

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 618 487**

51 Int. Cl.:

B21B 37/42 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.03.2013** **E 13160822 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.12.2016** **EP 2783765**

54 Título: **Procedimiento y sistema de control para ajustar el control de planicidad en un laminador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.06.2017

73 Titular/es:

ABB SCHWEIZ AG (100.0%)
Brown Boveri Strasse 6
5400 Baden, CH

72 Inventor/es:

MODEN, PER-ERIK

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 618 487 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

Procedimiento y sistema de control para ajustar el control de planicidad en un laminador

5 Campo técnico

La presente divulgación se refiere, en general, al control del laminado de una banda en un laminador, y en particular a un procedimiento para ajustar el control de planicidad para laminar una banda, y a un sistema de control y un programa informático para llevar a cabo el procedimiento.

10

Antecedentes

Bandas tales como bandas de acero, o bandas hechas con otros metales, pueden someterse a un proceso de reducción de grosor, por ejemplo, mediante laminado en frío o laminado en caliente en un laminador. La pieza de trabajo, es decir, la banda, se desenrolla en una desbobinadora, se procesa en el laminador y se enrolla en una bobinadora.

15

Un laminador comprende rodillos, donde un conjunto de rodillos está dispuesto por encima de la banda y otro conjunto de rodillos está dispuesto por debajo de la banda cuando la banda pasa por el laminador. El laminador está dispuesto para recibir la banda entre dos rodillos de trabajo que forman un espacio entre los mismos. Los rodillos restantes proporcionan un control y presión adicionales a los rodillos de trabajo, controlando así el perfil del espacio entre los rodillos y, por tanto, la planicidad de la banda a medida que pasa por el espacio entre los rodillos.

20

Un tren de laminación comprende, por ejemplo, una pluralidad de rodillos aplicados como capas por encima y por debajo de los rodillos de trabajo. Rodillos de apoyo, es decir, los rodillos superiores de los rodillos dispuestos por encima del espacio entre rodillos y los rodillos inferiores de los rodillos dispuestos por debajo del espacio entre rodillos, pueden estar segmentados. Cada segmento de rodillo puede moverse dentro y fuera del laminador mediante accionadores de corona. El movimiento de los rodillos segmentados se propaga a través de la agrupación de rodillos hacia los rodillos de trabajo para hacer que la banda pase por el espacio entre rodillos. Los rodillos restantes del tren de laminación también pueden accionarse mediante sus accionadores respectivos. Accionadores de curvatura pueden, por ejemplo, proporcionar efectos de curvatura a un rodillo al que están asignados y, de este modo, modificar el perfil del espacio entre rodillos. Rodillos de desplazamiento lateral pueden tener una forma no cilíndrica que modifica el perfil del espacio entre rodillos por medio de un desplazamiento axial de los rodillos de desplazamiento lateral a través de accionadores de desplazamiento lateral.

25

30

35

Normalmente se desea una planicidad uniforme en el ancho de la banda ya que, por ejemplo, puede obtenerse una planicidad no uniforme durante la fabricación de una banda de peor calidad que una banda que tiene un perfil de planicidad esencialmente uniforme. Una banda con una planicidad no uniforme puede, por ejemplo, combarse u ondularse parcialmente. Una planicidad no uniforme también puede provocar fisuras en la banda debido a mayores tensiones generadas de manera local. Por lo tanto, el perfil de planicidad de la banda se mide, por ejemplo, midiendo la fuerza aplicada por la banda a un rodillo de medición, antes de que la banda se enrolle en la bobinadora, donde los datos de planicidad medidos se proporcionan a un sistema de control que controla los accionadores del laminador para controlar el espacio entre rodillos del laminador con el fin de poder obtener una planicidad uniforme en la banda. Para controlar los accionadores, el laminador se modela generalmente mediante una función de respuesta de planicidad para cada uno de los accionadores del laminador. Estos pueden agruparse, por ejemplo, como columnas de una matriz, denominada en ocasiones matriz de laminado, G_m .

40

45

En un laminador que presenta una pluralidad de accionadores, tal como un tren de laminación, un accionador puede tener una dependencia lineal con las respuestas de planicidad. Esto significa que puede haber combinaciones de posiciones de accionador que no afectan a la planicidad de la banda debido a que la respuesta de planicidad combinada proporcionada por los accionadores cancela los efectos de planicidad proporcionados por cada accionador individual. En laminadores en los que puede darse la situación antes descrita, se dice que la matriz de laminado correspondiente es singular. En términos matemáticos, una matriz de laminado singular no tiene un rango completo, es decir, el espacio nulo de la matriz de laminado tiene una dimensión mayor que cero.

50

55

Un enfoque de control clásico utiliza un bucle de control por accionador, donde el vector de error de planicidad está proyectado a un valor por bucle de control. En laminadores que presentan una matriz de laminado singular esto hace que los accionadores se muevan de tal forma que, en algunos casos, la planicidad de la banda no se ve afectada, ya que la proyección del error permite todas las combinaciones posibles de posiciones de accionador. Esto corresponde a un movimiento de accionador en el espacio nulo de la matriz de laminado. Perturbaciones constantes harán que los accionadores se desvíen en direcciones que no afectan directamente a la planicidad. También existe el riesgo de que estos movimientos de los accionadores sean muy exagerados. Estos dos casos de comportamiento no deseado pueden hacer que los accionadores se saturen, pero también provocan una carga y un desgaste innecesarios en los mismos.

60

65

Para abordar este problema, la matriz de laminado G_m puede representarse mediante su descomposición en valores singulares $G_m = U\Sigma V^T$. Los valores singulares de G_m , que forman la diagonal de Σ obtenida a partir de la descomposición en valores singulares, proporcionan información de la magnitud de la respuesta de planicidad proporcionada por cada una de las combinaciones de posiciones de accionador, definidas por los vectores de columna de la matriz ortonormal V con respecto a las formas de planicidad definidas por las columnas de la matriz ortonormal U . Además, la descomposición en valores singulares proporciona información acerca de las posiciones de accionador que no influyen directamente en el perfil de planicidad del espacio entre rodillos, es decir, el espacio nulo.

Parametrizando el error de planicidad usando la respuesta de planicidad en las direcciones que no afectan a la planicidad, y correlacionando las salidas del controlador utilizando solamente las direcciones que no afectan a la planicidad, puede bloquearse el movimiento de los accionadores en direcciones que no afectan a la planicidad. Por tanto, se evitan las combinaciones de posiciones de accionador que no afectan al perfil de planicidad del espacio entre rodillos. Utilizando una descomposición en valores singulares para evitar combinaciones de las posiciones de accionador que no afectan a la planicidad de la banda, no todos los grados de libertad de control estarán disponibles para efectuar el control en el sentido de que algunas combinaciones de las posiciones de accionador no se permitirán. Por lo tanto, el rendimiento del control puede verse afectado. Además, también puede ser difícil ajustar los diferentes bucles de control de manera satisfactoria, ya que cada bucle de control utiliza varios accionadores y, por lo tanto, tienen dinámicas más complejas. El documento EP2505276 aborda estos problemas determinando un error de planicidad ajustado en función del error de planicidad medido y pesos para las posiciones de los accionadores que proporcionan un efecto de planicidad por debajo de un valor umbral. Por tanto, en algunas situaciones, pueden permitirse combinaciones de las posiciones de accionador que corresponden a vectores del espacio nulo del modelo. Por lo tanto, pueden utilizarse todas las combinaciones de posiciones de accionador posibles, es decir, todos los grados de libertad del sistema de control que implementan el procedimiento.

El documento WO 2006/132585 A1 da a conocer una parametrización de error de planicidad específico en un bucle de control para determinar los puntos fijados para minimizar el error de planicidad parametrizado. No se muestra un ajuste del control de planicidad. Aunque el control de planicidad basado en la descomposición en valores singulares es eficiente, es importante ajustar el proceso correctamente con el fin de obtener un control de planicidad satisfactorio.

Resumen

Un objetivo general de la presente divulgación es mejorar el control de planicidad cuando se lamina una banda en un laminador. En particular, es deseable proporcionar un procedimiento y sistema de control para ajustar el control de planicidad.

Por tanto, según un primer aspecto de la presente divulgación se proporciona un procedimiento para ajustar el control de planicidad para laminar una banda en un laminador que comprende cilindros que pueden controlarse mediante una pluralidad de accionadores, laminador que está modelado mediante una matriz de laminado, donde el procedimiento comprende:

- a) obtener una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador,
- b) determinar una matriz de laminado escalada escalando la matriz de laminado en función de las amplitudes de movimiento equivalentes, y
- c) obtener una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada para proporcionar un control de planicidad de la banda mediante los accionadores.

El término 'accionador' se refiere generalmente a un conjunto de accionadores que controlan un rodillo o un segmento de rodillo de un rodillo segmentado, tal como un rodillo de apoyo.

El escalamiento está basado en un parámetro ajustable por el usuario, es decir, la amplitud de movimiento equivalente, que es el grado de movimiento de los accionadores que el ingeniero encargado de la puesta en marcha responsable del ajuste cree oportuno. Este grado de movimiento también puede tener un efecto en la planicidad, más o menos comparable al grado de movimiento de los otros accionadores. La amplitud de movimiento equivalente de cada accionador caracteriza en cierto modo qué proporción del movimiento de los accionadores se considera equivalente, generalmente no en el sentido de que ofrezcan el mismo efecto de planicidad, sino en que sean aceptados por igual por el laminador. Las amplitudes de movimiento equivalentes indican de manera aproximada las amplitudes que se espera que cubran los diferentes accionadores en sus acciones de control habituales y, por tanto, pueden considerarse también amplitudes de control preferidas.

La descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada ofrece valores singulares diferentes a los de la matriz de laminado original y, en particular, diferentes relaciones particulares entre los valores singulares individuales. Esto afecta al número de condición de la parte que no es singular, es decir, las direcciones asociadas a un valor singular que está por encima de un valor umbral predeterminado, e influye en la posibilidad de realizar el control correctamente. Cuando el escalamiento varía y, por consiguiente, la descomposición en valores singulares,

no solo se ven afectos los valores singulares sino también los dos conjuntos de vectores base formados por las columnas de las matrices U y V , respectivamente, en la descomposición $G=U\Sigma V^T$. Esto significa que una combinación diferente de movimientos de accionador se usará para, por ejemplo, la primera dirección, y el error de planicidad correspondiente también será diferente. La influencia en el grado con que se usa cada accionador es, de hecho, un objetivo del ajuste cuando las amplitudes de movimiento equivalentes se usan como parámetros de ajuste.

Por tanto, mediante la presente divulgación, al seleccionarse de manera adecuada el escalamiento de la matriz de laminado puede obtenerse una buena base para el control de planicidad utilizando una descomposición en valores singulares. Además, el procedimiento de ajuste es fácil de aprender por parte de los usuarios y proporciona un ajuste rápido y eficaz tanto en la puesta en marcha como en la prestación de servicios.

Un escalamiento de los accionadores junto con una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado puede aplicarse de manera práctica a una solución de control con un control predictivo de modelo, así como a una solución de control en la que la distribución del error de planicidad con respecto a un controlador por cada accionador está basada en una condición de optimización.

Según una forma de realización, cada amplitud de movimiento equivalente es un elemento de un vector.

Una forma de realización comprende determinar un factor de escala en función de las amplitudes de movimiento equivalentes, donde la etapa b) comprende escalar la matriz de laminado con el factor de escala.

Según una forma de realización, el factor de escala es una matriz diagonal cuya diagonal está formada por una matriz diagonal que presenta como elementos diagonales las amplitudes de movimiento equivalentes.

Según una forma de realización, en la etapa a) el alcance de movimiento equivalente para cada accionador se obtiene a través de una entrada de usuario de cada amplitud de movimiento equivalente.

Una forma de realización comprende d) determinar una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado, de la matriz de laminado escalada, y repetir las etapas a) a d) hasta obtener una relación mínima. Por tanto, el número de condición de la parte no singular puede minimizarse, por lo que puede obtenerse un control más robusto. Si, por ejemplo, el objetivo es controlar correctamente n direcciones diferentes, entonces la relación de los valores singulares σ_1/σ_n no debería ser demasiado grande.

Según una forma de realización, el valor singular más alto es el numerador, y el valor singular mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado es el denominador de la relación.

Según un segundo aspecto, se proporciona un programa informático que comprende componentes ejecutables por ordenador que, cuando se cargan en un sistema de procesamiento de un sistema de control, realizan las etapas del primer aspecto. El programa informático puede almacenarse, por ejemplo, en una memoria o en otros medios legibles por ordenador, tal como software.

Según un tercer aspecto de la presente divulgación se proporciona un sistema de control para proporcionar un control de planicidad para laminar una banda en un laminador que comprende rodillos que pueden controlarse mediante una pluralidad de accionadores, sistema de control que utiliza una matriz de laminado para modelar el laminador, donde el sistema de control comprende: un sistema de procesamiento dispuesto para: obtener una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador; determinar una matriz de laminado escalada escalando la matriz de laminado en función de las amplitudes de movimiento equivalentes; y obtener una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada para proporcionar un control de planicidad de la banda mediante los accionadores.

Según una forma de realización, cada amplitud de movimiento equivalente es un elemento de un vector.

Según una forma de realización, el sistema de procesamiento está dispuesto para determinar un factor de escala basándose en las amplitudes de movimiento equivalentes, y para escalar la matriz de laminado con el factor de escala.

Según una forma de realización, el factor de escala es una matriz diagonal que presenta como elementos diagonales las amplitudes de movimiento equivalentes.

Según una forma de realización, el sistema de procesamiento está dispuesto para obtener cada amplitud de movimiento equivalente a partir de una entrada de usuario.

Según una forma de realización, el sistema de procesamiento está dispuesto para determinar una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad

predeterminado, de la matriz de laminado escalada, donde el sistema de procesamiento está dispuesto para repetir las siguientes etapas: obtener una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador, determinar una matriz de laminado escalada escalando la matriz de laminado en función de las amplitudes de movimiento equivalentes, obtener una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada para proporcionar un control de planicidad de la banda mediante los accionadores, y determinar una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado hasta obtener una relación mínima.

Según una forma de realización, el valor singular más alto es el numerador, y el valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado es el denominador de la relación.

Características y ventajas adicionales se darán a conocer posteriormente.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirá la invención y las características de la misma mediante ejemplos no limitativos, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la Fig. 1 es una vista en perspectiva de un ejemplo de un tren de laminación;
 la Fig. 2 es un diagrama de bloques de un sistema de control;
 la Fig. 3a es un ejemplo de una interfaz de usuario para ajustar el control de planicidad en un tren de laminación;
 la Fig. 3b es un ejemplo de una ventana de amplitudes de movimiento equivalentes de la interfaz de usuario de la Fig. 3a para seleccionar amplitudes de movimiento de accionador; y
 la Fig. 4 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para ajustar el control de planicidad para laminar una banda en un laminador que comprende una pluralidad de rodillos que pueden controlarse mediante accionadores.

Descripción detallada

La Fig. 1 muestra una vista en perspectiva de un ejemplo de una disposición de rodillos 1. La disposición de rodillos 1 ejemplificada comprende un tren de laminación 2, una desbobinadora 3 y una bobinadora 5. El tren de laminación 2, denominado en lo sucesivo laminador 2, puede usarse para laminar materiales duros, por ejemplo para laminar en frío una banda de metal.

Una banda 7 puede desenrollarse de la desbobinadora 3 y enrollarse en la bobinadora 5. La banda 7 se somete a un proceso de reducción de grosor mediante el laminador 2 a medida que la banda 7 se desplaza desde la desbobinadora 3 a la bobinadora 5.

El laminador 2 comprende una pluralidad de rodillos 9-1 y 9-2, que incluyen rodillos de trabajo 19-1 y 19-2, respectivamente. Los rodillos 9-1 forman una agrupación de rodillos superiores por encima de la banda 7. Los rodillos 9-2 forman una agrupación de rodillos inferiores por debajo de la banda 7. El laminador 2 ejemplificado es un laminador de 20 alturas, en el que los rodillos 9-1 y 9-2 están dispuestos en una formación 1-2-3-4 por encima y por debajo de la banda 7, respectivamente. Sin embargo, debe observarse que la presente invención también puede aplicarse a otros tipos de laminadores, tales como laminadores de 6 alturas y de 4 alturas.

Cada rodillo puede accionarse mediante accionadores (no mostrados) con el fin de deformar los rodillos de trabajo 19-1 y 19-2 y ajustar así un espacio entre rodillos 21 que se forma entre los rodillos de trabajo 19-1 y 19-2. El proceso de reducción de grosor de la banda 7 se obtiene cuando la banda pasa por el espacio entre rodillos 21. Por tanto, los rodillos de trabajo 19-1 y 19-2 hacen contacto con la banda 7 cuando la banda 7 recorre el laminador 2.

Cada uno de la pluralidad de rodillos 9-1 y 9-2 comprende rodillos de apoyo, tales como los rodillos de apoyo 11-1, 11-2, 11-3 y 11-4, que forman un conjunto externo de rodillos del laminador 2. Cada rodillo de apoyo está segmentado en una pluralidad de segmentos 13. Cada uno de los segmentos 13 puede controlarse mediante accionadores. Mediante los accionadores, los segmentos 13 pueden acercarse o alejarse de los rodillos de trabajo 19-1, 19-2. El movimiento de los segmentos giratorios 13 se propaga a través de la agrupación de rodillos hacia el rodillo de trabajo 19-1 y/o hacia el rodillo de trabajo 19-2 para hacer que la banda 7 pase por el espacio entre rodillos 21.

Para proporcionar mayor control al proceso de reducción de grosor de la banda 7, los rodillos 9-1 y 9-2 comprenden además rodillos intermedios 15 y 17 dispuestos entre los rodillos de trabajo 19-1, 19-2 y los rodillos de apoyo 11-1, 11-2, 11-3, 11-4. Los rodillos intermedios 15 y 17 pueden, por ejemplo, presentar accionadores de curvatura y/o accionadores de desplazamiento lateral, respectivamente.

La disposición de rodillos 1 comprende además un dispositivo de medición 23, ejemplificado en el presente documento mediante un rodillo de medición. El dispositivo de medición 23 presenta una extensión axial que es más ancha que la anchura de la banda 7 para poder medir fuerzas a lo largo de la anchura de la banda 7.

5 El dispositivo de medición 23 comprende una pluralidad de sensores. Por ejemplo, los sensores pueden estar distribuidos en aberturas en la superficie periférica del dispositivo de medición para detectar las fuerzas aplicadas por la banda al dispositivo de medición. A medida que la banda 7 se desplaza sobre el dispositivo de medición 23 puede obtenerse un perfil de tensión de banda por medio de los sensores. Un perfil de tensión de banda que presenta una distribución de fuerza homogénea indica que la banda presenta una planicidad uniforme a lo largo de su anchura. Un perfil de tensión de banda que no es uniforme indica que la banda tiene una planicidad no uniforme a lo largo de su anchura en la posición medida asociada de la banda.

10 El perfil de tensión de banda medida, convertido en un perfil de planicidad deducido, es proporcionado por el dispositivo de medición 23 como datos de medición a un sistema de control 3.

15 Los datos de medición son procesados por el sistema de control 3 para controlar los rodillos 9-1 y 9-2 mediante los accionadores del laminador 2 para proporcionar de este modo una planicidad uniforme o una planicidad objetivo a lo largo del ancho de la banda 7.

20 La Fig. 2 ilustra un diagrama de bloques esquemático del sistema de control 3. El sistema de control 3 puede ser, por ejemplo, un controlador predictivo de un modelo multivariable o puede comprender un bucle de control para cada accionador formado por respectivos controladores PI.

25 El sistema de control 3 comprende una unidad de entrada/salida (E/S) 3a, un sistema de procesamiento 3b y una memoria 3c. La unidad de E/S 3a está dispuesta para conectarse a la disposición de rodillos que va a controlar. El sistema de control 3 está dispuesto para recibir datos de medición desde un dispositivo de medición a través de la unidad de E/S 3a, y para controlar los accionadores a través de la unidad de E/S 3a. La memoria 3c está dispuesta para almacenar un modelo de la disposición de laminador que el sistema de control 3 tiene previsto controlar, y otros componentes ejecutables por ordenador para ajustar el control de planicidad. El modelo comprende una matriz de laminado G_m . La unidad de E/S 3a también puede estar dispuesta para conectarse a un dispositivo de entrada, tal como un ratón o un teclado, y a un dispositivo de visualización adaptado para mostrar una interfaz de usuario a los usuarios, tales como ingenieros encargados de la puesta en marcha, de manera que el ajuste de los accionadores puede realizarse mediante el sistema de control 3.

35 A continuación se describirá en mayor detalle un procedimiento para ajustar el control de planicidad con referencia a las Fig. 3a-b y 4. La Fig. 3a muestra un ejemplo de una interfaz de usuario 4 en la que una primera ventana 4a muestra cada error de planicidad antes del control E1 medido por los sensores del dispositivo de medición, y cada error de planicidad después del control E2 medido después de haberse iniciado el control del accionador y se haya establecido la respuesta. Según el ejemplo, una segunda ventana 4b muestra los movimientos de accionador de accionadores de corona para obtener los errores de planicidad después del control E2. Una tercera ventana 4c muestra los movimientos de accionador de accionadores combados para obtener los errores de planicidad después del control E2. Una cuarta ventana 4d muestra los movimientos de accionador de accionadores de desplazamiento lateral y oblicuos para obtener los errores de planicidad después del control E2. Además, una ventana de ajuste de accionadores 4e se muestra en la interfaz de usuario 4. Según el ejemplo, un usuario puede seleccionar la ventana de ajuste de accionador 4e con el fin de abrir una ventana de amplitudes de movimiento equivalentes 4f, como se muestra en la Fig. 3b. La ventana de amplitudes de movimiento equivalentes 4f permite a un usuario modificar la amplitud de movimiento equivalente de los accionadores. Una primera columna C1 indica los accionadores del laminador, que según el presente ejemplo tiene once accionadores. Una segunda columna C2 indica las amplitudes de movimiento equivalentes de los accionadores. Un usuario puede seleccionar un valor para cada amplitud de movimiento equivalente. Por tanto, el sistema de control puede recibir entradas de usuario de amplitudes de movimiento equivalentes mediante la entrada de la segunda columna C2. Una tercera columna C3 puede indicar la unidad de cada amplitud de movimiento equivalente, expresada, por ejemplo, en milímetros o en MPa en caso de un accionador hidráulico. Según el ejemplo, una cuarta columna C4 indica qué proporción de la amplitud total de movimiento de cada accionador se ofrece como amplitud de movimiento equivalente. La amplitud de movimiento equivalente puede corresponder, por ejemplo, al 100% del alcance de movimiento de accionador deseado, es decir, la magnitud de una amplitud deseada de movimiento de accionador permitido, o puede corresponder a, por ejemplo, el 2% o el 1% del alcance de movimiento de accionador deseado.

60 La amplitud de movimiento equivalente de cada accionador caracteriza en cierto modo qué proporción del movimiento de los accionadores se considera equivalente, generalmente no en el sentido de que ofrezcan el mismo efecto de planicidad, sino en que sean aceptados por igual por el laminador. Las amplitudes de movimiento equivalentes indican de manera aproximada las amplitudes que se espera que cubran los diferentes accionadores en sus acciones de control habituales y, por tanto, pueden considerarse también amplitudes de control preferidas. Pero lo que importa en la práctica es únicamente la relación entre las amplitudes de movimiento equivalentes proporcionada a los diferentes accionadores. La amplitud de movimiento equivalente de un accionador puede ser un valor numérico que está basado en la amplitud física real del movimiento permitido de ese accionador. Por medio de

la ventana de amplitudes de movimiento equivalentes 4e, un usuario puede seleccionar las amplitudes de movimiento equivalentes de los accionadores. El usuario puede observar simulaciones del control de error de planicidad en las ventanas 4a a 4d en función de las amplitudes de movimiento equivalentes seleccionadas, antes de decidir si las amplitudes de movimiento equivalentes seleccionadas para los accionadores son aceptables y van a utilizarse para el control de planicidad en el laminador.

La Fig. 4 muestra un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento de ajuste de control de planicidad en mayor detalle. En una etapa a), el sistema de procesamiento 3b obtiene una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador. La amplitud de movimiento equivalente para cada accionador puede obtenerse, por ejemplo, mediante una entrada de usuario a través de la interfaz de usuario 4. Tal entrada de usuario puede realizarse, por ejemplo, a través de la ventana de amplitudes de movimiento equivalentes 4e.

Cada amplitud de movimiento equivalente obtenida es un elemento de un vector p_a . Por tanto, cada elemento del vector p_a está asociado a un accionador respectivo y, por tanto, hay una correspondencia de uno a uno entre los accionadores y las coordenadas del vector.

En una etapa b), el sistema de procesamiento 2b del sistema de control 3 determina una matriz de laminado escalada G_s escalando la matriz de laminado G_m obtenida de la memoria 3c. El escalamiento está basado en las amplitudes de movimiento equivalentes. El escalamiento de la matriz de laminado G_m de la etapa b) puede obtenerse determinando un factor de escala g^{-1} en función de las amplitudes de movimiento equivalentes p_a y escalando la matriz de laminado G_m con el factor de escala g^{-1} . Normalmente, el escalamiento de la matriz de laminado G_m se obtiene multiplicando el factor de escala g^{-1} por la matriz de laminado G_m . Según una variación, el escalamiento implica multiplicar la matriz de laminado G_m desde la derecha por el factor de escala g^{-1} , es decir, $G_s = G_m * g^{-1}$. El factor de escala g^{-1} puede ser una matriz diagonal cuya diagonal presenta como elementos diagonales la amplitud de movimiento equivalente de cada accionador, como se muestra en la siguiente ecuación (1).

$$g^{-1} = \text{diag}(p_a) \quad (1)$$

El factor de escala g^{-1} es inverso a $g = (\text{diag}(p_a))^{-1}$ y puede obtenerse de la siguiente manera. Denote u_a las posiciones de accionador expresadas en unidades originales. Entonces, los accionadores escalados mediante las amplitudes de movimiento equivalentes p_a pueden expresarse como $u_s = g * u_a$. Entonces se cumplen las siguientes relaciones.

$$G_m * u_a = G_m * g^{-1} * g * u_a = G_m * g^{-1} * u_s = G_s * u_s \quad (2)$$

donde $G_s = G_m * g^{-1}$, es decir, la matriz de laminado G_m se escala mediante g^{-1} .

En una etapa c), el sistema de procesamiento 3b obtiene una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada G_s . La matriz de laminado escalada G_s puede utilizarse para proporcionar control de planicidad de la banda mediante los accionadores. En particular, el ajuste descrito anteriormente puede utilizarse en sistemas de control que comprenden controladores predictivos de modelo multivariable o controladores PI.

La descomposición en valores singulares a partir de la matriz de laminado escalada G_s puede expresarse de la siguiente manera:

$$G_s = U \Sigma V^T = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \approx U_1 \Sigma_1 V_1^T \quad (3)$$

La matriz Σ es diagonal a los valores singulares de G_s en su diagonal, donde el valor singular más alto aparece en primer lugar, y dispuestos en orden decreciente. La matriz U_1 está asociada a los efectos de planicidad proporcionados mediante combinaciones de posiciones de accionador específicas, es decir, configuraciones de accionador, que proporcionan un efecto de planicidad al espacio entre rodillos y que están definidas mediante los vectores de fila de la matriz V_1^T . Cada dirección de la matriz V_1^T , es decir, cada vector de fila, representa por tanto una combinación de posiciones de accionador específica. Los valores singulares que forman la diagonal de la matriz Σ_1 representan la magnitud del efecto de planicidad para las combinaciones de posiciones de accionador de la matriz V_1^T .

La matriz V_2 está asociada a las combinaciones de posiciones de accionador que no proporcionan ningún efecto de planicidad, y los valores singulares que forman la diagonal de la matriz Σ_2 valen cero o casi cero. En particular, los vectores de columna de la matriz V_2 abarcan el espacio nulo de la matriz de laminado G_s . En la práctica, los valores singulares que tienden a cero con fines de control pueden ser aquellos valores singulares que están por debajo de un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado. Como un ejemplo, valores singulares que son un factor de 10^{-3} más pequeños que el valor singular más alto pueden fijarse a cero. Los vectores de columna de V que

corresponden a estos valores singulares se definen, por tanto, para abarcar el espacio nulo de la matriz de laminado G_s .

5 Según una variación del proceso de ajuste, una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado, de la matriz de laminado escalada, se determina en una etapa d) por medio del sistema de procesamiento 3b. Las etapas a) a d) pueden repetirse hasta minimizar la relación. Por tanto, el valor singular más alto es el numerador, y el valor singular que tiene un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado es el denominador de la relación. Esta relación determina el número de condición eficaz, que es la relación entre el valor singular más alto y un valor singular que no está asociado a una dirección singular y que puede ser igual a o mayor que el valor singular más bajo. Por tanto, el valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado puede ser, por ejemplo, el valor singular más bajo de la parte no singular de la matriz Σ . Sin embargo, normalmente el número de condición de la matriz Σ_1 , tomando la relación entre el valor singular más alto y el valor singular más bajo, es muy elevado. Esto significa que debe ajustarse para controlar menos direcciones que un número correspondiente al rango de la matriz de laminado escalada. Por tanto, el valor singular que es mayor que un valor de efecto de planicidad predeterminado puede ser un valor singular que no es el valor singular más bajo de la parte no singular de la matriz Σ . El valor singular que es mayor que un valor de efecto de planicidad predeterminado puede seleccionarse por el usuario, por ejemplo el ingeniero encargado de la puesta en marcha.

20 Como un ejemplo, si la disposición de laminado tiene once accionadores, pero la matriz de laminado solo es de rango ocho, teóricamente es posible controlar ocho direcciones. Pero el número de condición práctico, tomando la relación entre el valor singular más alto y el octavo valor singular, es probablemente muy elevado. Esto significa que debe ajustarse para controlar, por ejemplo, cinco direcciones. Pero la relación entre el primer valor singular y el quinto valor singular dependerá de la matriz de laminado escalada G_s , es decir, del escalamiento del accionador. Minimizando la relación puede obtenerse un número de condición mínimo para la parte no singular de la matriz de laminado escalada G_s , por lo que puede proporcionarse un control más robusto. Por tanto, una matriz de laminado escalada G_s basada en amplitudes de movimiento equivalentes que minimizan el número de condición eficaz puede usarse para el control de la planicidad. Como alternativa, una matriz de laminado escalada G_s basada en un número de condición mínimo puede usarse como una opción inicial que puede ajustarse según las preferencias para el caso particular, por ejemplo a través de la ventana de amplitudes de movimiento equivalentes 4e.

35 Como una alternativa a la etapa d), en una etapa d') puede determinarse una relación entre el valor singular más alto y un valor singular seleccionado por el usuario. Las etapas a) a d') pueden repetirse hasta minimizar la relación. El valor singular seleccionado por el usuario no tiene que ser necesariamente mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado. En cambio, el valor singular seleccionado por el usuario puede ser el valor singular del orden numérico de valores singulares correspondiente al número de direcciones de valores singulares que el usuario, por ejemplo, el ingeniero encargado de la puesta en marcha, considera apropiado para un control eficaz de la planicidad.

40 La matriz de laminado escalada G_s obtenida mediante optimización minimizando la relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado o la relación entre el valor singular más alto y un valor singular seleccionado por el usuario, y/o mediante una selección de usuario del factor de escala, puede almacenarse en la memoria 3c para el control de la planicidad.

45 Como se ha indicado anteriormente, el proceso de ajuste presentado en el presente documento puede utilizarse tanto para sistemas de control PI como para un control predictivo de modelo multivariable que puede implementarse en software, en hardware o en una combinación de los mismos. En el primer caso, el sistema de procesamiento puede determinar un error de planicidad e mediante la diferencia entre la planicidad de referencia de la banda y los datos de medición. El error de planicidad e se ajusta para obtener un error de planicidad ajustado e_p . El error de planicidad ajustado e_p se considera un error de planicidad parametrizado, es decir, el error de planicidad ajustado e_p es una parametrización del error de planicidad e . El error de planicidad ajustado e_p se determina en función de la minimización de, por ejemplo, una de las ecuaciones (4) y (5) descritas posteriormente. La determinación del error de planicidad ajustado e_p se basa en la diferencia entre una correlación del error de planicidad ajustado e_p por medio de la matriz de laminado escalada G_s , y el error de planicidad e , mientras que se añaden costes, es decir, pesos, al error de planicidad ajustado y a las salidas u de la unidad de control y limitaciones respectivas a las salidas de la unidad de control. Tales limitaciones pueden ser, por ejemplo, limitaciones finales, es decir, posiciones mínimas y máximas permitidas o posibles posiciones de los accionadores. Las limitaciones también pueden referirse a limitaciones de velocidad, es decir, la rapidez permitida con que se mueven, o pueden moverse, los accionadores. Además, las limitaciones pueden referirse a diferencias entre posiciones de accionador.

60 La parametrización de los errores puede considerarse una proyección de las muchas mediciones originales sobre exactamente una medición por accionador, que es normalmente un número mucho más bajo.

$$e_p(t) = \arg \left(\min_{u(t) \in \text{permitida}} \left(\|G_m e_p(t) - e(t)\|^2 + e_p(t)^T V Q_e V^T e_p(t) + u(t)^T V Q_u V^T u(t) \right) \right) \quad (4)$$

La variable t de la ecuación (4) indica la dependencia en el tiempo del error de planicidad e, el error de planicidad ajustado e_p , y las salidas u de la unidad de control. La optimización se describe en mayor detalle en el documento EP2505276.

5

$$e_p(t) = \arg \left(\min_{u(t) \in \text{permitida}} \left((G_m e_p(t) - e(t))^T Z (G_m e_p(t) - e(t)) + e_p(t)^T V Q_e V^T e_p(t) + u(t)^T V Q_u V^T u(t) + u(t)^T Q_d u(t) \right) \right) \quad (5)$$

Si se usa un controlador predictivo de modelo multivariable (MPC) en lugar de controladores PI, el controlador MPC también aplica un criterio, pero en ese caso para la determinación directa en cada instante de muestreo de la variable manipulada u(t) que va a enviarse a los accionadores. Este criterio puede formularse como

10

$$u(t) = \arg \left(\min_{u(t) \in \text{permitida}} \sum_{k=t}^{t+H} [\hat{e}(k)^T Q_1 \hat{e}(k) + u(k)^T Q_2 u(k)] \right) \quad (6)$$

donde H es el horizonte y $\hat{e}(k)$ es el error de planicidad predicho en el instante de muestreo k. Además, cuando se usa una solución MPC, la descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada G_s puede usarse para ajustar el control. Puesto que el movimiento de los accionadores en direcciones vinculadas a pequeños valores singulares no es deseable, la matriz de ponderación Q_2 debe elegirse con la ayuda de la descomposición en valores singulares, en lugar de la opción estándar de una matriz diagonal. Con la elección de

15

20

$$Q_2 = V Q_u V^T \quad (7)$$

y una matriz diagonal Q_u , se obtienen parámetros de ajuste asociados a las diferentes direcciones de valores singulares. De manera ventajosa, se seleccionan valores altos de los elementos de Q_u que se asociarán a valores singulares pequeños. Asimismo, Q_1 puede seleccionarse como

25

$$Q_1 = U Q_e U^T \quad (8)$$

para poder fijar pesos en diferentes formas del error de planicidad según los valores singulares. En este caso, con una matriz diagonal Q_y pueden seleccionarse de manera ventajosa valores elevados de los elementos asociados a valores singulares elevados, ya que estos son las formas de error que se desea eliminar generalmente, y valores bajos de los elementos asociados a valores singulares bajos, ya que se considera que son muy difíciles de contrarrestar.

30

35

Los expertos en la técnica deben observar que la presente invención no está limitada a los ejemplos descritos anteriormente. Por el contrario, muchas modificaciones y variaciones son posibles dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para ajustar el control de planicidad para laminar una banda (7) en un laminador (2) que comprende rodillos (9-1, 9-2) que pueden controlarse mediante una pluralidad de accionadores, laminador (2) que está modelado mediante una matriz de laminado, donde el procedimiento comprende:
- 5
- a) obtener una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador,
 b) determinar una matriz de laminado escalada escalando la matriz de laminado en función de las amplitudes de movimiento equivalentes, y
 10 c) obtener una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada para proporcionar un control de planicidad de la banda (7) mediante los accionadores.
2. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que cada amplitud de movimiento equivalente es un elemento de un vector.
- 15
3. El procedimiento según la reivindicación 1 o 2, que comprende determinar un factor de escala en función de las amplitudes de movimiento equivalentes, donde la etapa b) comprende escalar la matriz de laminado con el factor de escala.
- 20
4. El procedimiento según la reivindicación 3, en el que el factor de escala es una matriz diagonal cuya diagonal presenta como elementos diagonales las amplitudes de movimiento equivalentes.
5. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que en la etapa a) la amplitud de movimiento equivalente para cada accionador se obtiene a través de una entrada de usuario de cada amplitud de movimiento equivalente.
- 25
6. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende:
- d) determinar una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado, de la matriz de laminado escalada, y repetir las etapas a) a d) hasta obtener una relación mínima.
- 30
7. El procedimiento según la reivindicación 6, en el que el valor singular más alto es el numerador, y el valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado es el denominador de la relación.
- 35
8. Un programa informático que comprende componentes ejecutables por ordenador que, cuando se cargan en un sistema de procesamiento (3a) de un sistema de control (3), realizan las etapas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.
- 40
9. Un sistema de control (3) que proporciona un control de planicidad para laminar una banda (7) en un laminador (2) que comprende rodillos (9-1, 9-2) que pueden controlarse mediante una pluralidad de accionadores, sistema de control (3) que utiliza una matriz de laminado para modelar el laminador, donde el sistema de control (3) comprende:
- 45 un sistema de procesamiento (3b) dispuesto para:
- obtener una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador,
 determinar una matriz de laminado escalada escalando la matriz de laminado en función de las amplitudes de movimiento equivalentes, y
 50 obtener una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada para proporcionar un control de planicidad de la banda mediante los accionadores.
10. El sistema de control (3) según la reivindicación 9, en el que cada amplitud de movimiento equivalente es un elemento de un vector.
- 55
11. El sistema de control (3) según la reivindicación 9 o 10, en el que el sistema de procesamiento (3b) está dispuesto para determinar un factor de escala basándose en las amplitudes de movimiento equivalentes, y para escalar la matriz de laminado con el factor de escala.
- 60
12. El sistema de control (3) según la reivindicación 11, en el que el factor de escala es una matriz diagonal que presenta como elementos diagonales las amplitudes de movimiento equivalentes.
13. El sistema de control (3) según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que el sistema de procesamiento (3b) está dispuesto para obtener cada amplitud de movimiento equivalente a partir de una entrada de usuario.
- 65
14. El sistema de control (3) según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que el sistema de procesamiento (3b) está dispuesto para determinar una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor

que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado, donde el sistema de procesamiento (3b) está dispuesto para repetir las siguientes etapas:

- 5 obtener una amplitud de movimiento equivalente para cada accionador,
determinar una matriz de laminado escalada escalando la matriz de laminado en función de las amplitudes de movimiento equivalentes para obtener una descomposición en valores singulares de la matriz de laminado escalada para proporcionar un control de planicidad de la banda mediante los accionadores, y
determinar una relación entre el valor singular más alto y un valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado hasta obtener una relación mínima.
- 10 15. El sistema de control (3) según la reivindicación 14, en el que el valor singular más alto es el numerador, y el valor singular que es mayor que un valor umbral de efecto de planicidad predeterminado es el denominador de la relación.

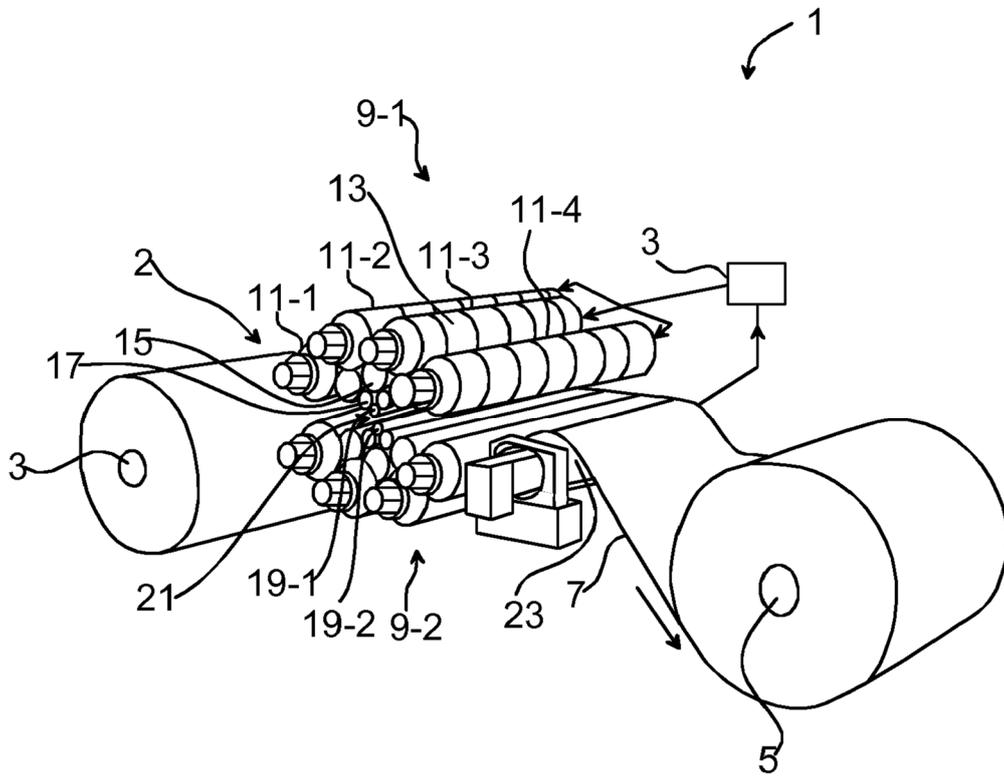


Fig. 1

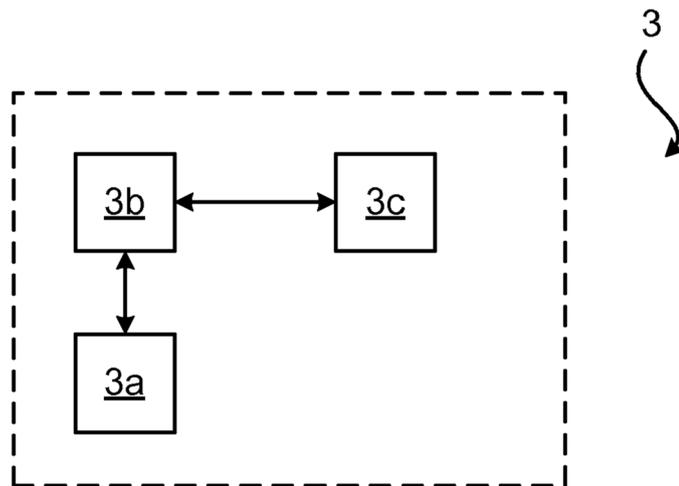


Fig. 2

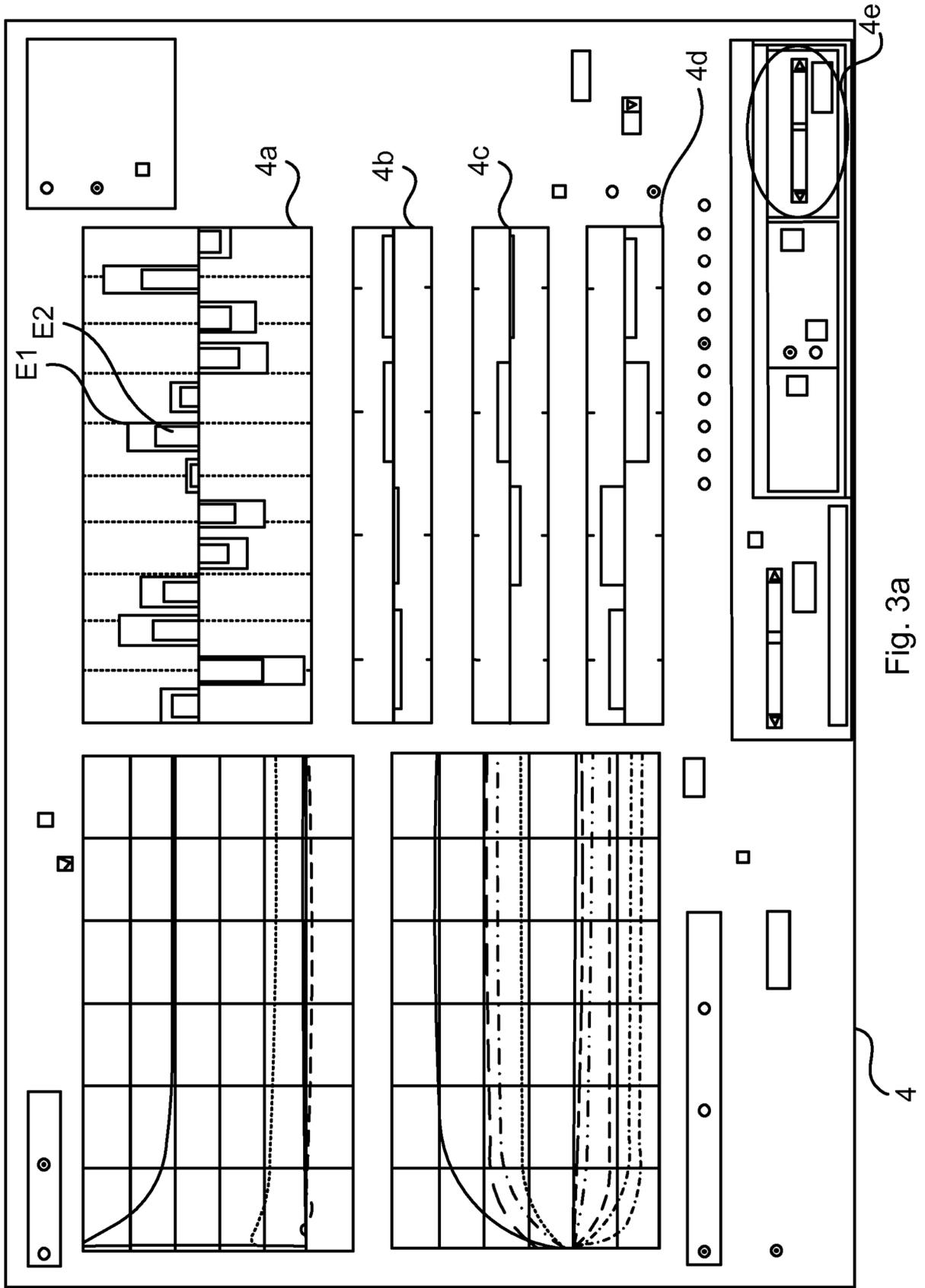


Fig. 3a

