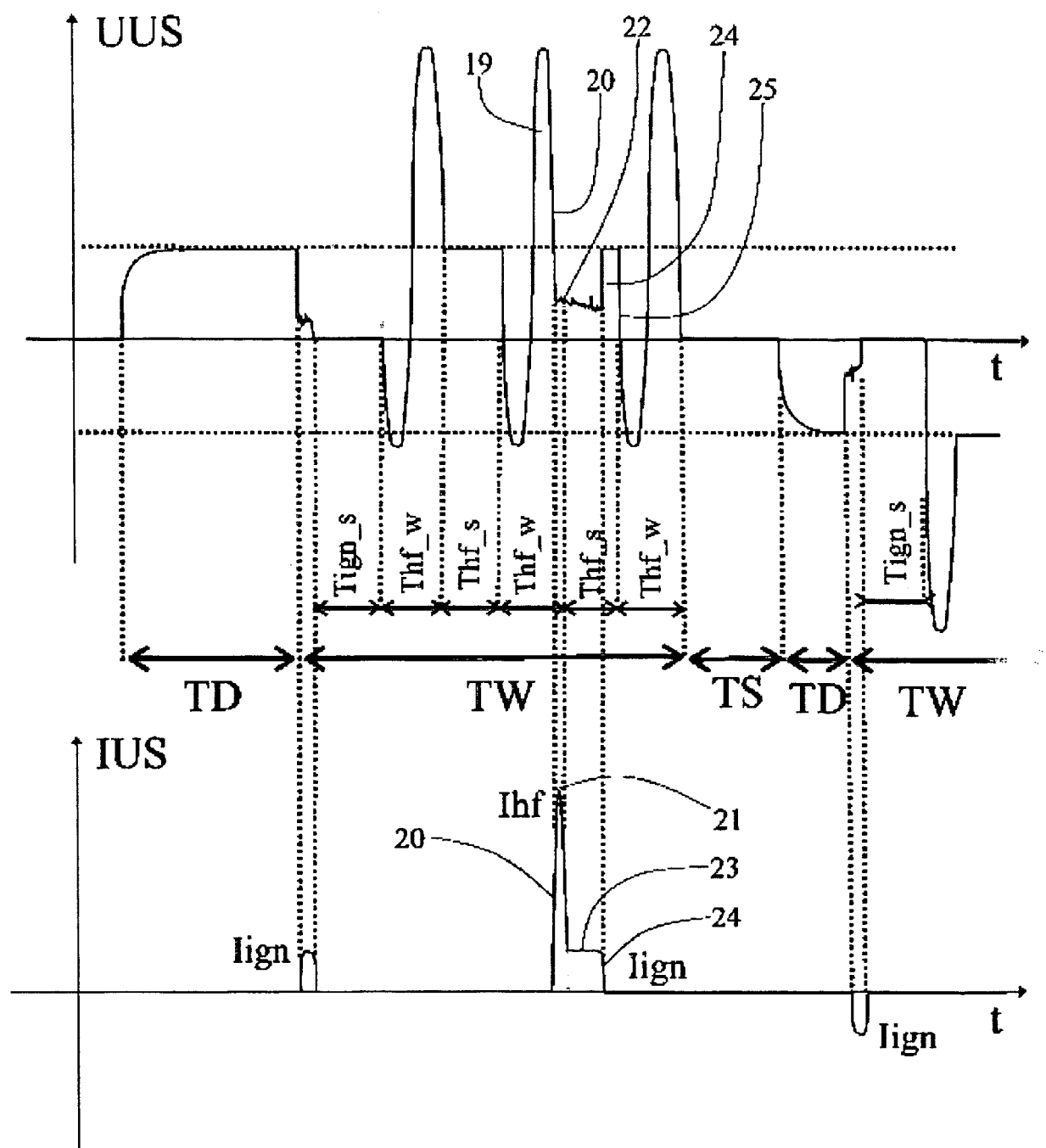


Fig.6

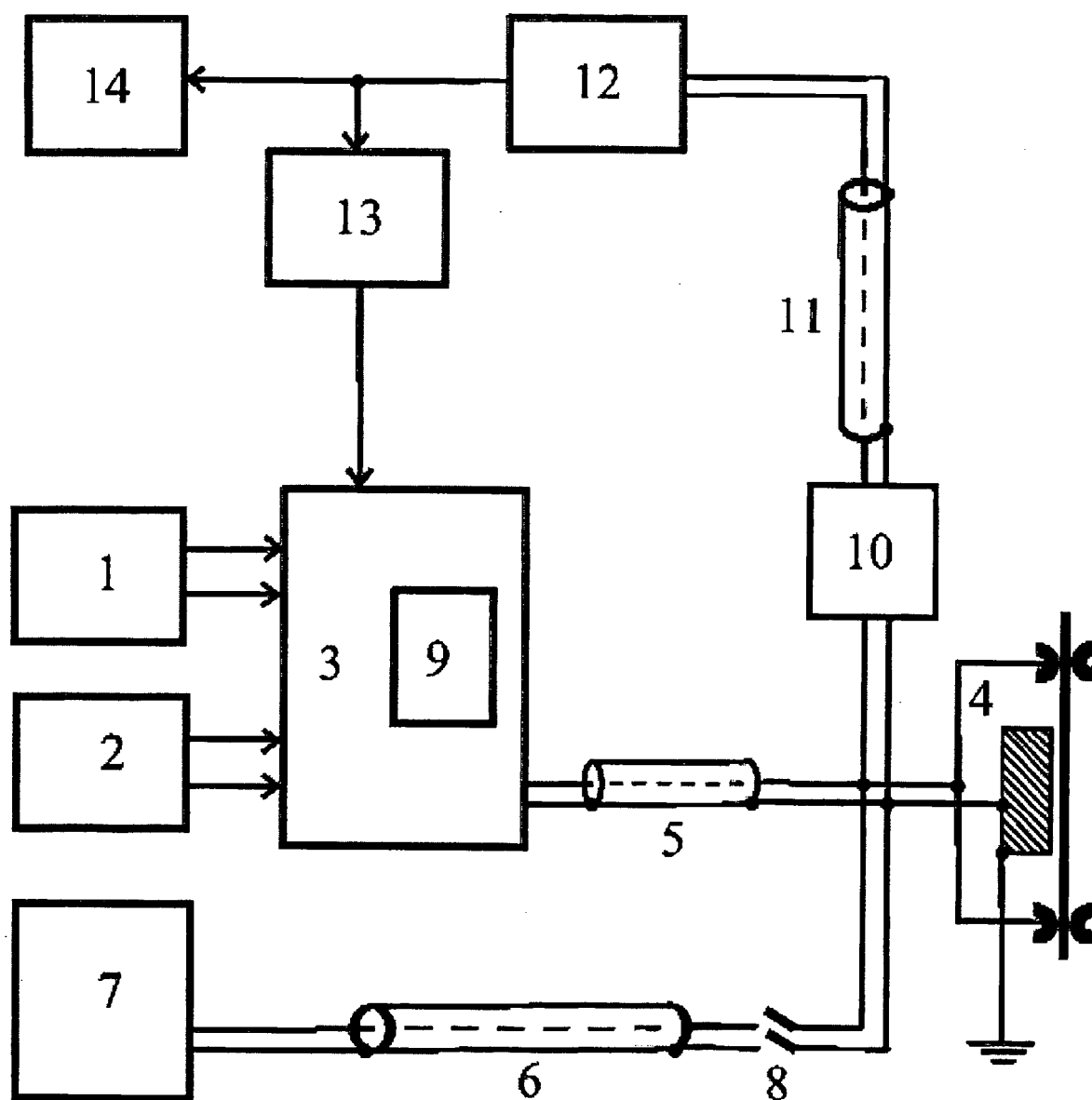


Fig.7

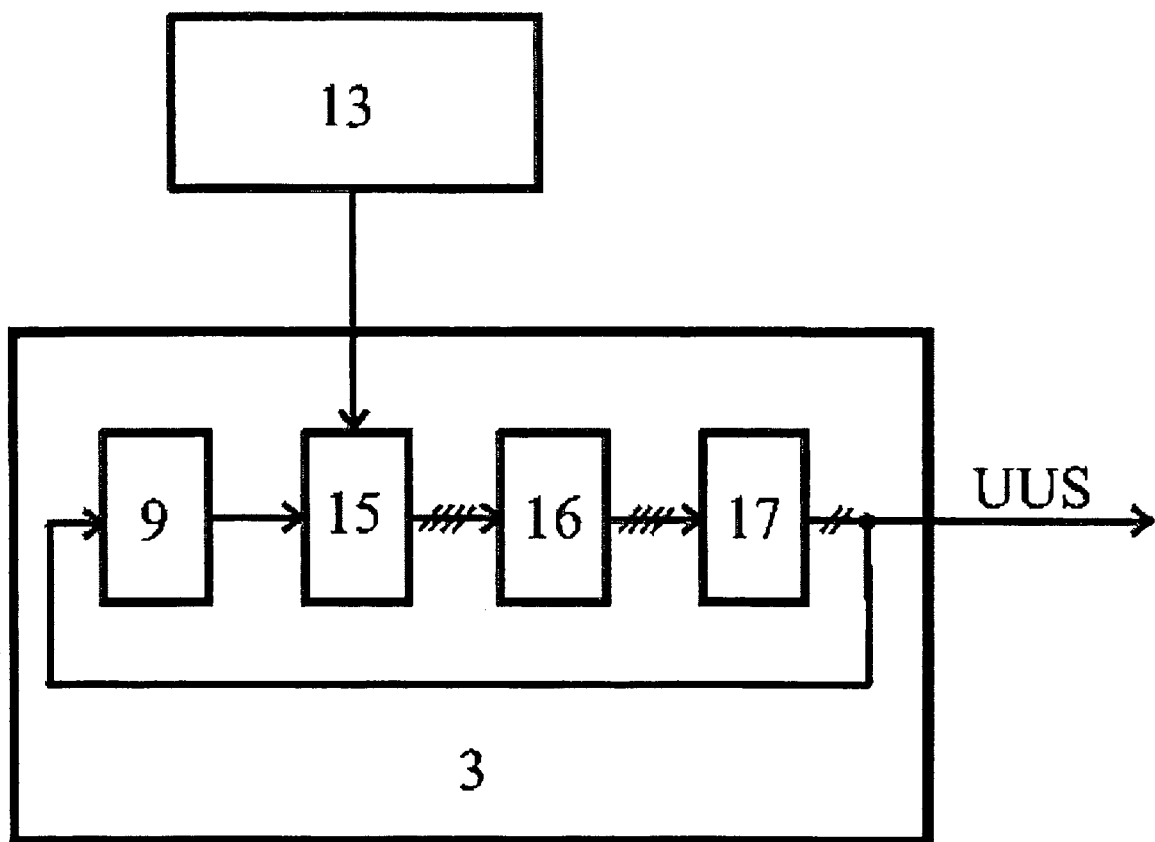


Fig.8

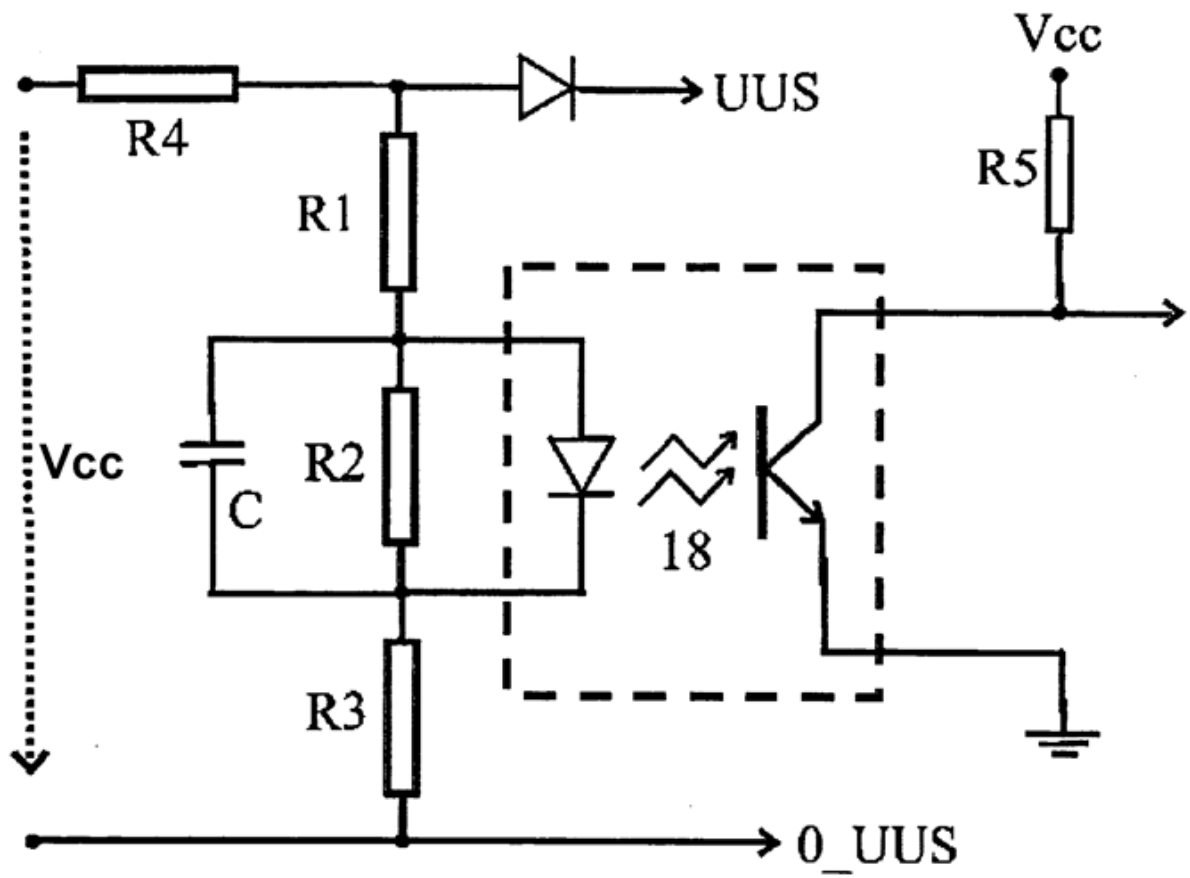


Fig.9

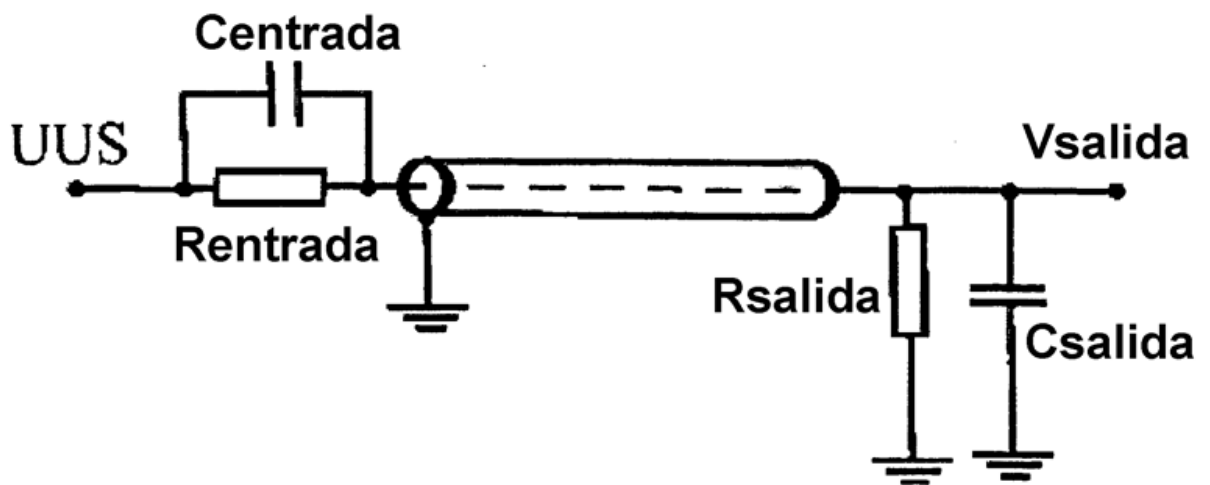


Fig.10