

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 028 932**

51 Int. Cl.:

G05B 19/406 (2006.01)

B23F 23/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.09.2020** **PCT/EP2020/074828**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.03.2021** **WO21048027**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.09.2020** **E 20764426 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.04.2025** **EP 4028839**

54 Título: **Control de proceso automático en una máquina de tallado de engranajes**

30 Prioridad:

13.09.2019 CH 11582019

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.06.2025

73 Titular/es:

REISHAUER AG (100.00%)
Industriestrasse 36
8304 Wallisellen, CH

72 Inventor/es:

DIETZ, CHRISTIAN

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 3 028 932 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

Control de proceso automático en una máquina de tallado de engranajes

5 **Sector de la técnica**

La presente invención se refiere a un procedimiento para supervisar una máquina para acabar engranajes, en particular una máquina para realizar un mecanizado por generación. La invención se refiere además a una máquina de acabado configurada para aplicar tal procedimiento, a un programa informático para aplicar tal procedimiento y a un medio legible por computadora que comprende tal programa informático.

Antecedentes de la invención

El mecanizado fino duro (acabado duro) de engranajes premecanizados es un procedimiento muy demandante, en el que incluso la más ligera desviación de las especificaciones de proceso puede ocasionar que las piezas de trabajo mecanizadas tengan que considerarse descartes ("piezas NIO", en donde NIO (Not In Order) significa "no aptas"). Este problema puede ilustrarse particularmente bien por el ejemplo de la rectificación por generación continua, pero también se aplica del mismo modo a otros procedimientos de acabado por generación tales como rectificación por generación de flancos individuales, bruido de engranajes por generación o biselado duro por generación. En cierta menor medida, sin embargo, surgen problemas similares también para procedimientos que no son por generación, como el rectificado de perfiles continuo o discontinuo.

En la rectificación por generación continua, una pieza en bruto de engranaje premecanizada se mecaniza en acoplamiento rodante con una muela abrasiva con perfil helicoidal (tornillo abrasivo). La rectificación por generación es un procedimiento de mecanizado generador muy demandante, el cual se basa en una gran cantidad de movimientos individuales sincronizados de alta precisión y es influido por muchas condiciones límite. Puede encontrarse información sobre los aspectos básicos de la rectificación por generación continua, por ejemplo, en el libro de H. Schriefer *et al.*, "Rectificación continua de engranajes por generación" ("Continuous Generating Gear Grinding"), publicado por Reishauer AG, Wallisellen 2010, ISN 978-3-033-02535-6, en el capítulo 2.3 ("Métodos básicos de rectificación por generación" ("Basic Methods of Generating Grinding")), páginas 121 a 129.

En teoría, la forma de flanco de diente en la rectificación por generación continua se determina únicamente por la forma del perfil reavivado del tornillo abrasivo y los datos de configuración de la máquina. Sin embargo, en la práctica, ocurren desviaciones de la condición ideal en la producción automatizada, las cuales pueden tener una influencia decisiva en los resultados de la rectificación.

Tradicionalmente, la calidad de los engranajes producidos por el procedimiento de rectificación por generación únicamente se evalúa después del fin del proceso de mecanizado mediante mediciones de engranajes fuera de la máquina ("fuera de línea") utilizando una gran cantidad de variables medidas. Existen a este respecto diversas normas que prescriben cómo deben medirse los engranajes y como deben verificarse si los resultados de la medición se encuentran dentro o fuera de una especificación de tolerancia. Un resumen de tales mediciones de engranajes puede encontrarse, por ejemplo, en el libro mencionado con anterioridad de Schriefer *et al.* en el capítulo 3 ("Control de calidad en la rectificación continua de engranajes por generación" ("Quality Assurance in Continuous Generating Gear Grinding")) en las páginas 155 a 200.

Según el estado de la técnica, se sabe cómo realizar correcciones en la máquina con base en las mediciones de engranajes con objeto de eliminar los errores detectados de mecanización. En el libro mencionado con anterioridad de Schriefer *et al.*, esto se describe en el capítulo 6.10 ("Análisis y eliminación de desviaciones de dientes de engranaje" ("Analysing and Eliminating Gear Tooth Deviations")) en las páginas 542 a 551.

Dado que, por razones de tiempo y costes, solo se realizan habitualmente verificaciones aleatorias durante la revisión de engranajes, los errores de mecanizado a menudo se detectan muy tarde. Esto puede ocasionar que, bajo determinadas circunstancias, piezas considerables de un lote de producción tengan que desecharse como piezas NIO. Por lo tanto, es deseable detectar errores de mecanizado tan pronto como sea posible "en línea" durante el mecanizado, idealmente antes de que un error de mecanizado llegue a tal grado que las piezas de trabajo tengan que rechazarse como piezas NIO.

Con este fin, es deseable prever un sistema de supervisión de proceso automatizado, el cual posibilite detectar desviaciones indeseables del proceso, para obtener indicaciones de posibles errores de mecanizado y para cambiar la configuración de la máquina de forma dirigida de modo que se eviten, o al menos se reduzcan, estos errores de mecanizado.

Idealmente, la supervisión de proceso también debe permitir llegar a conclusiones sobre las desviaciones del proceso retrospectivamente si los errores de mecanizado únicamente se detectan con posterioridad, por ejemplo, durante la prueba EOL (EOL = End Of Line = fin de línea).

Hasta ahora, las estrategias adecuadas para la supervisión automatizada del proceso en el mecanizado de engranajes únicamente se conocen de manera rudimentaria a partir del estado de la técnica.

Por ejemplo, a partir de la patente alemana DE 10 2014 015 587 A1 se sabe cómo supervisar los parámetros en una máquina de tallado de engranajes y cómo realizar una revisión de engranajes siempre que determinados parámetros medidos de la máquina se desvíen de los valores nominales.

La presentación de la compañía "NORDMANN Tool Monitoring", con fecha de versión 05.10.2017, consultada el 25/02/2019 desde https://www.nordmann.eu/pdf/presentation/Nordmann_presentation_ENG.pdf, describe diversas medidas para la supervisión de herramientas en máquinas herramienta de arranque de virutas generales (página 3). La presentación muestra ejemplos de aplicaciones en diversos procesos de mecanizado por arranque de virutas, entre los que se incluyen, de forma resumida, unos cuantos ejemplos de procesos relevantes en el mecanizado de engranajes, en particular, fresado por generación (páginas 41 y 42), biselado duro (página 59) y bruñido (página 60). La rectificación por generación continua únicamente se menciona en bordes (por ejemplo, páginas 3 y 61).

También se conocen procedimientos para la supervisión de proceso automático en diversos procesos de mecanizado a partir de los siguientes documentos, entre otros las patentes US 5.070.655, 3.809.970 y 4.894.644, y el documento de Klaus Nordmann, "Supervisión de proceso durante rectificación y reavivado" ("Prozessüberwachung beim Schleifen und Abrichten"), Schleifen + Polieren 05/2004, editorial especializada Moller, Vellbert (DE), páginas 52-56. Sin embargo, aquí también, el acabado de engranajes no se describe detalladamente.

Una dificultad de la supervisión de proceso en el mecanizado de engranajes es el hecho de que las variables medidas supervisadas dependen de manera altamente compleja en una gran cantidad de propiedades geométricas de la herramienta (en el caso de un tornillo abrasivo, por ejemplo, diámetro, módulo, número de vueltas, ángulo de paso, etc.), propiedades geométricas de la pieza de trabajo (por ejemplo, módulo, número de dientes, ángulo helicoidal, etc.) y parámetros de configuración en la máquina (por ejemplo, entrada radial, avance axial, número de revoluciones de los husillos portaherramientas y portapiezas, etc.). Debido a estas diversas y complejas dependencias, por una parte, es extremadamente demandante obtener conclusiones directas a partir de las variables medidas supervisadas acerca de las desviaciones del proceso en concreto y de los errores de mecanización resultantes. Por otra parte, es extremadamente difícil comparar entre sí las variables medidas a partir de diferentes procesos de mecanizado. Un desafío adicional surge al utilizar herramientas que puedan reavivarse. El reavivado hace que el diámetro de la herramienta cambie durante el mecanizado de una serie de piezas de trabajo y, por lo tanto, las condiciones de mecanizado también cambian. Como resultado, las variables medidas supervisadas derivadas de diferentes ciclos de reavivado no pueden compararse directamente entre sí incluso con la misma serie de piezas de trabajo, aunque las demás condiciones sigan siendo las mismas.

Los procedimientos conocidos de supervisión de procesos no tienen en cuenta hasta la fecha suficientemente estas peculiaridades del mecanizado de engranajes.

El documento US20180264613A1 divulga un dispositivo de detección de fallos para una máquina herramienta con un dispositivo de aprendizaje automático para el aprendizaje de datos de forma de onda relativos a una variable física detectada cuando la máquina herramienta funciona con normalidad. El dispositivo de aprendizaje automático observa los datos de forma de onda como una variable de estado para indicar un estado actual y aprende una característica de los datos de forma de onda utilizando el estado observado.

El documento JPH04106145U divulga un dispositivo de detección de errores para una máquina herramienta. Las señales de dos o más sensores se procesan estadísticamente y se almacenan las variables de estado en el estado normal. Sobre esta base, se crea una regla de diagnóstico de errores. Las señales de los sensores se supervisan continuamente durante el funcionamiento, y se emite una señal de predicción de errores sobre la base de la regla de diagnóstico de errores.

Explicación de la invención

Un objetivo de la presente invención es especificar un procedimiento para supervisar procesos en el mecanizado de engranajes, que posibilite detectar desviaciones del proceso y contrarrestarlas de manera dirigida. El procedimiento debe ser particularmente adecuado para su uso con herramientas que puedan reavivarse.

El objetivo se logra mediante un procedimiento según la reivindicación 1. Se especifican formas de realización adicionales en las reivindicaciones dependientes.

Se especifica un procedimiento para supervisar un proceso de mecanizado en el cual los flancos de diente de las piezas de trabajo preentendidas se mecanizan en una máquina de acabado. La máquina de acabado presenta un husillo portaherramientas para accionar en rotación una herramienta de acabado alrededor de un eje de herramienta y un husillo portapiezas para accionar en rotación una pieza de trabajo preentendida. El procedimiento comprende:

detectar una pluralidad de valores de medición mientras la herramienta de acabado se encuentra en acoplamiento

de mecanizado con una pieza de trabajo; y
 aplicar una operación de normalización al menos a algunos de los valores de medición o a valores de una variable derivada de los valores de medición, para obtener valores normalizados,
 en donde la operación de normalización depende de al menos un parámetro de proceso, en donde el al menos un parámetro de proceso se selecciona a partir de parámetros geométricos de la herramienta de acabado, parámetros geométricos de la pieza de trabajo y parámetros de configuración de la máquina de acabado.

Por lo tanto, se propone detectar valores de medición en la máquina de acabado y enviar al menos algunos de estos valores de medición o valores derivados de los mismos a una operación de normalización. La operación de normalización tiene en cuenta la influencia de uno o más parámetros de proceso en los valores de medición, en particular parámetros geométricos de la herramienta de acabado (en particular sus dimensiones, específicamente en particular su diámetro exterior), parámetros geométricos de la pieza de trabajo y/o parámetros de configuración de la máquina de acabado (en particular la alimentación radial, el avance axial y número de revoluciones de los husillos portaherramientas y portapiezas). Por ende, los valores normalizados resultantes son independientes de o al menos mucho menos dependientes de los parámetros de proceso mencionados. Gracias a la operación de normalización, los valores normalizados pueden compararse entre diferentes operaciones de mecanizado incluso aunque estos parámetros de proceso difieran.

Los valores de medición comprenden valores de un indicador de potencia, el cual indica el consumo de potencia actual del husillo portaherramientas durante el mecanizado de los flancos de diente de la pieza de trabajo. En particular, el indicador de potencia detectado puede ser una medida del consumo de corriente del husillo portaherramientas. Tal indicador de potencia se ve influido particularmente por los parámetros mencionados. Por lo tanto, es particularmente ventajoso aplicar la operación de normalización a los valores del indicador de potencia o a una variable derivada de los mismos.

La operación de normalización preferiblemente se basa en un modelo que describe una dependencia prevista de los valores de medición en los parámetros mencionados. El modelo describe la dependencia de la potencia del proceso (es decir, la potencia mecánica o eléctrica requerida para el proceso de mecanizado realizado) en los parámetros mencionados. El modelo de la potencia del proceso puede basarse en un modelo de fuerza que describe una dependencia prevista de la fuerza de corte, que actúa en el lugar del contacto entre la herramienta de acabado y la pieza de trabajo, en los parámetros geométricos de la herramienta de acabado, los parámetros geométricos de la pieza de trabajo y los parámetros de configuración de la máquina de acabado. El modelo de la potencia del proceso también puede tener en cuenta la longitud de un brazo de palanca que actúa entre el eje de herramienta y un punto de contacto entre la herramienta de acabado y la pieza de trabajo. La longitud del brazo de palanca puede aproximarse en particular por el diámetro exterior de la herramienta de acabado. Además, el modelo de la potencia del proceso puede tener en cuenta el número de revoluciones del husillo portaherramientas.

La operación de normalización puede comprender, por ejemplo, una multiplicación de los valores de medición detectados o variables derivadas de los mismos por un factor de normalización. Sin embargo, también son concebibles operaciones de normalización más complejas. Si los valores de medición incluyen los valores de un indicador de potencia, el factor de normalización puede ser, en particular, una variable de potencia inversa calculada con base en el modelo de la potencia del proceso para la presente situación de mecanizado concreta o una variable derivada de la misma.

La operación de normalización preferiblemente se aplica directamente a los valores de medición detectados, dado el caso, tras un filtrado. La operación de normalización se realiza ventajosamente en tiempo real, es decir, durante el proceso de mecanizado, en particular durante el mecanizado de la pieza de trabajo respectiva, es decir, mientras la herramienta de acabado aún se encuentra en acoplamiento de mecanizado con la pieza de trabajo. Esto significa que los valores normalizados se encuentran disponibles inmediatamente durante el proceso de mecanizado y pueden utilizarse en tiempo real para supervisar el proceso de mecanizado.

En algunas formas de realización, los valores normalizados se analizan en tiempo real con objeto de determinar desviaciones del proceso inadmisibles durante el proceso de mecanizado. Esto posibilita identificar piezas de trabajo para las cual se ha determinado una desviación del proceso inadmisible inmediatamente después de su mecanizado y, dado el caso, extraerlas del lote de piezas de trabajo para un tratamiento independiente. Por ejemplo, estas piezas de trabajo pueden someterse a una medición independiente o descartarse directamente como piezas NIO.

Alternativa o adicionalmente, el procedimiento comprende el cálculo de parámetros característicos del proceso de mecanizado a partir de los valores de medición o valores derivados de los mismos. El cálculo de parámetros característicos a partir de los valores de medición o valores derivados de los mismos es ventajoso independientemente de si se realiza una operación de normalización como parte del procedimiento. En algunas formas de realización, al menos uno de los parámetros característicos es un parámetro característico normalizado, es decir, en algún punto durante el cálculo del parámetro característico, se aplica la operación de normalización. Esto puede realizarse al calcular el parámetro característico a partir de valores de medición normalizados. Esto también puede realizarse al aplicar la operación de normalización únicamente a un resultado intermedio (es decir, a una variable derivada de los valores de medición) cuando se calcula el parámetro característico.

Al menos uno de los parámetros característicos es preferiblemente específico del proceso de mecanizado. Por lo tanto, es preferiblemente no sólo una variable estadística tal como un valor medio, una desviación estándar, etc., que puede formarse independientemente del proceso de mecanizado en concreto, sino un parámetro característico que tiene en cuenta las características del proceso de mecanizado en concreto.

Preferiblemente, al menos uno de los parámetros característicos se correlaciona con un error de mecanizado predefinido de la pieza de trabajo. En particular, es ventajoso que exista una relación univoca entre el parámetro característico y la variable del error de mecanizado, especialmente una simple proporcionalidad. Esto posibilita obtener información inmediata acerca de la generación de un error de mecanizado específico al supervisar el parámetro característico para diferentes piezas de trabajo. Esto permite incluso que operarios no experimentados interpreten correctamente los parámetros característicos y que emprendan una acción correctiva.

Se producen ventajas particulares cuando los parámetros característicos se relacionan directamente con los resultados de las mediciones de engranajes. Con este fin, el procedimiento puede comprender:

realizar una medición de engranajes para piezas de trabajo seleccionadas con objeto de determinar al menos una variable medida de engranaje por pieza de trabajo que caracterice el error de mecanizado predefinido; y
determinar parámetros de correlación que caractericen la correlación del al menos un parámetro característico con la al menos una variable medida de engranaje.

El cálculo de al menos uno de los parámetros característicos puede comprender, en particular, un análisis espectral de valores de medición, en particular de los valores del indicador de potencia (preferiblemente normalizados) y/o de valores de un sensor de aceleración. En particular, a este respecto se evalúan preferiblemente componentes espectrales en múltiplos del número de revoluciones de la herramienta y/o del número de revoluciones de la pieza de trabajo. De esta manera, el cálculo del parámetro característico correspondiente es específico del proceso de mecanizado. Tal análisis espectral también es ventajoso si no se realiza operación de normalización alguna, como puede ser el caso, por ejemplo, con valores provenientes de un sensor de aceleración.

Si el proceso de acabado es un proceso por generación en el cual la herramienta de acabado y la pieza de trabajo se encuentran en acoplamiento de rodadura, en particular un proceso de rectificación por generación, resulta ventajoso que los parámetros característicos comprendan al menos una de las siguientes variables:

un indicador de paso total calculado al evaluar una componente espectral de los valores de medición, en particular del indicador de potencia normalizado, al número de revoluciones del husillo portapiezas y correlacionado con un error de paso total de la pieza de trabajo,
un indicador de forma de perfil calculado al evaluar una componente espectral de los valores de medición, en particular de un sensor de aceleración, en la frecuencia de engrane de diente y correlacionado con una desviación de forma de perfil de la pieza de trabajo.

También resulta ventajoso que los parámetros característicos comprendan un indicador de desgaste, en donde el indicador de desgaste se calcula a partir de una componente espectral con filtrado de paso bajo de los valores de medición, en particular del indicador de potencia normalizado, y se correlaciona con un grado de desgaste de la herramienta de acabado.

Resulta ventajoso determinar una desviación del proceso del proceso de mecanizado con respecto a un proceso teórico sobre la base de la curva de al menos uno de los parámetros característicos para una pluralidad de piezas de trabajo. Con este fin, valores seleccionados ventajosamente de un parámetro característico se correlacionan con valores de otro parámetro característico u otra variable del proceso. Ventajosamente, el proceso de mecanizado se ajusta después para reducir la desviación del proceso, o se ajustan los valores de límite, los cuales se utilizan en el contexto del análisis en tiempo real explicado con anterioridad para identificar desviaciones del proceso inadmisibles. La desviación del proceso puede determinarse a este respecto mediante un algoritmo de aprendizaje automático entrenado.

El procedimiento puede comprender almacenar un conjunto de datos en una base de datos, en donde el conjunto de datos comprende un identificador único de la pieza de trabajo, al menos un parámetro de proceso y al menos uno de los parámetros característicos. Además, el procedimiento puede comprender:

recuperar conjuntos de datos para una pluralidad de piezas de trabajo de la base de datos; y
visualizar gráficamente los valores de al menos uno de los parámetros característicos o valores derivados de los mismos para la pluralidad de piezas de trabajo.

Estas etapas pueden realizarse en un navegador web, por ejemplo, porque los requisitos informáticos y de memoria para estas etapas son muy moderados en comparación con el procesamiento de los datos sin procesar.

El procedimiento prevé preferiblemente un recálculo de la operación de normalización siempre que cambie al menos uno de los parámetros de proceso. El recálculo de la operación de normalización preferiblemente implica la aplicación

de dicho modelo con los parámetros de proceso modificados.

El recálculo de la operación de normalización puede basarse en particular en una dimensión modificada de la herramienta de acabado, en particular de su diámetro exterior, y puede comprender una compensación con respecto a la dimensión modificada. Esto es particularmente importante si esta dimensión se modifica durante el mecanizado de una serie de piezas, como es normalmente el caso con las herramientas reavivables. De esta manera, parámetros característicos determinados en diferentes ciclos de reavivado pueden compararse directamente entre sí.

La invención también proporciona una máquina de acabado para el mecanizado de flancos de diente de piezas de trabajo predentadas. Esta presenta: un husillo portaherramientas para accionar en rotación una herramienta de acabado alrededor de un eje de herramienta; un husillo portapiezas para accionar en rotación una pieza de trabajo predentada; un dispositivo de control para controlar un proceso de mecanizado de la pieza de trabajo con la herramienta de acabado; y un dispositivo de supervisión del proceso. El dispositivo de supervisión del proceso está configurado específicamente para aplicar el procedimiento mencionado.

Con este fin, el dispositivo de supervisión del proceso presenta preferiblemente:

- un dispositivo de detección para detectar una pluralidad de valores de medición mientras la herramienta de acabado ese encuentra en acoplamiento de mecanizado con una pieza de trabajo; y
- un dispositivo de normalización para aplicar una operación de normalización al menos a algunos de los valores de medición o a valores de una variable derivada de los valores de medición, con objeto de obtener valores normalizados, en donde la operación de normalización depende al menos de un parámetro de proceso, en donde el al menos un parámetro de proceso se selecciona a partir de parámetros geométricos de la herramienta de acabado, parámetros geométricos de la pieza de trabajo y parámetros de configuración de la máquina de acabado.

Preferiblemente, el dispositivo de normalización está configurado para realizar la operación de normalización en tiempo real mientras la herramienta de acabado se encuentra en acoplamiento de mecanizado con la pieza de trabajo.

En algunas formas de realización, el dispositivo de supervisión del proceso presenta un dispositivo de detección de errores que está configurado para analizar los valores normalizados en tiempo real a fin de detectar desviaciones del proceso inadmisibles.

La máquina de acabado puede presentar un dispositivo de manejo de pieza de trabajo configurado para extraer automáticamente las piezas de trabajo para las cuales se ha determinado una desviación de proceso inadmisible.

En algunas formas de realización, el dispositivo de supervisión del proceso presenta un dispositivo de cálculo de parámetros característicos para calcular parámetros característicos del proceso de mecanizado a partir de los valores de medición o valores derivados de los mismos. El dispositivo de cálculo de parámetros característicos puede estar configurado para realizar un análisis espectral de los valores de medición, de valores derivados de los mismos o de valores normalizados para al menos uno de los parámetros característicos y en particular para evaluar componentes espectrales en múltiplos del número de revoluciones del husillo portaherramientas y/o del husillo portapiezas.

El dispositivo de supervisión del proceso puede presentar un dispositivo de comunicación de datos para transmitir un conjunto de datos a una base de datos, en donde el conjunto de datos comprende un identificador único de la pieza de trabajo, al menos un parámetro de proceso y al menos uno de los parámetros característicos.

El dispositivo de supervisión del proceso puede presentar un dispositivo de determinación de desviación para detectar una desviación de proceso del proceso de mecanizado con respecto a un proceso objetivo con base en valores de al menos uno de los parámetros característicos para una pluralidad de piezas de trabajo. El dispositivo de determinación de desviación puede comprender un dispositivo de procesador programado para ejecutar un algoritmo de aprendizaje automático entrenado a fin de detectar la desviación del proceso.

El dispositivo de supervisión de proceso puede presentar un dispositivo de cálculo de normalización para recalculer la operación de normalización cuando cambia al menos uno de los parámetros de proceso. El dispositivo de cálculo de normalización preferiblemente está configurado para aplicar un modelo al recálculo de la operación de normalización el cual describe una dependencia prevista de los valores de medición en los parámetros de proceso, en particular un modelo de una fuerza de proceso o potencia de proceso. El dispositivo de cálculo de normalización puede estar configurado ventajosamente para realizar una compensación con respecto a una dimensión de la herramienta de acabado, en particular con respecto a su diámetro exterior.

El dispositivo de detección de datos, el dispositivo de normalización, el dispositivo de detección de errores, el dispositivo de cálculo de parámetros característicos, el dispositivo de cálculo de normalización, el dispositivo de determinación de desviación y el dispositivo de comunicación de datos pueden implementarse al menos parcialmente en software para su ejecución en uno o más procesadores del dispositivo de supervisión del proceso.

La presente invención también proporciona un programa informático. El programa informático comprende comandos que hacen que un dispositivo de supervisión del proceso en una máquina de acabado del tipo explicado anteriormente, en particular uno o más procesadores del dispositivo de supervisión del proceso, aplique el procedimiento explicado con anterioridad. El programa informático puede almacenarse en un dispositivo de memoria adecuado, por ejemplo, en una computadora independiente del control de la máquina.

Además, la invención proporciona un medio legible por computadora en el cual se almacena el programa informático. El medio puede ser un medio no volátil, tal como una memoria flash, un CD, un disco duro, etc.

Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describen formas de realización preferidas de la invención con referencia a las figuras, las cuales únicamente tienen propósitos explicativos y no deben interpretarse como limitantes. En las figuras se muestra:

- Fig. 1 una vista esquemática de una máquina de rectificado por generación;
- Fig. 2 un fragmento ampliado de la Fig. 1 en el área II;
- Fig. 3 un fragmento ampliado de la Fig. 1 en el área III;
- Fig. 4 un diagrama con dos curvas del consumo de corriente del husillo portaherramientas durante el mecanizado de un flanco de diente;
- Fig. 5 un diagrama que muestra el valor máximo del consumo de corriente del husillo portaherramientas para una gran cantidad de piezas de trabajo en función del diámetro exterior del tornillo abrasivo; cuadrados: valores no normalizados; cruces: valores normalizados;
- Fig. 6 un espectro del consumo de corriente del husillo portaherramientas durante el mecanizado de una pieza de trabajo;
- Fig. 7 un espectro de los valores de medición provenientes de un sensor de aceleración durante el mecanizado de una pieza de trabajo;
- Fig. 8 un diagrama que muestra los valores de un indicador de paso total para una pluralidad de piezas de trabajo en función de la posición del tornillo abrasivo;
- Fig. 9 un diagrama que muestra los valores de un indicador de forma de perfil para una pluralidad de piezas de trabajo en función de la posición del tornillo abrasivo; triángulos: primer husillo portapiezas; cruces: segundo husillo portapiezas;
- Fig. 10 un diagrama que muestra los valores de un indicador de desgaste para una pluralidad de piezas de trabajo en función de la posición del tornillo abrasivo;
- Fig. 11 un diagrama que muestra los valores de un indicador de vibración para una pluralidad de piezas de trabajo en función de la posición del tornillo abrasivo;
- Fig. 12 un diagrama de flujo de un procedimiento para supervisar el mecanizado de un lote de piezas de trabajo;
- Fig. 13 un diagrama de flujo de un procedimiento para la detección automática y la corrección de desviaciones del proceso;
- Fig. 14 un diagrama de flujo de un procedimiento para la visualización gráfica de parámetros característicos e información derivada de los mismos; y
- Fig. 15 un diagrama de bloques esquemático de unidades funcionales de un dispositivo de supervisión del proceso.

Realización preferente de la invención

Estructura a modo de ejemplo de una máquina de rectificado por generación

La Fig. 1 muestra a modo de ejemplo una máquina rectificadora por generación 1 como ejemplo de máquina de acabado para mecanizar flancos de diente de piezas de trabajo predentadas. La máquina presenta un pedestal de máquina 11, sobre el cual se guía un portaherramientas 12 de manera desplazable a lo largo de una dirección de alimentación radial X. El portaherramientas 12 lleva un carro axial 13, el cual se guía de manera desplazable a lo largo de una dirección de avance Z con respecto al portaherramientas 12. Un cabezal rectificador 14 está montado sobre el carro axial 13, el cual puede hacerse pivotar alrededor de un eje de pivotado (el llamado eje A) que se extiende en paralelo al eje X para adaptarse al ángulo helicoidal del engranaje que va a mecanizarse. El cabezal rectificador 14 lleva a su vez un carro de desplazamiento sobre el cual puede desplazarse un husillo portaherramientas 15 a lo largo de un eje de desplazamiento Y con respecto al cabezal rectificador 14. Una muela abrasiva de perfil helicoidal (tornillo abrasivo) 16 está montada sobre el husillo portaherramientas 15. El tornillo abrasivo 16 es accionado en rotación por el husillo portaherramientas 15 alrededor de un eje de herramienta B.

El pedestal de máquina 11 también lleva una portapiezas de trabajo 20 pivotante en forma de torreta giratoria que puede hacerse pivotar alrededor de un eje C3 entre al menos tres posiciones. Sobre el portapiezas de trabajo 20 están montados diametralmente opuestos entre sí dos portapiezas idénticos, de los cuales en la Fig. 1 solamente es visible un husillo portapiezas 21 con la contrapunta 22 asociada. El husillo portapiezas visible en la Fig. 1 se encuentra en una posición de mecanizado en la cual una pieza de trabajo 23 sujeta sobre él puede mecanizarse con el tornillo abrasivo 16. El otro husillo portapiezas, desplazado 180° y no visible en la Fig. 1, se encuentra en una posición de cambio de pieza de trabajo en la cual una pieza de trabajo ya mecanizada puede extraerse de este husillo y puede sujetarse una nueva pieza en bruto. Un dispositivo de reavivado 30 está montado desplazado 90° con respecto a los

husillos portapiezas.

Todos los ejes accionados de la máquina rectificadora por generación 1 se controlan digitalmente por un control de máquina 40. El control de máquina 40 comprende varios módulos de eje 41, una computadora de control 42 y un panel de control 43. La computadora de control 42 recibe comandos de funcionamiento provenientes del panel de control 43 y señales de sensor provenientes de diversos sensores de la máquina rectificadora por generación 1 y calcula a partir de ello comandos de control para los módulos de eje 41. También entrega parámetros operativos al panel de control 43 para su visualización. Los módulos de eje 41 proporcionan señales de control en sus salidas para un eje de la máquina cada una (es decir, para al menos un actuador que sirva para accionar el eje de máquina en cuestión, tal como un servomotor).

Un dispositivo de supervisión del proceso 44 está conectado a la computadora de control 42. Este dispositivo recibe continuamente una pluralidad de valores de medición provenientes de la computadora de control 42 y, dado el caso, provenientes de otros sensores. Por una parte, el dispositivo de supervisión del proceso 44 analiza continuamente los valores de medición con objeto de detectar errores de mecanizado en una etapa inicial y de extraer las piezas de trabajo afectadas del proceso de mecanizado. Por otra parte, el dispositivo de supervisión del proceso 44 utiliza los valores de medición para calcular diversos parámetros característicos de la última pieza de trabajo mecanizada. Estos procesos se describen más detalladamente a continuación.

El dispositivo de supervisión del proceso 44 transmite un conjunto de datos para cada pieza de trabajo a un servidor de base de datos 46. El conjunto de datos contiene un identificador de pieza de trabajo único, así como también parámetros de proceso seleccionados y parámetros característicos. El servidor de base de datos 46 almacena estos conjuntos de datos en una base de datos de manera tal que para cada pieza de trabajo el conjunto de datos correspondiente pueda ser consultado posteriormente. El servidor de base de datos 46 con la base de datos puede estar dispuesto dentro de la máquina o de manera remota respecto a la máquina. El servidor de base de datos 46 puede conectarse al dispositivo de supervisión del proceso 44 a través de una red, como se indica mediante una nube en la Fig. 1. En particular, el servidor de base de datos 46 puede conectarse al dispositivo de supervisión del proceso 44 a través de una LAN dentro de la máquina u operativamente interna, a través de una WAN o a través de Internet.

Un cliente 48 puede conectarse al servidor de base de datos 46 para recuperar, recibir y evaluar datos provenientes del servidor de base de datos 46. Esta conexión también puede realizarse a través de una red, especialmente a través de una LAN, una WAN o Internet. En particular, el cliente 48 puede incluir un navegador web con el cual puedan visualizarse los datos recibidos y su evaluación. El cliente no necesita cumplir ningún requisito especial en términos de potencia informática. La aplicación de cliente tampoco requiere un alto ancho de banda de red.

En la Fig. 2, el fragmento II de la Fig. 1 se muestra a escala ampliada. Puede verse el husillo portaherramientas 15 con el tornillo abrasivo 16 sujetado sobre él. Una sonda palpadora de medición 17 está montada de manera pivotante en una parte fija del husillo portaherramientas 15. Esta sonda palpadora de medición 17 puede hacerse pivotar entre la posición de medición de la Fig. 2 y una posición de estacionamiento. En la posición de medición, la sonda palpadora de medición 17 puede utilizarse para medir el engranaje de una pieza de trabajo 23 sobre el husillo portapiezas 21 por palpado. Esto se realiza "en línea", es decir, mientras la pieza de trabajo 23 aún se encuentra sobre el husillo portapiezas 21. Esto permite detectar los errores de mecanizado en una etapa inicial. En la posición de estacionamiento, la sonda palpadora de medición 17 se encuentra ubicada en un área donde está protegida contra colisiones con el husillo portapiezas 21, la contrapunta 22, la pieza de trabajo 23 y otros componentes sobre el portapiezas de trabajo 20. Durante el mecanizado de la pieza de trabajo, la sonda palpadora de medición 17 se encuentra en esta posición de estacionamiento.

Una sonda de centrado 24 está dispuesta a un lado de la pieza de trabajo 23 opuesto al tornillo abrasivo 16. La sonda de centrado 24 está diseñada y dispuesta en este ejemplo de acuerdo con la publicación WO 2017/194251 A1. Con respecto al modo de funcionamiento y a la disposición de una sonda de centrado, se remite explícitamente a la publicación mencionada con anterioridad. En particular, la sonda de centrado 24 puede comprender un sensor de proximidad inductivo o capacitivo, como se conoce bien a partir del estado de la técnica. Sin embargo, también es concebible utilizar un sensor óptico para la operación de centrado, el cual, por ejemplo, dirige un haz de luz sobre el engranaje que va a medirse y detecta la luz reflejada desde él, o el cual detecta la interrupción de un haz de luz por el engranaje que va a medirse mientras está girando alrededor del eje de pieza de trabajo C1. Además, es concebible que uno o más sensores adicionales estén dispuestos sobre la sonda de centrado 24, los cuales pueden detectar datos de proceso directamente en la pieza de trabajo, como se sugiere en la patente US 6.577.917 B1, por ejemplo. Tales sensores adicionales podrían incluir, por ejemplo, un segundo sensor de centrado para un segundo engranaje, un sensor de temperatura, un sensor de ruido transmitido por estructura adicional, un sensor neumático, etc.

Además, la Fig. 2 muestra de manera meramente simbólica un sensor de aceleración 18. El sensor de aceleración 18 se utiliza para caracterizar las vibraciones del estator del husillo portaherramientas 15 que se producen durante el proceso de rectificación de una pieza de trabajo y cuando se reaviva el tornillo abrasivo. En realidad, el sensor de aceleración generalmente no se encuentra ubicado en una pieza de carcasa (como se indica en la Fig. 2), sino más bien, por ejemplo, directamente sobre el estator del motor de accionamiento del husillo portaherramientas 15. Son bien conocidos los sensores de aceleración de este tipo.

Una boquilla de refrigerante 19 dirige un chorro de refrigerante hacia la zona de mecanizado. Puede estar previsto un sensor acústico, no mostrado, para distinguir ruidos transmitidos a través de este chorro de refrigerante.

En la Fig. 3, el fragmento III de la Fig. 1 se muestra a escala ampliada. El dispositivo de reavivado 30 es particularmente fácil de reconocer aquí. Un husillo de reavivado 32, sobre el cual se sujeta una herramienta de reavivado 33 en forma de disco, está dispuesto sobre un accionamiento pivotante 31 y puede hacerse pivotar alrededor de un eje C4. En lugar de esto o adicionalmente, también puede estar prevista una herramienta de reavivado fija, en particular un llamado reavivador de cabezas, el cual está destinado para engranar únicamente con las áreas de cabeza de las espiras del tornillo abrasivo con objeto de reavivar estas áreas de cabeza.

Mecanizado de un lote de piezas de trabajo

Con objeto de mecanizar una pieza de trabajo no mecanizada (pieza en bruto), la pieza de trabajo se sujeta mediante un cambiador automático de piezas de trabajo sobre el husillo portapiezas que se encuentra en la posición de cambio de piezas de trabajo. La pieza de trabajo se cambia en paralelo al mecanizado de otra pieza de trabajo en el otro husillo portapiezas que se encuentra en la posición de mecanizado. Cuando se sujeta la nueva pieza de trabajo que va a mecanizarse y se completa el mecanizado de la otra pieza de trabajo, el portapiezas de trabajo 20 se hace pivotar 180° alrededor del eje C3 de manera tal que el husillo con la nueva pieza de trabajo que va a mecanizarse alcanza la posición de mecanizado. Antes y/o durante la operación de pivotado, se realiza una operación de centrado con ayuda de la sonda de centrado correspondiente. Con este fin, el husillo portapiezas 21 se hace girar y la posición de los espacios entre dientes de la pieza de trabajo 23 se mide con ayuda de la sonda de centrado 24. Esta es la base para determinar el ángulo de rodadura. Además, con la ayuda de la sonda de centrado, pueden deducirse indicaciones de variación excesiva en el grosor de diente y otros errores de premeconizado incluso antes de que se inicie el mecanizado.

Cuando el husillo portapiezas que lleva la pieza de trabajo 23 que va a mecanizarse ha alcanzado la posición de mecanizado, la pieza de trabajo 23 se engrana sin colisión con el tornillo abrasivo 16 desplazando el portaherramientas 12 a lo largo del eje X. La pieza de trabajo 23 se mecaniza ahora por el tornillo abrasivo 16 en acoplamiento rodante. Durante el mecanizado, la pieza de trabajo avanza continuamente a lo largo del eje Z con una alimentación X radial constante. Además, el husillo portaherramientas 15 se desplaza lenta y continuamente a lo largo del eje de desplazamiento Y con objeto de permitir que las áreas no utilizadas del tornillo abrasivo 16 se utilicen durante el mecanizado (el llamado movimiento de desplazamiento). Tan pronto como se completa el mecanizado de la pieza de trabajo 23, la pieza de trabajo se mide opcionalmente en línea con ayuda de la sonda palpadora de medición 17.

De manera simultánea al mecanizado de la pieza de trabajo, la pieza de trabajo ya mecanizada se extrae del otro husillo portapiezas y otra pieza en bruto se sujeta sobre este husillo. Cada vez que el portapiezas de trabajo se hace pivotar alrededor del eje C3, los componentes seleccionados se supervisan antes del pivotado o dentro del tiempo de pivotado, es decir, sin afectar al tiempo de ciclo, y el proceso de mecanizado no continúa hasta que se hayan cumplido todos los requisitos definidos.

Si, después de mecanizar una determinada cantidad de piezas de trabajo, el desgaste del tornillo abrasivo 16 ha progresado tanto que el tornillo abrasivo está demasiado desafilado y/o la geometría del flanco es demasiado imprecisa, se reaviva el tornillo abrasivo. Para realizar esto, el portapiezas de trabajo 20 se hace pivotar ±90° de manera tal que el dispositivo de reavivado 30 alcanza una posición en la que se encuentra frente al tornillo abrasivo 16. El tornillo abrasivo 16 se reaviva ahora con la herramienta de reavivado 33.

Detección de datos para la supervisión del proceso

El dispositivo de supervisión del proceso 44 se utiliza para supervisar el proceso de acabado realizado en la máquina de rectificado por generación 1 y, dado el caso, detectar automáticamente y extraer las piezas de trabajo mecanizadas incorrectamente y/o intervenir en el proceso de acabado para corregir las mismas.

Con este fin, el dispositivo de supervisión del proceso 44 recibe, por un lado, una pluralidad de diferentes datos de medición provenientes de la computadora de control 42. Entre estos datos de medición se encuentran datos de sensor detectados directamente por la computadora de control 42 y datos que la computadora de control 42 lee de los módulos de eje 41, por ejemplo, datos que indican el consumo de corriente o potencia en los husillos portaherramientas y portapiezas. Con este fin, el dispositivo de supervisión del proceso puede conectarse a la computadora de control 42 mediante una interfaz conocida, por ejemplo, mediante el estándar Profinet conocido.

El dispositivo de supervisión del proceso 44 también puede tener sus propias entradas de sensor analógicas y/o digitales para recibir directamente datos de sensor provenientes de otros sensores como datos de medición. Los sensores adicionales normalmente son sensores que no se requieren directamente para controlar el proceso de mecanizado propiamente dicho, por ejemplo, sensores de aceleración para detectar vibraciones o sensores de temperatura.

Para la siguiente descripción, se asume a modo de ejemplo que el dispositivo de supervisión del proceso 44 detecta al menos los siguientes datos de medición:

- velocidad angular actual o número de revoluciones del husillo portaherramientas 15
- velocidad angular actual o número de revoluciones de los husillos portapiezas 21
- consumo de corriente o potencia del husillo portaherramientas 15
- aceleraciones lineales de la carcasa del husillo portaherramientas 15 a lo largo de tres direcciones espaciales diferentes

Por supuesto, el dispositivo de supervisión del proceso 44 también puede detectar una pluralidad de otros datos de medición.

El dispositivo de supervisión del proceso 44 detecta continuamente los datos de medición durante el mecanizado de las piezas de trabajo. En particular, el consumo de corriente o potencia del husillo portaherramientas 15 se detecta a una tasa de muestreo suficientemente alta de manera que al menos se encuentre presente un valor para el consumo de potencia durante el mecanizado de cada flanco de diente, preferiblemente, una pluralidad de valores por cada flanco de diente.

Operación de normalización

En el dispositivo de supervisión del proceso 44, una filtración, por ejemplo, una filtración de paso bajo o paso de banda, se aplica, dado el caso, primeramente a los valores detectados del consumo de corriente o potencia del husillo portaherramientas con objeto de reducir el ruido de alta frecuencia. Después, se aplica una operación de normalización a los valores (dado el caso, filtrados). El resultado de la operación de normalización es un indicador de potencia normalizado. El valor del indicador de potencia normalizado se calcula a partir del consumo de corriente o potencia determinado por la multiplicación por un factor de normalización N_p . El factor de normalización tiene en cuenta parámetros geométricos de la herramienta de acabado, parámetros geométricos de la pieza de trabajo y datos de configuración de la máquina de acabado, tales como número de revoluciones del husillo portaherramientas, alimentación radial y avance axial por revolución de la pieza de trabajo, así como también las condiciones de acoplamiento resultantes entre la herramienta y la pieza de trabajo.

Esto se basa en las siguientes consideraciones. El consumo de corriente o potencia del husillo portapiezas depende en gran medida de parámetros geométricos de la herramienta de acabado, parámetros geométricos de la pieza de trabajo y datos de configuración de la máquina de acabado. Por ejemplo, un tornillo abrasivo con un diámetro más grande requiere un momento de torsión más grande para condiciones de mecanizado por lo demás idénticas debido al brazo de palanca efectivo más largo y, por lo tanto, se espera un mayor consumo de corriente que para un tornillo abrasivo con un menor diámetro. También, por ejemplo, para una velocidad de avance axial más alta o una alimentación radial más grande en condiciones por lo demás idénticas, también se espera un consumo de corriente correspondientemente más grande del husillo portaherramientas, al igual que para un número de revoluciones más alto. El factor de normalización tiene en cuenta tales influencias. Consecuentemente, el indicador de potencia normalizado generalmente no dependerá de tales influencias en mayor o en considerablemente menor medida que el caso del consumo de corriente o potencia detectado directamente. Como estas influencias ya se tienen en cuenta en el cálculo del indicador de potencia normalizado, las desviaciones derivadas de un proceso teórico pueden detectarse con mucha más facilidad utilizando el indicador de potencia normalizado que lo que sería el caso con el consumo de corriente o potencia medido directamente.

Esto se explica más detalladamente con referencia a la figura 4. La figura 4 muestra 2 típicas curvas 61, 62 del consumo de corriente del husillo portaherramientas durante el proceso de rectificación por generación de un flanco de diente individual. La curva 61 se midió para una alimentación radial relativamente grande y la curva 62 para una alimentación radial mucho menor, con condiciones de mecanizado por lo demás idénticas. Ambas curvas tienen una forma similar: después de una fase de subida, la corriente adopta un valor prácticamente constante antes de caer nuevamente en una fase de descenso. Sin embargo, difieren enormemente en su amplitud de corriente.

En el marco de la supervisión del proceso, la curva temporal del consumo de corriente se analiza continuamente con objeto de detectar desviaciones del proceso inadmisibles. Esto puede realizarse de diversas maneras. Una posibilidad, por ejemplo, es definir curvas de envolvente que el consumo de corriente no debe exceder o caer por debajo de las mismas. Si tal curva envolvente se excede o se cae por debajo de ella, puede concluirse correspondientemente una desviación del proceso inadmisibles. Tal curva de envolvente 63 se muestra de forma muy simplificada en la Fig. 4 a modo de ejemplo. Durante el mecanizado con la alimentación radial para la que se registró la curva de corriente 62, la curva de envolvente 63 representa un límite superior de la corriente, el cual no debe excederse. Sin embargo, esta curva de envolvente 63 ya no es útil si se establece una alimentación radial más grande, como se ilustra claramente por la curva de corriente 61: Con una alimentación radial más grande, el consumo de corriente excedería la curva de envolvente 63 incluso si el proceso de mecanizado fuese correcto. De acuerdo con lo anterior, la curva de envolvente 63 tendría que redeterminarse para cada cambio en la alimentación radial. Esto tendría que realizarse con ayuda de un mecanizado de muestras o valores empíricos. Ambos consumen mucho tiempo y son propensos a errores.

Por esta razón, los valores de medición detectados del consumo de corriente o potencia se someten a una operación de normalización en el marco de la presente supervisión del proceso. La operación de normalización tiene en cuenta, entre otras cosas, la alimentación radial. Esto hace a los valores de medición normalizados comparables directamente entre sí, independientemente del valor de la alimentación radial. De acuerdo con lo anterior, la misma curva de envolvente puede utilizarse siempre para diferentes valores de alimentación radial. Esta curva únicamente tiene que determinarse una vez y después puede utilizarse para una gran cantidad de diferentes situaciones de mecanizado.

Consideraciones similares aplican también a otros procedimientos para analizar los valores de medición, por ejemplo, cuando se supervisan continuamente determinadas componentes espectrales de los valores de medición en el espacio de la frecuencia.

La influencia del diámetro exterior del tornillo abrasivo en los valores de medición detectados tiene particular importancia, dado que el diámetro exterior del tornillo abrasivo cambia con cada proceso de reavivado. Esto se ilustra en la figura 5. La Fig. 5 muestra el máximo consumo de corriente $i_{\text{máx}}$ del husillo portaherramientas, medido durante cada mecanizado de rectificación por generación de una pieza de trabajo, para una pluralidad de piezas de trabajo. Todas las piezas de trabajo se mecanizaron con el mismo tornillo abrasivo, en donde el tornillo abrasivo se reavivó cada vez que se hubo mecanizado una determinada cantidad de piezas de trabajo. El diámetro exterior del tornillo abrasivo se reduce con cada operación de reavivado. Consecuentemente, las piezas de trabajo se mecanizaron con un diámetro exterior variable. La Fig. 5 muestra el diámetro exterior del tornillo abrasivo a lo largo del eje horizontal y el consumo de corriente máximo a lo largo del eje vertical para aquellas piezas de trabajo que se mecanizaron con este diámetro exterior. El consumo de corriente máximo que se midió directamente se indica con cuadrados. Es fácil ver que este consumo de corriente disminuye también a medida que disminuye el diámetro exterior. Esto significa que los valores de medición del consumo de corriente máximo con diferentes diámetros exteriores no son comparables directamente. En cambio, el consumo de corriente máximo normalizado, que es resultado de la aplicación de la operación de normalización al consumo de corriente máximo medido, se indica con cruces. La operación de normalización tiene en cuenta el diámetro exterior variable del tornillo abrasivo. Consecuentemente, los valores del consumo de corriente máximo normalizado ya no dependen del diámetro exterior del tornillo abrasivo.

La operación de normalización se realiza preferiblemente en tiempo real mientras la pieza de trabajo se mecaniza en la máquina de acabado 1. Por una parte, esto permite analizar los valores de medición normalizados en tiempo real durante el mecanizado de la pieza de trabajo, y pueden detectarse desviaciones del proceso inadmisibles antes del final del mecanizado o inmediatamente después. De acuerdo con lo anterior, las piezas de trabajo afectadas pueden identificarse y extraerse inmediatamente en tiempo real. Por otra parte, se garantiza que directamente después del final del mecanizado de una pieza de trabajo, puedan calcularse parámetros característicos del proceso de mecanizado para la pieza de trabajo respectiva a partir de los valores de medición normalizados. De esta manera, los parámetros característicos calculados se encuentran disponibles inmediatamente después de que se haya completado el mecanizado de una pieza de trabajo. Por una parte, un análisis de los parámetros característicos calculados permite detectar así desviaciones adicionales del proceso en una etapa inicial. Por otra parte, no existe necesidad de almacenar los valores de medición detectados directamente (es decir, los datos sin procesar) durante un periodo de tiempo más largo, como sería el caso con la evaluación fuera de línea. Más bien, es suficiente almacenar los parámetros característicos calculados junto con un identificador de la pieza de trabajo respectiva y parámetros de proceso seleccionados. Esto permite mantener muy bajos los requisitos de memoria.

Ejemplos del cálculo de parámetros característicos a partir de variables medidas

En el dispositivo de supervisión del proceso 44 se calculan diversos parámetros característicos a partir del indicador de potencia (preferiblemente normalizado) y otras variables medidas, los cuales caracterizan la pieza de trabajo mecanizada y su proceso de mecanizado. Estos parámetros característicos son variables ventajosamente específicas del proceso, de manera tal que permiten obtener conclusiones directas sobre las desviaciones del proceso en el proceso de mecanizado. En particular, los parámetros característicos posibilitan pronosticar determinados errores de mecanizado de la pieza de trabajo. Por lo tanto, la cantidad de piezas de trabajo que se someten a medición de engranajes individuales puede reducirse, mientras que las desviaciones del proceso aún pueden detectarse confiablemente en una etapa inicial y puede emprenderse acción correctiva en el proceso de mecanizado si es necesario.

El cálculo de parámetros característicos a partir de variables medidas se ilustra a continuación a modo de ejemplo para los siguientes tres parámetros característicos:

- (a) indicador de paso total I_{FP}
- (b) indicador de desgaste I_{Wear}
- (c) indicador de forma de perfil I_{ffa}

Los tres parámetros característicos se determinan mediante un análisis espectral de la curva temporal de las variables medidas a lo largo del mecanizado de la pieza de trabajo.

(a) Indicador de paso total I_{FP}

Para determinar el indicador de paso total I_{IP} , se evalúa la componente espectral del indicador de potencia (preferiblemente normalizado) al número de revoluciones de la pieza de trabajo n_C .

Esto se ilustra en la Fig. 6. Esta muestra un espectro del consumo de corriente normalizado (valor absoluto de la componente espectral del consumo de corriente normalizado en función de la frecuencia "f"). Tal espectro puede ser obtenido por una FFT de la curva temporal del consumo de corriente normalizado. Una flecha indica la componente espectral del consumo de corriente normalizado a la velocidad de giro n_C del husillo portapiezas. A fin de cuantificar esta componente espectral, puede determinarse la intensidad espectral en esta frecuencia, o puede integrarse un rango estrecho del espectro alrededor de esta frecuencia. La variable resultante es el indicador de paso total I_{IP} .

El indicador de paso total I_{IP} generalmente será tanto mayor, cuanto mayor sea el error de paso total del predentado de la pieza de trabajo, y/o cuanto peor sea la concentricidad de la pieza de trabajo. A partir del indicador de paso total I_{IP} es posible, por ende, deducir los errores de paso total existentes de las piezas en bruto a partir de los errores de premezanizado y/o errores de concentricidad, por ejemplo, debido a una orientación incorrecta del dispositivo de sujeción para las piezas de trabajo.

(b) Indicador de desgaste I_{Wear}

Para determinar el indicador de desgaste I_{Wear} , se determina la componente estática del indicador de potencia normalizado, es decir, la componente por debajo de una frecuencia de corte superior de, por ejemplo, 2 Hz. Con este fin, por ejemplo, la curva temporal del indicador de potencia puede someterse a un filtrado de paso bajo e integrarse.

El indicador de desgaste I_{Wear} puede entenderse como una medida de la energía de corte normalizada aplicada a una pieza de trabajo después de que todas las influencias geométricas y las influencias de los datos tecnológicos utilizados, tales como alimentación radial y avance axial, se hayan eliminado por la operación de normalización. En términos sencillos, cuanto más alto sea el valor del indicador de desgaste I_{Wear} , más material habrá arrancado el tornillo abrasivo de la pieza de trabajo a una determinada potencia de accionamiento. Por lo tanto, una reducción en el indicador de desgaste refleja un deterioro en el comportamiento de arranque de la herramienta sobre la pieza de trabajo bajo condiciones por lo demás invariables. En este sentido, una disminución en el valor del indicador de desgaste I_{Wear} es indicativa de un mayor desgaste de la herramienta.

(c) Indicador de forma de perfil I_{ffa}

El consumo de corriente normalizado se vuelve cada vez menos significativo hacia frecuencias más altas. Por esta razón, para el cálculo de parámetros característicos resultantes de componentes de proceso de frecuencias más altas preferiblemente se utilizan otros valores de medición, por ejemplo, los valores de medición del sensor de aceleración 18.

Para determinar el indicador de forma de perfil I_{ffa} , la componente espectral de tales valores de medición se evalúa en la frecuencia de engrane de diente. La frecuencia de engrane de diente corresponde así al número de revoluciones de la pieza de trabajo multiplicada por el número de dientes de la pieza de trabajo:

$$f_z = n_C \cdot z$$

Esto se ilustra en la Fig. 7, la cual muestra un espectro de las señales provenientes de un sensor de aceleración 18 durante el mecanizado de una pieza de trabajo. La componente espectral en la frecuencia de engrane de diente se indica con una flecha. Esto puede cuantificarse, por ejemplo, al integrar un rango estrecho del espectro alrededor de la frecuencia de engrane de diente.

El indicador de forma de perfil I_{ffa} generalmente será tanto mayor, cuanto más se desvíe la forma de perfil respecto a la forma de perfil ideal de acuerdo con su especificación. Por lo tanto, el indicador de forma de perfil puede utilizarse para obtener conclusiones acerca de las desviaciones de forma de perfil o desviaciones del proceso que generan tales desviaciones de forma de perfil.

Ejemplo del cálculo de otros parámetros característicos

El cálculo de parámetros característicos se explicó anteriormente utilizando tres ejemplos. Sin embargo, huelga decir que pueden determinarse una gran cantidad de otros parámetros característicos.

Otro ejemplo es el indicador de vibración I_{vib} . Este parámetro característico se obtiene al integrar los valores absolutos de las señales de medición del sensor de aceleración en el dominio de la frecuencia.

Detección de desviaciones del proceso

Al supervisar los cambios en los parámetros característicos determinados a lo largo de diversas piezas de trabajo,

pueden determinarse indicadores para desviaciones del proceso de mecanizado con respecto a un proceso teórico idealizado. Sobre esta base, el proceso de mecanizado puede ajustarse convenientemente para reducir las desviaciones. También puede utilizarse una comparación de los parámetros característicos determinados para diversas piezas de trabajo a fin de definir valores de límite tales como las curvas envolventes mencionadas con anterioridad para una supervisión en tiempo real más precisa, con objeto de detectar desviaciones del proceso inadmisibles en tiempo real con mayor precisión.

Esto se explicará a continuación utilizando las figuras 8 a 11.

Al interpretar estos diagramas, deben tenerse en cuenta de antemano determinadas peculiaridades del procedimiento de mecanizado seleccionado en el presente caso.

Por un lado, debe observarse que cada pieza de trabajo se mecaniza en dos pasadas, una de desbaste y otra de acabado. La estrategia de desplazamiento se adapta a esto de la siguiente manera: cada pieza de trabajo primero se mecaniza por desbaste con una región de tornillo abrasivo. Después, el tornillo abrasivo se desplaza una determinada cantidad (hacia valores Y más altos en los diagramas, es decir, hacia la izquierda) de manera tal que para el acabado se utiliza una región de tornillo abrasivo no utilizada. Después del acabado, el tornillo abrasivo se desplaza de nuevo hacia atrás al extremo de la región de tornillo abrasivo que se utilizó por última vez para el desbaste, y la siguiente región de tornillo abrasivo se utiliza para desbastar la siguiente pieza de trabajo. Como resultado, prácticamente cada región de tornillo abrasivo se utiliza primero para acabar una pieza de trabajo y después para desbastar una pieza de trabajo subsiguiente. Únicamente la región más a la derecha del tornillo abrasivo, cerca de $Y = 0$, se utiliza solo para operaciones de desbaste en esta estrategia de desplazamiento. La posición de mecanizado Y en las figuras 8 a 11 muestra qué región de tornillo a lo largo del ancho del tornillo abrasivo se utilizó para mecanizar la pieza de trabajo respectiva durante el desbaste.

Por otra parte, debe observarse que el tornillo abrasivo se reaviva nuevamente cada vez que se alcanza el final del tornillo abrasivo durante el desplazamiento. El diámetro exterior del tornillo abrasivo se reduce durante el reavivado. Por una parte, esto cambia las relaciones de apalancamiento a través de las cuales un par de accionamiento se convierte en una fuerza de corte cuando se rectifican las piezas de trabajo, y por otra parte, las condiciones de acoplamiento durante el mecanizado de cada flanco de diente también cambian. Cada una de las figuras 8 a 11 muestra un parámetro característico a lo largo de varios ciclos de reavivado en función de la posición de mecanizado Y durante el desbaste. Gracias a la operación de normalización, el reavivado tiene poca influencia o ninguna sobre el parámetro característico respectivo. La razón de esto es que la influencia de la operación de reavivado sobre la geometría del tornillo abrasivo se tiene en cuenta por el factor de normalización. Consecuentemente, los valores del indicador de potencia normalizado en diferentes ciclos de reavivado son comparables directamente entre sí. Correspondientemente, los parámetros característicos mostrados para diferentes ciclos de reavivado también son comparables directamente entre sí a pesar del diámetro exterior variable del tornillo abrasivo. Esto es una gran ventaja de la operación de normalización propuesta.

En la figura 8, se representa gráficamente el indicador de paso total I_{FP} para el proceso de desbaste para una pluralidad de piezas de trabajo a lo largo de varios ciclos de reavivado en función de la posición de mecanizado Y a lo largo del tornillo abrasivo. El diagrama distingue si la pieza de trabajo se mecanizó en el primer o el segundo husillo portapiezas ($I_{FP}(C1)$ o $I_{FP}(C2)$). El indicador de paso total $I_{FP}(C1)$ para las piezas de trabajo mecanizadas en el primer husillo portapiezas se indica con triángulos, mientras que las cruces indican el indicador de paso total $I_{FP}(C2)$ para las piezas de trabajo que se mecanizaron en el segundo husillo portapiezas.

Es inmediatamente evidente que el indicador de paso total para el primer husillo portapiezas es considerablemente más alto en promedio que para el segundo husillo portapiezas. Para piezas de trabajo que se premechanizan de la misma manera, esto indica errores de concentricidad de las piezas de trabajo en el primer husillo portapiezas debido a una orientación incorrecta del dispositivo de sujeción. Tales errores de concentricidad pueden generar ruido no deseado al utilizar el engranaje producido de esta manera. Simultáneamente, puede observarse que las operaciones de reavivado prácticamente no tienen influencia sobre el valor del indicador de paso total determinado gracias a la operación de normalización.

Por lo tanto, el reconocimiento de los errores de concentricidad y la causa correspondiente se facilita para el operario por el hecho de que el parámetro característico I_{FP} se correlaciona con otra variable del proceso de mecanizado, en este caso con la posición Y a lo largo del ancho del tornillo abrasivo, y se muestra visualmente. En lugar de la posición Y , también podría hacerse una correlación aquí con otras variables, en el caso más sencillo con un número de pieza de trabajo consecutivo.

En la figura 9, el indicador de forma de perfil I_{ffa} para una pluralidad de piezas de trabajo se representa nuevamente en función de la posición de mecanizado Y para la operación de desbaste a lo largo de varios ciclos de reavivado. Puede observarse que, independientemente del ciclo de reavivado, el indicador de forma de perfil es considerablemente menor en el extremo derecho del tornillo abrasivo (cerca de $Y = 0$), donde el mecanizado comienza después de cada operación de reavivado, que en el transcurso posterior de la oposición de mecanizado a lo largo del tornillo abrasivo y se incrementa en promedio hacia el extremo izquierdo del tornillo abrasivo ($Y = 40$ mm) con una

dispersión grande. Por lo tanto, el diagrama muestra que las primeras piezas de trabajo de un ciclo de reavivado siempre se producen con la forma de perfil correcta, mientras que ocurren cada vez más desviaciones de la forma de perfil para piezas de trabajo posteriores, además con gran dispersión. En vista de la estrategia de desplazamiento expuesta con anterioridad, esto indica que el tornillo abrasivo se sobrecarga en las regiones en las que se utiliza en primer lugar para una operación de acabado y posteriormente para una operación de desbaste.

En la figura 9, el reconocimiento de los errores de forma de perfil y sus causas se facilita para el operario por el hecho de que el parámetro I_{ffa} se correlaciona con otra variable del proceso de mecanizado, en este caso nuevamente con la posición Y a lo largo del ancho del tornillo abrasivo, y muestra visualmente.

En la figura 10, el indicador de desgaste I_{Wear} para una pluralidad de piezas de trabajo se representa nuevamente en función de la posición de mecanizado Y para la operación de desbaste. El indicador de desgaste tiene valores relativamente grandes en el extremo derecho del tornillo abrasivo cerca de $Y = 0$. A medida que la posición de mecanizado avanza a lo largo del ancho del tornillo abrasivo, el indicador de desgaste disminuye rápidamente a valores significativamente más bajos. Debe observarse que el indicador de desgaste no es una medida directa del desgaste en sí mismo, sino una medida de la cantidad de material arrancado en el flanco de diente. Esto significa que, en la región más grande del ancho del tornillo abrasivo, se retira menos material de los flancos de diente que en la región más a la derecha $Y = 0$. Esto indica un mayor desgaste en todas las regiones, excepto en la región más a la derecha. Por lo tanto, la curva del indicador de desgaste a lo largo del tornillo abrasivo confirma los hallazgos que también pueden obtenerse a partir de la curva del indicador de forma de perfil a lo largo el ancho del tornillo abrasivo: El indicador de desgaste muestra que el tornillo abrasivo se encuentra excesivamente desgastado en todos lados excepto en la región más a la derecha cerca de $Y = 0$.

La figura 11 muestra el indicador de vibración I_{Vib} para una pluralidad de piezas de trabajo en función de la posición de mecanizado Y para la operación de desbaste. El indicador de vibración muestra que, en la región desgastada del tornillo abrasivo, a pesar de la menor retirada de material, se genera una carga de vibración más grande. A su vez, esto puede ocasionar ruidos no deseados al utilizar el engranaje así producido. La curva del indicador de vibración a lo largo del ancho del tornillo abrasivo nuevamente confirma así los hallazgos ya obtenidos a partir de la curva del indicador de forma de perfil y del indicador de desgaste.

Con objeto de emprender aquí acciones correctivas, el número de revoluciones del husillo portaherramientas, la alimentación radial o el avance axial por cada revolución de la pieza de trabajo pueden reducirse, por ejemplo.

Comparación con valores de medición provenientes de la medición de engranajes

Los parámetros característicos determinados pueden compararse para piezas de trabajo seleccionadas con los resultados de una medición de engranajes en una máquina de prueba de engranajes. De esta manera, los parámetros que describen la correlación de los parámetros característicos con las desviaciones de forma reamente presentes pueden determinarse cuantitativamente. Por ejemplo, en el caso de una correlación lineal entre el parámetro característico y la desviación de la forma, puede realizarse una regresión lineal para determinar los parámetros de la correlación lineal. Esto posibilita cuantificar las desviaciones de la forma directamente para cada pieza de trabajo mecanizada con ayuda de los parámetros característicos, lo cual de otra manera sería posible únicamente mediante mediciones de engranajes e involucraría una cantidad de esfuerzo desproporcionada.

Interfaz basada en web

La representación gráfica de los parámetros característicos determinados y su correlación con otras variables características del proceso de mecanizado puede realizarse en cualquier computadora cliente a través de un navegador web, en particular, de manera independiente de la plataforma. Otras medidas de evaluación también pueden realizarse de acuerdo con lo anterior de manera independiente de la plataforma. Esto facilita el análisis remoto.

Detección automática de errores de mecanizado

En el ejemplo anterior, el análisis de la curva de los diversos parámetros característicos a lo largo del ancho del tornillo abrasivo fue realizado visualmente por el operario en la máquina o por un experto en una computadora cliente arbitraria. En lugar de ello, tal análisis también puede realizarse totalmente de manera automática.

Con este fin, el dispositivo de supervisión del proceso 44 puede ejecutar un algoritmo que reconoce automáticamente patrones en los parámetros característicos determinados en varias piezas de trabajo. Los algoritmos de aprendizaje automático son particularmente adecuados para este fin, tal y como se conocen en diversas versiones. Tales algoritmos se denominan a menudo "inteligencia artificial". Un ejemplo de esto son los algoritmos de red neuronal. Es evidente que tal algoritmo en los ejemplos anteriores podría detectar fácilmente, por ejemplo, diferencias en el indicador de paso total entre el primer y el segundo husillo portapiezas o el comportamiento de desgaste a lo largo del ancho del tornillo abrasivo descrito con anterioridad. Con este fin, el algoritmo puede entrenarse de la manera usual utilizando conjuntos de datos de entrenamiento. En particular, los conjuntos de datos de entrenamiento pueden tener en cuenta parámetros que describen la correlación de los parámetros característicos con desviaciones de forma

realmente presentes de acuerdo con la medición de engranajes.

Pueden tomarse ahora las medidas necesarias para eliminar desviaciones del proceso. Por ejemplo, cuando se detectan errores de concentricidad, el centrado del dispositivo de sujeción de la pieza de trabajo en el husillo portapiezas correspondiente puede corregirse manual o automáticamente. Si se detecta exceso de desgaste, la alimentación radial y/o el avance axial puede reducirse convenientemente. Estas medidas también pueden realizarse manual o automáticamente.

Modelo de fuerza

El cálculo del factor de normalización se realiza preferiblemente sobre la base de un modelo.

Para la rectificación por generación, existen modelos en la literatura que describen la dependencia de la fuerza de corte en parámetros geométricos de la herramienta y la pieza de trabajo, y en parámetros tecnológicos. A modo de ejemplo, se hace referencia al libro ya mencionado de H. Schriefer *et al.*, "Rectificación continua de engranajes por generación" ("Continuous Generating Gear Grinding"), editado por Reishauer AG, Wallisellen 2010, ISBN 978-3-033-02535-6, en el capítulo 4.7.3 "Fuerza de corte" ("Cutting Force"), páginas 319 a 322.

A continuación, se hace referencia al modelo de fuerza utilizado en la tesis de C. Dietz, "Simulación numérica del proceso de rectificación continua por generación teniendo en cuenta el comportamiento dinámico del sistema máquina - herramienta - pieza de trabajo" ("Numerische Simulation des kontinuierlichen Walzschleifprozesses unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens des Systems Maschine - Werkzeug - Werkstück", Diss. ETH Zurich N.º 24172, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000171605>. En este documento se describen procedimientos para modelar numéricamente el proceso de rectificación continua por generación. En particular, se presenta un modelo para el cálculo de la fuerza de corte, y se muestran procedimientos sobre cómo los parámetros de este modelo pueden determinarse experimentalmente mediante mediciones.

El modelo de fuerza para la fuerza normal se determina en la Ec. 4.27 de la disertación de C. Dietz, que se muestra a continuación:

$$F_n = F_0 + k \left(\frac{a_e v_f}{v_c} \right)^{\epsilon_1} l_k^{\epsilon_2} a_p$$

Aquí, a_e designa la profundidad de corte, a_p el ancho de corte, l_k el largo de contacto de la zona de arranque de viruta, v_c la velocidad de corte y v_f la velocidad de avance. Las constantes F_0 y k y los exponentes ϵ_1 y ϵ_2 son variables que han de determinarse empíricamente.

La fuerza de corte F_c es proporcional a la fuerza normal F_n , en donde la constante de proporcionalidad μ se denomina relación de fuerza:

$$F_c = \mu F_n$$

La relación de fuerza μ es nuevamente una variable que ha de determinarse empíricamente.

Las variables geométricas a_e , a_p e l_k describen la zona de arranque de viruta. Pueden calcularse analíticamente, como se indica en el capítulo 4.5.1 de la disertación por C. Dietz, o determinarse numéricamente mediante un cálculo de penetración.

En particular, puede derivarse la siguiente relación analítica para el largo de contacto l_k :

$$l_k = \sqrt{r_{pSS,eq}^2 - (r_{pSS,eq} - q_t)^2} + s_z/2$$

Aquí, $r_{pSS,eq}$ designa el radio del tornillo abrasivo equivalente, q_t la dimensión nominal y s_z el avance radial por revolución de la pieza de trabajo. El radio del tornillo abrasivo equivalente $r_{pSS,eq}$ puede calcularse a partir del radio del tornillo abrasivo real r_{pSS} de la siguiente manera:

$$r_{pSS,eq} = r_{pSS} / \left(\frac{\sin(\alpha_{SS})}{2} \right)$$

Aquí, α_{SS} designa el ángulo de engrane del tornillo abrasivo.

Para el ancho de corte a_p , puede derivarse la siguiente relación analítica:

$$a_p = \sqrt{a_{p,m\acute{a}x}^2 - \frac{a_{p,m\acute{a}x}^2 (l_k - 1,5 \cdot s_z)^2}{(l_k - s_z)^2}}$$

Aquí, $a_{p,m\acute{a}x}$ designa el ancho de corte máximo. Esto se calcula de la siguiente manera:

$$a_{p,m\acute{a}x} = \sqrt{L_y^2 - (L_y - q_t)^2}$$

Así, L_y designa el largo de rodadura.

La profundidad de corte corresponde a la medida nominal, la cual a su vez se relaciona con la alimentación radial Δx de la siguiente manera:

$$a_e = q_t = \Delta x \cdot \sin(\alpha_t)$$

Aquí, α_t designa el ángulo de engrane de la pieza de trabajo.

La velocidad de corte v_c y la velocidad de avance v_f se obtiene a partir de la cinemática del proceso de rectificación por generación. También pueden determinarse fórmulas analíticas para estas variables, como se especifica en el capítulo 4.7.1 de la disertación de C. Dietz. Así, lo siguiente se aplica a la velocidad de corte v_c :

$$v_c = \sqrt{v_{cu}^2 + v_{ca}^2 + v_{cw}^2}$$

Aquí, v_{cu} designa la velocidad periférica, v_{ca} la componente de velocidad axial y v_{cw} la velocidad de rodadura.

Para la velocidad periférica v_{cu} , se aplica lo siguiente:

$$v_{cu} = n_B \pi d_{pSS} / 60$$

Aquí, n_B designa el número de revoluciones de la herramienta (en rpm) y d_{pSS} el diámetro del tornillo abrasivo en el punto de contacto actual a lo largo de la altura de perfil de la respectiva espira de tornillo.

Para la componente de velocidad axial v_{ca} , se aplica lo siguiente:

$$v_{ca} = \frac{m_{nSS} z_0 n_B \pi}{60 \cos \gamma}$$

Aquí, m_{nSS} designa el módulo normal del tornillo abrasivo, z_0 la cantidad de espiras y γ el ángulo de paso del engranaje helicoidal.

Para la velocidad de rodadura v_{cw} , se aplica lo siguiente:

$$v_{cw} = \frac{m_{nSS} z_0 n_B \pi}{60} \sin \alpha_{SSy}$$

Aquí, α_{SSy} designa el ángulo de engrane local del punto de contacto en el tornillo abrasivo.

Para la velocidad de avance v_f , se aplica lo siguiente:

$$v_f = \frac{z_0 s_z n_B}{60 \cos \beta}$$

Aquí, β designa el ángulo helicoidal del engranaje en la pieza de trabajo.

Alternativamente, las variables geométricas a_e , a_p e l_k para la descripción de la zona de arranque de viruta, así como la velocidad de corte v_c y la velocidad de avance v_f también puede determinarse a partir de una simulación de proceso numérica.

Las constantes F_0 y k , los exponentes ε_1 y ε_2 y la relación de fuerza μ pueden determinarse empíricamente, como se especifica a modo de ejemplo en el capítulo 5.3 de la disertación de C. Dietz.

En la disertación de C. Dietz, se determinaron empíricamente los siguientes valores para la rectificación por generación de engranajes hechos de acero templado con herramientas con aglomerante cerámico utilizando corindón como agente abrasivo:

$$F_0 = 21,2422 \text{ N}$$

$$k = 4,4338$$

$$\varepsilon_1 = 0,1950$$

$$\varepsilon_2 = 2,0136$$

$$\mu = 0,3$$

Con estos valores, las fuerzas del proceso medidas reales pueden reproducirse con muy alta precisión por el modelo de fuerza.

Para otros emparejamientos de materiales, los valores de las variables mencionadas con anterioridad pueden desviarse de los valores determinados arriba. Sin embargo, tales valores pueden determinarse fácilmente de manera empírica comparando valores de fuerza medidos y calculados.

Modelado de la potencia de proceso

La potencia P_B que ha de proporcionarse por el husillo portaherramientas se obtiene como el producto de la fuerza de corte F_c y la velocidad periférica v_{cu} del tornillo abrasivo en el punto de contacto entre el tornillo abrasivo y la pieza de trabajo. Por una parte, la velocidad periférica es proporcional al número de revoluciones n_B del husillo portaherramientas; por otra parte, es proporcional al brazo de palanca efectivo, el cual es la mitad del diámetro d_{pSS} del tornillo abrasivo en el punto de contacto.

La potencia de proceso puede modelarse en conjunto como:

$$P_B = F_c \cdot n_B \pi d_{pSS} / 60$$

Así, el diámetro d_{pSS} del tornillo abrasivo en el punto de contacto puede sustituirse, como una buena aproximación, por su diámetro exterior d_{aSS} .

Cálculo del factor de normalización

Sobre la base de este modelo de la potencia de proceso, el factor de normalización puede seleccionarse de la siguiente manera, por ejemplo:

$$N_p = \left(F_0 + k \left(\frac{a_e v_f}{v_c} \right)^{\varepsilon_1} l_k^{\varepsilon_2} a_p \right)^{-E_1} \cdot \left(\frac{d_{aSS}}{d_{aSS,máx}} \right)^{-E_2} \left(\frac{n_B}{n_{B,ref}} \right)^{-E_3}$$

Aquí, $d_{aSS,máx}$ es el diámetro exterior máximo después de la primera operación de reavivado. Alternativamente, aquí puede utilizarse cualquier otro valor de referencia. La expresión $n_{B,ref}$ designa un número de revoluciones de referencia arbitrario.

Para los exponentes E_1 , E_2 y E_3 , lo siguiente se aplica en este modelo:

$$E_1 = E_2 = E_3 = 1$$

Sin embargo, en una extensión del modelo, estos exponentes también pueden desviarse de 1 y pueden determinarse empíricamente.

El primer factor (con exponente E_1) se obtiene directamente a partir del modelo de fuerza. Tiene en cuenta la geometría del tornillo abrasivo y de la pieza de trabajo, así como de las especificaciones tecnológicas, especialmente la alimentación radial y el avance axial.

- 5 El segundo factor (con exponente E_2) tiene en cuenta las relaciones de palanca en el punto de contacto, las cuales cambian dependiendo del diámetro del tornillo abrasivo.

El tercer factor (con exponente E_3) tiene en cuenta la dependencia de la potencia de proceso al número de revoluciones del husillo portaherramientas.

- 10 Como puede observarse a partir de la descripción anterior del modelo de fuerza y las explicaciones adicionales en la disertación de C. Dietz, la fuerza de corte cambia en cierta medida a lo largo del mecanizado de un flanco. Sin embargo, con fines de supervisión del proceso, la fuerza de corte puede considerarse constante a lo largo del mecanizado de un flanco, omitiendo la entrada y la salida. De acuerdo con lo anterior, es suficiente recalcular el factor de normalización N_P después de cada operación de reavivado (la cual cambia la geometría del tornillo abrasivo) y después de cada cambio en los parámetros tecnológicos (en particular la alimentación radial y/o el avance axial). Este factor de normalización N_P puede utilizarse después para todas las piezas de trabajo de un ciclo de reavivado.

- 15 Por supuesto que el factor de normalización N_P también puede calcularse de diferente manera a la mencionada con anterioridad. También son concebibles operaciones de normalización más complejas, por ejemplo, operaciones que incluyen primeramente una resta para eliminar un desfase, y únicamente después una multiplicación o división.

- 20 Las consideraciones anteriores se aplican a la rectificación por generación. Para otras operaciones de acabado, existen otros modelos de fuerza de corte y, de manera correspondiente, para otras operaciones de acabado, el factor de normalización diferirá del factor de normalización indicado con anterioridad.

Diagramas de flujo para procedimientos a modo de ejemplo

- 30 La figura 12 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento a modo de ejemplo para la supervisión del proceso en el contexto de la rectificación por generación de un lote de piezas de trabajo similares con una máquina de acabado del tipo mostrado en la Fig. 1.

- 35 En la etapa 110, la máquina de acabado se configura y los parámetros de proceso relacionados (en particular los parámetros geométricos del tornillo abrasivo y de las piezas de trabajo, así como también los parámetros tecnológicos tales como la alimentación radial y el avance axial) se introducen en el control de máquina 42 a través del panel de control 43. En la etapa 111 se reaviva el tornillo abrasivo 16 y se determina el diámetro exterior del tornillo abrasivo reavivado. En la etapa 112, se calcula un factor de normalización con base en los parámetros de proceso y el diámetro exterior del tornillo abrasivo.

- 40 En el bloque 120, se mecanizan las piezas de trabajo individuales del lote. Durante el mecanizado, se detectan las variables medidas continuamente por el dispositivo de supervisión del proceso 44 en la etapa 121. En la etapa 122, al menos algunas de las variables medidas, en particular las variables medidas relacionadas con el consumo de corriente del husillo portaherramientas, se normalizan en tiempo real. En la etapa 123, las variables medidas ahora normalizadas parcialmente se analizan continuamente en tiempo real con objeto de detectar posibles errores de mecanizado directamente en línea, mientras la pieza de trabajo individual aún se está mecanizando, con base en desviaciones del proceso. Si se detecta un posible error de mecanización, se ajusta una variable de instrucción correspondiente en el dispositivo de supervisión del proceso. Las etapas 121 a 123 se repiten continuamente durante el mecanizado de la pieza de trabajo.

- 50 Inmediatamente después finalizar el mecanizado de la pieza de trabajo, se calculan parámetros característicos en la etapa 124 a partir de las variables medidas normalizadas parcialmente. Los parámetros característicos se comparan con las especificaciones. Si se determina que los parámetros característicos se desvían excesivamente de las especificaciones, se ajusta una variable de instrucción para un error de mecanizado.

- 55 En la etapa 125, se le dan instrucciones a un sistema de manejo de piezas de trabajo por medio de las variables de instrucción para extraer las piezas de trabajo para las cuales se detectaron indicaciones de errores de mecanizado. Estas piezas de trabajo pueden someterse a una revisión más detallada o rechazarse inmediatamente como piezas NIO.

- 60 En la etapa 126, se almacena un conjunto de datos para cada pieza de trabajo en una base de datos. Este conjunto de datos incluye un identificador de pieza de trabajo único, los parámetros de proceso más importantes, los parámetros característicos determinados y, dado el caso, las variables de instrucción.

- 65 El mecanizado de piezas de trabajo se repite ahora de la misma manera hasta que el tornillo abrasivo se desgaste hasta tal grado que sea necesaria una nueva operación de reavivado. En este caso, se repite la etapa 111, es decir, se reaviva nuevamente el tornillo abrasivo y se determina su nuevo diámetro exterior. De acuerdo con lo anterior, el

factor de normalización se recalcula en la etapa 112. El mecanizado 120 de las piezas de trabajo continúa ahora con el tornillo abrasivo recién reavivado y el nuevo factor de normalización.

La figura 13 ilustra cómo desviaciones adicionales del proceso pueden detectarse automáticamente a partir de los conjuntos de datos almacenados para varias piezas de trabajo. En la etapa 131, los conjuntos de datos para una determinada cantidad de piezas de trabajo son leídos desde la base de datos. En la etapa 132, estos conjuntos de datos son analizados por un algoritmo de IA (IA = inteligencia artificial) con objeto de identificar desviaciones del proceso a partir de los conjuntos de datos que pueden no haber sido detectables directamente durante el mecanizado de las piezas de trabajo individuales. En la etapa 133, el resultado de este análisis se utiliza para emprender automáticamente medidas a fin de corregir el proceso de mecanizado (por ejemplo, reducción del avance axial, etc.). Estas etapas pueden realizarse siempre que se haya mecanizado una determinada cantidad mínima de piezas de trabajo. Sin embargo, el análisis también puede realizarse posteriormente, después del final del mecanizado del lote de piezas de trabajo, por ejemplo, para identificar posteriormente aquellas piezas de trabajo afectadas por un error de mecanizado.

Este proceso únicamente requiere una cantidad de cálculo y memoria moderada, dado que los conjuntos de datos son muy pequeños en comparación con la cantidad de datos adquiridos directamente durante el mecanizado.

Como se ilustra en la figura 14, independientemente de esto, los conjuntos de datos pueden ser leídos desde la base de datos en cualquier momento con una computadora cliente a través de una red (etapa 141) y editarse gráficamente para ser reproducidos visualmente (etapa 142). Este proceso también requiere solo una cantidad muy moderada de cálculo y memoria. Esto posibilita ejecutar este proceso utilizando un complemento (*plugin*) en un navegador web. Sobre la base de esta visualización, el operario puede efectuar un análisis de errores y, por ejemplo, volver a determinar las curvas envolventes descritas con anterioridad que se aplican durante el análisis en tiempo real.

Diagrama de bloques para bloques funcionales del dispositivo de supervisión del proceso

La Fig. 15 muestra a modo de ejemplo un diagrama de bloques que muestra esquemáticamente diversos bloques funcionales del dispositivo de supervisión del proceso 44. Los bloques funcionales se conectan funcionalmente entre sí mediante un componente de intercambio de comandos y datos 401.

Un dispositivo de cálculo de normalización 410 calcula el factor de normalización cuando se requiere. Se utiliza un dispositivo de detección 420 para detectar valores de medición. Un dispositivo de normalización 430 normaliza al menos algunos de los valores de medición inmediatamente después de su detección. Un dispositivo de detección de errores 440 analiza los valores de medición normalizados parcialmente e identifica desviaciones del proceso inadmisibles. Un dispositivo de manejo 441 (estrictamente hablando, no perteneciente al dispositivo de supervisión del proceso) extrae después, basándose en ello, las piezas de trabajo que se han mecanizado con desviaciones del proceso inadmisibles. Después del final del mecanizado de una pieza de trabajo, un dispositivo de cálculo de parámetros característicos 450 calcula parámetros característicos a partir de los valores de medición normalizados parcialmente. Un dispositivo de comunicación de datos 460 sirve para la comunicación con un servidor de base de datos. Un dispositivo de determinación de desviación 470 sirve para la detección automática de desviaciones del proceso. Con este fin, el dispositivo de detección de desviación 470 comprende un dispositivo de procesador 471, el cual ejecuta un algoritmo de IA.

Huelga decir que es posible una gran cantidad de variaciones de los ejemplos expuestos con anterioridad.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para supervisar un proceso de mecanizado, en el cual los flancos de diente de piezas de trabajo (23) predentadas se mecanizan con una máquina de acabado (1), en donde la máquina de acabado (1) presenta un husillo portaherramientas (15) para accionar en rotación una herramienta de acabado (16) alrededor de un eje de herramienta (B) y al menos un husillo portapiezas (21) para accionar en rotación una pieza de trabajo (23) predentada, en donde el procedimiento comprende:

detectar una pluralidad de valores de medición mientras la herramienta de acabado (16) se encuentra en acoplamiento de mecanizado con una pieza de trabajo (23), en donde los valores de medición detectados comprenden valores de un indicador de potencia, el cual indica un consumo de potencia actual del husillo portaherramientas (15),

caracterizado por que el procedimiento comprende:

aplicar una operación de normalización a los valores del indicador de potencia o a una variable derivada de los mismos, para obtener valores normalizados, en donde la operación de normalización depende al menos de un parámetro de proceso, en donde el al menos un parámetro de proceso se selecciona a partir de parámetros geométricos de la herramienta de acabado (16), parámetros geométricos de la pieza de trabajo (23) y parámetros de configuración de la máquina de acabado (1), y en donde la operación de normalización se basa en un modelo que describe una dependencia prevista de los valores del indicador de potencia en los parámetros de proceso, en donde el modelo describe la dependencia de la potencia de proceso en los parámetros de proceso y se basa en un modelo de fuerza que describe la dependencia prevista de la fuerza de corte, que actúa en el lugar del contacto entre la herramienta de acabada y la pieza de trabajo, en parámetros geométricos de la herramienta de acabada, parámetros geométricos de la pieza de trabajo y parámetros de configuración de la máquina de acabado;

recalcular la operación de normalización para los parámetros de proceso, cuando al menos uno de los parámetros de proceso varía, en donde recalcular la operación de normalización comprende aplicar el modelo, y

en donde el procedimiento, además, comprende:

a) analizar los valores normalizados en tiempo real para determinar desviaciones del proceso inadmisibles, en donde la operación de normalización tiene lugar en tiempo real mientras la herramienta de acabado (16) se encuentra en acoplamiento de mecanizado con la herramienta (23); y/o

b) calcular parámetros característicos del proceso de mecanizado a partir de los valores de medición o de valores derivados de los mismos, en donde al menos uno de los parámetros característicos se correlaciona con un error de mecanizado predefinido de la pieza de trabajo (23).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en donde los valores del indicador de potencia son valores de corriente del husillo portaherramientas (15).

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en donde la operación de normalización se realiza en tiempo real mientras la herramienta de acabado (16) se encuentra en acoplamiento de mecanizado con la pieza de trabajo (23).

4. Procedimiento según la reivindicación 3, que comprende:

analizar los valores normalizados en tiempo real para determinar desviaciones del proceso inadmisibles, en donde preferiblemente se extrae una pieza de trabajo para la cual se ha determinado una desviación del proceso inadmisible.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende:

calcular parámetros característicos del proceso de mecanizado a partir de los valores de medición o de valores derivados de los mismos, en donde al menos uno de los parámetros característicos se correlaciona con un error de mecanizado predefinido de la pieza de trabajo (23).

6. Procedimiento según la reivindicación 5, que comprende:

realizar una medición de engranajes para piezas de trabajo (23) seleccionadas para determinar al menos una variable medida de engranaje por pieza de trabajo que caracterice el error de mecanizado predefinido; y determinar parámetros de correlación que caractericen la correlación del al menos un parámetro característico con la al menos una variable medida de engranaje.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 o 6, en donde el cálculo de al menos uno de los parámetros característicos comprende un análisis espectral de valores de medición, valores derivados de los mismos o valores normalizados, en donde componentes espectrales son evaluadas en múltiplos del número de revoluciones del husillo portaherramientas (15) y/o del husillo portapiezas (21).

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 a 7, en donde el proceso de acabado es un proceso de

rectificación, en el cual la herramienta de acabado (16) y la pieza de trabajo (23) se encuentran en acoplamiento de rodadura, y en donde los parámetros característicos comprenden al menos una de las siguientes variables:

- un indicador de paso total (I_{fP}), en donde el indicador de paso total (I_{fP}) se calcula a partir de una componente espectral de valores de medición al número de revoluciones del husillo portapiezas (15) y se correlaciona con un error de paso total o de concentricidad de la pieza de trabajo (23);
- un indicador de desgaste (I_{Wear}), en donde el indicador de desgaste (I_{Wear}) se calcula a partir de una componente espectral de baja frecuencia de valores de medición y se correlaciona con un grado de desgaste de la herramienta de acabado (16);
- un indicador de forma de perfil (I_{ffa}), en donde el indicador de forma de perfil se calcula a partir de una componente espectral de valores de medición en la frecuencia de engrane de diente y se correlaciona con una desviación de forma de perfil de la pieza de trabajo (23).

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 a 8, que comprende:

- almacenar un conjunto de datos en una base de datos (46), en donde el conjunto de datos comprende un identificador único de la pieza de trabajo, al menos un parámetro de proceso y al menos uno de los parámetros característicos.

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 a 9, que comprende:

- realizar un análisis de valores de al menos uno de los parámetros característicos para una pluralidad de piezas de trabajo (23) para determinar una desviación del proceso, en donde el análisis se realiza, en particular, mediante un algoritmo de aprendizaje automático entrenado, en donde el análisis comprende preferiblemente correlacionar valores de al menos uno de los parámetros característicos para una pluralidad de piezas de trabajo (23) con otras variables del proceso de mecanizado; y
- cambiar el proceso de mecanizado para reducir la desviación del proceso.

11. Procedimiento una de las reivindicaciones 5 a 10, que comprende:

- visualizar gráficamente valores de al menos uno de los parámetros característicos o valores derivados de los mismos para una pluralidad de piezas de trabajo, en particular en un navegador web.

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el modelo es un modelo de una fuerza de proceso o potencia de proceso.

13. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde recalculer la operación de normalización comprende una compensación con respecto a una dimensión variable de la herramienta de acabado (16), en particular con respecto a su diámetro exterior (d_{aSS}).

14. Máquina de acabado para el mecanizado de flancos de diente de piezas de trabajo predestinadas, que presenta:

- un husillo portaherramientas (15) para accionar en rotación una herramienta de acabado (16) alrededor de un eje de herramienta (B);
- al menos un husillo portapiezas (21) para accionar en rotación una pieza de trabajo (23) predestinada;
- un dispositivo de control (40) para controlar un proceso de mecanizado de la pieza de trabajo (23) con la herramienta de acabado (16); y
- un dispositivo de supervisión del proceso (44) configurado para aplicar el procedimiento para supervisar el proceso de mecanizado según una de las reivindicaciones anteriores.

15. Programa informático que comprende comandos que hacen que un dispositivo de supervisión del proceso en una máquina de acabado (1) según la reivindicación 14 aplique un procedimiento según las reivindicaciones 1 a 13.

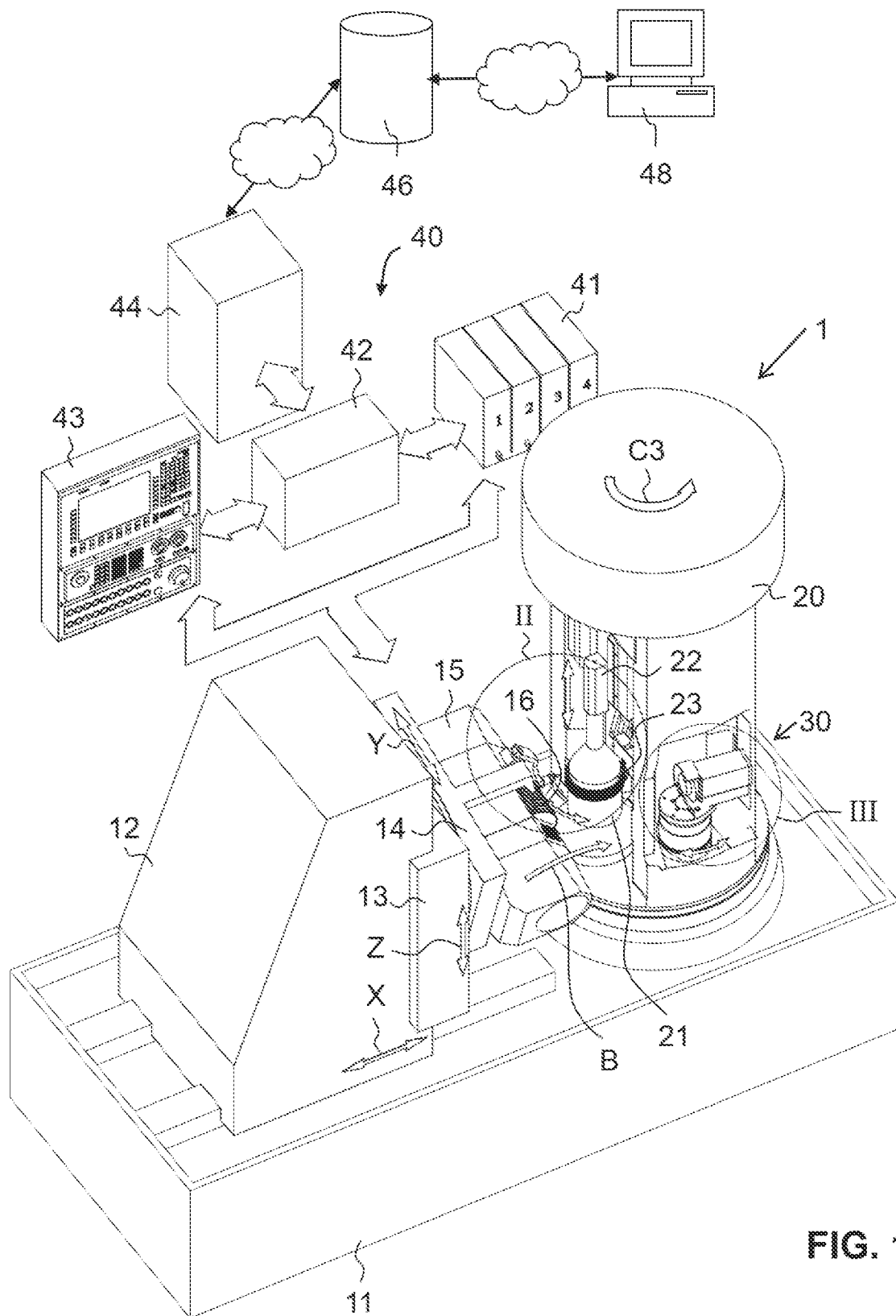


FIG. 1

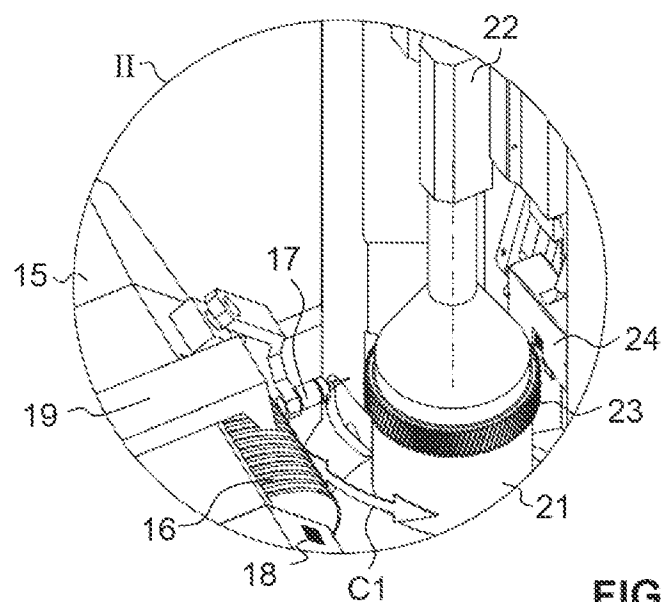


FIG. 2

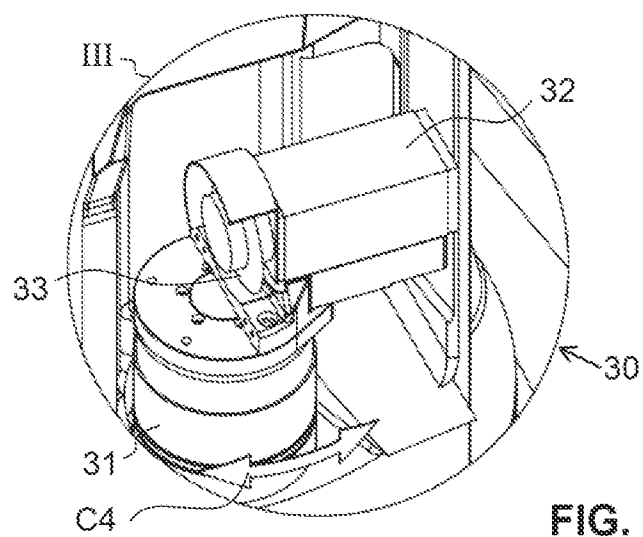


FIG. 3

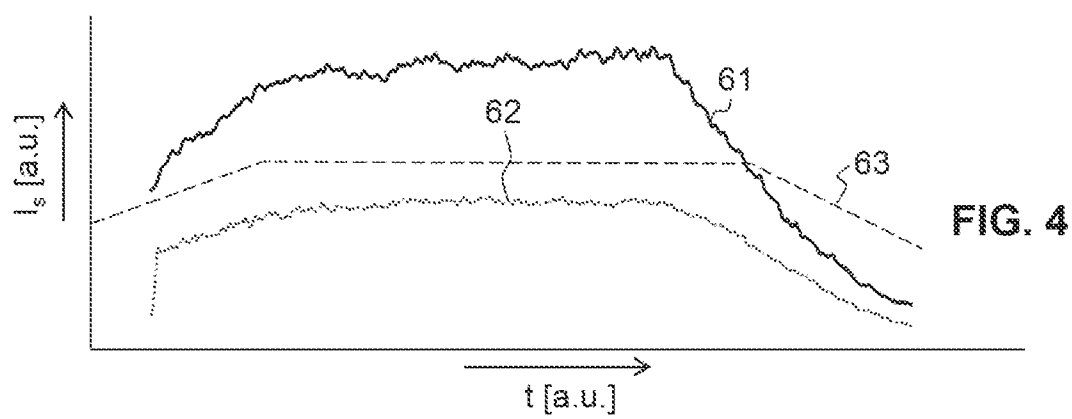
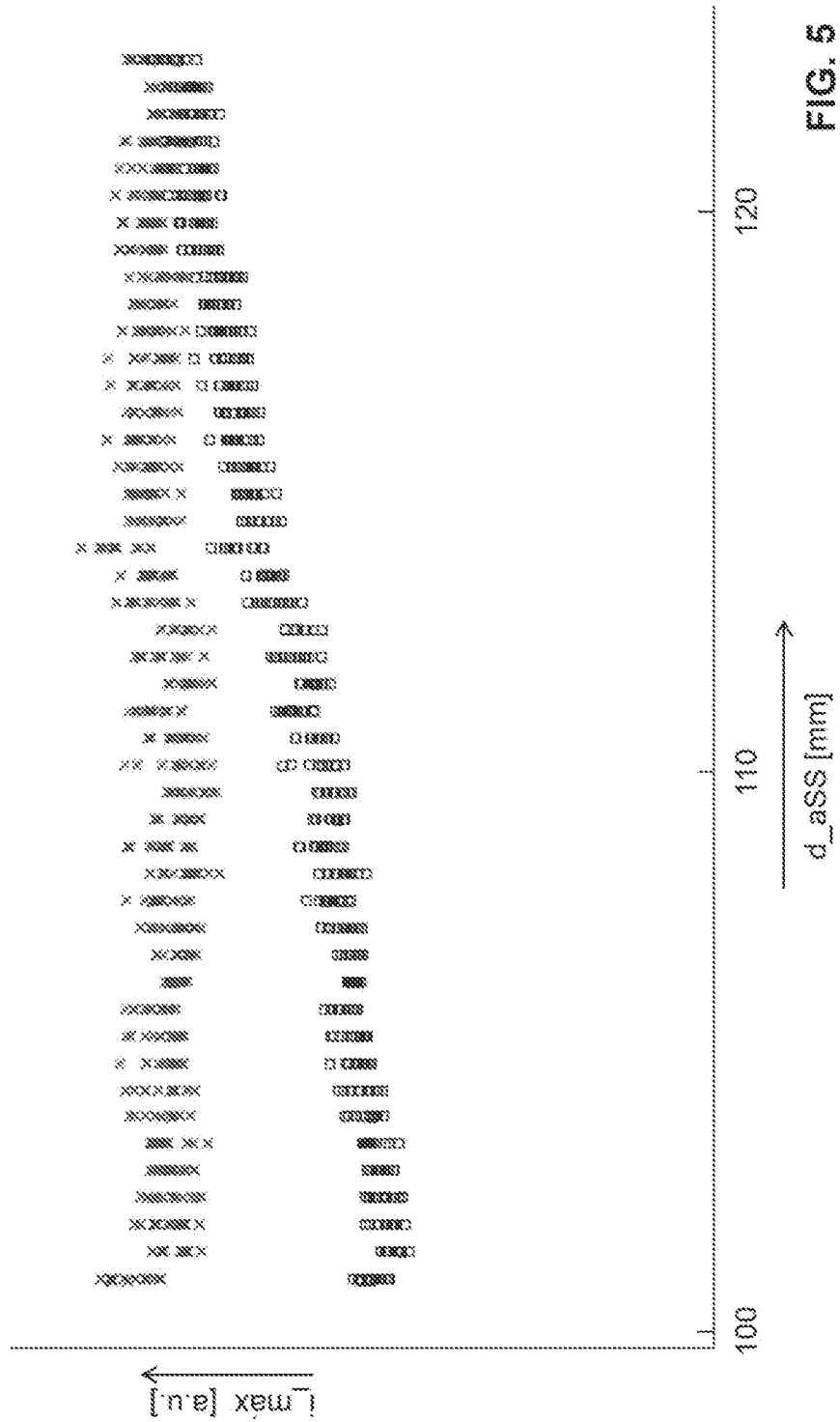


FIG. 4



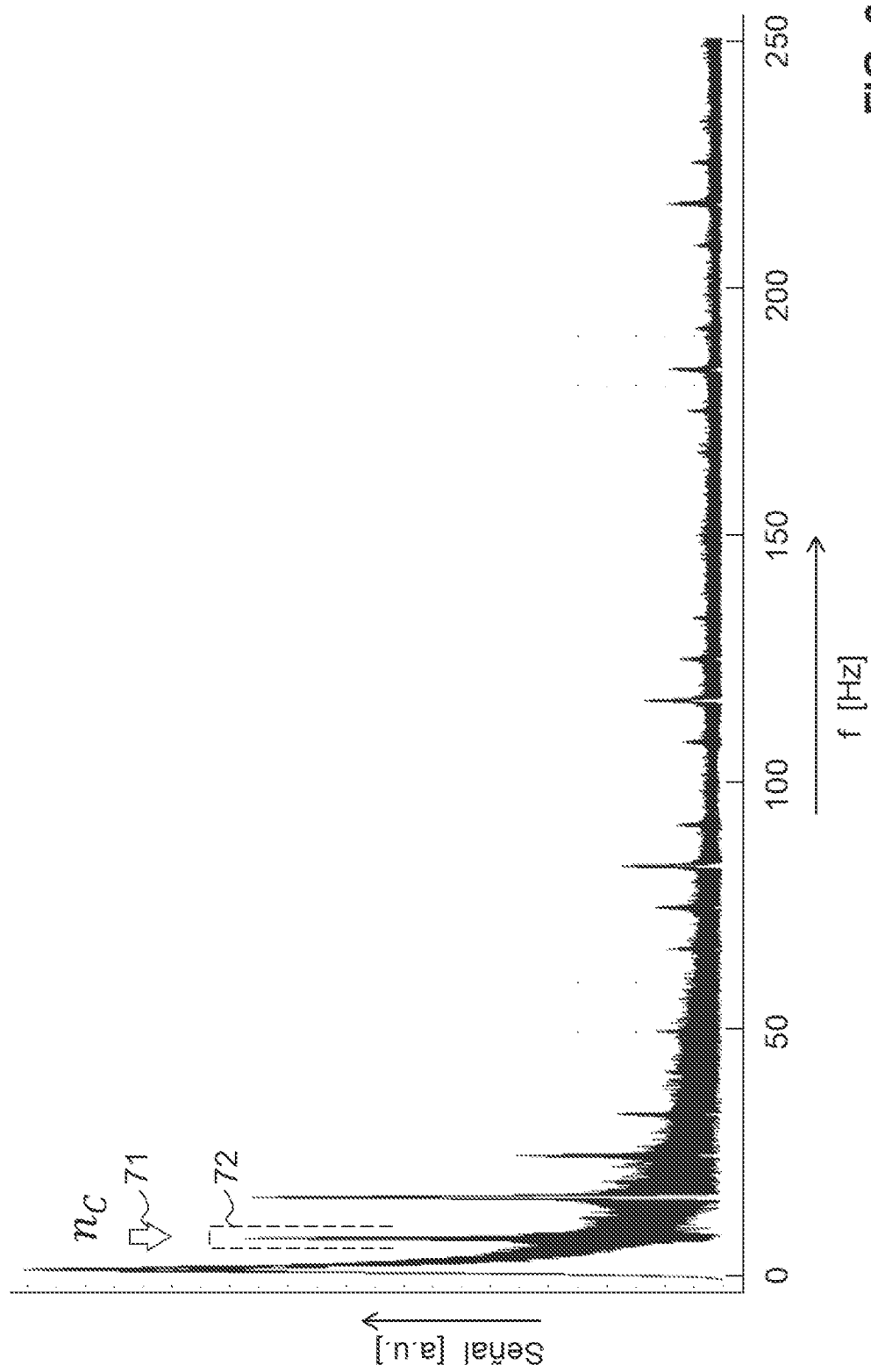


FIG. 6

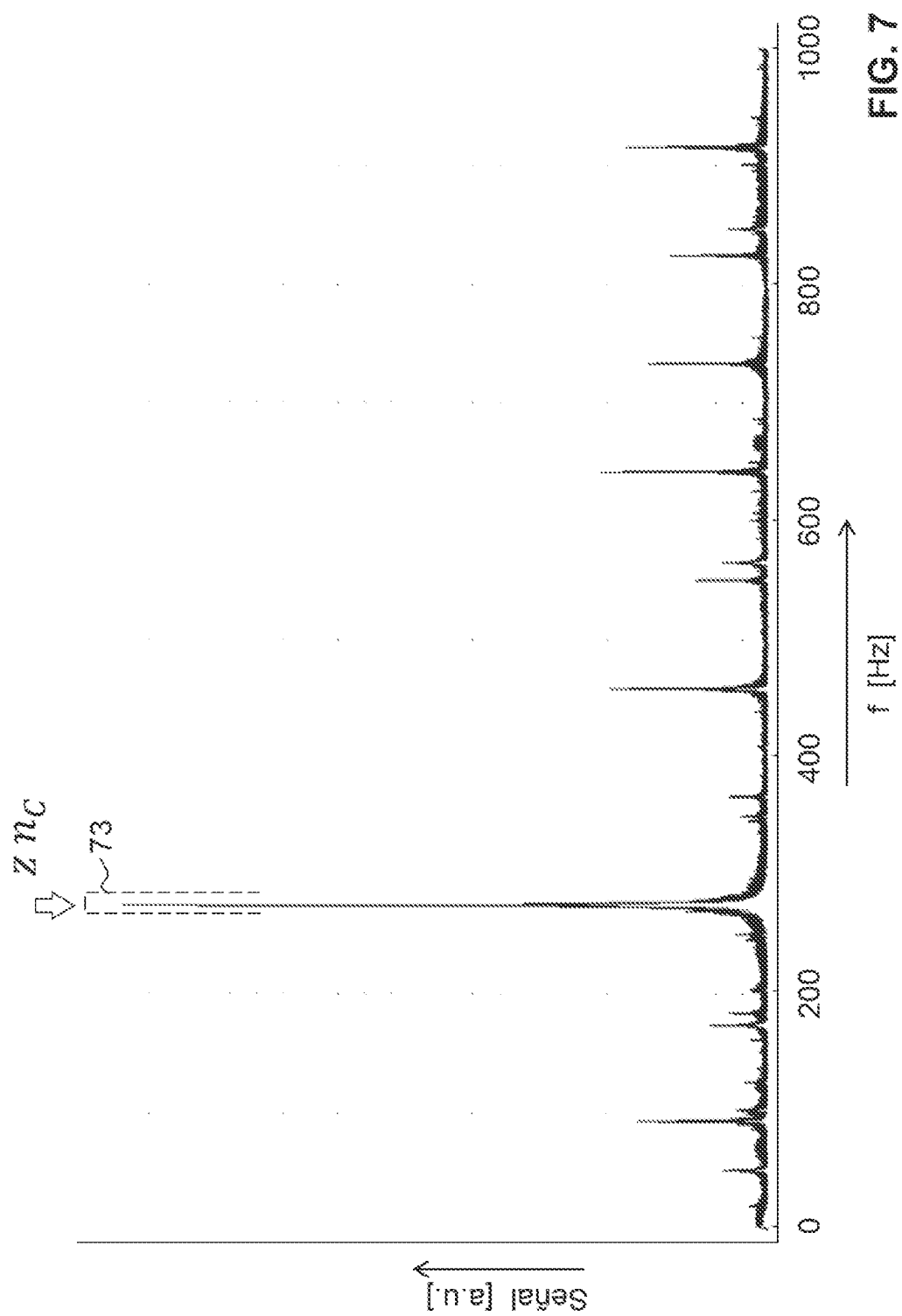


FIG. 7

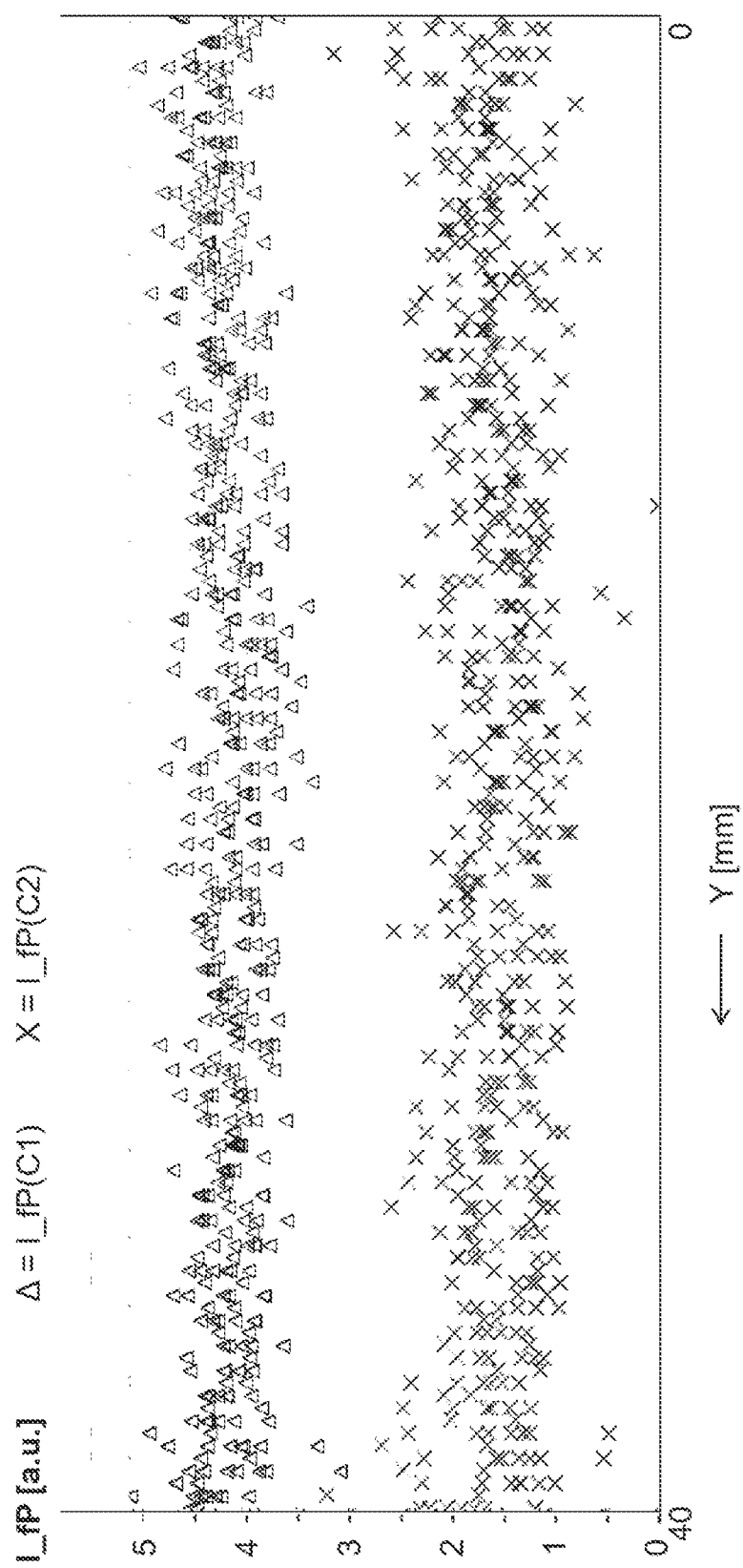


FIG. 8

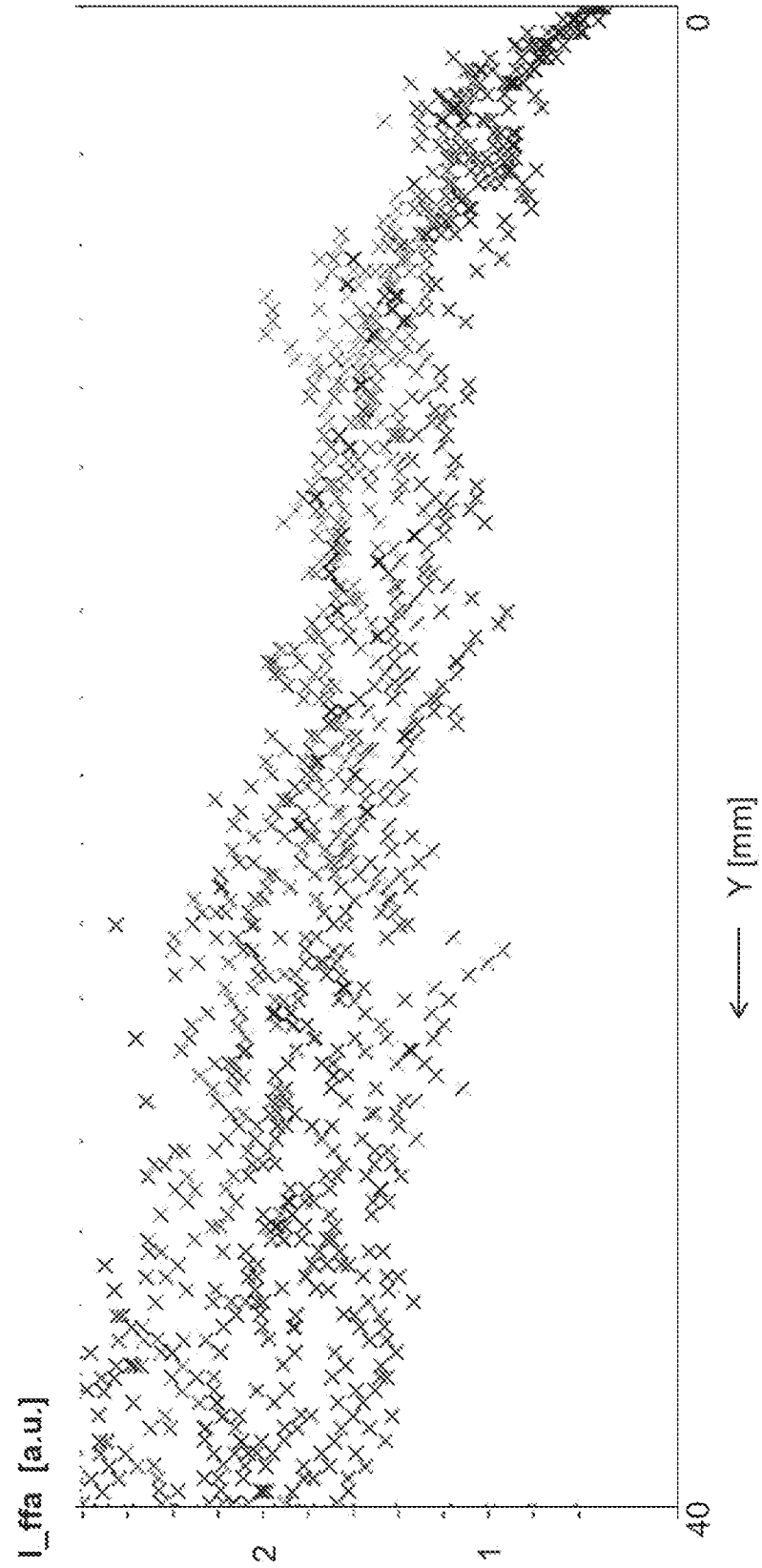


FIG. 9

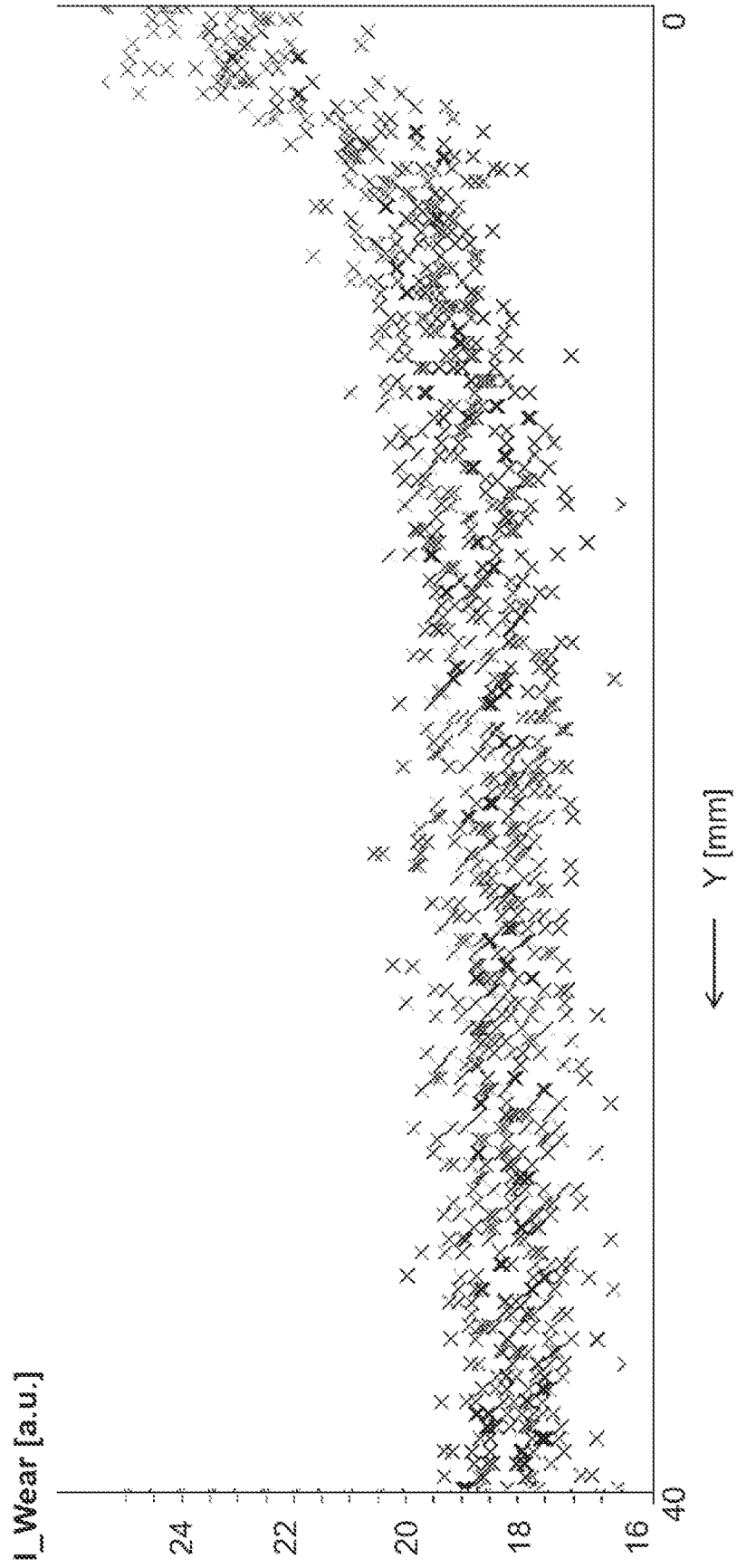


FIG. 10

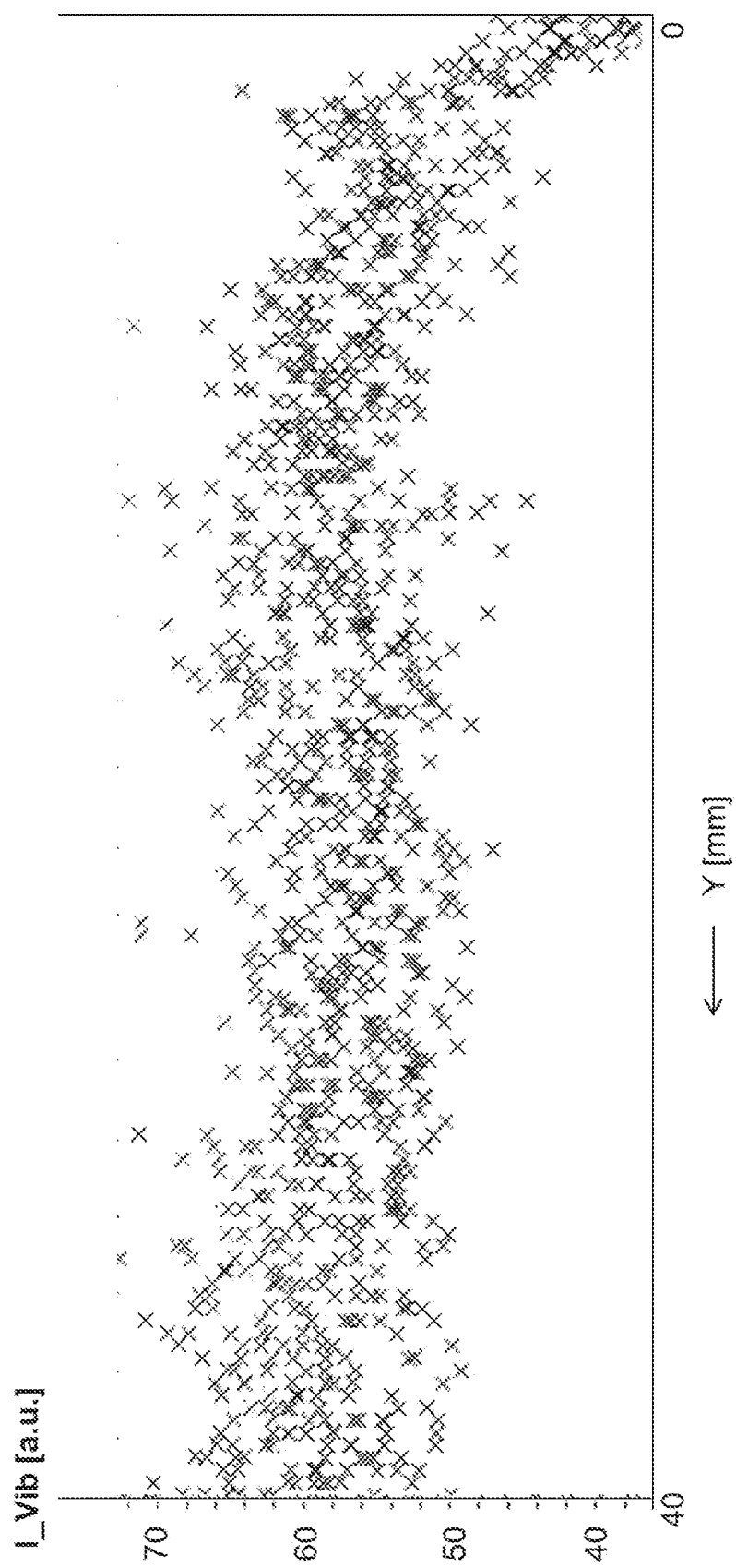


FIG.11

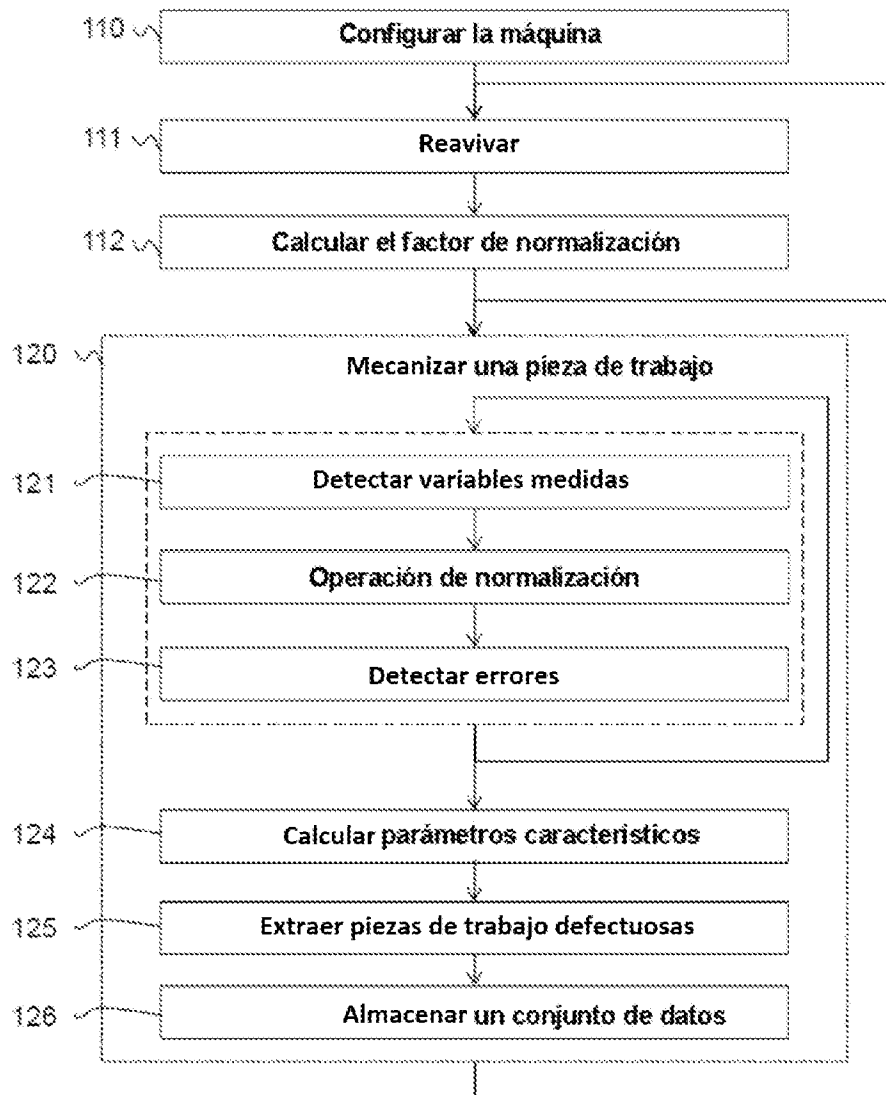


FIG. 12

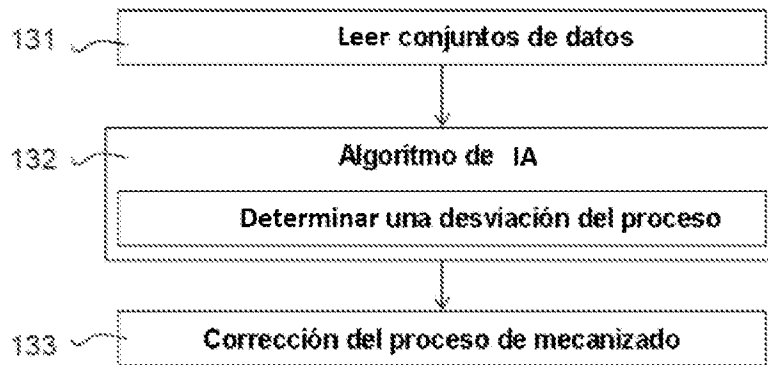


FIG. 13

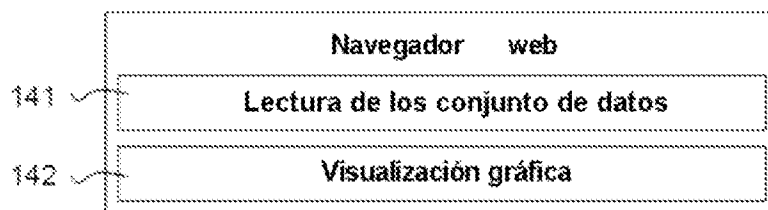


FIG. 14

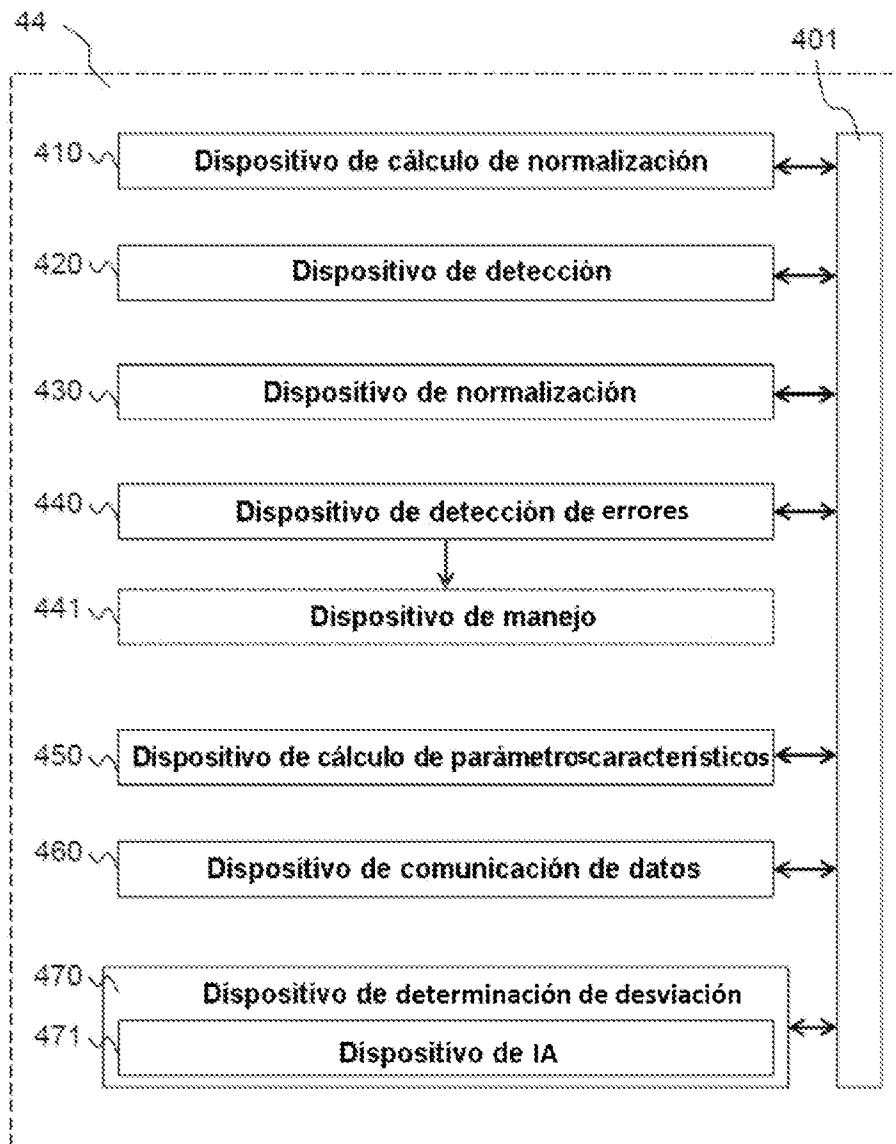


FIG. 15