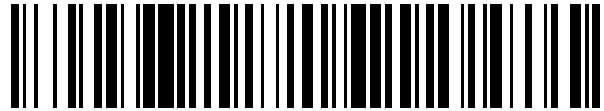


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 405 286**

51 Int. Cl.:

**B23H 3/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.04.2003** **E 03715219 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2013** **EP 1501653**

54 Título: **Método para realizar una eliminación automática de deposiciones catódicas durante un mecanizado electroquímico bipolar**

30 Prioridad:

**23.04.2002 WO PCT/IB02/02807**

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

**30.05.2013**

73 Titular/es:

**KONINKLIJKE PHILIPS ELECTRONICS N.V.**  
**(100.0%)**

**GROENEWOUDSEWEG 1**  
**5621 BA EINDHOVEN, NL**

72 Inventor/es:

**ZAJCEV, ALEXANDR, N.;**  
**GIMAEV, NASICH, Z.;**  
**MARKELOVA, NATALYA;**  
**KUCENKO, VIKTOR, N.;**  
**BELOGORSKY, ALEKSANDR, L.;**  
**MUCHUTDINOV, RAFAIL, R. y**  
**AGAFONOV, IGOR, L.**

74 Agente/Representante:

**ZUAZO ARALUZE, Alexander**

**ES 2 405 286 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**

Método para realizar una eliminación automática de deposiciones catódicas durante un mecanizado electroquímico bipolar

5 La invención se refiere a un método para el mecanizado electroquímico de una pieza de trabajo eléctricamente conductora en un electrolito mediante la aplicación de impulsos eléctricos bipolares entre la pieza de trabajo y un electrodo, alternándose uno o más impulsos de tensión de una polaridad de mecanizado unipolar con impulsos de tensión de una polaridad inversa, mientras que se mantiene una separación entre la pieza de trabajo y el electrodo, llenándose dicha separación mediante el electrolito.

15 Se conoce un método de un tipo descrito en el párrafo inicial a partir del documento US 5.833.835. El método conocido se dispone para realizar una eliminación automática de deposiciones catódicas de una superficie frontal del electrodo durante un modo bipolar de mecanizado electroquímico de una pieza de trabajo. En el método conocido, la amplitud de los impulsos de una polaridad inversa está determinada por dos condiciones, en primer lugar una calidad de superficie dada de la pieza de trabajo y en segundo lugar, por el desgaste de un electrodo. Se conoce en la técnica que la calidad de superficie de la pieza de trabajo y una precisión de copiado son directamente proporcionales al valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas sobre la superficie frontal del electrodo. Por tanto, los parámetros de los impulsos de la polaridad inversa, tales como una duración de impulso, deben seleccionarse de modo que las deposiciones catódicas sobre la superficie frontal del electrodo se eliminen suficientemente y no se produzca desgaste del electrodo.

25 Es una desventaja del método conocido que no hay medios para cuantificar la extensión de las deposiciones catódicas y por tanto es difícil seleccionar un modo óptimo para la duración de impulso de los impulsos de la polaridad inversa para la eliminación de las deposiciones catódicas.

30 Es un objeto de la invención proporcionar un método para determinar el modo óptimo para la eliminación de deposiciones catódicas, cuando se realiza una eliminación de este tipo con una alta precisión por medio de impulsos de la polaridad inversa.

35 Para ello, el método según la invención se caracteriza porque dicho método comprende la etapa de determinar una duración óptima de los impulsos de la polaridad inversa para una eliminación de deposiciones catódicas del electrodo, determinándose dicha duración óptima a partir de una primera calibración llevada a cabo precediendo al mecanizado de la pieza de trabajo y una segunda calibración llevada a cabo durante el mecanizado de la pieza de trabajo, en el que la primera calibración comprende determinar una dependencia entre un parámetro operativo que tiene un intervalo de valores correspondiente a un intervalo de alturas de las deposiciones catódicas generadas en una superficie metálica inicialmente limpia y un intervalo de duraciones de impulso de un impulso adecuado de la polaridad inversa necesario para eliminar las deposiciones catódicas de dicha superficie, en el que la primera calibración comprende las etapas de:

40 - realizar un mecanizado de un conjunto de muestras con impulsos de mecanizado unipolares con el fin de producir un intervalo de alturas de las deposiciones catódicas;

45 - aplicar un impulso de la polaridad inversa que tiene una duración de impulso por muestra con el fin de eliminar las deposiciones catódicas producidas;

- realizar una calibración de una dependencia entre la altura de las deposiciones catódicas y la duración de los impulsos de la polaridad inversa requeridos para eliminar dichas deposiciones catódicas producidas de las muestras;

50 y en el que la segunda calibración comprende las etapas de:

55 - realizar un mecanizado de la pieza de trabajo mediante la aplicación de uno o más impulsos de la polaridad de mecanizado unipolar hasta que se satisface una condición definida a priori, dando como resultado dicho mecanizado una primera altura de la deposición catódica;

- realizar una medición de un primer valor del parámetro operativo representativo de la primera altura de la deposición catódica;

60 - realizar una aplicación de un impulso de la polaridad inversa correspondiente a la primera altura de la deposición catódica, dando como resultado dicha aplicación un estado limpiado de la superficie del electrodo, determinándose parámetros de dicho impulso de la polaridad inversa a partir de la primera calibración;

- realizar una medición de un segundo valor del parámetro operativo representativo del estado limpiado de la superficie del electrodo;

65 - realizar una nueva calibración de la dependencia entre el parámetro operativo y la altura de las deposiciones

catódicas establecida durante la primera calibración basándose en el primer valor y el segundo valor del parámetro operativo.

5 La medida técnica de la invención se basa en un conocimiento de que realizando la primera calibración antes del mecanizado de la pieza de trabajo, puede recogerse una información sobre una relación entre una extensión esperada de las deposiciones catódicas sobre la superficie frontal del electrodo y una duración óptima del impulso inverso necesario para eliminar dichas deposiciones. Esta calibración puede realizarse basándose en parámetros operativos del proceso electroquímico. Además, se entiende que durante el proceso del mecanizado electroquímico, pueden alterarse las condiciones operativas produciendo una perturbación de la relación entre la extensión esperada de las deposiciones catódicas sobre la superficie frontal del electrodo y una duración óptima del impulso inverso necesario para eliminar dichas deposiciones. Por tanto, realizando la segunda calibración durante el mecanizado electroquímico, se determina una relación corregida entre la extensión real de las deposiciones catódicas y el impulso inverso óptimo.

15 En el método según la invención, la primera calibración comprende determinar una dependencia entre un parámetro operativo que tiene un intervalo de valores correspondiente a un intervalo de alturas de las deposiciones catódicas generadas en una superficie metálica inicialmente limpia y un intervalo de duraciones de impulso de un impulso adecuado de la polaridad inversa necesario para eliminar dichas deposiciones de dicha superficie.

20 Esta medida técnica se basa en un conocimiento de que para condiciones operativas dadas, como amplitudes de los impulsos de mecanizado y la amplitud de los impulsos de la polaridad inversa, la presión del electrolito, la dimensión de la separación entre la pieza de trabajo y el electrodo, existe una dependencia única entre un parámetro operativo representativo de la extensión de las deposiciones catódicas y la duración de impulso requerida para los impulsos de la polaridad inversa necesarios para eliminar dichas deposiciones. Esta dependencia demuestra ser invariante con respecto al material y la geometría del electrodo, la composición y las propiedades del electrolito.

En el método según la invención, la primera calibración comprende las etapas de:

30 - realizar un mecanizado de un conjunto de muestras con impulsos de mecanizado unipolares con el fin de producir un intervalo de alturas de las deposiciones catódicas;

- aplicar un impulso de la polaridad inversa que tiene una duración de impulso por muestra con el fin de eliminar las deposiciones catódicas producidas;

35 - realizar una calibración de una dependencia entre la altura de las deposiciones catódicas y la duración de los impulsos de la polaridad inversa requeridos para eliminar dichas deposiciones catódicas producidas de las muestras.

40 La primera calibración se lleva a cabo experimentalmente, comprendiendo las siguientes etapas: en primer lugar, se obtiene un intervalo de diferentes alturas de las deposiciones catódicas en un conjunto de muestras no mecanizadas. Se mide el valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas y se mide también un valor correspondiente de un parámetro operativo, por ejemplo el potencial de cátodo. A continuación, se aplica un impulso de una polaridad inversa por muestra, teniendo dicho impulso una duración de impulso suficiente para eliminar las deposiciones catódicas sin un desgaste del electrodo. Esta duración de impulso es la duración de impulso óptima. La dependencia resultante entre la altura de las deposiciones catódicas y la duración de impulso óptima constituye la primera calibración. Para valores intermedios de la altura, se interpolan los datos de medición para obtener duraciones de impulso inverso óptimas correspondientes. Un ejemplo de una dependencia de este tipo se comentará con referencia a la figura 1.

En el método según la invención, la segunda calibración comprende las etapas de:

50 - realizar un mecanizado de la pieza de trabajo mediante la aplicación de uno o más impulsos de la polaridad de mecanizado unipolar hasta que se satisface una condición definida a priori, dando como resultado dicho mecanizado una primera altura de la deposición catódica;

55 - realizar una medición de un primer valor del parámetro operativo representativo de la primera altura de la deposición catódica;

60 - realizar una aplicación de un impulso de la polaridad inversa correspondiente a la primera altura de la deposición catódica, dando como resultado dicha aplicación un estado limpiado de la superficie del electrodo, determinándose parámetros de dicho impulso de la polaridad inversa a partir de la primera calibración;

- realizar una medición de un segundo valor del parámetro operativo representativo del estado limpiado de la superficie del electrodo;

65 - realizar una nueva calibración de la dependencia entre el parámetro operativo y la altura de las deposiciones catódicas basándose en el primer valor y el segundo valor del parámetro operativo.

La segunda calibración se realiza durante el proceso electroquímico con el fin de tener en cuenta posibles perturbaciones de la dependencia entre el parámetro operativo y la altura de las deposiciones catódicas. Esto se basa en un conocimiento de que el valor absoluto del parámetro operativo representativo de la altura de las deposiciones catódicas puede alterarse durante el proceso electroquímico. Se entiende que, por ejemplo si el potencial de cátodo se selecciona como el parámetro operativo, tiene diferentes valores para una superficie limpia, no mecanizada del electrodo y para la superficie del electrodo que se ha limpiado por medio de una aplicación de un impulso de la polaridad inversa. Esta diferencia se explica por el hecho de que durante el mecanizado electroquímico, los microporos de la superficie del electrodo se llenan con capas de óxido dando como resultado un cambio en el potencial de cátodo. Este efecto se ilustrará en un ejemplo facilitado en la figura 3.

El método según la presente invención funciona de la siguiente manera: en primer lugar, se mecaniza la pieza de trabajo hasta que se satisface una determinada condición definida previamente. Por ejemplo, el mecanizado puede llevarse a cabo durante un determinado periodo de tiempo, o hasta que se detecta una extensión sustancial de las deposiciones catódicas o hasta que se detecta una máxima extensión admisible de las deposiciones catódicas. La máxima extensión admisible de las deposiciones catódicas está determinada por la calidad de superficie seleccionada como objetivo de la pieza de trabajo y por la precisión de copiado seleccionada como objetivo. Por ejemplo, en el caso en que se selecciona la máxima extensión admisible de las deposiciones catódicas como una condición definida a priori, entonces se mide un primer valor del parámetro operativo representativo de dicha extensión de la deposición catódica. Un ejemplo de un parámetro operativo de este tipo es un potencial de cátodo medido en la superficie del electrodo. Basándose en los resultados de la primera calibración, se selecciona la duración de impulso para el impulso inverso necesario para eliminar dicha primera calibración. En esta etapa, los datos de la primera calibración son todavía válidos debido al hecho de que el estado inicial correspondía a una superficie limpia del electrodo. Tras aplicarse el impulso óptimo de la polaridad inversa, se limpia la superficie del electrodo y podría tener un potencial de cátodo diferente al de la superficie limpia. Por tanto, según la medida técnica, el parámetro operativo se mide una vez más para una superficie de electrodo limpia. Entonces se usa este valor para ajustar de nuevo a escala la dependencia entre el valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas y el parámetro operativo, por ejemplo, un potencial de cátodo en condiciones operativas. Por tanto, como resultado de la segunda calibración, se deriva una dependencia ajustada de nuevo a escala entre el valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas y el parámetro operativo, por ejemplo el potencial de cátodo, en condiciones de mecanizado. Entonces se usa esta calibración, junto con los resultados de la primera calibración, para determinar la duración de impulso óptima para la eliminación de las deposiciones catódicas. Según la medida técnica de la presente invención, es posible por tanto cuantificar la altura de las deposiciones catódicas durante el mecanizado y seleccionar la duración óptima del impulso de la polaridad inversa basándose en el valor de la altura. El tiempo adecuado para realizar la medición del parámetro operativo durante el proceso electroquímico se comentará con referencia a las figuras 2 y 3. Debido al hecho de que se cuantifica la extensión de las deposiciones catódicas, el método según la invención presenta medios para una eliminación precisa de las deposiciones catódicas sin desgaste del electrodo.

Una realización del método según la invención se caracteriza porque en una zona, correspondiente a un intervalo entre los impulsos de tensión de mecanizado unipolares, se deriva un área bajo una curva del potencial de electrodo, seleccionándose dicha área como el parámetro operativo. Esta medida técnica es particularmente adecuada para condiciones operativas con un alto flujo de electrolito o para pequeñas trayectorias de electrolito, o para mayores valores de la separación. En estas condiciones, no es favorable que se generen las deposiciones catódicas en una gran extensión, dando como resultado cambios menores en el valor absoluto del potencial de cátodo. Es más sensible cuantificar, por tanto, la extensión de las deposiciones catódicas analizando la curva del potencial de electrodo.

Una realización adicional del método según la invención se caracteriza porque para intervalos cortos entre impulsos de tensión de mecanizado unipolares se deriva una pendiente de la curva del potencial de electrodo en un intervalo entre los impulsos de tensión de mecanizado unipolares, seleccionándose dicha pendiente como el parámetro operativo. Se ha encontrado que el valor del potencial de cátodo no se estabiliza entre los impulsos de mecanizado con una alta tasa de repetición, siendo la pendiente de la curva un mejor parámetro para dicha cuantificación.

Una realización todavía adicional del método según la invención se caracteriza porque el valor absoluto del primer armónico de la transformada de Fourier de un impulso de potencial de cátodo se selecciona como el parámetro operativo.

Esta medida técnica es particularmente favorable para intervalos muy cortos entre los impulsos de mecanizado y se demuestra que los coeficientes de Fourier son más sensibles a las deposiciones catódicas que el valor absoluto del potencial de cátodo.

En el método de la invención en primer lugar, se establece la duración de impulso óptima para impulsos de la polaridad inversa. Esto puede realizarse según el método para determinar un modo óptimo para una eliminación de deposiciones catódicas comentado anteriormente. El control del proceso de mecanizado se realiza entonces según el parámetro operativo que esté monitorizándose, por ejemplo, el valor absoluto del potencial de cátodo, u otro

parámetro adecuado. La aplicación de los impulsos inversos se realiza en el caso en que el parámetro operativo monitorizado supera un valor preseleccionado. Puede elegirse un valor preseleccionado adecuado para relacionarlo con el máximo grosor admisible de las deposiciones catódicas.

5 Un sistema de control adecuado para controlar un método según la invención se caracteriza porque dicho sistema comprende

- medios de sondeo dispuestos para realizar una medición de un valor de un parámetro operativo;

10 - medios de calibración dispuestos para realizar una calibración numérica de una variable representativa de un estado de la superficie del electrodo basándose en el valor del parámetro operativo;

- una unidad de almacenamiento dispuesta para almacenar una dependencia entre la variable y una duración de un impulso inverso óptimo necesario para eliminar dicho estado;

15 - medios de monitorización dispuestos para monitorizar un valor real del parámetro operativo;

- una unidad lógica dispuesta para comparar dicho valor real del parámetro operativo con un valor preseleccionado del parámetro operativo y para accionar una aplicación de los impulsos óptimos de polaridad inversa en el caso en que el valor real del parámetro operativo sea mayor que el valor preseleccionado del parámetro operativo, determinándose parámetros del impulso inverso mediante la calibración y la dependencia almacenada en la unidad de almacenamiento.

20 El sistema de control está dispuesto para realizar el control de proceso automático y para accionar un procedimiento para la eliminación automática de las deposiciones catódicas basándose en un parámetro operativo monitorizado. La ventaja del sistema de control es que es adecuado para una determinación precisa de la extensión de la deposición catódica dando como resultado una eliminación precisa de la misma de la superficie del electrodo sin ningún desgaste del electrodo. Las partes del sistema de control se explicarán en más detalle con referencia a la figura 4.

25 Un programa informático está dispuesto para la interconexión entre el sistema de control y el aparato para el mecanizado electroquímico, visualizándose los resultados del mecanizado electroquímico a un usuario en un modo automático. El programa informático está dispuesto para cargarse en un ordenador y para controlar que el ordenador, cuando se carga, funcione como el sistema de control.

35 La ventaja del programa informático es que proporciona medios para implementar una eliminación precisa de las deposiciones catódicas de la superficie del electrodo de manera precisa sin ningún desgaste del electrodo. La descripción detallada del programa informático se facilitará con referencia a la figura 8. Estos y otros aspectos de la invención se comentan con referencia a las figuras.

40 La figura 1 muestra un ejemplo de la primera calibración de la dependencia entre la altura de las deposiciones catódicas y la duración de impulso óptima para el impulso de la polaridad inversa.

La figura 2 muestra un ejemplo de un oscilograma característico adquirido durante el mecanizado electroquímico.

45 La figura 3 muestra un ejemplo de la evolución del potencial de cátodo entre los impulsos de la polaridad de mecanizado para diferentes condiciones de electrodo.

La figura 4 presenta de manera esquemática una realización de un aparato para el mecanizado electroquímico según la invención.

50 La figura 5 presenta de manera esquemática una realización del sistema de control según la invención.

La figura 6 presenta de manera esquemática una realización del programa informático según la invención.

55 La figura 7 presenta de manera esquemática una realización de una ventana principal de la interfaz de usuario del programa informático según la invención.

60 La figura 1 muestra un ejemplo de la primera calibración de la dependencia entre la altura  $h$  de las deposiciones catódicas y la duración de impulso óptima  $t$  para los impulsos de la polaridad inversa. Basándose en los resultados experimentales, se encuentra que existe una dependencia única entre la altura y la duración del impulso óptimo de la polaridad inversa necesario para eliminar dichas deposiciones, generándose las deposiciones con determinados parámetros operativos (tipo y presión del electrolito, amplitud y duración de los impulsos de la polaridad de mecanizado, valor absoluto de la separación, etc.). Por tanto, realizando una calibración de la dependencia entre la altura y la duración de impulso, puede seleccionarse el impulso óptimo de la polaridad inversa para eliminar las deposiciones catódicas durante el proceso electroquímico. En la figura, los valores 1, 3, 5, 7, 9 medidos se facilitan mediante las flechas 1', 3', 5', 7', 9', siendo toda la curva 2 un resultado de la interpolación entre los puntos de

medición. Eventualmente, para alturas más allá de los datos medidos, puede extrapolarse la dependencia. Almacenando esta dependencia en una unidad de control para el mecanizado electroquímico, puede realizarse la limpieza en tiempo real de las deposiciones catódicas de manera precisa. Evidentemente, es posible almacenar una pluralidad de tales dependencias que representan diferentes condiciones operativas. Con el fin de evaluar un valor de la altura de las deposiciones catódicas, se usa un potencial de cátodo. El valor absoluto del potencial de cátodo se mide en el intervalo entre los impulsos de la polaridad de mecanizado, que se ilustra esquemáticamente en la figura 2.

La figura 2 muestra un ejemplo de un oscilograma característico adquirido durante el mecanizado electroquímico. La evolución del impulso de la polaridad de mecanizado viene dada esquemáticamente por 20, la evolución del potencial de cátodo tras la terminación del impulso 20 viene dada por  $\varphi$ . Se observa, que el valor del potencial de cátodo  $\varphi$  disminuye con el tiempo y en algún punto, se alcanza un valor saturado  $\varphi_s$ . Es posible instalar la medición del potencial de cátodo basándose en el conocimiento sobre el tiempo requerido para que el potencial de cátodo alcance el valor saturado  $\varphi_s$ , o para realizar la medición de  $\varphi_s$  precediendo directamente al siguiente impulso 20' de mecanizado. Como el valor saturado del potencial de cátodo es directamente proporcional al valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas, puede deducirse el valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas.

La figura 3 muestra un ejemplo de la evolución del potencial de cátodo entre los impulsos de la polaridad de mecanizado para diferentes condiciones de electrodo. En la figura, una curva C ilustra la evolución del potencial de cátodo del electrodo para una superficie de electrodo inicialmente limpia, no mecanizada, una curva B muestra la evolución del potencial de cátodo para la superficie de electrodo tras una operación de limpieza por medio de una aplicación de un impulso óptimo de la polaridad inversa, la curva U muestra la evolución del potencial de cátodo tras una serie de impulsos de mecanizado unipolares, en el que se generaron máximas deposiciones catódicas admisibles, la curva A muestra la evolución del potencial de cátodo en una situación intermedia en la que las deposiciones catódicas son menos que las máximas admisibles. Tal como se observa a partir de la figura 3 en una zona de saturación de los potenciales de cátodo S, existe una discrepancia entre el valor absoluto del potencial de cátodo correspondiente a una superficie de electrodo limpia, respectivamente limpiada. Por tanto, el nuevo valor del potencial de cátodo correspondiente a una altura cero de las deposiciones catódicas es  $\varphi_2$ , y no el valor inicial  $\varphi_1$ . Por tanto, debe tomarse el primer valor para ajustar de nuevo a escala la dependencia entre la altura absoluta de las deposiciones catódicas y el valor real medido del potencial de cátodo en condiciones operativas.

La figura 4 presenta de manera esquemática una realización de un aparato 4 para el mecanizado electroquímico de una pieza 42 de trabajo eléctricamente conductora por medio de un electrodo 43. El aparato 4 comprende una base 46 para colocar una pieza 42 de trabajo, un soporte 47 para colocar un electrodo 43 y un accionador 48 para mover el soporte 47 y la base 46 uno con respecto a la otra. La base 46 y el accionador 48 se montan sobre un bastidor (no mostrado) que tiene una construcción rígida de modo que puede seleccionarse una distancia de trabajo entre el electrodo 43 y la pieza 42 de trabajo con una alta precisión. La disposición comprende además un depósito 50 lleno de un electrolito 45 de tal manera que la separación 44 formada como resultado de la distancia de trabajo entre el electrodo 43 y la pieza 42 de trabajo se llena con el electrolito 45. En el presente caso, el electrolito comprende  $\text{NaNO}_3$  disuelto en agua. Como alternativa, es posible usar otro electrolito, tal como por ejemplo  $\text{NaCl}$  o una combinación de  $\text{NaNO}_3$  y un ácido. El electrolito 45 se bombea a través de la separación 44 por medio de una instalación, no mostrada en la figura. Por medio del aparato 4, la pieza 42 de trabajo puede mecanizarse pasando un impulso de tensión de mecanizado desde una unidad 40 de suministro de energía a través del electrolito 45 en la separación 44 mediante el electrodo 43 y la pieza 42 de trabajo. La unidad 40 de suministro de energía comprende un generador 41 de impulsos de tensión y un interruptor 49 controlable. Cuando la polaridad de la tensión de mecanizado aplicada es la correcta, esto da como resultado que se elimina material de la superficie de la pieza 42 de trabajo y que se disuelve en el electrolito 45 en la ubicación de una pequeña distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo. La forma de la cavidad así obtenida está determinada por la forma del electrodo opuesto a la misma. El aparato 4 comprende además una segunda unidad 40' de suministro de energía, en la que está incorporada una fuente de los impulsos 41' de tensión de la polaridad opuesta U2. La segunda fuente de suministro de energía comprende además un interruptor 49' controlable que va a operarse por la unidad C de control de proceso. En el caso en que se detecta que los impulsos de mecanizado U1 han de alternarse con los impulsos de la polaridad opuesta U2, la unidad C de control de proceso opera alternativamente los interruptores 49' y 49 controlables para suministrar un impulso de tensión de polaridad adecuada a la separación (44). También es posible usar un suministro de energía, en el que las fuentes de suministro de energía primera y segunda están integradas y constituyen una sola fuente de suministro de energía, que es programable mediante los medios C de control de proceso para suministrar impulsos de tensión alternos de polaridad opuesta. El aparato 4 según la invención comprende además un sistema C2 de control dispuesto para controlar una eliminación automática de deposiciones catódicas de la superficie del electrodo. El sistema C2 de control está dispuesto para comunicarse con los medios C de control de proceso, preferiblemente por medio de una interfaz RS232. Además, el sistema C2 de control está dispuesto para realizar una medición y una monitorización del valor del potencial de cátodo. El sistema C2 de control se comenta en más detalle con referencia a la figura 5.

La figura 5 presenta de manera esquemática una realización del sistema C2 de control según la invención. El sistema de control comprende medios 51 de sondeo dispuestos para realizar una medición de un valor del potencial de cátodo, por ejemplo, por medio de un osciloscopio digital (no mostrado). El sistema C2 de control comprende

medios 53 de calibración adicionales dispuestos para realizar una calibración numérica de la altura de las deposiciones catódicas basándose en el valor medido del potencial de cátodo. Con el fin de realizar esta calibración, los medios de calibración se remiten a una tabla (no mostrada) almacenada en una unidad 55 de almacenamiento en la que el valor absoluto de la altura de las deposiciones catódicas se expone frente a los valores del potencial de cátodo para una superficie de electrodo inicialmente no limpiada. Antes de la primera operación de limpieza, se usa esta tabla para estimar el valor de la altura. Tras realizarse al menos una operación de limpieza, se cambia la relación entre la altura y el potencial de cátodo, tal como se explica con referencia a la figura 3. Los medios 53 de calibración están dispuestos por tanto para realizar una nueva calibración de dicha relación basándose en la medición del potencial de cátodo tras limpiarse la superficie de electrodo con un impulso óptimo. Los resultados de la nueva calibración se almacenan en la unidad 55 de almacenamiento y se escriben en una tabla corregida (no mostrada) a la que se remite posteriormente para determinar la duración de impulso óptima para los impulsos de la polaridad inversa durante el mecanizado. El sistema C2 de control comprende medios 57 de monitorización adicionales dispuestos para monitorizar un valor real del potencial de cátodo. Los medios 57 de monitorización pueden disponerse para almacenar el valor real del potencial de cátodo en un archivo de registro. Una unidad 59 lógica, dispuesta para comparar el valor real del potencial de cátodo con un valor preseleccionado del potencial de cátodo y enviar una señal de accionamiento A a los medios de control de proceso (no mostrados), puede remitirse a la entrada del archivo de registro para accionar una aplicación de los impulsos óptimos de polaridad inversa en el caso en que el valor real del potencial de cátodo es mayor que el valor preseleccionado del potencial de cátodo. Los parámetros del impulso inverso óptimo se suministran por la unidad 55 de almacenamiento para la altura real de las deposiciones catódicas que se calcula por los medios 53 de calibración basándose en la tabla corregida.

La figura 6 presenta de manera esquemática una realización del programa informático según la invención. El programa 60 informático comprende una interfaz 61 para los medios de control de proceso (no mostrados) con el fin de accionar el mecanizado de la pieza de trabajo por medio de la aplicación de impulsos unipolares de la polaridad directa. La interfaz 62 está dispuesta para controlar la medición del parámetro operativo, por ejemplo, el potencial de cátodo. Con el fin de realizar un control de este tipo, la interfaz 62 puede estar dispuesta para comunicarse con un osciloscopio digital dispuesto para realizar dicha medición. Entonces se suministran los datos de medición a la unidad 63 de acondicionamiento, dispuesta para verificar si el parámetro operativo no superó un valor preseleccionado. Por ejemplo, la unidad 63 de acondicionamiento puede estar dispuesta para monitorizar un tiempo de procesamiento, un valor real del potencial de cátodo o cualquier otro parámetro adecuado para este fin. En el caso en que la unidad 63 de acondicionamiento detecta que la condición es verdadera, se mide el parámetro operativo, por ejemplo el potencial de cátodo por los medios de sondeo mediante la interfaz 64. Esta operación está seguida por una aplicación de los impulsos de la polaridad inversa, accionados por la unidad 65 de accionamiento. Los parámetros de los impulsos óptimos de la polaridad inversa se toman de la tabla 68 inicial, adquirida según la calibración según la figura 1, almacenándose dicha tabla 68 en la unidad 66 de almacenamiento. A continuación, la medición del valor del potencial de cátodo correspondiente a la superficie de electrodo limpiada se acciona por la interfaz 67 y se almacena el valor correspondiente como un nuevo valor para una altura cero de las deposiciones catódicas en la tabla 69 de calibración corregida en la unidad 66 de almacenamiento. Entonces, se inicia la aplicación de los impulsos de mecanizado en la etapa 61'. La interfaz 62' controla la medición y la monitorización del valor real del potencial de cátodo durante las condiciones operativas. La monitorización se realiza, por ejemplo por la unidad 63' de acondicionamiento, en la que se compara el valor real para el potencial de cátodo con un valor preseleccionado correspondiente a la máxima altura admisible de las deposiciones catódicas. En el caso en que no se alcanza el valor preseleccionado, se acciona la aplicación de los impulsos de mecanizado, si no se acciona la aplicación de los impulsos inversos óptimos por la unidad 65' de accionamiento, en la que se toma la duración del impulso óptimo de la tabla 69 corregida almacenada en la unidad 66 de almacenamiento. Tras la operación de limpieza, el programa vuelve a la etapa 61'.

La figura 7 presenta de manera esquemática una realización de una ventana principal de la interfaz de usuario del programa informático según la invención. La ventana 70 principal comprende un campo 71 dispuesto para llevar a cabo una interconexión digital con un osciloscopio digital dispuesto para monitorizar la evolución de la curva del potencial de cátodo  $\phi$  en los intervalos entre los impulsos de mecanizado. En un determinado momento 72 preseleccionado, preferiblemente que precede directamente a una aplicación de un impulso de mecanizado posterior, se mide el valor real del potencial de cátodo mediante el osciloscopio digital y puede facilitarse en una ventana de texto T para mayor comodidad del usuario. La ventana 70 principal comprende una ventana 73 de control, en la que se emite información de control de proceso relevante. Esta información se adquiere por medio de una interconexión con un sistema de intercambio de datos (no mostrado) de los medios de control de proceso (no mostrados). Por ejemplo, en una subventana 74 puede indicarse el modo de operación (pausa, mecanizado, limpieza). Una subventana 75 puede estar dispuesta para presentar los valores reales de los parámetros operativos, tales como el valor real del potencial de cátodo, el máximo valor admisible del potencial de cátodo y otros datos relevantes. La ventana 70 principal puede estar configurada para comprender además una interfaz 77 gráfica, dispuesta para presentar una salida gráfica del valor real de la altura de las deposiciones catódicas h y los intervalos BP, en los que están aplicándose los impulsos óptimos de la polaridad inversa. De esta manera, un usuario tiene una información precisa sobre los parámetros y las condiciones del proceso electroquímico que está ejecutándose.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para el mecanizado electroquímico de una pieza de trabajo eléctricamente conductora en un electrolito por medio de la aplicación de impulsos eléctricos bipolares entre la pieza de trabajo y un electrodo, alternándose uno o más impulsos de tensión de una polaridad de mecanizado unipolar con impulsos de tensión de una polaridad inversa mientras que se mantiene una separación entre la pieza de trabajo y el electrodo, llenándose dicha separación mediante el electrolito, caracterizándose dicho método porque comprende la etapa de determinar una duración óptima de los impulsos de la polaridad inversa para una eliminación de deposiciones catódicas del electrodo, determinándose dicha duración óptima a partir de una primera calibración llevada a cabo precediendo al mecanizado de la pieza de trabajo y una segunda calibración llevada a cabo durante el mecanizado de la pieza de trabajo, en el que la primera calibración comprende determinar una dependencia entre un parámetro operativo que tiene un intervalo de valores correspondiente a un intervalo de alturas de las deposiciones catódicas generadas en una superficie metálica inicialmente limpia y un intervalo de duraciones de impulso de un impulso adecuado de la polaridad inversa necesario para eliminar las deposiciones catódicas de dicha superficie, en el que la primera calibración comprende las etapas de:
- realizar un mecanizado de un conjunto de muestras con impulsos de mecanizado unipolares con el fin de producir un intervalo de alturas de las deposiciones catódicas;
  - aplicar un impulso de la polaridad inversa que tiene una duración de impulso por muestra con el fin de eliminar las deposiciones catódicas producidas;
  - realizar una calibración de una dependencia entre la altura de las deposiciones catódicas y la duración de los impulsos de la polaridad inversa requeridos para eliminar dichas deposiciones catódicas producidas de las muestras;
- y en el que la segunda calibración comprende las etapas de:
- realizar un mecanizado de la pieza de trabajo mediante la aplicación de uno o más impulsos de la polaridad de mecanizado unipolar hasta que se satisface una condición definida a priori, dando como resultado dicho mecanizado una primera altura de la deposición catódica;
  - realizar una medición de un primer valor del parámetro operativo representativo de la primera altura de la deposición catódica;
  - realizar una aplicación de un impulso de la polaridad inversa correspondiente a la primera altura de la deposición catódica, dando como resultado dicha aplicación un estado limpiado de la superficie del electrodo, determinándose parámetros de dicho impulso de la polaridad inversa a partir de la primera calibración;
  - realizar una medición de un segundo valor del parámetro operativo representativo del estado limpiado de la superficie del electrodo;
  - realizar una nueva calibración de la dependencia entre el parámetro operativo y la altura de las deposiciones catódicas establecida durante la primera calibración basándose en el primer valor y el segundo valor del parámetro operativo.
2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque se selecciona un potencial de cátodo como el parámetro operativo.
3. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque en una zona, correspondiente a un intervalo entre los impulsos de tensión de mecanizado unipolares, se deriva un área bajo una curva del potencial de electrodo, seleccionándose dicha área como el parámetro operativo.
4. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque para intervalos cortos entre impulsos de tensión de mecanizado unipolares se deriva una pendiente de la curva del potencial de electrodo en un intervalo entre los impulsos de tensión de mecanizado unipolares, seleccionándose dicha pendiente como el parámetro operativo.
5. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque el valor absoluto del primer armónico de la transformada de Fourier de un impulso de potencial de cátodo se selecciona como el parámetro operativo.



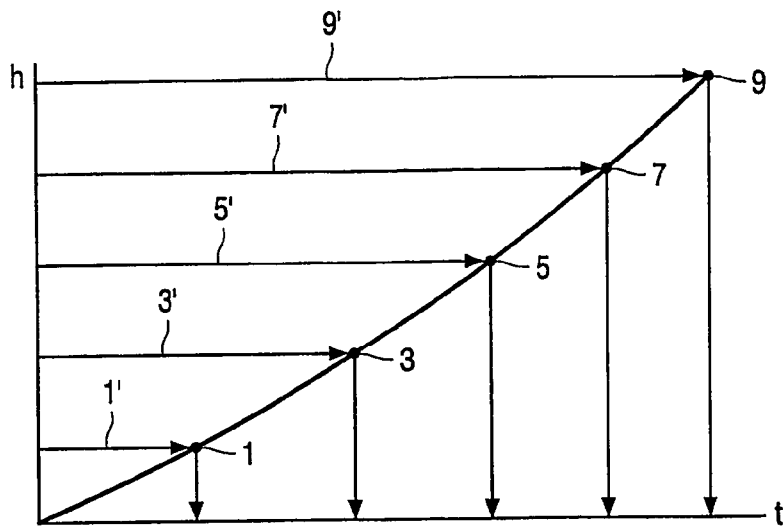


FIG. 1

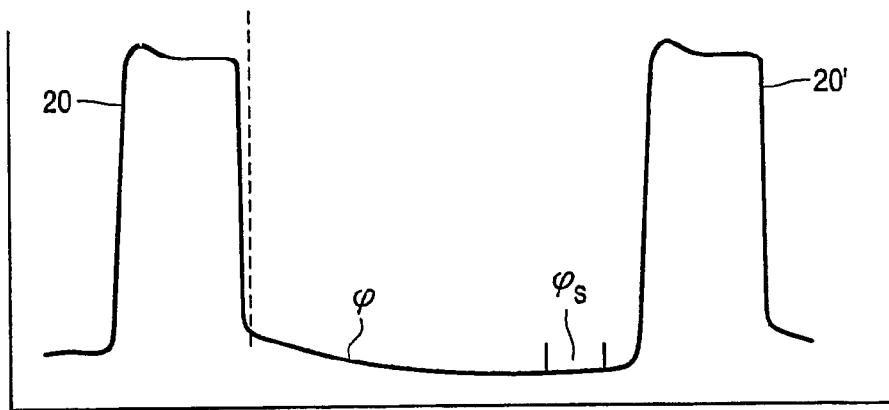


FIG. 2

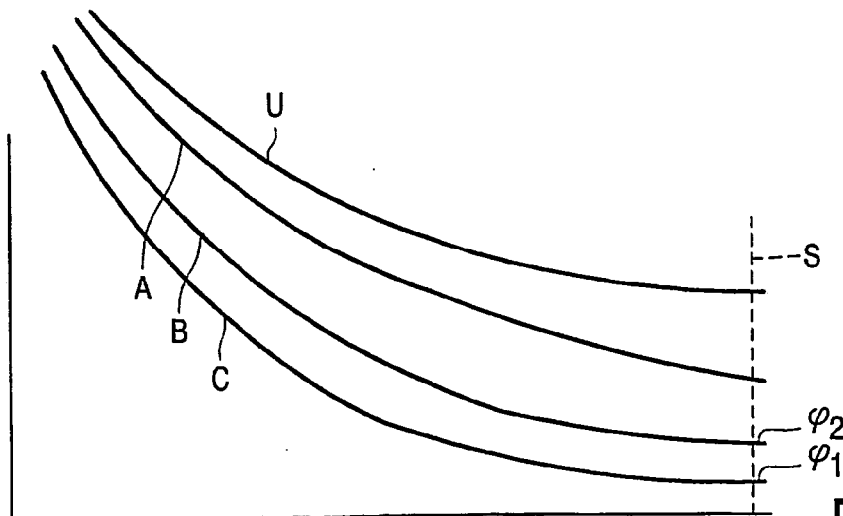


FIG. 3

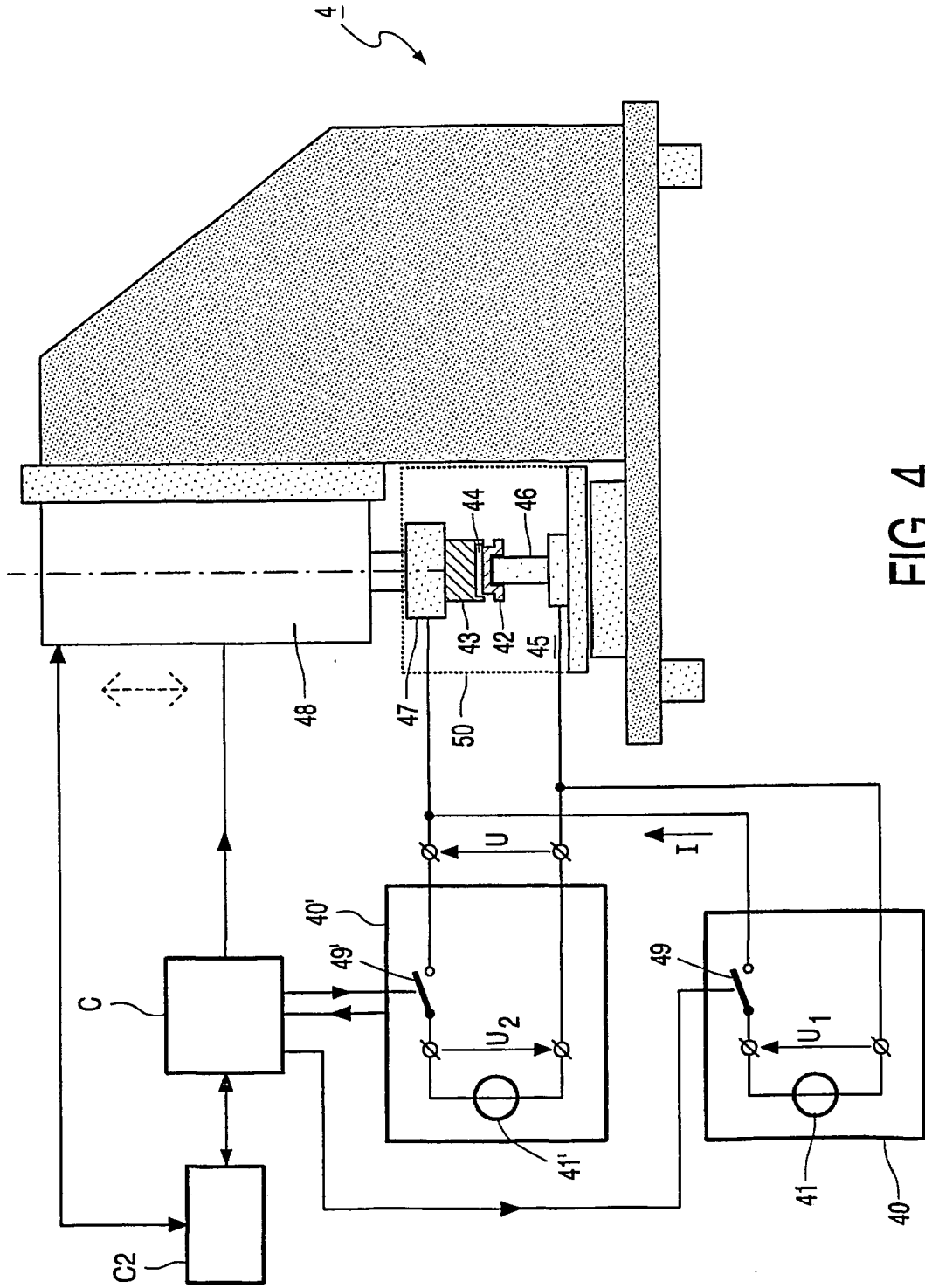


FIG. 4

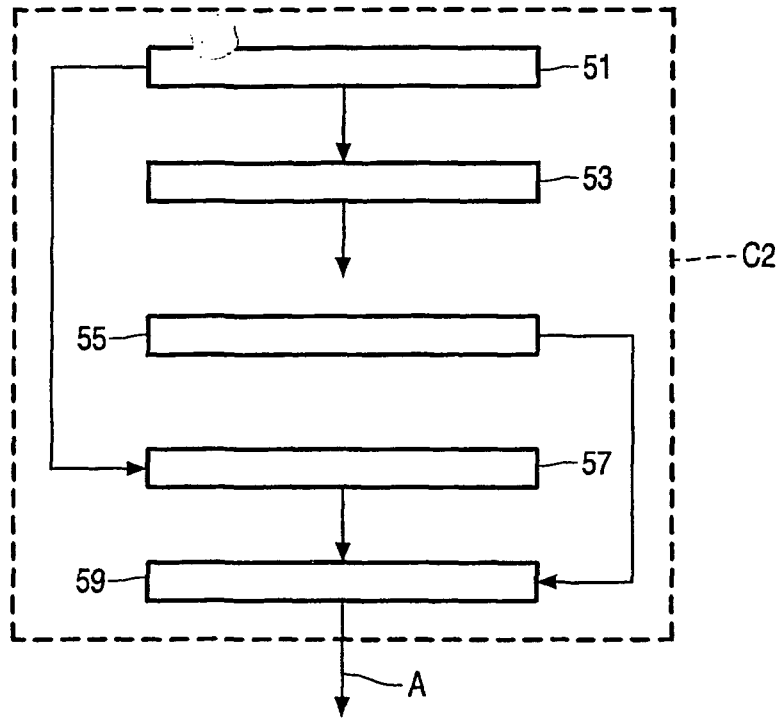


FIG. 5

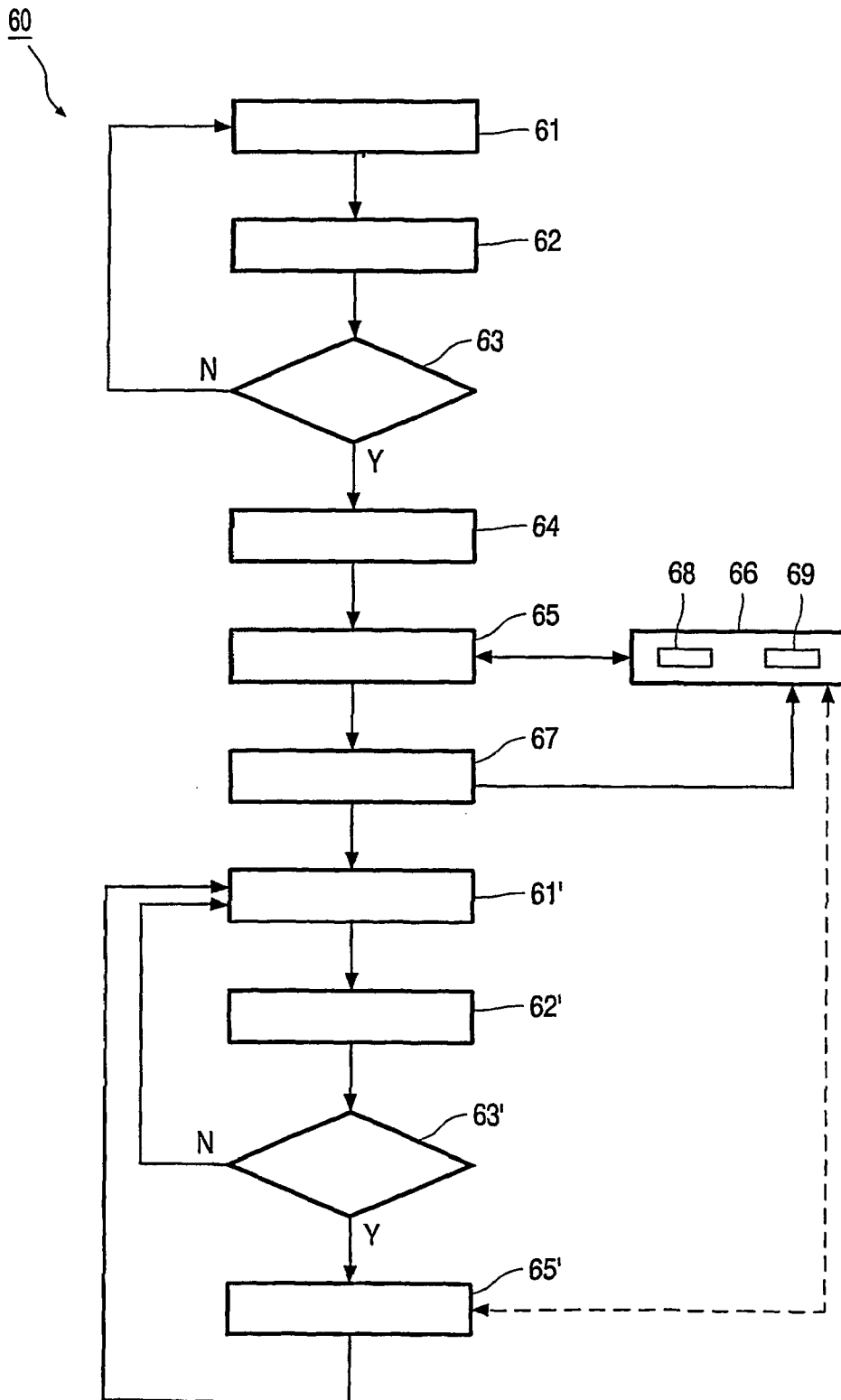


FIG. 6

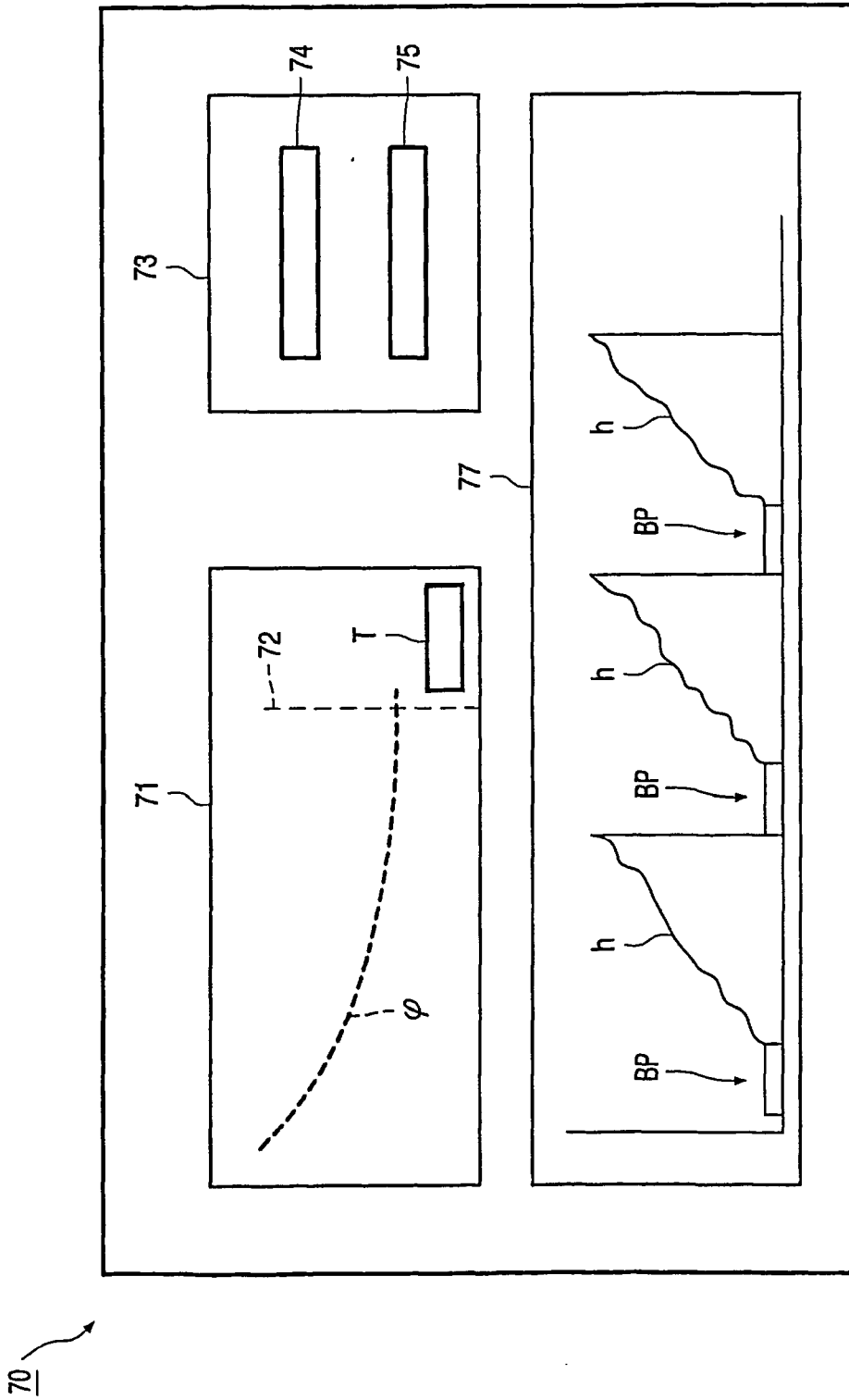


FIG. 7