



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 342 256**

51 Int. Cl.:  
**B60C 23/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01922202 .5**

96 Fecha de presentación : **12.04.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1272365**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.01.2003**

54 Título: **Estimación de presión de neumático.**

30 Prioridad: **12.04.2000 SE 2000101353**  
**13.06.2000 SE 2000102213**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**05.07.2010**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**05.07.2010**

73 Titular/es: **Nira Dynamics AB.**  
**Teknikringen 6**  
**583 30 Linköping, SE**

72 Inventor/es: **Gustafsson, Fredrik;**  
**Persson, Niclas y**  
**Drevo, Marcus**

74 Agente: **Justo Bailey, Mario de**

ES 2 342 256 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**

Estimación de presión de neumático.

**5 Campo de la invención**

La presente invención se refiere generalmente a un sistema para estimar la presión de neumático de un vehículo dotado de ruedas provistas con neumáticos, y más específicamente a la detección y estimación de parámetros físicos dependientes de la presión de neumático.

**10 Antecedentes**

En el diseño de coches y otros vehículos se presta hoy en día una gran atención a los aspectos de seguridad. Uno de tales aspectos de gran importancia es el relativo a la presión de neumáticos en las ruedas debido al hecho de que un pinchazo repentino puede provocar fácilmente un accidente. Además, en áreas con gran riesgo de ser asaltado en la carretera, una detención involuntaria en conexión con un cambio de ruedas lleva aparejada un aumento en el riesgo personal para conductores y pasajeros. Otro aspecto más relacionado con la economía de conducción está basado en el hecho de que un neumático con una presión de aire baja se desgasta más rápidamente que un neumático correctamente inflado. Una indicación de la presión de aire del neumático es por lo tanto un medio para evitar tales costes innecesarios.

**El estado de la técnica**

Existen métodos de medición directa de la presión de neumático en el estado de la técnica anterior, pero requieren un equipo comparativamente caro integrado en el neumático. Tradicionalmente, los métodos que miden indirectamente la presión de neumático se basa bien en un análisis de frecuencias o en un análisis de radios de neumático. El análisis de frecuencias se puede realizar bien mediante computación del espectro de frecuencias utilizando, por ejemplo, una transformada rápida de Fourier (FFT), o por estimación de los parámetros del modelo en un modelo lineal del neumático. Habitualmente, el neumático se modela como un resorte amortiguado y los parámetros del modelo estimados se relacionan con la frecuencia de resonancia, que a su vez depende de la presión del neumático.

Un sistema de presión de neumático basado en un análisis de radios de ruedas se divulga por ejemplo en el documento de patente US 5.922.949, de Nakajima. Como la velocidad angular aumenta cuando el radio de la rueda disminuye, esto es, cuando disminuye la presión del neumático, la presión de neumático relativa se estima comparando la velocidad angular con la velocidad del vehículo. Sin embargo, el radio de la rueda se ve afectado asimismo por el desgaste y deterioro y depende de los estados de conducción, tales como frenado y giro. El análisis de radios de la rueda funciona generalmente bien en buenas condiciones, pero es menos preciso en caso de deslizamiento de las ruedas. No se puede obtener un valor estimado de la presión de cada neumático individual propiamente mediante esta tecnología del estado de la técnica anterior ya que sólo se investigan diferencias entre los radios de diferentes ruedas. Las desventajas de métodos basados en el análisis de radios de ruedas son, por ejemplo, una falta de robustez con relación a los diferentes estilos de conducción y pérdida de funcionalidad durante situaciones de baja fricción o  $\mu$  dividido, esto es, cuando existe una fricción diferente para neumáticos diferentes. Una desventaja adicional es que la totalidad el algoritmo falla en casos de mal funcionamiento de uno de los sensores de velocidad de la rueda. Además, caídas de presión simultáneas en los neumáticos pueden permanecer no detectadas en ciertos casos debido a la naturaleza comparativa de los métodos de análisis de radios de ruedas.

Sistemas de presión de neumático basados en análisis de frecuencias se divulgan, por ejemplo, en los documentos de patente nº EP 0700798, EP 0925960 y US 5.753.809.

En el documento EP 0700798, el análisis de frecuencias se realiza utilizando una transformada rápida de Fourier (FFT) sobre los componentes de alta frecuencia extraídos. El resultado es una frecuencia de resonancia que se compara con una frecuencia de referencia predefinida.

En el documento EP 0925960, la señal de velocidad de ruedas se filtra utilizando un filtro de paso de banda para conseguir una señal de velocidad de rueda que corresponda a los picos de resonancia primero o segundo, dependiendo de la velocidad de la rueda. En esta pieza del estado de la técnica anterior, se utiliza un modelo temporal discreto de segundo orden para el análisis de frecuencias en lugar de la transformada rápida de Fourier. El modelo temporal discreto incluye dos parámetros desconocidos que se identifican mediante el método de mínimos cuadrados. La frecuencia de resonancia se calcula a continuación a partir de los dos parámetros anteriormente mencionados y puede ser relacionada posteriormente con la presión de neumático.

La patente norteamericana US 5.723.809, de Ogusu *et al.*, divulga un método que estima la presión de neumático utilizando un modelo de predicción lineal de segundo orden para la velocidad de giro de la rueda del vehículo y la vibración del neumático utilizando parámetros identificados a partir de los valores de velocidad de giro de cada rueda tratada individualmente. A partir de los parámetros identificados se encuentra una frecuencia de resonancia, y se estima la presión de neumático a partir de una relación lineal entre la presión y la frecuencia de resonancia. Este método disminuye la complejidad de computación en comparación con el método que utiliza la transformada rápida de Fourier, ya que se necesita menos procesamiento aritmético. Una memoria de baja capacidad es satisfactoria y el

método puede ser implementado en un sistema de bajo coste. Esta pieza de estado de la técnica anterior está dirigida a un sistema de estimación de presión de neumático y divulga el uso de un sensor de velocidad de rueda situado en cada rueda. Las señales del sensor se recogen y combinan en un procesador de señal, que saca una señal de indicación de presión de neumático para cada rueda. Este sistema está confinado a producir una señal de presión de neumático dentro de los límites de precisión de los sensores de velocidad de rueda.

Las desventajas encontradas en los métodos estimación de presión de neumático del estado de la técnica anterior basados en análisis de frecuencias son una correlación relativamente débil con la presión y una sensibilidad a diversas fuentes de vibración, por ejemplo dependientes de la velocidad del vehículo.

La patente de EE.UU. n° 5.629.478, de Nakajima *et al.*, divulga un método y un dispositivo para detectar una caída de presión de neumático en los neumáticos del vehículo. Este estado de la técnica anterior concierne específicamente al problema de corregir la influencia sobre la detección de caída de presión de diferentes factores de interferencia, tales como velocidad, radio de giro, aceleración delantera/trasera y aceleración lateral. La corrección se lleva a cabo sustituyendo, en el cálculo de la caída de presión, un valor de velocidad, un valor de aceleración delantera/trasera, un valor de aceleración lateral y un valor de radio de giro del vehículo por una expresión polinómica para determinar un valor de corrección. La expresión polinómica se selecciona específicamente de modo tal que se ejerza una influencia del radio de giro en todos los términos. Este método de evaluación de caída de presión hace uso así de una pluralidad de parámetros de presión de neumático que dependen todos ellos del análisis de radios de ruedas, o expresado de modo diferente, de un análisis de radio de rodadura. Sin embargo, las propiedades compensatorias parecen ser limitadas.

En resumen, métodos efectivos de estimación de presión de neumático deberían compensar un número de fenómenos diferentes, tales como giro, aceleración, par de tracción y fricción, que pueden provocar una diferencia de radio de rueda virtual o experimentada. Todos los métodos del estado de la técnica anterior parecen ser insuficientes en el manejo de altas velocidades, esto es, situaciones en las que el par de tracción es grande.

Debe notarse que la palabra neumático se refiere en general a una pieza gruesa de goma o material similar ajustada sobre las ruedas de vehículos a ruedas. La goma se rellena usualmente con un gas, siendo el más común aire comprimido. Este texto aplica a todo tipo de neumáticos, aunque los ejemplos se refieren en su mayoría a neumáticos de goma rellenos de aire.

El documento DE-A-4409846 divulga, de acuerdo con los preámbulos respectivos de las reivindicaciones independientes 1, 20 y 22, un aparato de detección de velocidad para un cuerpo giratorio y un método para estimar una presión de neumático de un neumático utilizando un filtro estadístico adaptativo basado en un modelo de vehículo que utiliza señales de la velocidad angular de las ruedas.

El documento EP-A-0938987 divulga un método y un dispositivo para monitorizar la presión de aire de un neumático de las ruedas de un automóvil. Esta pieza de estado de la técnica anterior se basa en un análisis de deslizamiento de rueda y determina un valor de desfase que se utiliza para determinar las presiones relativas de neumático de las ruedas.

### Objeto de la invención

El objeto de la invención es resolver el problema de proporcionar un método mejorado y un sistema para estimar la presión de neumático en las ruedas de un vehículo.

Aspectos del problema son:

- conseguir un indicador de presión de neumático con un grado de precisión mejorado;
- proporcionar robustez con relación a, por ejemplo, diversos estilos de conducción, giro, casos de conducción a baja fricción y situaciones de  $\mu$  dividido;
- proporcionar una detección de caídas de presión simultáneas en los neumáticos.

Un aspecto adicional del problema es proporcionar una señal de velocidad de rueda mejorada a partir de sensores de velocidad de rueda existentes.

### Sumario de la invención

El objeto de la invención se consigue mediante un método y un sistema que comprenden determinar o estimar valores de parámetros en un filtro adaptativo basado en un modelo de presión de neumático predeterminado o preseleccionado, dando así como resultado un sistema de ecuaciones determinadas adaptativamente para calcular un valor indicativo de presión de neumático. De acuerdo con un aspecto de la invención, el modelo se basa preferiblemente en la dinámica lateral del vehículo dependiente de la velocidad angular de las ruedas de un vehículo y de parámetros indicativos de un movimiento lateral del vehículo. La estimación de los valores de parámetros del modelo se calcula en dependencia de la entrada de señales paramétricas indicativas de la dinámica lateral del vehículo, preferiblemente en forma de una señal de velocidad angular de una o de una pluralidad de ruedas, y preferiblemente una señal de gui-

ñada, posiblemente en combinación con o como alternativa a una señal de aceleración lateral. Un valor de indicación de presión de neumático, por ejemplo en forma de un valor de desfase de presión de neumático, que depende de y es indicativo de la presión de neumático de un neumático, se calcula a continuación dependiendo de los valores de parámetros del modelo. En contraste con el estado de la técnica anterior, la invención estima valores de parámetros de un modelo de cálculo de presión de neumático predeterminado o preseleccionado, de modo tal que el modelo se adapta a la situación específica actual. El inventor se ha dado cuenta de que estimando valores de parámetros del modelo de presión de neumático en un proceso de filtrado recursivo, se tiene en consideración un gran número de fuentes de error y se suprime su influencia en el valor del estimador del parámetro, y en la siguiente etapa la influencia del error sobre el valor de indicación de presión de neumático.

En un aspecto adicional de la invención, un primer valor indicación de presión de neumático que se basa en un primer modelo dinámico se utiliza en conjunción con un segundo valor indicación de presión de neumático basado en un segundo modelo dinámico diferente para la estimación de presión de neumático. Esta técnica de estimación tomada conjuntamente con un proceso de evaluación diseñado específicamente, empleado en un modo de realización ventajoso de la invención, proporciona una aplicación mejorada adicionalmente de la indicación de presión de neumático.

Los parámetros del modelo adaptativo se calculan preferiblemente por medio de un filtro recursivo preferiblemente en forma de un filtro recursivo de mínimos cuadrados, o todavía más ventajosamente un filtro Kalman que opera en un modelo de espacio de estados.

Un aspecto importante de la invención se realiza en modelos complejos y filtros que integran y comprenden parámetros que representan diferentes bases en términos de principios físicos o dinámicas, tales como combinaciones de dinámicas laterales y longitudinales o adición de otros tipos de parámetros tales como parámetros del motor y fricción de carretera. Diferentes señales de sensor se integran en estos modelos complejos realizando así una fusión de sensor.

Un modo de realización específico de la invención aplica una combinación de un primer modelo de estimación en la forma de un análisis de frecuencias mejorado y un segundo modelo de estimación en la forma de un análisis de radios de rueda mejorado basado en señales de velocidad de rueda medida. De acuerdo con un aspecto ventajoso de la invención, el análisis de frecuencias comprende un modelo temporal discreto de segundo orden dotado de un filtro Kalman para la estimación de un parámetro de resorte, una característica que atenúa eficientemente el ruido y aumenta la precisión teórica así como la práctica del análisis. Más específicamente, este modo de realización comprende un cálculo del desfase de deslizamiento del parámetro de fricción que constituye un valor indicativo de presión de neumático. El parámetro de desfase de deslizamiento es independiente de la fuerza de fricción y de tracción, y por lo tanto la invención proporciona una estimación de presión de neumático que es insensible a diferentes niveles de fricción, y es robusta con relación a diferentes estilos de conducción. Un modo de realización del análisis de radios de rueda comprende un cálculo de:

- En primer lugar, la diferencia relativa en radios de rueda de las ruedas delanteras y traseras para las parejas de ruedas izquierda y derecha, respectivamente, lo que da una indicación de si una de las ruedas bien izquierda o derecha tiene una presión anormal. Preferiblemente, las diferencias relativas en los radios de rueda se calculan a partir de un modelo de fricción diseñado para compensar diferentes fenómenos tales como giro, aceleración, par de tracción y fricción, que pueden provocar una diferencia de radio de rueda virtual o experimentada.

- En segundo lugar, la diferencia relativa en radios de rueda de las ruedas izquierda y derecha para la pareja de ruedas delantera y trasera, respectivamente, que de modo similar da una indicación de si una de las ruedas bien delanteras o traseras tiene una presión anormal. Este segundo análisis de radios de rueda se basa en un modelo de fusión de sensor que además de las señales de los sensores de velocidad de rueda recoge señales de un giróscopo de guiñada.

Modos de realización de la invención pueden comprender asimismo un control de paridad del radio de rueda con el fin de proporcionar un indicador de si uno de los neumáticos tiene un radio anormal.

De acuerdo con aspectos adicionales, modos de realización de la invención comprenden un pre-procesamiento dotado de un algoritmo de calibración basado en un modelo de autoregresión para la señal de pulso de la rueda medida con el fin de generar una señal de velocidad de rueda computada mejorada para la estimación de la presión de neumático. En particular, esta es una característica ventajosa en modos de realización que utilizan un sensor de velocidad de rueda que comprende una rueda dentada y un detector de borde acoplado a cada rueda respectiva. Los sensores de este tipo son comunes en los sistemas de frenos antibloqueo (ABS) estándares de los vehículos modernos. Un problema típico con tal rueda dentada es que ni la distancia entre los dientes ni el tamaño de los dientes es uniforme, y consecuentemente se genera una señal de velocidad de rueda imprecisa. Este problema puede agravarse incluso durante el funcionamiento debido al hecho de que la rueda dentada generalmente está mal protegida del daño mecánico, por ejemplo por piedras o gravilla. Modos de realización de la invención comprenden por lo tanto un método de corrección para corregir las imprecisiones que surgen de la rueda dentada.

Una ventaja con la presente invención es que la funcionalidad funciona bien en vehículos con cualquier número de ruedas, incluso en vehículos de una rueda, y quizás de modo más práctico en vehículos de dos ruedas tales como motocicletas, en coches estándar con cuatro ruedas o camiones con pares de ruedas extra.

## ES 2 342 256 T3

Modos de realización de la presente invención se aplican ventajosamente para la detección de desequilibrado de ruedas, estimación de la textura superficial y detección de desniveles superficiales. Estas aplicaciones se explican en mayor profundidad a continuación.

- 5 La invención es aplicable y adaptable a todo tipo de vehículos transportados sobre ruedas neumáticas, tales como coches, motocicletas, camiones o tractores con cualquier número de ruedas de acuerdo con los diferentes modos de realización y aspectos adicionales descritos en la descripción detallada.

### Breve descripción de los dibujos

- 10 La presente invención se explicará más ampliamente por medio de modos de realización ejemplares en conjunción con los dibujos adjuntos, en los cuales:

15 la figura 1 muestra un diagrama de bloques que ilustra las etapas del método general así como los medios funcionales de un modo de realización de la invención;

la figura 2 muestra un diagrama de bloques que ilustra un modo de realización de la invención aplicado a un vehículo de cuatro ruedas;

20 la figura 3 muestra un diagrama de bloques de un modo de realización del pre-procesado de la señal del sensor mostrado la figura 1;

la figura 4 muestra una rueda dentada de un sensor de velocidad de rueda utilizado en conexión con la invención;

25 la figura 5A muestra un diagrama de la señal de velocidad angular de rueda emitida por una rueda dentada ideal;

la figura 5B muestra un diagrama ejemplar de la señal de velocidad angular de rueda emitida por una rueda dentada no ideal;

30 la figura 6 muestra un diagrama de un espectro de energía de una señal de velocidad angular de rueda no corregida;

la figura 7 muestra un diagrama de desfases en radianes representado para el diente de una rueda dentada;

35 la figura 8 muestra un diagrama del espectro de energía resultante de una señal de velocidad angular de rueda tras su corrección de acuerdo con la invención;

la figura 9 muestra un diagrama de bloques general de la corrección de la rueda dentada de acuerdo con invención;

40 la figura 10 muestra un diagrama de un espectro de energía ejemplar en el dominio de frecuencias para una señal de velocidad angular de un coche;

la figura 11 muestra un diagrama de flujo de la separación de bandas de frecuencia en una señal de velocidad angular;

45 la figura 12 muestra un diagrama de flujo de la reducción inventiva de la frecuencia de muestra en la banda de frecuencias inferiores;

la figura 13 muestra diagramas de espectros de frecuencias de señales para diferentes etapas del proceso de reducción en la banda de frecuencias inferiores;

50 la figura 14 muestra un diagrama de flujo de la reducción inventiva de la frecuencia de muestra en la banda de frecuencias superiores;

55 la figura 15 muestra diagramas de espectros de frecuencias de señales para diferentes etapas del proceso de reducción en la banda de frecuencias superiores;

la figura 16 muestra un diagrama de flujo general de una funcionalidad de decimación de datos utilizando solape;

la figura 17A muestra las señales de entrada y salida de la decimación de datos utilizando solape;

60 la figura 17B ilustra interpolación;

la figura 17C muestra un diagrama de flujo de un proceso de interpolación;

65 la figura 18C muestra un diagrama de estimación de frecuencia de resonancia utilizando un filtro Kalman para tres presiones de aire de neumático diferentes;

la figura 18A y 18B muestra diagramas de flujo de modos de realización de la estimación del modelo adaptativo;

## ES 2 342 256 T3

la figura 19 ilustra un modo de realización con una estimación de filtro adaptativo basada en una combinación de análisis de guiñada y análisis de radios de rueda;

la figura 20 muestra las relaciones geométricas en un vehículo de cuatro ruedas;

las figuras 21 y 22 muestran diagramas de estimaciones de presión de neumático resultantes con y sin filtro no lineal para acelerar la adaptación;

la figura 23 muestra las relaciones entre valores de desfase;

las figuras 24 y 25 muestran diagramas vectoriales para detectar un neumático con baja presión;

las figuras 26 y 27 muestran modos de realización para guiñada de alta precisión y fricción de carretera basados en la estimación de la presión de neumático;

las figuras 28-32 muestran diagramas relativos a una aplicación de la invención a motocicletas;

las figuras 33 y 34 muestran modos de realización para integrar guiñada de alta precisión y análisis de vibraciones en la estimación de presión de neumático.

### Descripción detallada de modos de realización

#### *Ajuste general*

La invención comprende un método y una realización del método que puede llevarse a cabo en hardware, software o en una combinación de los mismos. La realización más practicable de la invención se llevará a cabo con más probabilidad en la forma de un producto de programa de ordenador, que comprenda preferiblemente un portador de datos dotado de un código de programa u otros medios diseñados para controlar o dirigir un aparato de procesamiento de datos para realizar las etapas y funciones de método de acuerdo con la descripción. Un aparato de procesamiento de datos que ejecute el método inventivo incluye típicamente una unidad de procesamiento central, medios de almacenamiento de datos y un interfaz I/O para señales o valores de parámetros. La invención puede llevarse a cabo asimismo como un hardware y software de diseño específico en un aparato o un sistema que comprenda mecanismos y etapas funcionales u otros medios para llevar a cabo las etapas y funciones de método de acuerdo con la descripción. En la práctica, la invención se implementará típicamente en un sistema de control de sensor analógico o digital de un vehículo. Tal sistema incluye enlaces de comunicación de datos por cable, ópticos o inalámbricos para comunicar la salida de un sensor a una unidad de control. La unidad de control propiamente está dotada de un procesador de datos del tipo anteriormente mencionado. La entrada y salida de diferentes bloques funcionales se describe en este texto en términos de señales, las cuales deben ser interpretadas como señales analógicas, señales muestreadas o datos que representen los parámetros o entidades descritos.

#### *Estimación de presión de neumático*

La estimación de la presión de neumático se calcula en base al menos parcialmente a la velocidad angular de cada rueda sometida a estimación. La señal de velocidad angular se toma preferiblemente de sensores de velocidad angular de un sistema de frenos antibloqueo (ABS) instalado en el vehículo, o de sensores instalados específicamente a los efectos de la invención. Sin embargo, tales sensores no son muy precisos generalmente, por ejemplo debido a imperfecciones en la fabricación y al desgaste mecánico. Se proporciona por lo tanto un modo de realización de la invención dotado de una etapa de pre-procesamiento que comprende una calibración de la señal de sensor medida, una característica que mejora enormemente la precisión de la señal de velocidad de rueda computada. Modos de realización del pre-procesamiento inventivo y del algoritmo de calibración, respectivamente, se explicarán asimismo en más profundidad a continuación. En los casos en que se proporcione una señal de velocidad angular lo suficientemente precisa, la invención se lleva a cabo sin la etapa de pre-procesamiento.

En un modo de realización, se calcula una primera estimación de la presión de neumático en base a un primer modelo de fenómenos de vibración, y se lleva a cabo un análisis de vibración utilizando un modelo estimado adaptativamente del espectro de frecuencias de las vibraciones. A continuación se calcula un primer valor indicativo de una presión de neumático dependiendo de valores de parámetros resultantes del análisis de vibración. Con el fin de mejorar adicionalmente la precisión del valor indicativo de presión de neumático, la estimación de presión de neumático basado en frecuencias se combina con una segunda estimación de presión de neumático basada en un segundo modelo, que implica preferiblemente un análisis de los radios de rueda basado asimismo en la señal de velocidad angular.

La figura 1 muestra un diagrama de flujo que ilustra los componentes funcionales así como las etapas de método de un modo de realización de la invención. Una señal de velocidad angular  $1$  o  $\omega$  es recibida desde cada rueda en unos medios de pre-procesamiento  $2$  que llevan a cabo, por ejemplo, un algoritmo de calibración. Modos de realización del pre-procesamiento comprenden asimismo un algoritmo de decimación de datos, que disminuye la carga computacional en un factor de hasta  $5$ , en comparación con una secuencia de datos o señal no pre-procesada. Una señal de velocidad angular  $3$  pre-procesada y, por lo tanto, mejorada se transmite a continuación a unos medios de estimación del modelo  $4$ , que están diseñados para estimar parámetros  $4$  de los cuales depende la presión de neumático en base al dicho primer

principio físico de vibraciones. Preferiblemente, se lleva a cabo una estimación del modelo en base a un análisis de frecuencias individual para cada rueda. Un primer estimador 7 de la presión de neumático se calcula a continuación a partir de los valores de parámetros 4 obtenidos en la etapa 4.

5 En paralelo, la señal de velocidad angular  $\omega$  original 1 o la pre-procesada 3, como se muestra con la línea intermitente, se transmite asimismo a unos segundos medios de estimación de la presión de neumático 8, 9 para la estimación de la presión de neumático en base a dicho segundo principio físico. Preferiblemente, la segunda estimación de neumático comprende unos medios de análisis de radios de rueda 8 diseñados para calcular los radios de rueda y unos segundos medios de cálculo de la presión de neumático 15 que producen un segundo estimador 16 de la presión de neumático. Además, se calculan posiblemente diferentes relaciones o estimadores 9 de los radios de ruedas respectivos para ser usados como un complemento al primer estimador de presión de neumático 7 de la etapa 6. Preferiblemente, la diferencia relativa en radios de rueda de las ruedas delantera y trasera para los pares de rueda izquierdo y derecho, respectivamente, se computan a partir de un modelo de fricción. La diferencia relativa se utiliza como una indicación de una presión anormal en cualquiera de las ruedas derecha o izquierda. En un modo de realización de la invención desarrollado adicionalmente se toma otra señal de entrada al análisis de radios de rueda de un giróscopo de guiñada y se combina con una computación similar de la diferencia relativa en radios de rueda de las ruedas izquierda y derecha para los pares de rueda delantera y trasero, respectivamente. La combinación con la señal del giróscopo de guiñada se utiliza para compensar el giro, aceleración y fricción, y da como resultado un indicador de si cualquiera de las ruedas delantera o trasera presenta una presión anormal. Posiblemente, se puede incluir asimismo un control de paridad de radios de rueda con el fin de generar un indicador de si alguno de los cuatro neumáticos tiene un radio anormal.

El análisis de radios de rueda y los modos de realización que utilizan un filtrado Kalman en la estimación del modelo (explicados a continuación) se basan preferiblemente en un modelo de fricción, en el que el deslizamiento  $s$  de una rueda se define como la diferencia relativa entre una velocidad circunferencial,  $\omega_w r_w$  de una rueda conducida, y su velocidad absoluta  $v_w$ , así pues  $s = (\omega_w r_w - v_w)/v_w$ . En estas ecuaciones,  $\omega_w$  es la velocidad angular de la rueda, y  $r_w$  el radio de la rueda. La velocidad absoluta de una rueda conducida se calcula a partir de la velocidad de dos ruedas no conducidas utilizando relaciones geométricas. El coeficiente de fricción  $\mu$  se define como el cociente entre la fuerza de tracción,  $F_i$ , y la fuerza normal,  $N$ , sobre la rueda conducida. Dicho coeficiente de fricción se denomina asimismo como la fuerza de tracción normalizada. La pendiente de deslizamiento,  $k$ , se define como  $d\mu/ds$  para  $\mu = 0$ , y es diferente para diferentes texturas superficiales. Dicha pendiente de deslizamiento se denomina comúnmente como la rigidez longitudinal, pero en este texto se prefiere pendiente de deslizamiento. Sin embargo, el deslizamiento  $s$  es distinto de cero cuando la fuerza de tracción,  $F_i$ , es cero, y debido a una pequeña diferencia en radios de rueda efectivos aparece un desfase de deslizamiento,  $\delta$ . Este desfase de deslizamiento,  $\delta$ , tiene la característica ventajosa de ser independiente de la fricción y la fuerza de tracción, y es dependiente sólo del radio del neumático. La velocidad angular de rueda  $\omega$  se calcula en base a la señal del sensor de velocidad de rueda y el deslizamiento  $s$  se calcula a su vez a partir de la velocidad angular. Además, el par motor  $M$  requerido en algunos modos de realización de la invención para calcular una fuerza de tracción normalizada  $\mu$ , se calcula preferiblemente en base a señales de sensores del motor. Para la estimación del modelo, explicada a continuación, los parámetros  $\omega$  y  $\mu$  se introducen entonces en un filtro adaptativo, por ejemplo un filtro Kalman, estimando adaptativamente la pendiente de deslizamiento,  $k$ , y el desfase de deslizamiento,  $\delta$ .

De vuelta a la figura 1, el primer estimador 7 de presión de neumático así como el segundo estimador 16 de presión de neumático y posiblemente asimismo los cálculos 9 de radios de rueda son recibidos a continuación en unos medios de evaluación 10 diseñados para evaluar la señal de entrada y calcular un estimador 11 de presión de neumático resultante. Por lo tanto, se corrigen o compensan los primeros estimadores 7 de presión de neumático de situaciones de conducción que son manejadas con incertidumbre en la estimación del modelo basado en frecuencias por medio de las dependencias de los radios de rueda respecto a la presión de neumático real. Ejemplos de tales situaciones de conducción compensadas son el giro, aceleración y fricción. En otras palabras, los medios de evaluación 10 son de hecho medios para la fusión de diferentes señales de sensor o diferentes señales derivadas del mismo sensor con el fin de hacer un uso optimizado de la información disponible. Pruebas experimentales han mostrado que con esta invención se puede conseguir una estimación de presión de neumático que se desvíe tan sólo en aproximadamente un 15% de la presión de neumático real.

55 Como se muestra finalmente en la figura 1, el estimador 11 de presión de neumático resultante se transmite, de acuerdo con un modo de realización ejemplar, a unos medios de detección de cambio 12 diseñados para generar una señal de alarma en respuesta a cambios detectados de acuerdo con reglas predeterminadas. Por ejemplo, se puede generar una primera señal de alarma si la presión de neumático de un neumático disminuye más del 25% en un periodo de tiempo corto, lo que indica un pinchazo, y se puede generar una segunda alarma si la presión de neumático aumenta por encima de un nivel predeterminado.

#### *Aplicación a vehículo de cuatro ruedas*

65 En la figura 2, se muestra un modo de realización de la invención por medio de un diagrama de bloques que representa etapas de método así como unidades funcionales de la invención. El modo de realización mostrado se diseña para una estimación de presión de neumático en un vehículo de cuatro ruedas, y se debe apreciar que modos de realización adaptados a otros números de ruedas tendrían la misma estructura básica. Este modo de realización comprende o utiliza un sensor de velocidad de rueda 101, 102, 103, 104 que detecta la velocidad angular de cada rueda.

## ES 2 342 256 T3

Los sensores de velocidad de rueda son preferiblemente equipo existente en el vehículo, por ejemplo proporcionado en conexión con un sistema de frenos antibloqueo (ABS).

La señal del sensor de velocidad de cada rueda se pre-procesa individualmente por los medios de pre-procesamiento de señal del sensor 111, 112, 113, 114 y a continuación se filtra mediante unos medios de filtrado 121, 122, 123, 124 adaptativos o recursivos, adaptados para una estimación del modelo de frecuencias y un cálculo de valores de parámetros de los cuales depende la presión de neumático. A continuación se lleva a cabo un análisis de frecuencias en unos medios de análisis de frecuencias 131, 132, 133, 134 sobre los valores de parámetros obtenidos y se genera para cada rueda una señal de presión de neumático calculada, que se transmite a una primera unidad lógica 140. En la primera unidad lógica 140, las señales de presión de neumático calculada se procesan, por ejemplo con relación a unos valores umbrales predeterminados, y se generan y emiten señales de presión de neumático para la rueda delantera izquierda FL, la rueda derecha izquierda RL, la rueda delantera derecha FR y la rueda trasera derecha RR, respectivamente, desde la primera unidad lógica 140. Posiblemente además o alternativamente, se generan y emiten por dicha primera unidad lógica 140 una o más señales de aviso W1.

Un desarrollo adicional de la invención puede comprender asimismo una segunda unidad lógica 142, en la cual se introducen las señales de presión de neumático FL, RL, FR, RR. La segunda unidad lógica 142 está acoplada opcionalmente asimismo a unos medios para estimar el desfase de deslizamiento 144, diseñados para realizar una estimación del desfase de deslizamiento en base a la señal original de velocidad angular de rueda de los sensores de velocidad de rueda 101, 102, 103, 104 o la velocidad angular pre-procesada de los medios de pre-procesamiento 111, 112, 113, 114. La entrada de velocidad angular de rueda se muestra en la figura 2 como  $\omega$  por simplicidad. Los valores de desfase de deslizamiento estimados para cada rueda se transmiten a la segunda unidad lógica 142 como una entrada para una evaluación y estimación mejoradas adicionalmente de las presiones de neumático. De modo similar, se pueden proporcionar asimismo unos medios de análisis de radios de rueda 146 o unos medios de estimación de desplazamiento de radio de rueda 148 que añadan información para una estimación mejorada de las presiones de neumático. La segunda unidad lógica 142 está adaptada para generar un segundo conjunto de señales de presión de neumático 150 mejoradas para las ruedas o una señal de alarma W2 dependiente de reglas predeterminadas.

### *Pre-procesamiento*

El propósito de la etapa de pre-procesamiento es mejorar la calidad de la señal en la cual se basa la estimación del modelo. Un modo de realización de los medios de pre-procesamiento adaptado para este tipo específico de dispositivo de medición se describe como ejemplo. Otros tipos de sensores aplicados en la invención necesitarían un esquema general de pre-procesamiento similar, aunque los detalles serían adaptados a la corrección específica de problemas en cada caso. La figura 3 muestra un modo de realización de un método de pre-procesamiento así como los medios funcionales para llevar a cabo el método. Una señal de velocidad angular 202 procedente de un sensor de velocidad de rueda se introduce así en los medios de pre-procesamiento 201 que comprenden una secuencia de unos medios de corrección de señal de detector 204, unos medios de remuestreo 206, unos medios de filtrado de paso de banda 208 y unos medios de submuestreo/decimación de datos 210.

### *Corrección de señal de detector*

El dispositivo de medición de velocidad angular de rueda más común en los coches estándares modernos y en otros vehículos se basa en una rueda dentada dispuesta sobre la rueda del vehículo y giratoria con la misma y un sensor, por ejemplo un sensor óptico o inductivo, que detecta cada borde de diente. Se mide el tiempo transcurrido entre la detección de los dos últimos bordes de diente y se calcula una velocidad angular con la ecuación:

$$(1) \quad \omega = (2\pi/N) \cdot \Delta t \quad [\text{rad/s}]$$

en donde N es el número de dientes de la rueda dentada y  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido entre dos dientes detectados. Un problema con este tipo de dispositivos es que la rueda dentada habitualmente no es ideal, por ejemplo debido a tolerancias mecánicas de producción, esto es, la distancia entre los dientes y los tamaños de los dientes no son completamente uniformes y, por lo tanto, el incremento de ángulo entre todos los dientes típicamente no es uniforme. Además, la rueda dentada está a menudo insuficientemente protegida contra daños mecánicos y deformación, causada por ejemplo por piedras o gravilla. Éstos y otros fenómenos hacen que la señal de velocidad angular sea incorrecta.

La figura 4 ilustra una rueda dentada 401 en la que se dibujan la silueta de una rueda ideal en línea de puntos, y una rueda más realista, no ideal, se dibuja en línea continua.  $\alpha_i$  es el ángulo real entre el diente i y el diente i - 1, y  $\delta_i$  es el error de desfase. La figura 5A muestra la velocidad angular como función del tiempo t y para un coche que se desplace con una velocidad constante, la señal de salida teórica  $\omega$  de un sensor de velocidad de rueda que tiene una rueda dentada ideal, por lo que resulta una  $\omega$  constante. La figura 5B muestra de modo similar un ejemplo de una señal de salida  $\omega$  de un sensor de rueda dentada imperfecta, real, lo que da como resultado una constante  $\omega$  periódicamente, con una periodicidad de N, esto es, el número de dientes. En el dominio de frecuencias, las perturbaciones periódicas en la señal de velocidad angular provocan un impulso con un gran número de componentes armónicos. La figura 6 muestra un espectro de energía de una señal de velocidad angular de rueda no corregida, en cuyo espectro los componentes que

## ES 2 342 256 T3

se originan de la rueda dentada imperfecta domina y hacen que otros componentes de frecuencias sean inobservables. Las partes interesantes de la señal tienen a menudo las mismas frecuencias que las perturbaciones.

El período de la señal de velocidad constante periódicamente es el mismo que el de la propia rueda del vehículo, esto es con una rueda normal que tenga una circunferencia de, aproximadamente, 1,8 m y una velocidad de vehículo de 80 km/h la rueda gira una vuelta en  $T_{lap} = 1,8/(80/3,6) = 0,081$  s. Esto es equivalente a una frecuencia de  $f_{lap} = 1/0,081 = 12,3$  Hz. Esto debe compararse con el hecho teórico de que las imperfecciones de la rueda dentada tienen una frecuencia fundamental de, aproximadamente,  $v/(3,6*1,8)$  Hz, dependiendo así de la velocidad real  $v$ . Como se representa en la figura 6, la frecuencia fundamental de los impulsos es de, aproximadamente, 11,6 Hz, lo que se corresponde bien con la frecuencia teórica de la rueda dentada. La figura 6 muestra así el espectro de frecuencias, esto es, la transformada de Fourier de una señal de velocidad de rueda no corregida e ilustra la distorsión provocada por errores mecánicos.

De acuerdo con la invención, las imperfecciones de la rueda dentada se identifican y a continuación las perturbaciones originadas por la rueda dentada se eliminan de la señal de velocidad angular. De nuevo en referencia a la figura 4, los errores de desfase  $\delta_i$  se identifican con el fin de encontrar los factores de corrección. El ángulo real  $\alpha_i$  es desconocido pero puede ser calculado aproximadamente con

$$(2) \quad \alpha_i = \omega \cdot \Delta t$$

en donde  $\omega$  es la velocidad angular actual de la rueda. La velocidad de rueda  $\omega$  actual se puede calcular de diversas maneras, y con el fin de mantener el algoritmo original tan sólo se utilizan mediciones antiguas de acuerdo con la invención. En un modo de realización,  $\omega$  se calcula utilizando la velocidad promedio durante la última vuelta, de acuerdo con:

$$(3a) \quad \omega = 2\pi / (t_i - t_{i-N})$$

Preferiblemente, se utiliza un algoritmo adaptativo, por ejemplo un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos (RLS) generales o un algoritmo de filtrado Kalman para identificar el error de desfase. La ventaja de utilizar un algoritmo adaptativo del tipo RLS es que si ocurren nuevos errores se adapta a la nueva rueda dentada. Con esta aproximación, la velocidad angular se expresa como:

$$(3b) \quad \omega = (2\pi/N + \Theta_i) / \Delta t$$

El modelo de regresión lineal para identificar los errores de la rueda dentada relativos a causas mecánicas es:

$$(4) \quad \begin{aligned} y(t_i) &= \omega(t_i) \cdot \Delta t_i - 2\pi N \\ \theta &= (\delta_1 \delta_2 \dots \delta_N)^T \\ \phi(t_i) &= (0 \ 1 \ \dots \ 0) \text{ posición } i \text{ mod } N \text{ es } 1 \\ \omega(t_i) &= 2\pi / (t_i - t_{i-N}) \\ \Delta t_i &= t_i - t_{i-1} \\ \sum_{i=1}^N \delta_i &= 0 \end{aligned}$$

En la ecuación 4,  $\omega$  es la velocidad angular actual,  $N$  es el número de dientes y  $t_i$  es el instante en el que el último diente pasó el sensor. La velocidad angular actual no está disponible y por lo tanto se calcula de los datos pasados. Los datos pasados se pueden tomar de un número arbitrario de revoluciones ( $k$ ), aunque existe un compromiso entre sensibilidad y retraso de la señal. Como condición de contorno adicional, la suma de la totalidad del desfase debe ser 0.

## ES 2 342 256 T3

La solución de un modelo de regresión lineal con RLS es:

$$\begin{aligned}
 (5) \quad & y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t) \text{ modelo de regresión} \\
 & \hat{\theta} = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \\
 & K(t) = P(t)\varphi(t) \\
 & P(t) = \left[ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right] / \lambda
 \end{aligned}$$

Los errores de desfase ( $\delta_1 \delta_2 \dots \delta_N$ ) se estiman entonces combinando las ecuaciones (4) y (5) y aplicándolas a la señal de la unidad de medición de velocidad angular.

Los errores de desfase típicos estimados por medio del algoritmo descrito se muestran en la figura 7, el error de desfase en radianes se representa para cada diente. Como se ve en la figura 7, algunos dientes tienen desfases relativamente grandes que distorsionan las señales de velocidad de rueda de modo bastante evidente. Cuando los errores de desfase se identifican, la señal de velocidad de rueda se corrige mediante, por ejemplo:

$$\begin{aligned}
 (6a) \quad & \alpha_{i,corr} = \frac{2\pi}{N} + \delta_i \\
 & \omega_{corr} = \frac{\alpha_{i,corr}}{\Delta t_i}
 \end{aligned}$$

en donde el ángulo se corrige con los errores mecánicos identificados antes de que la señal de velocidad de rueda correcta se calcule. En una segunda alternativa la señal de velocidad de rueda se corrige mediante:

$$\begin{aligned}
 (6b) \quad & \Delta t_{i,corr} = \Delta t_i - \delta_i / \omega(t_i) \\
 & \omega_{corr} = \frac{2\pi}{\Delta t_{i,corr}}
 \end{aligned}$$

en donde el tiempo transcurrido entre los dos últimos dientes se corrige con el conocimiento de los errores mecánicos antes de que la señal de velocidad de rueda correcta sea calculada.

Aquí en las ecuaciones 6a y 6b  $\Delta t$  es la señal original,  $\delta$  es el desfase para el diente real y  $\omega$  es la velocidad de rueda actual usando la calculada por ejemplo con la ecuación 3.

En la figura 8 se presenta el espectro de energía resultante, esto es, la transformada de Fourier de la señal de velocidad de rueda tras su corrección, y es claro que casi todos los armónicos debidos a la distorsión por errores mecánicos se eliminan totalmente, y se pueden extraer los componentes de la señal real.

La figura 9A muestra un diagrama de flujo que resume el modo de realización descrito utilizado en una variedad de correcciones 204 de las señales de detector de la figura 3, tomando así como entrada el tiempo transcurrido entre dos dientes  $\Delta t$  tras lo cual se crea 902 un modelo de regresión lineal. En base al modelo de regresión lineal la rueda dentada se identifica con un RLS y se estiman 904 los errores de desfase. A continuación, se lleva a cabo 906 una corrección de la señal de velocidad de rueda y se saca un tiempo transcurrido corregido  $\Delta t_{corr}$ . De modo similar, la figura 9B muestra el proceso de corrección alternativo utilizado en una variedad alternativa de la corrección 204 de señal de detector de la figura 3, que introduce  $\Delta t$  en una etapa de creación 908 de un modelo de regresión lineal, que identifica y estima el desfase debido a errores mecánicos 910, corrige la señal de velocidad de rueda y saca una  $\omega_{corr}$  corregida.

## ES 2 342 256 T3

### Remuestreo y reducción de la frecuencia de muestreo

El proceso de remuestreo 206, filtrado de paso de banda 208 y submuestreo 210 en el pre-procesamiento como se describe en la figura 3 se describe en conjunción con las figuras 10 a 17.

5

La aplicación más factible de la invención es en un sistema de control digital en el que la señal de velocidad angular  $\omega(t)$  de un sensor de velocidad de rueda se muestrea, y la señal muestreada o datos  $\omega(nT_1)$ , con la frecuencia de muestreo de  $1/T_1$ , está disponible para los componentes del sistema. Como se explicó anteriormente, esta información es suficiente para que una estimación de presión de neumático sea estimada independientemente para cada rueda, en particular en un intervalo de baja presión. Cuando se lleva a cabo el análisis de frecuencias existen básicamente dos intervalos de frecuencias dependientes de la presión para los cuales se puede extraer información acerca de la presión de aire de neumático. Estos dos intervalos se denominan aquí como intervalo de baja frecuencia e intervalo de alta frecuencia, respectivamente. La figura 10 muestra un espectro de energía ejemplar en el dominio de frecuencias para una señal de velocidad angular de un coche, en el que se indican el intervalo de baja frecuencia 1001 y el intervalo de alta frecuencia 1002.

15

El componente de baja frecuencia se debe sustancialmente al hecho de que el lateral de la rueda es elástico, y consecuentemente puede tener lugar una vibración si se excitan las frecuencias correspondientes. Esta frecuencia es altamente dependiente del tipo de neumático, ya que diferentes tipos de neumático tienen diferente elasticidad. La alta frecuencia se origina sustancialmente en la banda de rodadura del neumático, y como el tamaño de la banda de rodadura de neumático es mucho menor que la rueda, la frecuencia de la banda de rodadura de neumático es alta.

20

En un modo de realización de la invención, se utiliza información de ambos intervalos con el fin de reducir la frecuencia de muestreo y, por lo tanto, reducir asimismo la tasa de datos. Por lo tanto, la información de frecuencias de los dos intervalos de frecuencia se separa por medio de dos filtros de paso de banda. La figura 11 muestra un diagrama de flujo de tal separación, en el que una señal de velocidad angular muestreada  $\omega(nT_1)$  se introduce en un primer filtro de paso de banda 1101 que tiene una banda de paso baja en el intervalo  $[f_1 f_2]$  Hz y en un segundo filtro de paso de banda 1102 que tiene una banda de paso alta en el intervalo  $[f_3 f_4]$  Hz. La salida del filtro de paso de banda baja 1101 es una primera nueva señal  $\omega_1(nT_1)$  y de el filtro de paso de banda alta es una segunda nueva señal  $\omega_2(nT_1)$ . A continuación, el espectro de intervalo de baja frecuencia se mueve a  $[0 f_2 - f_1]$  Hz y el espectro del intervalo de alta frecuencia se mueve a  $[0 f_4 - f_3]$  Hz en, y en conexión con el desplazamiento de frecuencia se lleva a cabo una reducción de la frecuencia de muestreo.

25

30

La figura 12 muestra un diagrama de flujo de las etapas para desplazar el espectro de frecuencias y para reducir la frecuencia de muestreo en la banda de baja frecuencia. La señal muestreada  $\omega_1(nT_1)$ , mostrada en la figura 13a, se introduce en una etapa de decimación de datos 1201, que decima los datos con un factor  $k_1$ , salvando cada  $k_1$ -ésima muestra y descartando el resto de las muestras. La decimación da como resultado una señal  $y_1(nT_1k_1)$  que se representa en la figura 13b. La señal  $y_1(nT_1k_1)$  se modula a continuación en una etapa 1202 con  $\cos(2\pi f_1 T_1 k_1)$ , generando por lo tanto la señal modulada  $y_2(nT_1k_1)$ , que se representa en la figura 13c. Con el fin de permitir una decimación adicional, la señal  $y_2(nT_1k_1)$  se filtra a través de un filtro de paso bajo (LP) 1204, evitando por lo tanto el solape. El resultado del filtrado de paso bajo es una señal en  $y_3(nT_1k_1)$ , representada en la figura 13d. Finalmente la señal  $y_3(nT_1k_1)$ , es decimada en la etapa 1206 en un factor  $k_2$ , salvando cada  $k_2$ -ésima muestra y descartando el resto de las muestras. Así pues, la señal de salida de este proceso de decimación de datos tiene una frecuencia de muestreo que se reduce de  $1/T_1$  en la señal de entrada a  $1/T_1k_1k_2$  de la señal de salida  $y_4(nT_1k_1k_2)$  resultante, representada en la figura 13e y está disponible para su procesamiento posterior.

35

40

45

La figura 14 muestra un diagrama de flujo similar de las etapas para reducir la frecuencia de muestreo en la banda de frecuencia superior. La señal muestreada  $\omega_2(nT_1)$ , mostrada en la figura 15a, se modula en la etapa 1401 con  $\cos(2\pi f_3 T_1)$ , utilizando así la frecuencia  $f_3$  y generando por lo tanto la señal modulada  $y_5(nT_1)$ , que se muestra en la figura 15b. La señal  $y_5(nT_1)$ , se filtra a continuación por ejemplo mediante un filtro de paso bajo (LP) 1402, retirando la componente que provocará un solape en la etapa de decimación. El resultado del filtrado de paso bajo es una señal en  $y_6(nT_1)$ , representada en la figura 14c, que se introduce en una etapa de decimación de datos 1403 que decima los datos con un factor  $k_3$  salvando cada  $k_3$ -ésima muestra y descartando el resto de las muestras. La decimación da como resultado una señal  $y_7(nT_1k_3)$ , que se representa en la figura 15d. Así pues, la señal de salida del proceso de decimación de datos tiene una frecuencia de muestreo que se reduce de  $1/T_1$  en la señal de entrada a  $1/T_1k_3$  de la señal de salida  $y_7(nT_1k_3)$  resultante y está disponible para su procesamiento.

50

55

La técnica de modulación descrita anteriormente en conexión con los esquemas de reducción de datos es bastante costosa computacionalmente, en particular para el intervalo de alta frecuencia en el que una gran parte del procesamiento de señal tiene que ser llevado a cabo a la frecuencia de muestreo original. Un modo de realización alternativo de la invención se basa por lo tanto en una utilización del fenómeno de solape. Este modo de realización se muestra por medio de un ejemplo aplicado al intervalo de alta frecuencia. La figura 16 muestra un diagrama de flujo en el que una señal de velocidad angular de alta frecuencia  $\omega_2(nT_1)$  se introduce en una etapa de decimación de datos 1601, que decima los datos con un factor  $k_4$  y saca la señal resultante  $y_8(nT_1k_4)$  salvando cada  $k_4$ -ésima muestra y descartando el resto de las muestras. La señal de entrada  $\omega_2(nT_1)$  así como la señal de salida  $y_8(nT_1k_4)$  se muestran en las figuras 17a y 17b, respectivamente.

60

65

## ES 2 342 256 T3

### Interpolación de datos no equidistantes

5 Cuando se han corregido señales de, por ejemplo, el ABS en una etapa de pre-procesamiento con relación a imperfecciones en la rueda dentada, se interpolan los datos con el fin de permitir el uso de teoría estándar para sistemas muestreados equidistantemente. La idea detrás de la interpolación es convertir datos  $\omega_1(t_1), \omega_2(t_2), \omega_3(t_3) \dots$  recogidos en instantes  $t_1, t_2, t_3 \dots$  a una nueva secuencia de datos  $\omega'_1(t_0), \omega'_2(t_0 + T), \omega'_2(t_0 + 2T) \dots$  Este proceso debe ser realizado en línea y son posibles diversos métodos, tales como interpolación lineal o interpolación de spline. La figura 17B ilustra la idea detrás de interpolar, esto es, que comprende las etapas para:

- 10 1. Encontrar la última muestra tomada en un instante  $< nT$
2. Encontrar la primera muestra tomada en un instante  $\geq nT$
3. Calcular el gradiente entre dichos valores último y primero
- 15 4. Calcular el valor en el instante  $nT$  utilizando la interpolación a lo largo de la línea recta

20 La implementación es directa y una alternativa a la interpolación lineal se ilustra como un diagrama de flujo en la figura 17C, que comprende las etapas 1702-1719.

### Filtrado-BP para preparar la señal para la identificación de modelo

25 En modos de realización que identifican un modelo de parámetros de orden inferior, tal como AR(2), para estimar la presión de neumático en un modelo basado en vibraciones, la frecuencia de resonancia se separa preferiblemente de otras perturbaciones. Esto se consigue utilizando un filtro digital de paso de banda (BP) expresado en la forma

$$30 \quad (7) \quad y(n) = a_1y(n-1) + \dots + a_Ny(n-N) + b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M)$$

35 en donde  $x(n)$  es la señal original y  $y(n)$  es la señal filtrada. Las características del filtro se deciden por los coeficientes de filtro:

$$40 \quad (8) \quad a_k \quad k = 1 \dots N$$

y

$$45 \quad (9) \quad b_l \quad l = 1 \dots M$$

Existen muchas elecciones diferentes para los coeficientes de filtro y se calculan utilizando métodos estándar conocidos en sí mismos. Ejemplos son filtros temporales discretos Cauer, Butterworth, Chebyshev I o Chebyshev II entre otros. Con el fin de reducir el orden de filtro puede ser preferible sin embargo un filtro Cauer en comparación con un Butterworth, como ejemplo de las consideraciones que deben ser tenidas en cuenta.

### Estimación de modelo

55 El análisis de vibraciones de la invención se basa en un modelo de resorte del neumático y en el hecho bien conocido de que la rugosidad de la carretera así como el par motor excitan frecuencias de resonancia en el neumático. Utilizando señales de velocidad de rueda de los sensores de velocidad de rueda como punto de partida, se encuentra un pico distintivo en el espectro de energía dependiente de la presión de neumático, por ejemplo en el intervalo de frecuencias de 40-50 Hz. Una presión de neumático estimada se calcula por lo tanto por medio de un análisis de frecuencias sobre señales de velocidad de rueda de un modo conocido en sí mismo.

65 El neumático se modela como un resorte amortiguado, lo que expresado en forma temporal discreta es:

$$(10) \quad y_t = -a_1y_{t-1} - a_2y_{t-2} + e_t$$

## ES 2 342 256 T3

Con el modelo aplicado en un sistema de presión de aire de neumático,  $y_t$  es la velocidad angular real de la rueda y  $e_t$  es el ruido externo de la carretera y el estado presente del vehículo. Este es un modelo de autoregresión de segundo orden con una función de transferencia

$$(11) \quad G(q) = \frac{1}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}}$$

en donde  $q$  es un operador tal que  $q^{-1}y_t = y_{t-1}$ . El propósito de la estimación del modelo, esto es la identificación del sistema, es estimar los parámetros del modelo  $a_1$  y  $a_2$  de los cuales se puede calcular el indicador de neumático. Existen métodos alternativos para llevar a cabo la estimación de los parámetros, sin embargo es importante que los algoritmos se ejecuten en línea, lo que significa que cada muestra debe ser tratada inmediatamente en lugar de como un lote de datos recogidos y procesados fuera de línea con el fin de evitar retrasos temporales en el sistema de detección. De acuerdo con la invención, la estimación se lleva a cabo preferiblemente por medio de un algoritmo de estimación adaptativo tal como un método de mínimos cuadrados recursivos (RLS) o un filtrado Kalman.

### *Estimación de modelo por mínimos cuadrados recursivos*

En un modo de realización de la estimación del modelo inventiva, los parámetros del modelo se estiman por medio de un método por mínimos cuadrados recursivos (RLS). Este modo de realización comprende la introducción del vector de parámetros y el vector de regresión como:

$$(12) \quad \begin{aligned} \theta &= (a_1 \ a_2)^T \\ \varphi_t &= (-y_{t-1} \ -y_{t-2})^T \end{aligned}$$

para simplificar la notación. A continuación, el criterio

$$(13) \quad V_t(\theta) = \sum_{k=1}^t \lambda^{t-k} [y(k) - \varphi^T(k)\theta]^2$$

se minimiza con respecto a  $\theta$ , por medio de RLS. La solución a (9) se obtiene por medio del algoritmo recursivo:

$$(14) \quad \begin{aligned} P(t) &= \left[ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right] / \lambda \\ K(t) &= P(t)\varphi(t) \\ \hat{\theta} &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \end{aligned}$$

La variable de diseño en RLS es el factor de olvido  $\lambda$ . Un valor de  $\lambda$  grande (próximo a 1) hace que el algoritmo recuerde un gran número de mediciones antiguas y, por lo tanto, tiene una ganancia de adaptación pequeña. Un valor de  $\lambda$  pequeño, por otro lado, hace al algoritmo más rápido, pero la vez es más sensible a perturbaciones. Ambos parámetros  $a_1$  y  $a_2$  tienen la misma ganancia de adaptación, y sólo uno de ellos es útil para la estimación de la presión de neumático. Pruebas experimentales han mostrado que el parámetro  $a_1$  está fuertemente relacionado con la presión, mientras que  $a_2$  presenta una correlación pobre.

La figura 18A muestra un diagrama de flujo general de la estimación del modelo inventiva utilizando mínimos cuadrados recursivos, que comprende las siguientes etapas:

1802 establecer o crear un modelo de regresión lineal;

1804 estimar valores de parámetros por medio de un proceso de mínimos cuadrados recursivos;

1812 transformar los parámetros a una frecuencia de resonancia.

## ES 2 342 256 T3

### Estimación de modelo de espacio de estados

Otro modo de realización de la estimación del modelo y de la estimación de parámetros se basa en un filtrado Kalman basado en un modelo de espacio de estados. En el sistema de cálculo de la presión de aire en neumático inventivo, el modelo de espacio de estados se expresa por ejemplo como:

$$\begin{aligned}
 x_{t+1} &= Ax_t + v_t \quad \text{Cov}(v_t) = Q_t \\
 y_t &= C_t x_t + e_t \quad \text{Cov}(e_t) = R_t \\
 x_t &= (a_1 \ a_2)^T \\
 A &= I \quad C_t = (-y_{t-1} \ -y_{t-2}) \\
 Q_t &= \begin{pmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{pmatrix} \quad R_t = 1
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

La variable de diseño en el filtro Kalman es la matriz de covarianza  $Q_t$ , que es una descripción de la relación entre  $Q_t$  y  $R_t$ . El filtro Kalman permite diferentes ganancias de adaptación ( $q_1$  y  $q_2$ ) para los parámetros  $a_1$  y  $a_2$ , respectivamente, lo que es una ventaja importante en la estimación del modelo ya que uno de los parámetros tiene en consideración las diferentes presiones de aire en neumático y el otro parámetro gestiona algunas de las perturbaciones externas.

Tras la estimación de los valores de parámetros, los parámetros se transforman o se convierten en una frecuencia de resonancia. Con la función de transferencia expresada en la ecuación (11) anterior, el modelo de neumático de la ecuación (10) puede escribirse como:

$$\begin{aligned}
 y(q) &= G(q) e(q) \\
 G(q) &= \frac{1}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Los polos en  $G(q)$  son un conjugado complejo, y el ángulo  $\alpha$  entre los polos y el eje de números reales corresponde a la frecuencia de resonancia. El cálculo del ángulo  $\alpha$  es implementado en un modo de realización ejemplar del sistema de cálculo de presión de neumático implementado con ventajas computacionales como:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\sqrt{-(a_1/2)^2 - a_2}}{(a_1/2)} \right)
 \tag{17}$$

Como  $\alpha$  está en el intervalo  $[0 \pi]$  debe ser transformado con relación al periodo de muestreo  $T_s$ , con el fin de obtener la frecuencia de resonancia  $\omega_{res}$ , en donde

$$\omega_{res} = \frac{\alpha}{2\pi \cdot T_s} \text{ [Hz]}
 \tag{18}$$

Cuando la presión de aire en neumático disminuye, el parámetro dependiente  $a_1$  disminuye y como consecuencia disminuye igualmente la frecuencia de resonancia  $\omega_{res}$ .

La figura 18B muestra un diagrama de flujo general de la estimación del modelo inventiva utilizando un filtro Kalman que comprende las siguientes etapas:

- 1808 establecer o crear un modelo de espacio de estados;
- 1810 estimar valores de parámetros por medio de un proceso de filtrado Kalman;
- 1812 transformar los parámetros a una frecuencia de resonancia.

La figura 18 muestra un diagrama del curso de la estimación de la frecuencia de resonancia con el filtro Kalman para tres presiones de aire en neumático diferentes, curva 1 = 2,3 bar, curva 2 = 1,95 bar y curva 3 = 1,6 bar.

*Indicador de presión de neumático que usa ritmo de guiñada de alta precisión*

En un modo de realización de la invención, se consigue un indicador de presión de neumático (TPI) adaptativo combinando una primera estimación de presión de neumático en base a un primer principio físico, preferiblemente un análisis de radios de rueda sobre un fenómeno de radios de rodadura con una estimación basada en un segundo principio físico, siendo preferiblemente un análisis sobre fenómenos de guiñada. El análisis de radios de rueda se computa preferiblemente en dependencia de señales de sensores de velocidad angular de un sensor ABS, y el análisis de guiñada se computa preferiblemente en dependencia de señales de un giróscopo. En una variedad ventajosa de este modo de realización, se utilizan adicionalmente señales de un acelerómetro lateral para mejorar el rendimiento del sistema.

La figura 19 muestra un diagrama de flujo que ilustra esquemáticamente los componentes funcionales así como las etapas de método de un modo de realización de un indicador de presión de neumático que comprende una estimación del modelo adaptativo 1902 que recibe como señales de entrada una señal de guiñada  $\Psi$  de un giróscopo y señales de velocidad angular de rueda  $\omega_i$  de un ABS. La estimación del modelo 1902 se lleva a efecto preferiblemente como un filtro adaptativo, por ejemplo un filtro Kalman basado en un modelo de espacio de estados como se describió anteriormente. Las señales de entrada son posiblemente pre-procesadas en una etapa 1901 de pre-procesamiento con el fin de mejorar la calidad de la señal y su usabilidad. Las señales de entrada se reciben asimismo en una etapa 1906 de evaluación de la observabilidad diseñada para determinar la observabilidad de los parámetros y para transmitir una señal de activación a la etapa de estimación del modelo adaptativo en el caso de que la observabilidad sea determinada positivamente. La etapa 1902 de estimación del modelo adaptativo produce como salida señales de desfase  $\delta_{front}$  y  $\delta_{rear}$  respectivamente, y  $\delta_{front\ hat}$  y  $\delta_{rear\ hat}$ , respectivamente. Las señales de desfase  $\delta_{front}$  y  $\delta_{rear}$  se introducen en un filtro no lineal 1904 que por medio de una conexión de retroalimentación transmite su salida  $q_{front}$  y  $q_{rear}$  de vuelta a la etapa de estimación 1902 del modelo adaptativo con el fin de acelerar la adaptación tras una caída de presión. Los parámetros  $q$  describen la velocidad de adaptación para los dos valores de desfase y normalmente es pequeña (lenta). Sin embargo, si ocurriera una caída de presión la velocidad de adaptación se aumenta con el fin de permitir el seguimiento de la nueva situación. Los valores o señales que representan  $\delta_{front\ hat}$  y  $\delta_{rear\ hat}$  se transmiten a una etapa 1908 de evaluación diseñada para evaluar cambios en la presión de neumático y para generar señales de indicación de cambio, por ejemplo en forma de una alarma de acuerdo con reglas predeterminadas.

La figura 20 muestra un dibujo esquemático de un vehículo de cuatro ruedas durante el giro, en el cual las relaciones geométricas se definen para las velocidades de rueda usadas para computar una estimación de guiñada a partir de señales de velocidad de rueda. Las ruedas en esta aplicación se denotan por  $r_l$  para la trasera izquierda,  $r_r$  para la trasera derecha,  $fl$  para la delantera izquierda y  $fr$  para la delantera derecha. Se dibuja asimismo en la figura 20 un sistema de coordenadas que indica las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

En la estimación del modelo adaptativo 1902 se calcula un valor de guiñada de alta precisión por medio de una primera señal de guiñada procedente del giróscopo en combinación con un segundo valor de guiñada calculado en dependencia de señales de velocidad angular de rueda. Las siguientes ecuaciones se utilizan en este proceso:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi} &= \frac{v_x}{R} = v_x R^{-1} \\ a_y &= \frac{v_x^2}{R} = v_x^2 R^{-1} = v_x \dot{\Psi} \end{aligned} \tag{19}$$

en donde:

$\dot{\Psi}$  es la guiñada a partir de un giróscopo;

$v_x$  es la velocidad del vehículo en la dirección  $x$  tomada de un sistema ABS; y

$a_y$  es la aceleración en la dirección  $y$  tomada opcionalmente de un acelerómetro lateral, e introducida en la estimación del modelo adaptativo.

El radio de curvatura se define como la distancia entre el centro rotacional del coche y el punto medio del eje trasero, y se computa de acuerdo con la siguiente relación en la que  $R$  era se definen como la distancia al centro del eje de ruedas trasero,

$$\frac{v_{rr}}{v_{rl}} = \frac{R_{rr}}{R_{rl}} = \frac{R + L/2}{R - L/2} \tag{20}$$

## ES 2 342 256 T3

Las velocidades angulares de rueda  $\omega$  para cada una de las ruedas respectivas se reciben de un ABS y el inverso de  $R$ ,  $R^{-1}$ , se resuelve con el fin de evitar problemas numéricos en ciertos casos de conducción, por ejemplo en conducción recta. Esto da como resultado:

$$(21) \quad R^{-1} = \frac{2 \frac{v_{rl}}{v_{rr}} - 1}{L \frac{v_{rl}}{v_{rr}} + 1} = \frac{2 \frac{\omega_{rl} r_{rl}}{\omega_{rr} r_{rr}} - 1}{L \frac{\omega_{rl} r_{rl}}{\omega_{rr} r_{rr}} + 1}$$

en donde el radio de rueda se denota como  $r_r$ .

La razón de radios de rueda está sometida a un desfase:

$$(22) \quad \frac{r_{rl}}{r_{rl}} \equiv 1 + \delta_{rear}$$

La influencia del desfase sobre el denominador es despreciable, de modo que en modos de realización preferidos se utiliza la siguiente expresión para el inverso del radio de curva:

$$(23) \quad R^{-1} = \frac{1}{L} \frac{2}{\frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} + 1} \left( \frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} (1 + \delta_{rear}) - 1 \right) = R_m^{-1} + \frac{1}{L} \frac{2}{\frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} + 1} \delta_{rear}$$

en donde la cantidad computable

$$(24) \quad R_m^{-1} = \frac{1}{L} \frac{2}{\frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} + 1} \left( \frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} - 1 \right)$$

se utiliza para el radio de curva inverso.

La velocidad en el centro del eje de ruedas trasero es:

$$(25) \quad v_{x,m} = \frac{\omega_{rl} + \omega_{rr}}{2} r$$

en donde  $r$  denota el radio de rueda nominal.

Finalmente, la guiñada se computa con:

$$(26) \quad \dot{\Psi} = v_{x,m} R_m^{-1}$$

En una implementación práctica de este modo de realización, las mediciones de sensor son típicamente como sigue:

-  $y_1(t)$  se toma de un sensor de guiñada, esto es, una señal de giróscopo

-  $y_2(t) = v_{x,m,rear} R_{m,rear}^{-1}$ , de sensores ABS traseros;

## ES 2 342 256 T3

-  $R_{m,rear}^{-1}$  se computa como  $R_m^{-1}$  anteriormente;

-  $v_{x,m,rear}$  como  $v_{x,m}$ ;

5 -  $y_3(t) = v_{x,m,front} R_m^{-1}$ , de sensores ABS delanteros; y

-  $R_{m,front}^{-1}$  y  $v_{x,m,front}$  se computan del mismo modo que  $R_m^{-1}$  y  $v_{x,m}$ , en donde  $\omega_{fl}$  se sustituye por  $\omega_{fl}$  y  $\omega_{fr}$  se sustituye con  $\omega_{fr}$ .

10

Todas estas mediciones de sensor están sometidas a un desfase y a ruido de medición dado por las relaciones:

15

$$y_1(t) = \dot{\Psi}(t) + \delta_{giro}(t) + e_1(t)$$

20

$$(27) \quad y_2(t) = v_{x,m,rear}(t) R_{m,rear}^{-1}(t) + e_2(t) = \dot{\Psi}(t) + v_{x,m,rear}(t) \frac{1}{L} \frac{2}{\frac{\omega_{rl}(t)}{\omega_{rr}(t)} + 1} \frac{\omega_{rl}(t)}{\omega_{rr}(t)} \delta_{rear}(t) + e_2(t)$$

25

$$y_3(t) = v_{x,m,front}(t) R_{m,front}^{-1}(t) + e_2(t) = \dot{\Psi}(t) + v_{x,m,front}(t) \frac{1}{L} \frac{2}{\frac{\omega_{fl}(t)}{\omega_{fr}(t)} + 1} \frac{\omega_{fl}(t)}{\omega_{fr}(t)} \delta_{front}(t) + e_3(t)$$

30

en donde  $\delta_{rear}$  es un desfase que depende del radio de rueda relativo entre las ruedas traseras izquierda y derecha, y  $\delta_{front}$  del radio relativo entre las ruedas delanteras izquierda y derecha.  $\delta_{front}$  se define del mismo modo que  $\delta_{rear}$ .

35

De acuerdo con la invención, los desfases se estiman adaptativamente mediante un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos (RLS), mínimos cuadrados medios (LMS) o un filtro Kalman. El filtro Kalman es el preferido y presenta las siguientes ventajas sobre RLS:

- En primer lugar, se puede incorporar en el filtro Kalman un modelo para la variación de la guiñada verdadera.

40

- En segundo lugar, se pueden utilizar diferentes variaciones temporales de los desfases de sensor. Por ejemplo, la temperatura puede influir en la variación del desfase del giróscopo, un arranque en frío pueden hacer que el filtro olvide más del desfase del giróscopo que del desfase del ABS.

45

El filtro Kalman queda completamente especificado por una ecuación de espacio de estados de la forma

$$(28) \quad \begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bv(t) \\ y(t) &= Cx(t) + e(t) \end{aligned}$$

50

en la que las matrices de covarianza de  $v(t)$  y  $e(t)$  se denotan como  $Q$  y  $R$ , respectivamente.

55

El problema al designar una implementación es establecer el modelo de espacio de estados. Un modo de realización ejemplar utiliza el vector de estados:

60

$$(29) \quad x(t) = \begin{pmatrix} \dot{\Psi}(t) \\ \ddot{\Psi}(t) \\ \delta_{giro} \\ \delta_{rear} \\ \delta_{front} \end{pmatrix}$$

65

y un modelo de espacio de estados de tiempo continuo es:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} v(t) \\
 (30) \quad y(t) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & v_{x,m,rear} \frac{1}{L} \frac{2}{\omega_{rl} + 1} \frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & v_{x,m,front} \frac{1}{L} \frac{2}{\omega_{fl} + 1} \frac{\omega_{fl}}{\omega_{fr}} \end{pmatrix} x(t) + e(t)
 \end{aligned}$$

Aquí se asume que existe una entrada desconocida  $v(t)$  que afecta a la aceleración de guiñada, que es un modelo común para modelos de movimiento, motivados básicamente por la ley de Newton  $F = ma$ .

Un modelo de espacio de estados de tiempo discreto se describe en la siguiente ecuación (31) y es utilizado por el filtro Kalman.

$$\begin{aligned}
 x(t+1) &= \begin{pmatrix} 0 & T_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} T_s^2/2 \\ T_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_s^2/2 \\ T_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} v(t) \\
 (31) \quad y(t) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & v_{x,m,rear} \frac{1}{L} \frac{2}{\omega_{rl} + 1} \frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & v_{x,m,front} \frac{1}{L} \frac{2}{\omega_{fl} + 1} \frac{\omega_{fl}}{\omega_{fr}} \end{pmatrix} x(t) + e(t)
 \end{aligned}$$

## ES 2 342 256 T3

Los desfases de radios de rueda relativos no varían durante la conducción normal con presión correcta, y por lo tanto las ganancias de adaptación para los desfases de radios de ruedas son bajas. Para acelerar la adaptación tras una caída de presión en las ruedas traseras se aplica un filtro no lineal, de acuerdo con:

$$(32) \quad \begin{aligned} g(t)_{rear} &= g(t)_{rear} + s(t)_{rear} - v \\ g(t)_{rear} &= 0 \text{ si } g(t)_{rear} < 0 \\ \text{si } g(t)_{rear} > h, & \text{ alarma y aumentar } q_{rear} \text{ una muestra} \\ g(t)_{rear} &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{en donde } s(t)_{rear} = y_2(t) - \left( x_1(t) + v_x \frac{1}{L} \frac{2}{\frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} + 1} \frac{\omega_{rl}}{\omega_{rr}} x_4(t) \right).$$

Del mismo modo, se puede aplicar un filtro no lineal para una caída de presión de las ruedas delanteras.

El sistema monitoriza  $\delta_{rear}$  y  $\delta_{front}$  y si cualquiera de estos valores supera un valor umbral  $h$  se proporciona una alarma. Las siguientes reglas predeterminadas se utilizan para decidir qué presiones de neumático son incorrectas.

<u>Evento</u>	<u>Alarma</u>
$\delta_{rear} > h$	Caída de presión en rueda trasera derecha
$\delta_{rear} < -h$	Caída de presión en rueda trasera izquierda
$\delta_{front} > h$	Caída de presión en rueda delantera derecha
$\delta_{front} < -h$	Caída de presión en rueda delantera izquierda

La figura 21 muestra una curva de representación de los resultados de la estimación de presión de neumático sin un filtro no lineal, y la figura 22 muestra los resultados con un filtro no lineal para acelerar la ganancia de adaptación.

En una descripción paso a paso de este modo de realización para un indicador de presión de neumático, el método inventivo comprende las siguientes etapas (en referencia de nuevo a la figura 19):

1) Recoger mediciones:

(a) señales de guiñada de un giróscopo de guiñada;

(b) señales de velocidad angular de rueda de unos sensores ABS;

(c) posible señal de aceleración lateral  $a_y$  de un acelerómetro lateral;

(d) posible ángulo de giro de la rueda de un sensor de ángulo de giro de rueda; introducción a una etapa 1901 de pre-procesamiento o a una etapa 1902 de estimación del modelo adaptativo.

2) Pre-procesar y filtrar datos de sensor no procesados, lo que comprende:

(a) escalado de entradas de sensor a constantes físicas;

(b) filtrado de paso bajo de la guiñada para reducir la cuantificación y los efectos de errores de ruido, por ejemplo promediando sobre unas pocas muestras;

## ES 2 342 256 T3

(c) sincronización rotacional de los dientes para evitar efectos de error por deformidad de dientes, esto es calcular la velocidad angular de rueda usando una vuelta completa de la rueda;

5 (d) tratamiento similar de las señales de sensor 1c) y 1d) para reducir efectos de error conocidos, por ejemplo con filtrado de paso bajo;

(e) realización de un diagnóstico simple en los sensores para ocuparse de funciones de diagnóstico incorporadas al sensor, por ejemplo sensores que utilizan un voltaje de nivel cero para indicar un fallo interno.

10

3) Calcular las entradas de filtro y parámetros en un modelo de error que comprende:

(a) Calcular la estimación de radios inversos de curvatura a partir de las ruedas del eje delantero (ecuación 24, con el índice de rueda cambiado a  $\omega_n$  y  $\omega_{fr}$ ).

15

(b) Calcular la estimación de los radios inversos de curvatura a partir de las ruedas del eje trasero (ecuación 24).

(c) Calcular la estimación de la velocidad del vehículo a partir de los sensores ABS (ecuación 25).

20

(d) Calcular la estimación de la guiñada para las ruedas traseras y delanteras (ecuación 26).

(e) Calcular la función de propagación de errores del desfase de radios de rueda para el eje trasero.

(f) Calcular la función de propagación de errores del desfase de radios de rueda para el eje delantero.

25

4) Examinar la calidad de datos de acuerdo a normas dadas para producir matrices estadísticas para filtrado Kalman, por ejemplo:

30

(a) La velocidad baja aumenta el ruido y otros errores en la guiñada estimada a partir de sensores ABS  $\Rightarrow$  aumentar la matriz de covarianza  $R$ .

(b) Un coche en parada asegura que la guiñada sea exactamente igual a cero  $\Rightarrow$  disminuir la matriz de covarianza  $R$ .

35

5) Aplicar ecuaciones de filtro Kalman.

6) Detectar cambios utilizando un filtro no lineal.

40

7) Sacar un filtro adaptativo

45

(a) Proporcionar radios de rueda relativos  $\delta_{ABS}$  entre ruedas izquierda y derecha sobre parejas de ruedas delantera y trasera para su uso como un sistema de indicación de presión de neumático.

Si  $|\delta_{ABS}| > h$  supera el umbral  $h$  se proporciona una alarma de caída de presión

50

*Indicador de presión de neumático que usa ritmo de guiñada de alta precisión e indicador de fricción de carretera*

55

En un modo de realización, la indicación de presión de neumático se consigue combinando parámetros basados en dinámicas laterales de vehículo con parámetros basados en parámetros que dependen de la fricción de carretera en un modelo de presión de neumático integrado. Preferiblemente, los parámetros de dinámicas laterales se derivan de una computación de guiñada de alta precisión como se describió anteriormente, y los parámetros de fricción de carretera se derivan de una señal de par que indica el par del motor del vehículo junto con una señal de indicación de razón de marcha. El modelo de presión de neumático integrado está de acuerdo con la invención llevada a cabo en un filtro adaptativo o un algoritmo de estimación adaptativo tal como un método de mínimos cuadrados recursivos o un filtro Kalman, como se describió anteriormente.

60

Utilizando las relaciones geométricas del vehículo descritas en conexión con la figura 20, en las siguientes ecuaciones se describe un método para calcular la fricción de carretera que depende de la velocidad angular de rueda.

65

## ES 2 342 256 T3

Símbolo	Descripción
$\omega_d$	Velocidad angular, rueda conducida [rad/s]
$\omega_n$	Velocidad angular, rueda no conducida [rad/s]
$r_d$	Radio de rueda, rueda conducida [m]
$r_n$	Radio de rueda, rueda no conducida [m]
$T_e$	Par motor [Nm]
$i$	Razón de marcha de motor a ruedas conducidas [-]
$N$	Fuerza normal en la rueda conducida [N]
$s$	Deslizamiento de rueda [-]
$\mu$	Fuerza de tracción normalizada [-]

La rigidez longitudinal  $k$ , que durante condiciones de conducción normales puede ser modelada como:

$$(33) \quad k = \frac{\mu}{s}$$

en donde

$$\mu = \frac{T_e i}{2r_d N}$$

es la fuerza de tracción normalizada y

$$(34) \quad s = \frac{\omega_d r_d - \omega_n r_n}{\omega_n r_n} = \frac{\omega_d r_d}{\omega_n r_n} - 1$$

es el deslizamiento de rueda. Aquí  $N$  es la fuerza normal de neumático que depende de la masa, la geometría del vehículo y el estado del vehículo (tal como la velocidad actual y la aceleración/retardo).

En la práctica se debe tomar en consideración que los radios de rueda  $r_d$  y  $r_n$  son desconocidos. Al introducir  $\delta$  como la diferencia relativa en radios de rueda, esto es:

$$(35) \quad \delta = \frac{r_n - r_d}{r_n} = 1 - \frac{r_d}{r_n}$$

y aproximando el deslizamiento de rueda como:

$$(36) \quad s_m = \frac{\omega_d}{\omega_n} - 1$$

## ES 2 342 256 T3

se obtiene el modelo:

$$(37) \quad s_m \approx s + \delta = \frac{1}{k} \mu + \delta$$

Los parámetros en este modelo,  $1/k$  y  $\delta$ , pueden ser estimados a partir del deslizamiento medido  $s_m$  y de la fuerza de tracción  $\mu$  utilizando un filtro adaptativo (tal como un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos o un filtro Kalman) y el modelo de espacio de estados

$$(38) \quad \begin{aligned} x_{t+1} &= x_t + w \\ s_{m,t} &= H_t x_t + e_t \end{aligned}$$

en donde  $x_t = (1/k \delta)^T$ ,  $H_t = (\mu_t 1)^T$ , y  $w_r$  y  $e_r$  son ruido de proceso y de medición, respectivamente.

Este método se usa separadamente, en un modo de realización, para el lado izquierdo y derecho del vehículo. Esto conduce a dos desfases de radios relativos

$$(39) \quad \begin{aligned} \delta_{left} &= 1 - \frac{r_{fl}}{r_{rl}} \\ \delta_{right} &= 1 - \frac{r_{fr}}{r_{rr}} \end{aligned}$$

asumiendo un coche de tracción delantera. En el caso de un coche de tracción trasera, las fracciones del lado derecho necesitan ser invertidas. Los desfases de radios de rueda relativos no varían durante la conducción normal con presión correcta y, por lo tanto, las ganancias de adaptación ( $q_{left}$  y  $q_{right}$ ) para los desfases de radios de rueda son bajas. Para acelerar la adaptación tras una caída de presión en las ruedas traseras se aplica un filtro no lineal

$$(40) \quad \begin{aligned} g(t)_{left} &= g(t)_{left} + s(t)_{left} - v \\ g(t)_{left} &= 0 \text{ si } g(t)_{left} < 0 \\ \text{si } g(t)_{left} > h, & \text{ alarma y aumentar left una muestra} \\ g(t)_{left} &= 0 \end{aligned}$$

en donde  $s(t)_{left} = y_{left} - (\mu_{t,left} x(t)_1 + x(t)_2)$ . Del mismo modo se puede aplicar el filtro no lineal al lado derecho. El sistema monitoriza  $\Delta_{left}$  y  $\delta_{right}$  y si cualquiera de estos valores supera un umbral  $h$  se proporciona una alarma. La siguiente logística se utiliza para decidir que las presiones de neumático son incorrectas.

Evento	Alarma
$\delta_{left} > h$	Caída de presión en la rueda delantera izquierda
$\delta_{left} < -h$	Caída de presión en la rueda trasera izquierda
$\delta_{right} > h$	Caída de presión en la rueda delantera derecha
$\delta_{right} < -h$	Caída de presión en la rueda trasera izquierda

La figura 23 muestra cómo se relacionan los desfases de radios de rueda relativos de una computación de guiñada de alta precisión y una computación de fricción de carretera. Las figuras 24 y 25 muestran cómo se pueden utilizar estos desfases para identificar si una rueda tiene una baja presión de neumático, con relación a las otras ruedas, e identificar asimismo cuál de las ruedas se desvía en presión de neumático de las otras. Más específicamente, la figura

24 muestra una ilustración de cómo los vectores de desfase en una situación de presión normal de neumático suman cero, aunque con a un pequeño error de estimación debido al hecho de que los neumáticos no son absolutamente similares. La figura 25 muestra una situación en la que el neumático derecho trasero tiene una presión baja y  $\delta_{\text{right}}$  y  $\delta_{\text{rear}}$  son significativamente superiores al error de estimación.

La figura 26 muestra esquemáticamente la computación del desfase a partir de señales CAN 2603 que introduce una guiñada y una velocidad angular de rueda en una etapa 2601 de computación de guiñada de alta precisión, y un par y una indicación de marcha a una etapa 2602 de computación de indicación de fricción de carretera. Los valores de desfase de salida 2604 de las dos etapas de computación son  $\delta_{\text{left}}$  y  $\delta_{\text{right}}$ .

La figura 27 muestra esquemáticamente los valores de desfase 2604, 2701 siendo introducidos en un modelo de presión de neumático integrado como se mencionó anteriormente que comprende parámetros que representan los valores de desfase respectivos en relación a dinámicas laterales de vehículo y fricción de carretera. En un modelo de presión de neumático integrado, llevado a cabo por ejemplo por medio de un filtro Kalman, la salida 2703 se puede ajustar para indicar un aviso de presión 2704, una indicación o identificación de neumático 2706 y una indicación de confianza 2708.

### Estimación de presión de neumático para motocicletas

Una aplicación de la invención se dirige a estimar la presión de neumático en motocicletas. En diferentes modos de realización de la invención se combinan o integran diferentes conjuntos de parámetros y señales de entrada de sensor en el modelo de estimación de presión de neumático. La figura 28 muestra las relaciones geométricas para fuerzas normales y laterales sobre una motocicleta, expresadas en notación bien establecida, y la figura 29 muestra del mismo modo la notación para velocidades angulares.

En el modo de realización para motocicletas de la invención la velocidad angular de las ruedas delantera y trasera, detectada por ejemplo por los sensores de un equipo ABS, se introduce en un modelo predeterminado de estimación de presión de neumático, posiblemente en conjunción con señales de sensor adicionales para mejorar la estimación. Un parámetro adicional utilizado en modos de realización ventajoso es el ángulo de balanceo, detectado por un sensor de ángulo de balanceo. El ángulo de balanceo se utiliza en un modo de realización más sencillo como un umbral para desconectar indicaciones del sistema de estimación de presión de neumático cuando el ángulo de balanceo está fuera de un intervalo permitido. En otro modo de realización, el ángulo de balanceo está comprendido y se integra en el modelo con el fin de aumentar el intervalo de ángulo de balanceo en el cual la estimación de presión de neumático es útil.

La figura 30 muestra esquemáticamente un modo de realización de la invención que toma como entrada señales de velocidad angular para la rueda delantera 3001 y para la rueda trasera 3002, respectivamente, y el ángulo de balanceo 3003 a una etapa 3008 de estimación de presión de neumático que comprende un modelo adaptativo como se describió anteriormente en esta descripción. Las señales de velocidad angular se pre-procesan, antes de su introducción en la etapa de estimación, en una etapa 3006 de pre-procesamiento que comprende preferiblemente una combinación de unos filtros de paso bajo primero y segundo, un remuestreo y una etapa de decimación de datos como se describió en la sección de pre-procesamiento de este texto.

En un modo de realización más avanzado, mostrado esquemáticamente en la figura 31, un modelo de estimación de neumático integrado 3020 comprende señales individuales o combinadas adicionales de sensores que detectan parámetros tales como información de par 3012, frenada 3014, temperatura del aire 3016 y temperatura de neumático 3018 para mejorar adicionalmente el sistema. De modo similar al modo de realización anterior, las señales de sensor adicionales pueden ser procesadas en etapas de pre-procesamiento 3013, 3017, 3019 específicamente adaptadas con el fin de mejorar la calidad de la señal. Además de las ecuaciones anteriores, el modelo adaptado a motocicletas toma en consideración las siguientes ecuaciones básicas para detectar cambios en el radio de rueda efectivo entre las ruedas delantera y trasera. El deslizamiento de rueda para la rueda trasera es:

$$(41) \quad s = \frac{\omega_r r_r - u_r}{u_r} = \frac{\omega_r r_r - \omega_f r_f}{\omega_f r_f} = \frac{\omega_r r_r}{\omega_f r_f} - 1 = \left\{ \delta_r = \frac{r_r}{r_f} \right\} = \frac{\omega_r}{\omega_f} \delta_r - 1$$

Si no se aplica par a ninguna de las ruedas, el deslizamiento es igual a cero, lo que da:

$$(42) \quad s|_{r_r=r_f=0} = \frac{\omega_r}{\omega_f} \delta_r - 1|_{r_r=r_f=0} = 0 \Rightarrow \delta|_{r_r=r_f=0} = \frac{\omega_r}{\omega_f}$$

## ES 2 342 256 T3

El rendimiento se mejora retirando los puntos fuera de control, que típicamente están conectados con tipos de conducción diferentes tales como aceleración, giro y frenada. El parámetro  $\delta$ , se estima preferiblemente utilizando un filtro recursivo, tal como mínimos cuadrados recursivos (RLS) o un filtro Kalman.

5 Un modo de realización mejorado comprende un algoritmo que integra información de par del siguiente modo. Una medición del par aplicado se utiliza para calcular la fuerza aplicada entre la rueda y el suelo. Cuando las fuerzas normales sobre las ruedas son conocidas, se estima la fuerza de tracción normalizada  $\mu = F/N$ . La relación entre deslizamiento y fuerza de tracción normalizada se ilustra en el diagrama de la figura 32. Preferiblemente el sistema se diseña para valores de deslizamiento pequeños, y de aquí la curva puede ser convertida en lineal, y en un modo de  
10 realización se hace, de acuerdo a:

$$15 \quad (43) \quad k = \left. \frac{d\mu}{ds} \right|_{\mu=0}$$

Debido a que la velocidad real de la rueda trasera se aproxima por medio de la velocidad angular multiplicada por el radio de la rueda de la rueda delantera, esta curva tiene un desfase significativo:

$$20 \quad (44) \quad \delta = s \Big|_{\mu=0}$$

25 El modelo lineal para la pendiente de deslizamiento se modela por tanto como  $\mu = k(s-\delta)$ . Con el fin de estimar los parámetros  $k$  y  $\delta$ , se requiere un buen modelo de regresión, preferiblemente:

$$30 \quad (45) \quad s_{medido}(t) = \mu(t) \frac{1}{k} + \delta + e(t) = (\mu(t)1) \left( \frac{1/k}{\delta} \right) + e(t) = H(t)x + e(t)$$

35 Un modelo de espacio de estados para un filtro adaptativo tal como un filtro Kalman se expresa como:

$$40 \quad (46) \quad \begin{aligned} x(t+T) &= x(t) + v(t) \\ y(t) &= H(t)x(t) + e(t) \end{aligned}$$

en donde:

$$45 \quad (47) \quad \begin{aligned} Q(t) &= E v(t) v^T(t) \\ R(t) &= E e(t) e^T(t) \\ y(t) &= s_{medido} \\ H(t) &= (\mu(t)1) \\ x(t) &= (1/k(t)\delta(t))^T \end{aligned}$$

55 Con el fin de calcular la fuerza de tracción normalizada, se estiman las fuerzas normales que actúan sobre la motocicleta. La derivación de estas fuerzas es directa, especialmente si el sistema tiene en consideración el ángulo de balanceo desconectándolo a su vez cuando se inclina, como en la primera alternativa mencionada anteriormente. El método alternativo extiende e integra el ángulo de balanceo en el modelo para hacerlo capaz de manejar la inclinación de la motocicleta. Un modo de realización que lleva a cabo la última alternativa tendrá que manejar las fuerzas laterales que actúan sobre las ruedas, las cuales a su vez influyen en la rigidez longitudinal. De acuerdo con modos de realización de la invención que emplean un filtro Kalman, esto se maneja eficientemente con un filtro Kalman adecuadamente ajustado ya que la rigidez longitudinal puede variar muy rápidamente, por ejemplo debido a diferentes tipos  
60 de carreteras nevadas, con hielo, etc., pero el desfase del radio de rueda cambia lentamente.

65 Con el fin de compensar fuerzas normales y laterales, se derivan a su vez modelos para las fuerzas que actúan sobre las ruedas de acuerdo con las siguientes ecuaciones, para la notación referida a las figuras 28 y 29.

## ES 2 342 256 T3

La fuerza que actúa sobre la rueda delantera perpendicular a la carretera se expresa como:

$$(48) \quad N_f = \frac{l_r}{l_r + l_f} mg - \frac{\cos \Phi}{l_r + l_f} (\dot{u} z_G + l_r \dot{u} \dot{\theta})$$

La fuerza que actúa sobre la rueda trasera perpendicular a la carretera se expresa como:

$$(49) \quad N_r = \frac{l_f}{l_r + l_f} mg + \frac{\cos \Phi}{l_r + l_f} (\dot{u} z_G - l_f \dot{u} \dot{\theta})$$

La fuerza que actúa sobre la rueda trasera en la carretera perpendicular a la dirección de desplazamiento se expresa como:

$$(50) \quad F_{ry} = \frac{m \sin \Phi}{l_r + l_f} (\dot{u} z_G + l_r \dot{u} \dot{\theta})$$

La fuerza que actúa sobre la rueda delantera en la carretera perpendicular a la dirección de desplazamiento se expresa como:

$$(51) \quad F_{fy} = \frac{m \sin \Phi}{l_r + l_f} (-\dot{u} z_G + l_f \dot{u} \dot{\theta})$$

La estimación de presión de neumático inventiva aplicada a motocicletas se adapta así con la ayuda de los algoritmos de esta sección.

### *Fusión de radios de rueda y estimación de presión de neumático basada en vibraciones*

Los modos de realización de la invención se dirigen a estimar la presión de neumático combinando métodos basados en radios de rueda y basados en vibraciones en un modelo de presión de neumático integrado. Más específicamente, este modo de realización emplea los resultados de los distintos modos de realización descritos anteriormente.

La figura 33 ilustra esquemáticamente las etapas funcionales de este modo de realización, tomando señales CAN 3301, tales como velocidad angular de rueda 3302, par 3304, razón de marcha 3306 y guiñada 3308 como una entrada a un modelo que integra una estimación de guiñada 3310 de alta precisión con una estimación basada en fricción de carretera 3312. Los resultados de salida en términos de una primera señal de aviso de presión 3316, un primer identificador de neumático 3318 y un indicador de confianza 3320 se toman como una entrada a un modelo de integración en un algoritmo de fusión, tal como un filtro Kalman como se describió anteriormente. Además, se toman señales de entrada en forma de señales de velocidad angular 3326 de, por ejemplo, sensores ABS 3324, se introducen en un modelo de estimación basada en vibraciones 3328 como se describió anteriormente. La salida del análisis de vibración en forma de un segundo aviso de presión 3330, un segundo identificador de neumático 3332 y un segundo indicador de confianza 3334 se introduce en el modelo de integración 3322. El modelo de integración comprende un filtro adaptativo para estimar parámetros del modelo integrado y calcular a continuación una señal de aviso de presión resultante 3336 y una identificación de neumático 3338 resultante.

La figura 34 muestra un diagrama de flujo para el método de generar un aviso de acuerdo con las etapas 3402 a 3416, utilizando las señales de aviso de presión  $w_i$ , neumático  $t_i$  y confianza  $c_i$ , en donde  $i = 1, 2$ . En primer lugar se comprueba si cualquiera de los algoritmos señala una alarma. Si es así, se comprueba si es el mismo neumático. Si es así, la suma de la confianza se compara con un umbral predeterminado. Si es así, se envía una alarma de que el neumático  $t_i$  tiene una presión baja. Si los métodos tienen avisos para diferentes neumáticos  $t_1 \neq t_2$  el algoritmo compara la confianza y el método con la mayor confianza se comprueba a continuación a un umbral predeterminado. Si la confianza es mayor que el umbral se dispara una alarma para ese neumático.

La invención se ha descrito por medio de modos de realización ejemplares y se debe apreciar que son posibles diversos diseños y combinaciones dentro del concepto inventivo como se define en las reivindicaciones. Además, todos los diferentes aspectos y características funcionales de la invención pueden aplicarse independientemente.

# ES 2 342 256 T3

## REIVINDICACIONES

1. Un método para estimar la presión neumática de un neumático en una rueda de un vehículo, que comprende:

5 recibir como un dato de entrada de una primera señal de sensor de estado del vehículo (1) procedente de un sensor de dicho vehículo, representando dicha señal de sensor un estado del vehículo dependiente de la presión neumática de dicho neumático;

10 calcular un valor (7) dependiente de la presión de neumático por medio de un filtro adaptativo (4) que está basado en un primer modelo predeterminado del estado del vehículo dependiente de la presión de neumático;

calcular una estimación (5) de primeros valores de parámetros de dicho filtro adaptativo dependiente de dicha primera señal de sensor de estado del vehículo y del desfase de dicha señal de sensor;

15 **caracterizado** por las etapas de:

calcular un valor de indicación (10) de presión de neumático dependiente de dichos primeros valores de parámetros (5) del modelo dependiente de la presión de neumático y de un segundo modelo predeterminado dependiente de presión de neumático (8) del estado del vehículo.

20

2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

25 recibir dicha primera señal de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ ) de dicha rueda;

calcular un primer valor de indicación de la presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático del espectro de frecuencias de vibraciones en el neumático de dicha rueda (131), dependiente de dicha señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ );

30 calcular un segundo valor de indicación de la presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas longitudinales (144) que comprende un análisis de radio de rodadura y dependiente de dicha primera señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ );

35 evaluar dichos valores de indicación de presión de neumático primero y segundo;

calcular un valor de indicación de presión de neumático resultante dependiente de dichos valores de indicación de presión de neumático primero y segundo.

40

3. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

45 recibir dicha primera señal de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ ) de dicha rueda y una segunda señal de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo;

calcular un primer valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático del espectro de frecuencias de vibraciones (3328) en el neumático de dicha rueda, representando dicha primera señal de sensor de estado del vehículo la velocidad angular de rueda ( $\omega$ );

50 calcular un segundo valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas laterales del vehículo (3310) dependiente de la primera señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular ( $\omega$ ) de dicha rueda y de la segunda señal de sensor de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo;

55 evaluar dichos valores de indicación de presión de neumático primero y segundo;

calcular un valor de indicación de presión de neumático resultante dependiente de dichos valores de indicación de presión de neumático primero y segundo.

60

4. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

65 recibir dicha primera señal de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $m$ ) de dicha rueda y una segunda señal de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo;

calcular un primer valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas longitudinales (2602) que comprende un análisis de radio de rodadura y

## ES 2 342 256 T3

dependiente de dicha primera señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ );

5        calcular un segundo valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas laterales del vehículo (2601) que depende de la primera señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular ( $\omega$ ) de dicha rueda y de la segunda señal de sensor de estado del vehículo que representa el movimiento lateral de dicho vehículo;

10        evaluar dichos valores indicación de presión de neumático primero y segundo;

10        calcular un valor de indicación de presión de neumático resultante dependiente de dichos valores de indicación de presión de neumático primero y segundo.

15        5. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

15        recibir dicha primera señal de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ ) de dicha rueda y una segunda señal de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo;

20        calcular dicho primer valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático del espectro de frecuencias de vibraciones (3328) en el neumático de dicha rueda dependiente de dicha primera señal de sensor de estado de vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ );

25        calcular un segundo valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas longitudinales (3312) que comprende un análisis de radio de rodadura y que depende de dicha señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ );

30        calcular un tercer valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas laterales de vehículo (3310) que depende de la primera señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular ( $\omega$ ) de dicha rueda y de la segunda señal de sensor de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo;

30        evaluar dichos valores de indicación de presión de neumático primero, segundo y tercero;

35        calcular un valor de indicación de presión de neumático resultante dependiente de dichos valores indicación de presión de neumático primero, segundo y tercero.

40        6. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de

40        recibir dicha primera señal de estado del vehículo que representa la velocidad angular de rueda ( $\omega$ ) de dicha rueda y una segunda señal de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo;

45        calcular dicho primer valor de indicación de presión de neumático basado en un modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de dinámicas laterales de vehículo (1902) que depende de la primera señal de sensor de estado del vehículo que representa la velocidad angular ( $\omega$ ) de dicha rueda y de la segunda señal de sensor de estado del vehículo que representa el movimiento lateral ( $\Psi$ ) de dicho vehículo.

50        7. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores 3-6, en el que dicha señal de sensor de estado del vehículo que representa el movimiento lateral es una señal que indica la guiñada ( $\Psi$ ) de dicho vehículo.

55        8. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores 3-6, en el que dicha señal de sensor de estado del vehículo que representa el movimiento lateral es una señal que indica la aceleración lateral ( $a_y$ ) de dicho vehículo.

9. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

60        integrar, en un filtro adaptativo, parámetros relativos a dinámicas laterales y parámetros relativos a fenómenos de radio de rodadura;

65        estimar los valores de dichos parámetros integrados que dependen de dicha primera señal de estado del vehículo de un sensor de velocidad angular de rueda y de una segunda señal de estado del vehículo de un sensor de indicación de movimiento lateral;

65        calcular una señal de indicación de movimiento lateral mejorada que depende de dichos valores de parámetros integrados.

## ES 2 342 256 T3

10. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

integrar, en dicho filtro adaptativo, parámetros relativos a dinámicas laterales y parámetros relativos a dinámicas longitudinales de dicho vehículo;

5 estimar los valores de dichos parámetros integrados que dependen de una señal indicación de movimiento lateral y de una señal de indicación de fricción de carretera derivada de una señal de velocidad angular de rueda, una señal de par motor y una señal de indicación de marcha;

10 calcular una señal de indicación de presión de neumático mejorada para un neumático identificado, y posiblemente asimismo una indicación de confianza, que depende de dichos valores de parámetros integrados.

11. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el filtro adaptativo de dicho modelo predeterminado es un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos.

12. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el filtro adaptativo de dicho modelo predeterminado es un filtro Kalman que representa un algoritmo de modelo de espacio de estados.

20 13. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además la etapa de pre-procesar una señal de estado del vehículo en forma de una señal de velocidad angular de rueda derivada de un sensor de rueda dentada con respecto a corrección de errores de rueda dentada.

25 14. El método de acuerdo con la reivindicación 11, que comprende además la etapa de interpolar datos no equidistantes en dicha señal de velocidad angular de rueda corregida.

30 15. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además la etapa de reducir la frecuencia de muestreo de una señal de sensor muestreada remuestreando y filtrando por paso de banda las señales de sensor de entrada en unas bandas de frecuencia primera y segunda, y modulando dichas bandas de frecuencia primera y segunda con señales de modulación que dependen de la frecuencia menor de cada banda de frecuencia.

16. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

35 integrar, en un filtro adaptativo, parámetros relativos a grupos diferentes de parámetros de estado del vehículo;

estimar los valores de dichos parámetros integrados que dependen de señales de sensor que representan entidades relativas a dichos grupos de parámetros de estado del vehículo;

40 calcular una señal de indicación de presión de neumático que depende de dichos valores de parámetros integrados, y posiblemente asimismo

calcular señales de indicación secundarias derivadas de los valores de dichos parámetros integrados.

45 17. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además la etapa de:

calcular una primera estimación de un valor de presión de aire en neumático dependiente de dicho primer valor de indicación de presión de neumático y una función de mapeo predeterminada o tabla de mapeo.

50 18. Un producto de programa de ordenador para estimar la presión neumática de un neumático en una rueda de un vehículo, que comprende un código de programa adaptado para dirigir un sistema de procesamiento de datos de un ordenador digital, código de programa de ordenador que comprende conjuntos de instrucciones adaptadas para:

55 recibir en unos medios de procesamiento de datos una entrada de datos de una primera señal de sensor de estado del vehículo (1) de un sensor de dicho vehículo, representando dicha señal de sensor un estado del vehículo que depende de la presión neumática de dicho neumático;

60 calcular un valor dependiente de la presión de neumático (7) por medio de un filtro adaptativo (4) que se basa en un primer modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático del estado del vehículo;

calcular una estimación (5) de primeros valores de parámetros de dicho filtro adaptativo que dependen de dicha señal de sensor de estado del vehículo y del desfase para dicha señal de sensor;

65 **caracterizado** por conjuntos de instrucciones adaptados para:

## ES 2 342 256 T3

calcular, dependiendo de dichos valores de parámetros (5) del modelo dependiente de la presión de neumático y de un segundo modelo (8) predeterminado dependiente de la presión de neumático del estado del vehículo, un valor de indicación de presión de neumático (11) que es dependiente de la presión neumática de neumático e indicativo de la misma;

5

generar una señal indicación de presión de neumático (14) que depende de dicho valor de indicación de presión de neumático.

10

19. El producto de programa de ordenador de acuerdo con la reivindicación anterior, que comprende además unas instrucciones de código de programa adaptadas para dirigir dicho sistema de procesamiento de datos para realizar las etapas y funciones de cualquiera de las reivindicaciones 2-17.

15

20. Un aparato para estimar la presión neumática de un neumático en una rueda de un vehículo, que comprende:

un interfaz de entrada adaptado para recibir en unos medios de procesamiento de datos una entrada de datos de una señal (1) de sensor de estado del vehículo de un sensor de dicho vehículo, representando dicha señal de sensor un estado del vehículo dependiente de la presión neumática de dicho neumático;

20

un aparato de procesamiento de datos adaptado para:

calcular un valor (7) dependiente de la presión de neumático por medio de un filtro adaptativo (4) que está basado en un primer modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático de estado del vehículo;

25

calcular una estimación de primeros valores de parámetros (5) de dicho filtro adaptativo que dependen de dicha primera señal de sensor de estado del vehículo y del desfase de dicha señal de sensor;

**caracterizado** porque dicho aparato de procesamiento de datos está adaptado para:

30

calcular, dependiendo de dichos primeros valores de parámetros (5) del modelo dependiente de la presión de neumático y de un segundo modelo predeterminado dependiente de la presión de neumático (8) del estado del vehículo, un valor de indicación de presión de neumático (11) que es dependiente de la presión neumática de neumático e indicativo de la misma;

35

generar una señal de indicación de presión de neumático (14) que depende de dicho valor de indicación de presión de neumático.

40

21. El aparato de acuerdo con la reivindicación anterior, que comprende además componentes funcionales adaptados para realizar las etapas y funciones de cualquiera de las reivindicaciones 2-17.

45

50

55

60

65

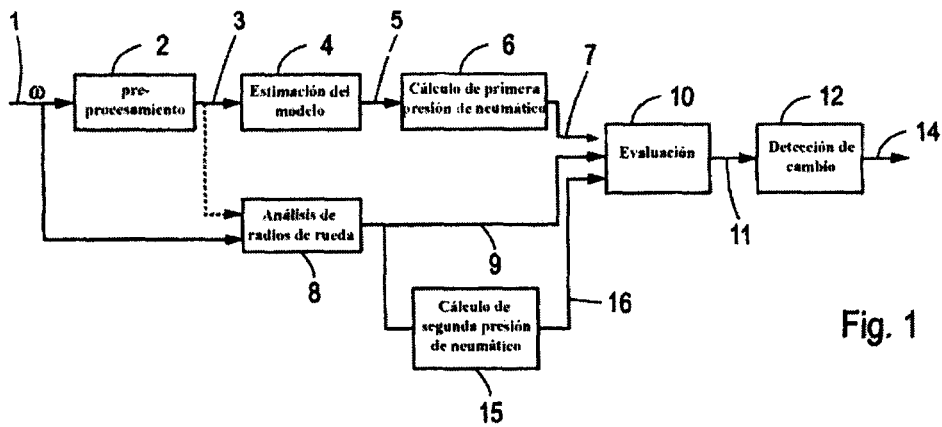


Fig. 1

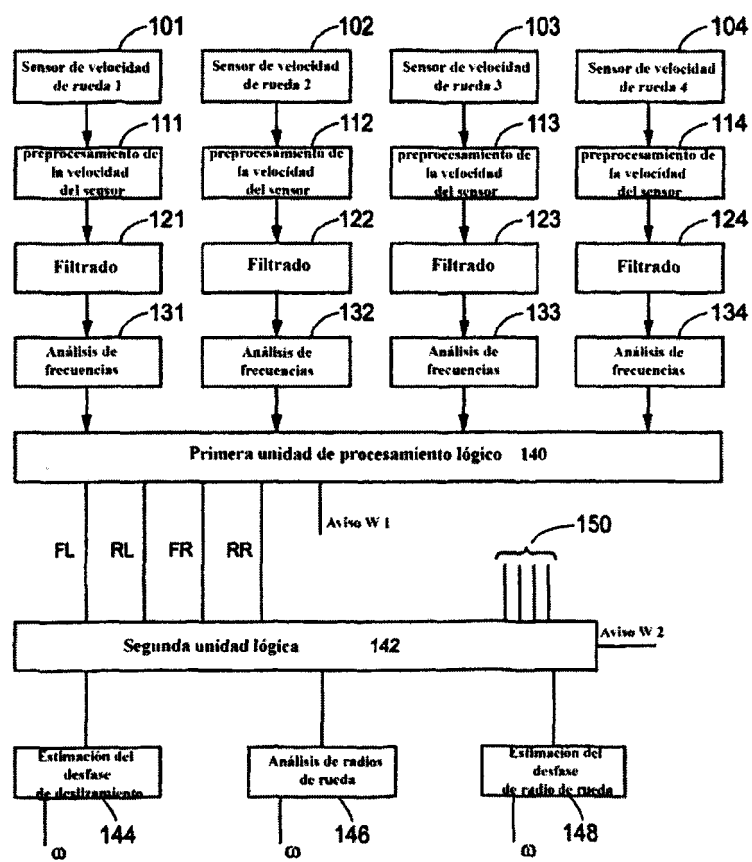


Fig. 2

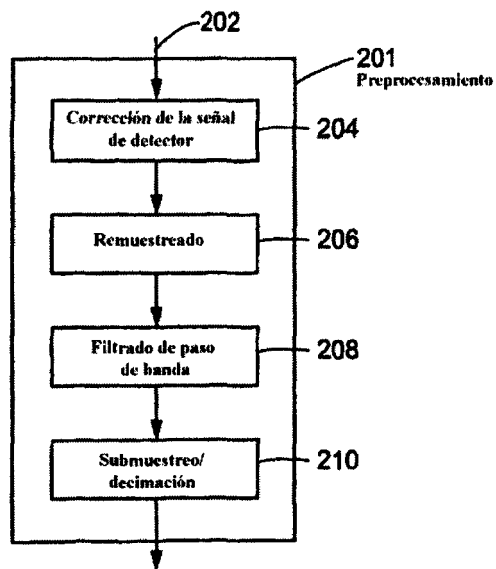


Fig. 3

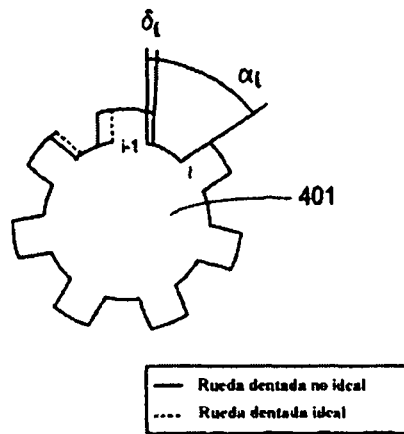


Fig. 4

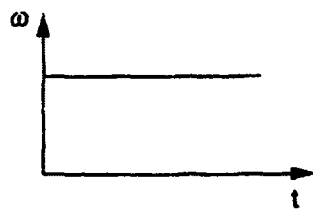


Fig. 5 A

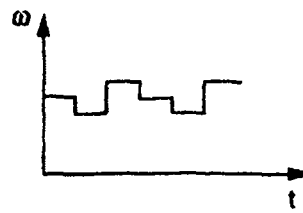


Fig. 5 B

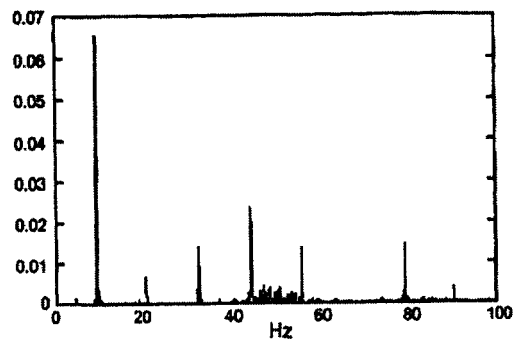


Fig. 6

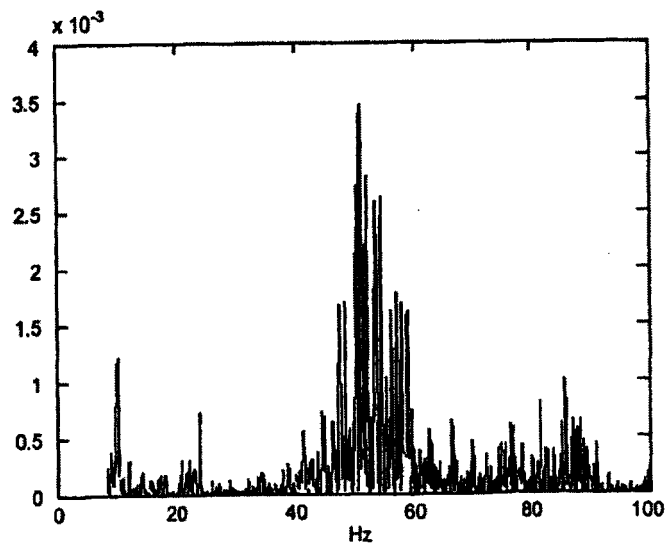


Fig. 8

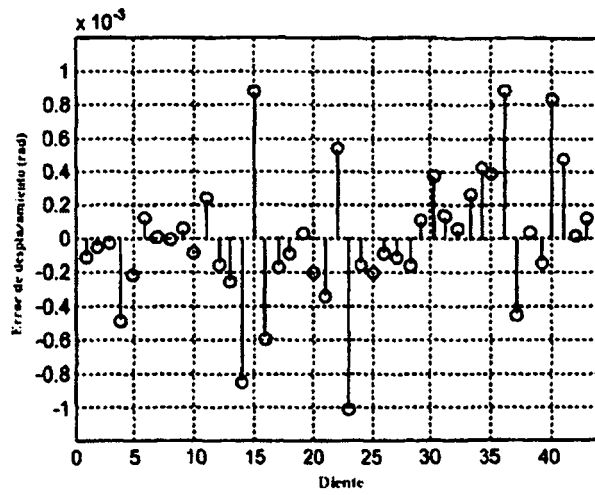


Fig. 7

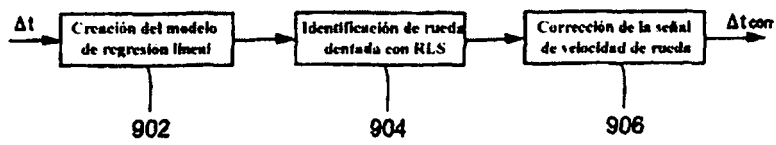


Fig. 9 A

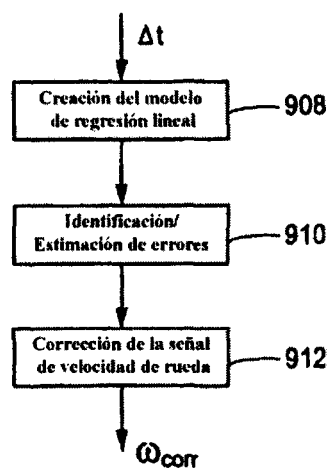


Fig. 9B

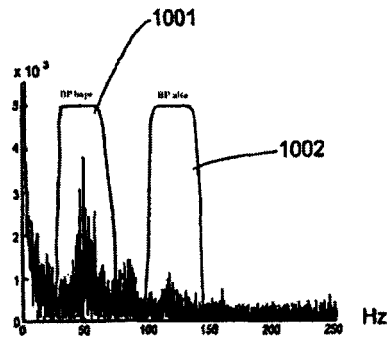


Fig. 10

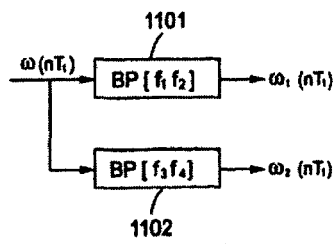


Fig. 11

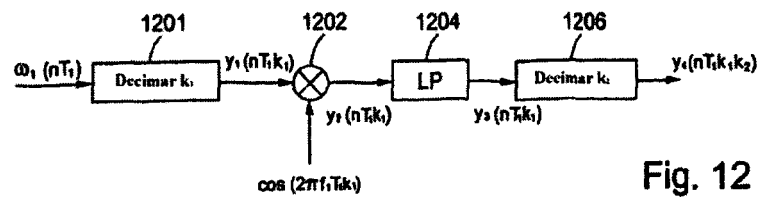


Fig. 12

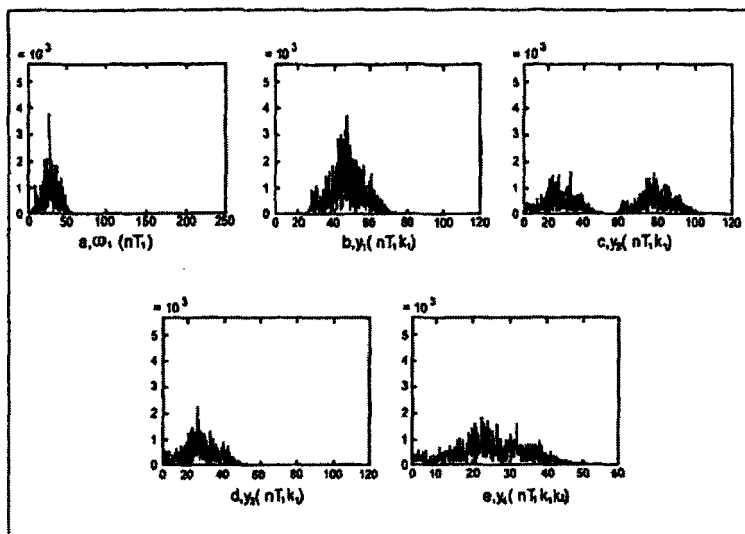


Fig. 13

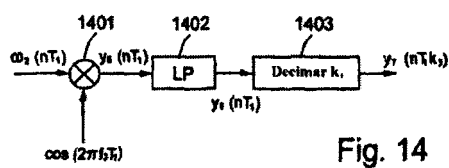


Fig. 14

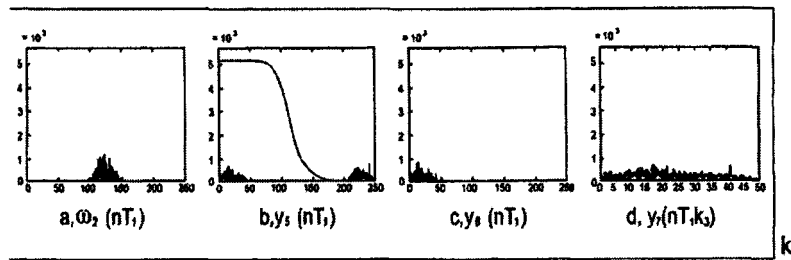


Fig. 15

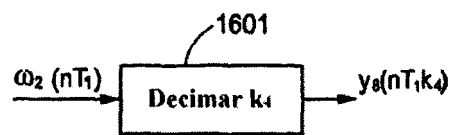


Fig. 16

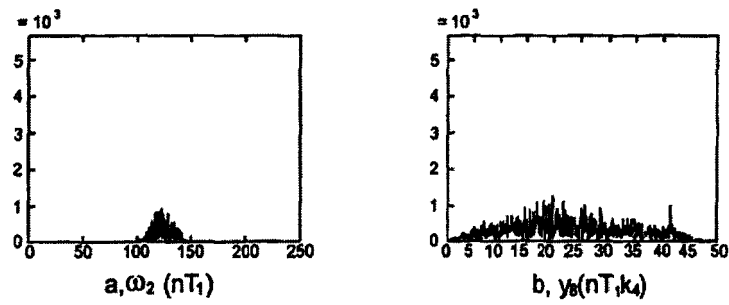


Fig. 17A

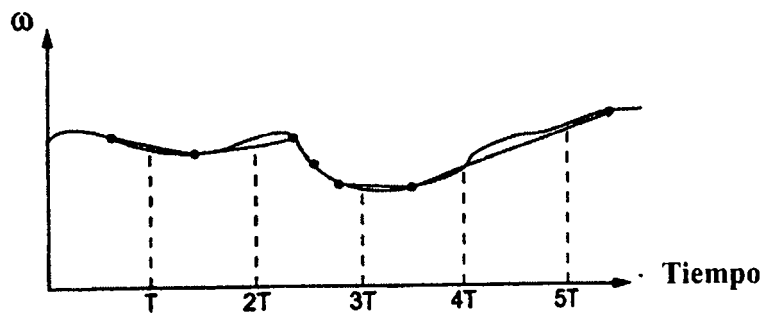


Fig. 17B

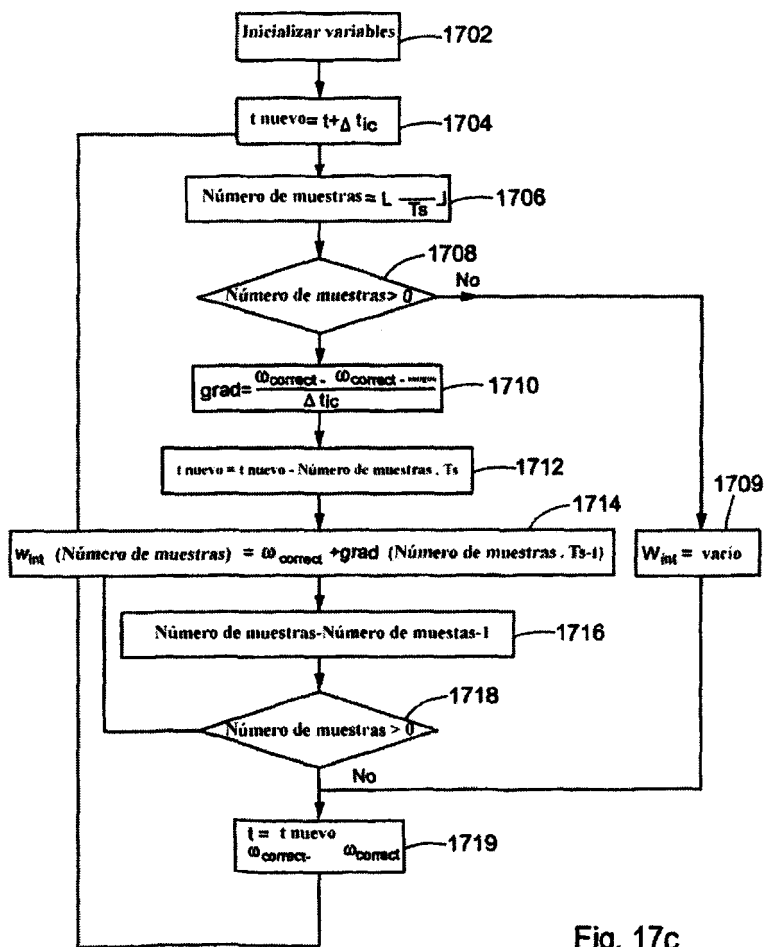


Fig. 17c

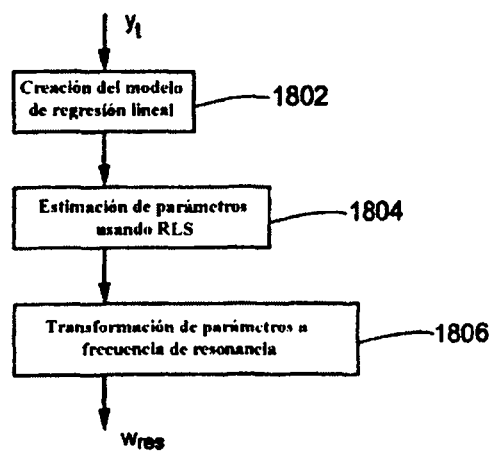


Fig. 18 A

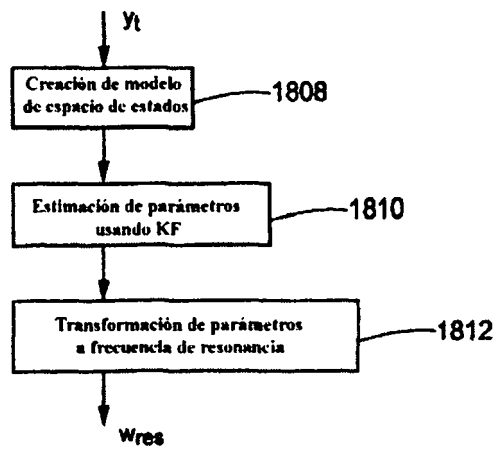


Fig. 18 B

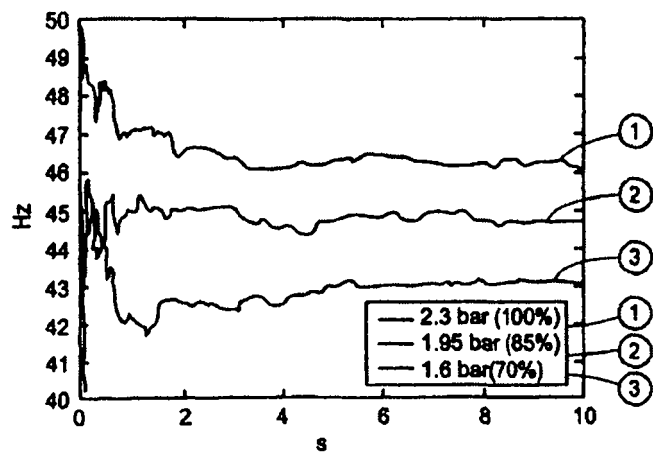


Fig. 18 C

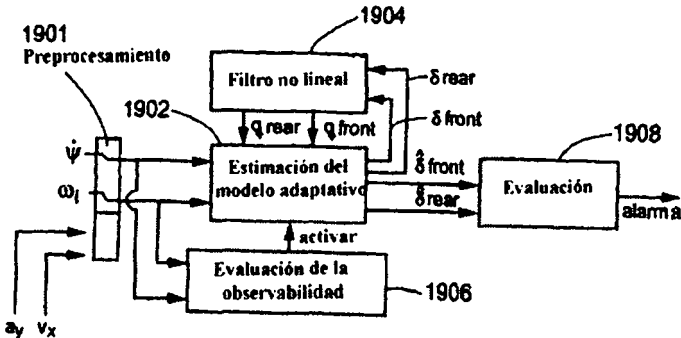


Fig. 19

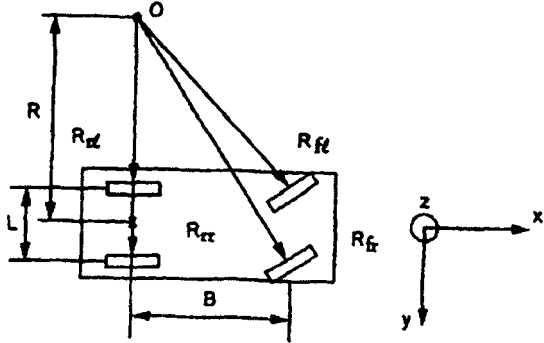


Fig. 20

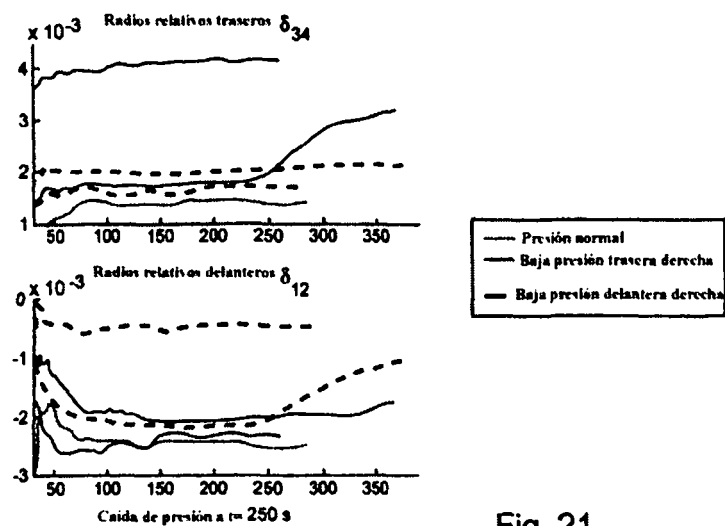


Fig. 21

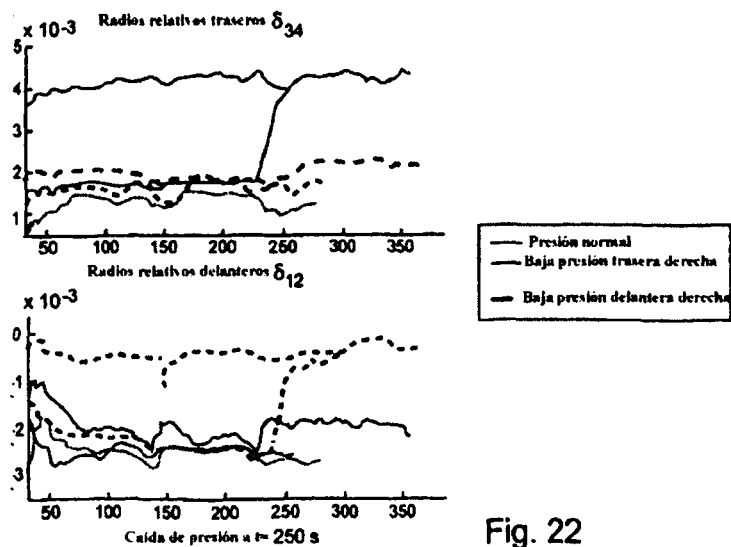


Fig. 22

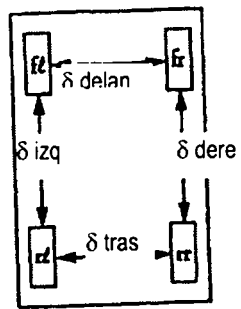


Fig. 23

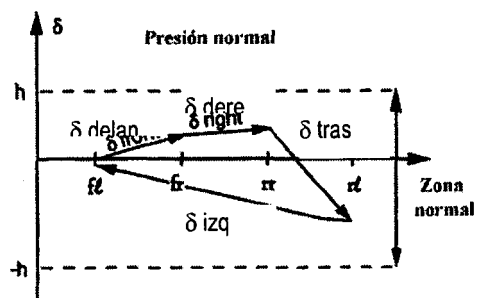


Fig. 24

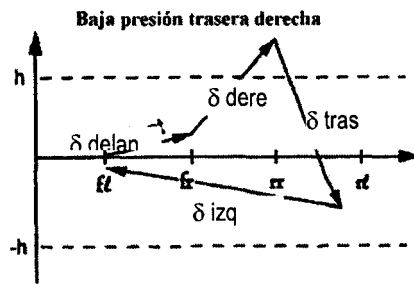


Fig. 25

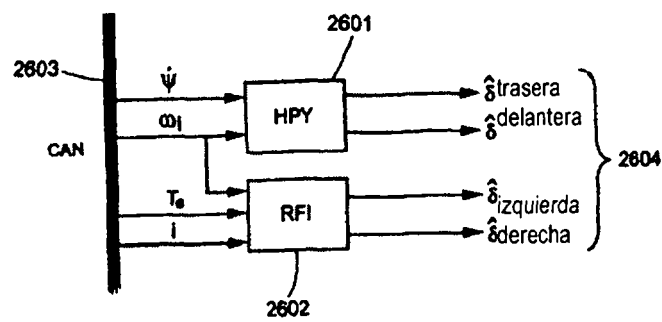


Fig. 26

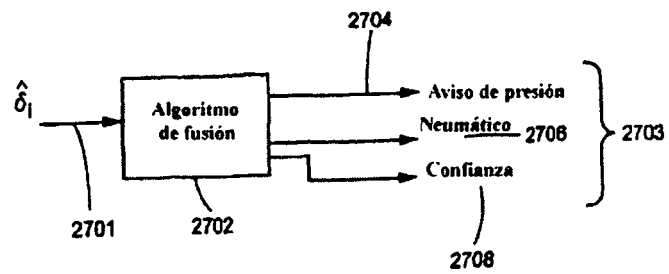
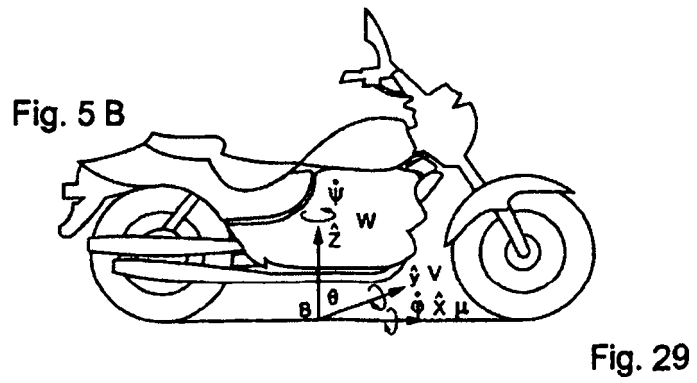
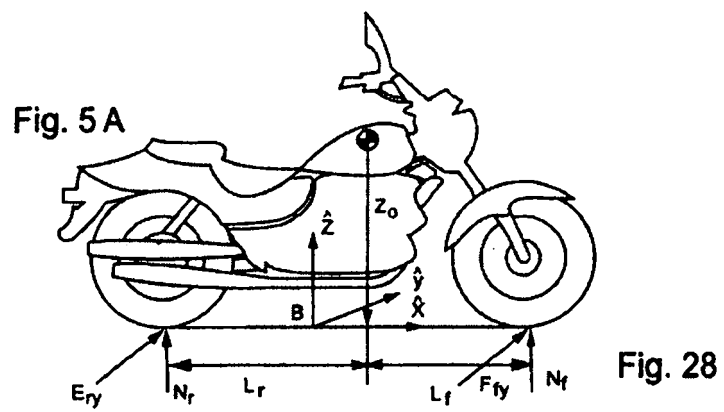


Fig. 27



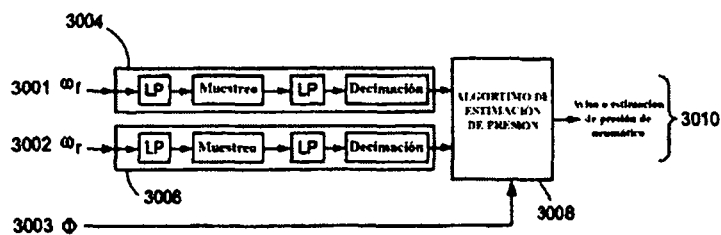


Fig. 30

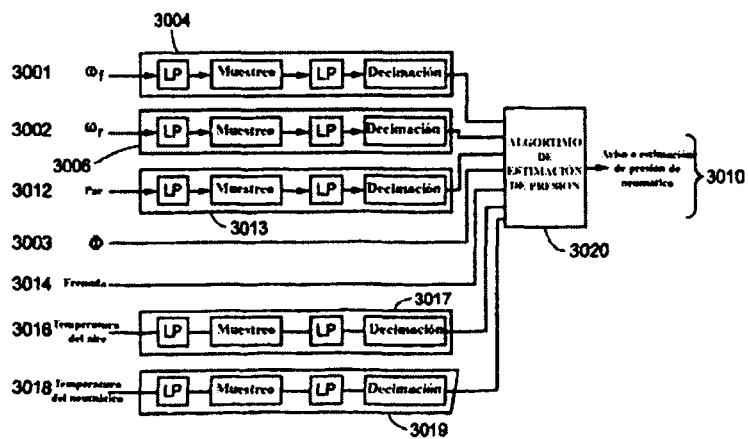


Fig. 31

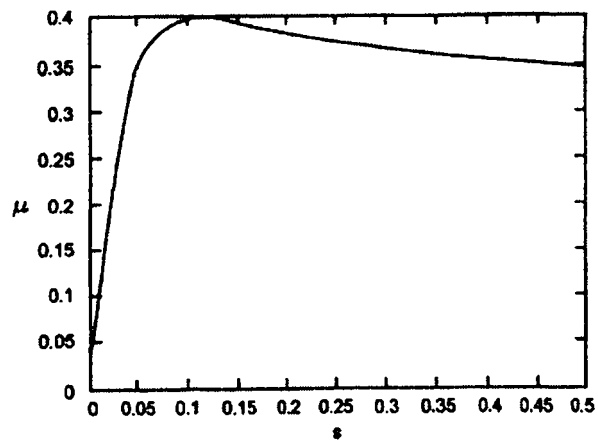


Fig. 32

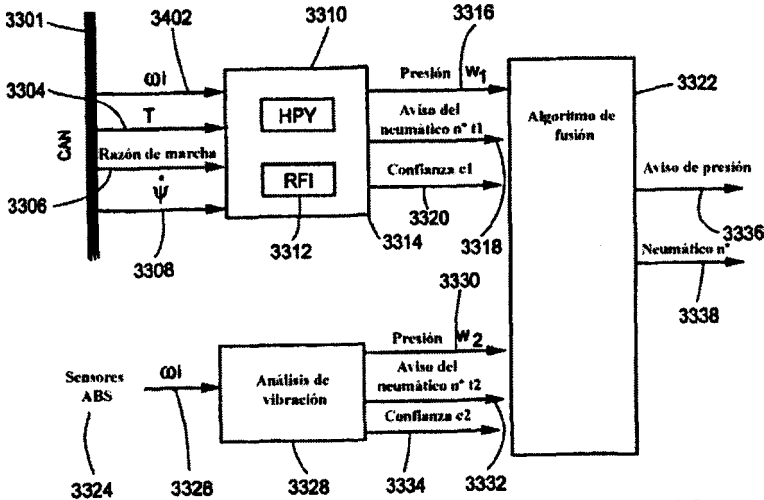


Fig. 33

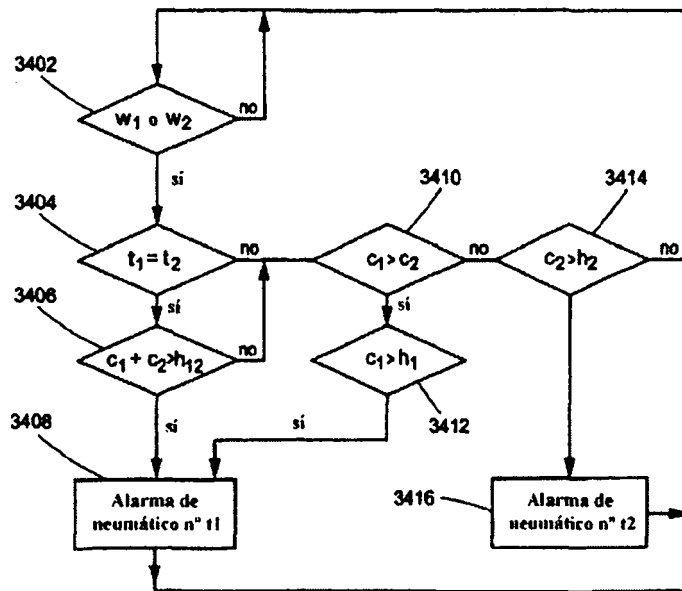


Fig. 34