

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 452 167**

51 Int. Cl.:

F22G 5/12

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.03.2010 E 10711874 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2014 EP 2411735**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para regular la temperatura de vapor para una instalación de vapor**

30 Prioridad:

24.03.2009 EP 09155997

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

31.03.2014

73 Titular/es:

**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Wittelsbacherplatz 2
80333 München, DE**

72 Inventor/es:

**TREUER, MICHAEL;
MEERBECK, BERNHARD;
RUPP, JOACHIM;
WEISSBACH, TOBIAS y
WENDELBERGER, KLAUS**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 452 167 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para regular la temperatura de vapor para una instalación de vapor

5 La invención se refiere a un procedimiento para regular la temperatura de vapor para una instalación de vapor, en el que un regulador de estado reconduce varios estados de vapor a un recalentador para sobrecalentar el vapor con ayuda de un observador, que calcula estos estados, para editar una temperatura nominal de vapor como magnitud de ajuste, y la temperatura nominal de vapor se transmite a otro regulador para regular la temperatura.

10 El grado de eficacia de una instalación de central de vapor aumenta con la temperatura del vapor generado en la caldera de central. Evidentemente no deben superarse límites máximos de temperatura admisibles del material de caldera así como de una turbina, que debe recibir el vapor. Cuanto más exactamente pueda mantenerse la temperatura en su valor nominal, el valor nominal podrá estar situado más cerca del límite de temperatura admisible, es decir, podrá alcanzarse un grado de eficacia más elevado durante el funcionamiento de la instalación de central. En el documento GB 2 449 998 A se describe una regulación de temperatura de vapor según el estado de la técnica.

15 El sobrecalentamiento del vapor en la caldera se produce por medio de que el vapor se conduce en varias etapas a través de haces de tubos calentados – las llamadas etapas de recalentador. La regulación de la temperatura de vapor se realiza mediante inyección de agua en el conducto de vapor, antes de las etapas de recalentador, a través de válvulas de inyección correspondientes. Los recalentadores con sus grandes masas de hierro presentan un comportamiento muy inerte. Una graduación de la válvula de inyección no tiene efecto en la temperatura a regular hasta pasados varios minutos. El retraso de tiempo no es con ello constante, sino que depende de la corriente másica de vapor actual. Además de esto, la temperatura a regular se ve influenciada fuertemente por numerosas perturbaciones, como por ejemplo variaciones de carga, burbujas de hollín en la caldera, cambio del combustible, etc. Por estos motivos una regulación de temperatura exacta es difícil de lograr.

25 Para solucionar este problema se conoce la llamada regulación en cascada, en la que se instalan dos circuitos reguladores IP encajetillados uno en el otro. Un regulador exterior, lento, regula la temperatura a la salida del recalentador y fija un valor nominal para la temperatura a la entrada del recalentador – es decir después de la inyección. La temperatura a la entrada del recalentador se regula mediante un regulador PI interior, rápido, que gradúa la válvula de inyección. De este modo pueden regularse al máximo, rápidamente, perturbaciones de la temperatura de vapor a la entrada de la inyección. El inconveniente de este concepto radica en que las perturbaciones, que actúan sobre el propio recalentador, sólo pueden graduarse al máximo en el circuito exterior, lento - es decir, con una baja calidad de regulación.

30 Una tarea de la invención consiste en indicar un procedimiento, con el que pueda regularse la temperatura de vapor tanto con precisión como de forma estable.

35 Esta tarea es resuelta por medio de que el regulador de estado, conforme a la invención, sea un regulador lineal cuadrático. En el caso de un Linear Quadratic Regulator (LQR) de este tipo, o expresado de otra manera: de una reconducción de estados lineal cuadrática óptima, se trata de un regulador de estado cuyos parámetros pueden determinarse de tal modo, que se optimice un criterio de calidad para la calidad de regulación. Por medio de esto puede conseguirse una regulación tanto precisa como estable. La invención se basa aquí en la consideración de que para la regulación de estado se reconducen varios estados – en parte no mesurables – para establecer la señal de ajuste de regulador. Para el presente caso aplicativo esto significa que también se utilizan las temperaturas en varios puntos a lo largo del recalentador en el algoritmo. Sin embargo, debido a que estas temperaturas no son mesurables se necesita un circuito de observador, con cuya ayuda pueden estimarse o calcularse los valores de temperatura necesarios. Los términos “estimar”, “calcular” y “establecer” se utilizan a partir de ahora como sinónimos. La ventaja de este concepto consiste en que pueden reaccionar muy rápida y precisamente a perturbaciones, que actúan sobre el recalentador.

45 La instalación de vapor es una instalación que funciona con vapor. Puede ser una turbina de gas, una instalación de procesamiento de vapor o cualquier otra instalación, que funcione con energía procedente del vapor.

50 Como un regulador de estado puede entenderse a partir de ahora un circuito de regulación, que regula la magnitud de regulación sobre la base de una representación espacial del estado. Con ello se alimenta el estado del tramo de regulación mediante un observador al tramo de regulación, es decir, se reconduce. La reconducción, que junto con el tramo de regulación forma el circuito de regulación, se produce mediante el observador que sustituye a un dispositivo de medición, y el verdadero regulador de estado. El observador calcula los estados del sistema, en este caso del vapor en el recalentador. El observador comprende una ecuación diferencial de estado, una ecuación inicial y un vector de observación. La salida del observador se compara con la salida del tramo de regulación. La diferencia actúa a través del vector de observador sobre la ecuación diferencial de estado.

En una forma de ejecución ventajosa de la invención el observador es un filtro Kalman, que está diseñado conforme a la reconducción de estado lineal cuadrática. La cooperación entre el LQR y el filtro Kalman recibe el nombre de algoritmo LQG (Linear Quadratic Gaussian).

5 De forma ventajosa, la magnitud de perturbación del calor aportado mediante el recalentador al vapor se define como estado y se utiliza en el algoritmo de regulación. Aquí no sólo pueden definirse como estado las temperaturas o un parámetro derivado de ellas a lo largo del recalentador, sino adicionalmente la magnitud de perturbación, y en especial estimarse o establecerse con ayuda del observador. Las perturbaciones que actúan directamente sobre el recalentador se expresan por medio de que se modifica el intervalo de calentamiento en el recalentador. Mediante una observación de este tipo de las magnitudes de perturbación es posible una reacción muy rápida, precisa pero al mismo tiempo robusta ante las perturbaciones correspondientes.

15 Otra configuración ventajosa de la invención prevé que como magnitudes de estado se utilicen entalpías del vapor. Mediante la utilización de las entalpías en lugar de temperaturas de vapor puede linealizarse el sistema de regulación y, por medio de esto, hacerse accesible un cálculo más sencillo. El procedimiento LQR se refiere a problemas de regulación lineales. La temperatura a la entrada del recalentador, sin embargo, actúa mediante la toma de calor de forma no lineal sobre la magnitud de regulación temperatura a la salida. Mediante la consiguiente conversión a entalpías, en especial de todos los valores de medición y nominales de temperatura, se consigue una linealización del problema de regulación, ya que entre entalpía de entrada y de salida existe una relación lineal. La conversión se realiza con ello convenientemente con ayuda de relaciones tabulares de agua/vapor, utilizando la presión de vapor medida. Mediante esta linealización se consigue un comportamiento de regulación muy robusto, es decir, la calidad de regulación ya no depende del punto de funcionamiento actual de la instalación.

20 Aparte de esto se propone que la reconducción de estado se realice a través de una ecuación matricial, cuyos parámetros se determinen al menos en parte mediante la utilización de valores de medición actuales. Mediante un cálculo online de la matriz de reconducción el regulador puede adaptarse constantemente a las condiciones de funcionamiento reales. Por ejemplo, por medio de esto se tiene en cuenta automáticamente una variación, dependiente de la carga, del comportamiento dinámico del recalentador. También mediante este paso puede conseguirse un aumento de la robustez del algoritmo de regulación. A causa del hecho de que el algoritmo de regulación es muy robusto, durante la puesta en marcha sólo es necesario ajustar muy pocos parámetros. Por ello el tiempo y la complejidad de puesta de marcha son considerablemente menores con respecto a todos los procedimientos conocidos hasta ahora.

30 De forma ventajosa la ecuación matricial se calcula mediante una técnica de conducción de la instalación de vapor. La técnica de conducción puede ser aquí un sistema de control, que controle la instalación de vapor en su funcionamiento regular. Para mantener sencillos los módulos matemáticos de la técnica de conducción, es ventajoso que la ecuación matricial se transfiera a una serie de ecuaciones diferenciales escalares. Una integración relativamente sencilla de la ecuación matricial puede conseguirse mediante una integración inversa en el tiempo. Debido a que en un caso real se dispone de información procedente del futuro, puede conseguirse una integración equivalente a la integración inversa si se integra la serie de ecuaciones diferenciales escalares con signo inverso, lo que conduce de forma estable a la misma solución estacionaria.

40 La invención se refiere además a un dispositivo para regular la temperatura de vapor para una instalación de vapor con un regulador de estado, para editar una temperatura nominal de vapor como magnitud de ajuste mediante la reconducción de varios estados de vapor de un recalentador para sobrecalentar el vapor, a un observador que calcula estos estados, y a otro regulador para regular la temperatura con base en la temperatura nominal de vapor.

Se propone que el regulador de estado sea un regulador lineal-cuadrático. Puede conseguirse una regulación precisa y estable.

45 El dispositivo está diseñado ventajosamente para ejecutar uno, varios o todos los pasos de procedimiento antes propuestos.

La invención se explica con más detalle con base en ejemplos de ejecución, que están representados en los dibujos.

Aquí muestran:

la figura 1 una vista fragmentaria de una central de vapor con un recalentador,

la figura 2 un esquema de una cascada de regulación,

50 la figura 3 un modelo del recalentador,

la figura 4 un modelo lineal de tramo como base para un proyecto de regulador,

la figura 5 una estructura de un observador y

la figura 6 una vista general de una estructura de regulador.

La figura 1 muestra una representación esquemática de una vista fragmentaria de una central de vapor con una turbina de gas como instalación de vapor 2, una caldera 4, que entrega calor a una etapa de recalentador, por ejemplo de un recalentador 6 multietapa, por el que circula vapor 8. Mediante la toma de calor el vapor 8 en el recalentador 6 se sobrecalienta hasta obtener vapor fresco 10 y, a continuación, se alimenta a la turbina de gas. Para regular la temperatura del vapor 8 está previsto un refrigerador de inyección 12, que inyecta agua 14 en el vapor 8 y así refrigera el mismo. La cantidad de agua inyectada 14 se ajusta mediante una válvula de regulación 16. Un sensor de temperatura 18 y un sensor de presión 20 miden la temperatura ϑ_{NK} o la presión p_{NK} del vapor 8 delante del recalentador 6, y un sensor de temperatura 22 y un sensor de presión 24 miden la temperatura de vapor fresco ϑ_D o la presión de vapor fresco p_D del vapor fresco 10 detrás del recalentador 6.

Únicamente para una mejor diferenciación, a partir de ahora el vapor 8 delante del recalentador 6 recibe el nombre de vapor 8 y el vapor 10 detrás del recalentador 6 vapor fresco 10, en donde se pone de relieve que la invención, en la forma de ejecución descrita a continuación, puede aplicarse naturalmente también a vapor que dado el caso no se designaría como vapor fresco.

En la figura 2 se ha representado esquemáticamente una cascada de regulación con una cascada exterior 26 y una cascada interior 28. La cascada exterior 26 comprende un regulador LQG 30 al que, como magnitudes de entrada, se alimentan la temperatura de vapor fresco ϑ_D así como su valor nominal ϑ_{DS} , la presión de vapor fresco p_D y la temperatura ϑ_{NK} o la presión p_{NK} del vapor 8. Otra entrada es la señal de carga actual LA, que es necesaria para la adaptación de las constantes de tiempo de recalentador en función de la carga. La temperatura de vapor fresco ϑ_D detrás del recalentador 6 es la magnitud de regulación del regulador LQG 30. La temperatura nominal ϑ_{NKS} se edita como magnitud de ajuste del regulador LQG 30.

La temperatura nominal ϑ_{NKS} del vapor 8 se prefija en un circuito de regulación 32 de la cascada interior 28 como valor nominal. La temperatura ϑ_{NK} del vapor 8 detrás del refrigerador de inyección 12 es la magnitud de regulación del circuito de regulación 32. El circuito de regulación 32 tiene como magnitud de ajuste una posición de la válvula de regulación 16 del refrigerador de inyección 12 y regula, con ayuda de la cantidad de agua 14 inyectada en el vapor 8, la temperatura ϑ_{NK} .

El regulador LQG 30 no actúa directamente sobre el proceso a través de un órgano de ajuste, sino que transfiere el valor nominal ϑ_{NKS} para la temperatura detrás del refrigerador de inyección 12 al circuito de regulación 32 en cascada, con el que de este modo forma una cascada formada por cascada exterior 26 y cascada interior 28. La temperatura medida ϑ_{NK} detrás del refrigerador de inyección 12 es necesaria para el regulador LQG 30 como información adicional, al igual que la presión de vapor p_{NK} detrás del refrigerador de inyección 12 y la presión de vapor fresco p_D , ya que a partir de temperaturas y presiones se calculan entalpías internas. Una limitación del vapor saturado del valor nominal de temperatura ϑ_{NKS} detrás del refrigerador 12 se realiza por fuera del módulo de regulador LQG 30.

Para la parametrización del regulador LQG 30 se necesita una constante de tiempo T_{100} , que describe el comportamiento de sobrecalentamiento a plena carga. Una variación de la temperatura de vapor ϑ_{NK} a la entrada del recalentador actúa con ello sobre la temperatura de vapor fresco ϑ_D , aproximadamente del mismo modo que describe un retraso a causa de tres elementos PT_1 en cada caso con la constante de tiempo T_{100} . Asimismo se necesita una constante de tiempo T_{mess} , que describe el comportamiento en el tiempo de la medición de temperatura de vapor fresco.

El comportamiento del regulador se parametriza a través de dos valores de ajuste R y R_K , que describen la sensibilidad del regulador de estado y del filtro Kalman.

La figura 3 muestra un modelo del tramo de sobrecalentamiento en el recalentador 6, que se compone de tres elementos PT_1 34. Como elemento PT_1 34 se entiende a partir de ahora un elemento de transmisión lineal, que presenta un retraso de tiempo de primer orden. Los tres elementos PT_1 34 reproducen el comportamiento de transición de un retraso desde la entalpía específica h_{NK} a la entrada del recalentador 6, es decir detrás del refrigerador 12, hasta la entalpía específica h_D del vapor fresco 10. Aquí se calcula con entalpías en lugar de temperaturas, ya que por medio de esto se justifica la suposición de un comportamiento lineal. Como constante de tiempo T_{UH} para los elementos PT_1 34 se usa el cociente entre T_{100} y la señal de carga LA, con lo que se aproxima el comportamiento en el tiempo dependiente de la carga del recalentador. En el caso de una carga menor se reduce la velocidad de circulación del vapor 8 a través del recalentador y el comportamiento de transmisión se hace de forma correspondiente más inerte.

La alimentación de calor q_F desde la caldera 4 conduce a un aumento de entalpía en el lado del vapor a través del recalentador 6. En el modelo esto se realiza mediante la adición en cada caso de un tercio de la alimentación de calor a la entrada de cada elemento PT_1 34. El retraso del elemento de medición durante la medición de temperaturas del vapor fresco se modela mediante otro elemento PT_1 36 con la constante de tiempo T_{mess} . De forma consciente no se dispone de una dinámica del elemento de ajuste en el modelo, que se basa en el regulador de estado, es decir en una parte del regulador LQG 30.

La alimentación de calor q_F desde la caldera 4 representa en el modelo contemplado una magnitud de perturbación, que no se mide directamente. Por ello en los reguladores es conocido llevar a cabo una ampliación dinámica del tramo. Esta adición de una parte I hace posible evitar desviaciones de regulación remanentes. Sin embargo, debido a que q_F no es una magnitud que varíe lentamente, sino que supone una gran parte de las perturbaciones fluctuantes que actúan sobre el recalentador 6, de este modo se regulan las perturbaciones causadas por el fuego sobre todo a través de esta parte I , y no a través del verdadero regulador de estado.

En el caso del regulador LQG 30 un observador utilizado reconstruye y conecta posteriormente de forma correspondiente la magnitud de perturbación q_F , de tal modo que no sea necesaria la ampliación dinámica del modelo de tramo en una parte 1 concluyente.

La magnitud de regulación del regulador LQG 30 es la temperatura del vapor fresco ϑ_D . Sin embargo, debido a que el regulador de estado aquí contemplado se basa en un modelo con entalpías, se convierte la temperatura de vapor fresco ϑ_D con ayuda de la presión de vapor fresco p_D y una tabla de vapor de agua en la entalpía específica h_D del vapor fresco 10. Para el regulador de estado lineal h_D es por lo tanto la magnitud de regulación.

El regulador de estado contemplado no debe actuar directamente sobre la válvula de regulación 16 del refrigerador de inyección. Debe conservarse la valorada estructura en cascada, en la que el circuito de regulación 32 en cascada, por ejemplo un regulador PI, regula mediante la válvula de regulación 16 la temperatura ϑ_{NK} detrás del refrigerador de inyección 12 hasta un valor nominal ϑ_{NKS} . Este valor nominal ϑ_{NKS} es por lo tanto la magnitud de ajuste para la cascada exterior, que se forma mediante el regulador de estado. El valor nominal ϑ_{NKS} se forma a su vez a partir de la entalpía h_{NKS} , con la ayuda de la presión y de la tabla de vapor de agua. El regulador de estado lineal tiene de este modo la magnitud de ajuste h_{NKS} .

Un regulador de estado forma su salida de regulador como suma ponderada de los estados del modelo de tramo. En el caso aquí modelado estos son las salidas de los cuatro elementos PT_1 34, 36, marcados en la figura 3 con h_1 a h_4 .

Sin embargo, para la regulación no se utilizan los cuatro estados h_1 a h_4 directamente, sino la desviación de los estados respecto a su punto de trabajo. Para h_1 y h_2 este punto de trabajo viene dado por el valor nominal de entalpía h_{DS} , para h_3 y h_4 es inferior en un $1/3$ de q_F , respectivamente $2/3$ de q_F . La suma ponderada con k_1 a k_4 se obtiene de este modo de

$$\begin{aligned} A_1 &= k_1(h_1 - h_{DS}) + k_2(h_2 - h_{DS}) + k_3(h_3 - h_{DS} - \frac{1}{3}q_F) + k_4(h_4 - h_{DS} - \frac{2}{3}q_F) \\ &= k_1(h_1 - h_{DS}) + k_2(h_2 - h_{DS}) + k_3(h_3 - h_{DS}) + k_4(h_4 - h_{DS}) - \frac{1}{3}(k_3 + 2k_4)q_F \\ &= \sum_{i=1}^4 k_i(h_i - h_{DS}) - \frac{1}{3}(k_3 + 2k_4)q_F \end{aligned}$$

La desviación de cada estado respecto a su punto de trabajo – y de este modo también la suma ponderada A_1 – se hace cero en el punto de trabajo, es decir, no interviene el regulador. La magnitud de ajuste h_{NKS} no debería ser sin embargo cero en el punto de trabajo, sino ser inferior al valor nominal de entalpía del vapor fresco h_{DS} en el importe de la toma de calor q_F . Con este offset se obtiene finalmente la ley del regulador

$$\begin{aligned} h_{NKS} &= h_{DS} - q_F - A_1 \\ &= h_{DS} - (1 - \frac{1}{3}k_3 - \frac{2}{3}k_4)q_F - \sum_{i=1}^4 k_i(h_i - h_{DS}) \end{aligned} \quad (1)$$

La toma de calor q_F puede contemplarse aquí como magnitud de perturbación, que conecta de forma ponderada posteriormente con

$$k_5 = 1 - \frac{1}{3}k_3 - \frac{2}{3}k_4 \quad (2)$$

5 Mediante la conexión posterior de la magnitud de perturbación k_5q_F se compensa además el hecho de que se diferencien de h_{DS} los valores nominales para h_3 y h_4 . El término $h_{DS} - h_{5q_F}$ puede interpretarse como ramal de control, y como reconducción permanece:

$$-\sum_{i=1}^4 k_i (h_i - h_{DS}) = -\sum_{i=1}^4 k_i x_i \quad \text{con} \quad x_i = (h_i - h_{DS}), \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

10 En el comportamiento propio del tramo de regulación sólo puede influirse mediante una reconducción. Por ello a continuación se contempla el modelo de tramo, del que se ha eliminado el ramal de control y la magnitud de perturbación. Se obtiene una cadena de elementos PT₁ 34, 36, como se ha representado en la figura 4.

En la forma de escritura matricial se representa la cadena de elementos PT₁ 34, 36 mediante una representación espacial de estado en la forma

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t)$$

$$y(t) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t)$$

con el vector de estado

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$$

15

y las matrices de sistema

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_{mess}} & \frac{1}{T_{mess}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{OH}} & \frac{1}{T_{OH}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{OH}} & \frac{1}{T_{OH}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{OH}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{OH}} \end{bmatrix}$$

y $\mathbf{c}^T = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$.

5 El comportamiento propio del tramo se representa mediante los valores propios de la matriz A, que equivalen a los polos de la función de transmisión. Se obtienen un polo con $-1/T_{\text{mess}}$ y un polo triple con $-1/T_{\text{ÜH}}$. Como todos los polos tienen una parte real negativa, el tramo es estable. Debido a que las partes imaginarias de todos los polos son cero, es decir no existe ninguna pareja de polos complejos conjugados, el tramo no puede oscilar, es decir, no puede producirse una sobre-oscilación. La velocidad de una estabilización o desactivación se describe por último mediante las aportaciones de las partes reales de los polos.

Si el circuito de regulación se cierra mediante la reconducción de estado

$$u = -\sum_{j=1}^4 k_j x_j = -\mathbf{k}^T \mathbf{x} \quad (4)$$

con el refuerzo de regulación

$$\mathbf{k}^T = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]$$

10

se obtiene

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T)\mathbf{x}(t) .$$

15

El comportamiento propio del circuito de regulación cerrado se representa mediante los valores propios de la matriz $(\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T)$. Mediante la elección correspondiente de refuerzo de regulador \mathbf{k}^T varían estos valores propios, es decir los polos del circuito de regulación cerrado, y con ello también el comportamiento del tramo. Por ejemplo un desplazamiento de los polos "hacia la izquierda", es decir una parte real negativa más reforzada, hace que el tramo sea más rápido.

20

Para la elección del refuerzo de regulador \mathbf{k}^T se necesita una metodología apropiada. El problema de regulación LQ formula un compromiso entre complejidad de ajuste y calidad de regulación, pero prescinde de un forzamiento del comportamiento no periódico y por medio de esto consigue una robustez claramente superior.

La valoración de la calidad de regulación y de la complejidad de ajuste se realiza mediante la función de costes

$$J = \int_{t=0}^{\infty} [\mathbf{x}(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + u(t)r u(t)] dt .$$

25

Con ello las variaciones de los estados se ponderan cuadráticamente con la matriz Q, la complejidad de ajuste cuadrática con r y se integran en el tiempo. Si por ejemplo se contempla un tramo estable no regulado como el tramo de sobrecalentamiento de la figura 4, una perturbación inicial de los estados se desactiva por completo con el tiempo. La función asume un determinado valor finito. Si ahora se cierra el circuito de regulación y por medio de ello se produce un comportamiento de desactivación más rápido, normalmente también la contribución de los estados al valor de la función se hace menor, y la calidad de regulación mejora. Evidentemente ahora se añade además la complejidad de ajuste a la regulación de la perturbación inicial. En el caso de un regulador muy agresivo la función de costes puede asumir de este modo incluso un valor mayor que en el tramo no regulado. Una minimización de la función de costes representa de este modo un compromiso entre calidad de regulación y complejidad de ajuste.

30

35

Debido a que la calidad de regulación se realiza mediante una suma cuadrática ponderada de los estados, a través de la elección de la matriz Q puede influirse en lo que se considera un "buen comportamiento de regulación". Normalmente sólo estará ocupada la diagonal de Q, con lo que se valoran los cuadrados de los estados aislados, pero no los productos de dos estados. La ponderación de la complejidad de ajuste se realiza a través del factor r. Para influir en la relación entre calidad de regulación y complejidad de ajuste, es suficiente con variar r y dejar Q invariable. Por ejemplo podría dejarse de lado una duplicación de cada entrada en Q y expresarse de forma equivalente mediante una división por dos del valor r, lo que se corresponde después con una minimización de 0,5 veces la función de costes y conduce al mismo resultado.

El problema de minimización, en el que se aplica la ley del regulador

$$u(t) = -\mathbf{k}^T \mathbf{x}(t)$$

y se busca el refuerzo de regulación \mathbf{k}^T , para el que se hace mínima la función de costes, conduce a la ecuación diferencial matricial de Riccati (MRDGL) para una matriz $\mathbf{P}(t)$, como se describe en la extensa bibliografía existente:

$$-\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \frac{1}{r} \mathbf{P} \mathbf{b} \mathbf{b}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} \quad (5)$$

5

Con la solución estacionaria \mathbf{P} de esta MRDGL se obtiene después finalmente el refuerzo de regulador \mathbf{k}^T con

$$\mathbf{k}^T = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4] = \frac{1}{r} \mathbf{b}^T \mathbf{P} . \quad (6)$$

A continuación se describe el observador, también llamado observador de perturbación u observador de magnitudes de perturbación, ya que éste observa la perturbación. La figura 5 representa la estructura del observador de magnitudes de perturbación.

10

El regulador de estado forma su salida de regulador como suma ponderada de los estados de tramo. En el caso aquí modelado se trata de las salidas de los cuatro elementos PT₁ 34, 36. Sin embargo, debido a que no existe ninguna medición de entalpías a lo largo del recalentador 6, éstas deben reconstruirse con ayuda de un observador.

La reconstrucción de los estados de tramo se realiza mediante el cálculo de un modelo de tramo dinámico en paralelo al verdadero proceso. La desviación entre magnitudes de medición procedentes del proceso y los valores correspondientes, que se establecen con el modelo de tramo, se designa como error de observador e . Los estados aislados del modelo de tramo se corrigen en cada caso mediante un error de observador ponderado, con lo que éste se estabiliza. Las ponderaciones se designan como refuerzo de observador $L_1 - L_5$.

15

Como "magnitud de medición" se usa en este caso la entalpía específica h_D del vapor fresco, que se calcula a partir de la temperatura de vapor fresco ϑ_D y de la presión de vapor fresco p_D .

20

Como modelo de tramo se usa un modelo de observador ligeramente modificado respecto a la figura 3. Como magnitudes de estado no se eligen las entalpías específicas absolutas, sino su desviación respecto al valor nominal de entalpía h_{DS} para el vapor fresco 10, así como los estados como se han definido anteriormente en la descripción del regulador de estado.

Una entrada en el modelo de tramo es la entalpía específica h_{NK} detrás del refrigerador 12. Está formada directamente por el valor de medición de la temperatura ϑ_{NK} detrás del refrigerador 12 y la correspondiente presión p_{NK} .

25

La segunda entrada en el modelo de tramo es la magnitud de perturbación q_F , que no es medible, sino que debe reconstruirse. Por ello el modelo de observador se amplía en este punto en un estado x_5 . Un integrador 38 entrega la corriente de calor estimada al modelo de tramo. La única conexión a la entrada del integrador es el error de observador ponderado con L_5 , para su corrección.

30

Las matrices de sistema del modelo de observador – sin la reconducción mediante los refuerzos de observador – vienen dadas por

$$\mathbf{A}_O = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_{mess}} & \frac{1}{T_{mess}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{\dot{O}H}} & \frac{1}{T_{\dot{O}H}} & 0 & \frac{1}{3T_{\dot{O}H}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{\dot{O}H}} & \frac{1}{T_{\dot{O}H}} & \frac{1}{3T_{\dot{O}H}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{\dot{O}H}} & \frac{1}{3T_{\dot{O}H}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_O = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{\dot{O}H}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

y $\mathbf{c}_O^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$.

El subíndice O significa con ello observador. Cabe destacar que el estado x_5 , que representa la corriente de calor q_F , no puede controlarse pero sí observarse.

- 5 El observador de magnitudes de perturbación aquí presentado necesita, para la reconstrucción de los estados de tramo (x_1 a x_4) y la magnitud de perturbación (x_5), solamente valores de medición o magnitudes derivadas de valores de medición – la entalpía específica h_{NK} delante y h_D detrás del recalentador 6. No se necesita ninguna señal de ajuste de un regulador, ya que no contiene ningún modelo de la dinámica de elemento de ajuste. De este modo un observador implementado en el sistema de técnica de conducción puede funcionar en todo momento, con independencia de qué tipo de estructura de regulación interviene, es decir, una desconexión del regulador de estado o de la sustitución temporal por otra estructura de regulación no influye en el observador.

10 El refuerzo de observador, marcado en la figura 5 mediante las ponderaciones L_1 a L_5 , se elige de tal forma que el error de observador se estabilice y se desactive de forma correspondientemente rápida. Esto se corresponde con la regulación del sistema dual (con las matrices de sistema $\mathbf{A}_D = \mathbf{A}_O^T$, $\mathbf{b}_D = \mathbf{c}_O$ y $\mathbf{c}_D^T = \mathbf{b}_O^T$, índice D para dual) mediante un regulador de estado.

- 15 Si el diseño de los refuerzos de observador no se realiza mediante una prefijación fija de los polos de observador, sino mediante el proyecto de un LQR para el sistema dual, se obtiene un filtro Kalman. Las ponderaciones Q_O y r_O se corresponden después con las covariancias del ruido de sistema y del ruido de medición.

La ecuación diferencial matricial de Riccati correspondiente es la siguiente:

$$-\frac{d\mathbf{P}_O}{dt} = \mathbf{A}_D^T \mathbf{P}_O + \mathbf{P}_O \mathbf{A}_D - \frac{1}{r_O} \mathbf{P}_O \mathbf{b}_D \mathbf{b}_D^T \mathbf{P}_O + \mathbf{Q}_O$$

- 20 análogamente al proyecto LQR, y el refuerzo de observador se obtiene con la solución estacionaria \mathbf{P}_O , según

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{r_O} \mathbf{b}_D^T \mathbf{P}_O \right)^T. \quad (7)$$

Esta ecuación del vector de reconducción \mathbf{L} con el parámetro constante \mathbf{b}_D^T se usa para calcular el refuerzo de observador $L_1 - L_5$.

En la figura 6 se ha representado una vista general de la estructura del regulador LQG 30 como regulador de estado. En primer lugar se realiza una conversión de temperaturas a entalpías con ayuda de la tabla de vapor de agua. El refuerzo de regulación $k_1 - k_5$ y el refuerzo de observador $L_1 - L_5$ se calculan en función de las constantes de tiempo, los parámetros de ajuste y la carga de la instalación de central de vapor 2.

5 El observador 42 representado en la figura 5 entrega los estados x_1 a x_4 así como la magnitud de perturbación observada $x_5 = q_F$. El refuerzo de observador k^T , respectivamente k_1 a k_4 (ecuación 6) así como la ponderación k_5 de la conexión posterior de magnitudes de perturbación (ecuación 2) entrega la MRDGL (ecuación 5). El refuerzo de observador L entrega un observador de MRDGL 48 a partir de la ecuación 7. Un regulador de estado 46 produce la reconducción conforme a las ecuaciones 1 - 4, en donde la conexión posterior de magnitudes de perturbación $-k_5 x_5$ está ya integrada en la representación de suma $i = 1 - 5$ del regulador de estado 46. Por último se realiza de nuevo una conversión con la tabla de vapor de agua, para transformar el valor nominal de entalpía h_{NKS} detrás del refrigerador de inyección 6 en un valor nominal de temperatura. Éste puede utilizarse después para la regulación de la válvula de inyección.

15 El regulador de estado 30 representado en la figura 6 no debe parametrizarse mediante factores de refuerzo constantes k_1 a k_4 y L_1 a L_5 , sino mediante las constantes de tiempo del tramo y el ajuste de los factores de ponderación. Además de esto los factores de refuerzo óptimos no son constantes, ya que las constantes de tiempo del modelo de tramo dependen de la carga. La solución de las ecuaciones matriciales de Riccati debe realizarse por ello dentro de la técnica de conducción, que dispone en cada momento de los parámetros correspondientes. Por ello no es conveniente una integración previa de las ecuaciones diferenciales matriciales de Riccati (MRDGL).

20 De la MRDGL citada anteriormente realmente sólo se busca la solución estacionaria para cada punto de trabajo, es decir, el lado derecho de la MRDGL se pone a cero y a continuación viene una ecuación algebraica de Riccati (ARE). Para la solución de esta ecuación matricial cuadrática existen algoritmos performantes, que sin embargo pueden implementarse sin más en una técnica de conducción.

25 Por este motivo se ha elegido aquí otro camino, que tiene en cuenta en especial el carácter variable en el tiempo de las ecuaciones de sistema mediante las constantes de tiempo en función del tiempo: la MRDGL se resuelve mediante integración en el tiempo. Sin embargo, mediante la integración directa es inestable y de este modo se integra convenientemente a la inversa en el tiempo. Mediante una sencilla inversión de signo se obtiene una DGL, que con la integración directa es estable y posee la misma solución estacionaria. Solamente en el caso de procesos variables en el tiempo, es decir, durante variaciones de carga y en el caso de una variación de los parámetros de ajuste, la solución encontrada mediante integración directa difiere del desarrollo óptimo teórico de la solución, que sólo puede determinarse mediante integración inversa.

35 La implementación del concepto de regulación propuesto anteriormente en la técnica de conducción se realiza mediante el conexionado de módulos estándar, es decir, de los cuatro métodos de cálculo básicos e integradores. Estos módulos trabajan en la técnica de conducción exclusivamente con magnitudes escalares. No existe ninguna señal con valor vectorial e incluso con valor matricial y, de este modo, por ejemplo ningún módulo para un producto de dos matrices.

Por ello las ecuaciones diferenciales matriciales de Riccati, que se necesitan para calcular el refuerzo de regulador k y el refuerzo de observador L , se trasladan a una serie de ecuaciones diferenciales escalares. Para esto las matrices de sistema para el problema concreto se insertan en la MRDGL y se multiplican. Se obtienen ecuaciones escalares,

40 para las entradas aisladas de matriz
$$\frac{dP_{i,j}}{dt}.$$

La MRDGL tiene una estructura simétrica. Si en el caso de la matriz de ponderación Q , como se ha mencionado anteriormente, sólo está ocupada la diagonal principal, se obtiene de aquí que las entradas de matriz $P_{i,j}$ y $P_{j,i}$ convergen en el mismo valor y a partir de ahí están situadas siempre una sobre la otra. Las ecuaciones diferenciales para estas entradas de matriz son correspondientemente idénticas, si se cumple $P_{i,j} = P_{j,i}$. Si se aprovecha esta característica de simetría, es suficiente con considerar una matriz triangular.

Para el cálculo de la matriz 4×4 P del regulador son de este modo suficientes 10 ecuaciones diferenciales escalares en lugar de 16. Para la matriz 5×5 P_0 del observador son suficientes, de forma correspondiente, 15 ecuaciones diferenciales en lugar de 25.

50 Los refuerzos de observador pueden calcularse reunidos en un macro-módulo 48 de la técnica de conducción. El módulo marco necesita de este modo los parámetros de ajuste r_0 y Q_{01} a Q_{05} , la constante de tiempo de elemento de medición T_{mess} y la constante de tiempo de recalentador T_{UH} , que se calcula a partir de T_{100} y de la señal de carga LA. Para cada una de las 15 ecuaciones diferenciales existe su propio sub-macro, que implementa el lado derecho de la DGL y contiene un integrador para el estado P_{0ij} correspondiente.

5 El modelo de tramo para el observador 42 está instalado conforme a la figura 5 en un macro-bloque. Solamente la formación de las desviaciones de entalpía se realiza fuera del macro-bloque. Los elementos PT_1 34, 36 están formados por integradores retro-acoplados con la constante de tiempo 1 segundo. El término de corrección (L_e) actúa con ello directamente a la entrada de cada integrador, con lo que puede prescindirse de una multiplicación con la respectiva constante de tiempo.

10 La conversión de valores de temperatura a entalpía puede realizarse sobre el plano más exterior del macro-bloque de módulo de regulación. El acceso a la tabla de vapor de agua exige, además de la temperatura, la presión correspondiente en cada caso. Esto es para la temperatura de vapor fresco la presión de vapor fresco y para la temperatura detrás del refrigerador de inyección la presión correspondiente delante del recalentador. Este último a menudo no está disponible, pero puede sustituirse por la presión de vapor fresco, ya que la pérdida de presión a través del recalentador no tiene una influencia digna de mención. Aunque por medio de esto se modifica ligeramente el valor de entalpía absoluto a la entrada del recalentador, el aumento fundamental de entalpía a través del recalentador viene dado sin embargo por la toma de calor. La finalidad de la conversión a entalpías es la transmisión a un sistema lineal. De este modo, unos errores de entalpía insignificantes conducen a unas faltas de linealidad insignificantes. Sin embargo, mediante el cálculo de ida y vuelta con el mismo valor de presión no se produce ningún error de balance.

20 La presión indica, en el caso de una conversión entre temperaturas y entalpías, una especie de punto de trabajo para la linealización. De este modo representa la dependencia de la carga en la conversión. Por ello no es importante alimentar al módulo de regulación cada pequeña oscilación de presión; más bien necesita la presión "nominal" perteneciente a la carga. Las oscilaciones rápidas que con frecuencia se producen en la medición de presión deben nivelarse por ello suficientemente, por ejemplo mediante un elemento PT_1 con una constante de tiempo de diez minutos. Si se utilizan diferentes señales de presión para la presión de vapor fresco y para la presión detrás del refrigerador de inyección debe tenerse en cuenta una nivelación del mismo tipo para ambas señales.

25 Como se ha explicado, el regulador implementado es óptimo con respecto a un criterio de calidad que tenga en cuenta la calidad de regulación y la complejidad de ajuste. La calidad de regulación se determina mediante la matriz de ponderación Q , respectivamente en el caso aquí implementado mediante las entradas de diagonal Q_1 a Q_4 .

30 El parámetro de ajuste r pondera la complejidad de ajuste en el criterio de calidad con relación a la calidad de regulación. Un valor mayor tiene con ello como consecuencia un desarrollo de ajuste más tranquilo, al mismo tiempo que una pérdida de calidad de regulación, mientras que un valor menor conduce a un comportamiento de regulación más preciso.

La elección del criterio de calidad es independiente de las instalaciones reales con sus diferentes constantes de tiempo de tramo. Teóricamente es suficiente, a la hora de aplicar el módulo de regulación a otra instalación, con una adaptación de las constantes de tiempo. Evidentemente podría requerirse de instalación en instalación de todas formas un comportamiento de regulación con una precisión diferente. Para esto el parámetro principal es r .

35 La matriz de covariancia Q_0 del filtro Kalman indica la covariancia del ruido de estado del modelo de observador. También aquí están ocupados a su vez solamente los elementos de diagonal. Un valor pequeño de la covariancia significa que el estado respectivo se describe muy bien mediante la ecuación del modelo. Un valor grande, por el contrario, significa que existe una gran desviación estocástica. En el caso del modelo de observador implementado los tres elementos PT_1 34, 36 reproducen relativamente bien el comportamiento de transmisión del recalentador. La magnitud de ajuste a observar, precisamente de la corriente de calor q_F específica, no se ha modelado por el contrario en absoluto. Este estado sólo se modifica mediante influencias perturbadoras. El ruido de este estado tiene por lo tanto una gran covariancia.

45 El parámetro de ajuste remanente r_0 indica la covariancia del ruido de medición. Ésta debe contemplarse a su vez con relación a la covariancia del ruido de estado. Un valor grande significa que la medición tiene mucho ruido, y que debe tratarse como más fiable la predicción del modelo de observador. Un valor r_0 pequeño, por lo contrario, indica que la medición es buena, y que un error de observador que pudiera producirse debe corregirse de forma correspondientemente precisa. A través de r_0 puede ajustarse por lo tanto la velocidad del observador, respectivamente del filtro Kalman. Es posible una aceleración del observador mediante la reducción de r_0 .

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para regular la temperatura (ϑ_D) de vapor (8) para una instalación de vapor (2), en el que un regulador de estado (46) reconduce varios estados de vapor a un recalentador (6) para sobrecalentar el vapor (8) con ayuda de un observador (42), que calcula estos estados, para editar una temperatura nominal de vapor (ϑ_{NKS}) como magnitud de ajuste, y la temperatura nominal de vapor (ϑ_{NKS}) se transmite a otro regulador (32) para regular la temperatura, caracterizado porque el regulador de estado (46) es un regulador lineal cuadrático.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque el observador (42) es un filtro Kalman, que está diseñado conforme a la reconducción de estado lineal cuadrática.
- 10 3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque la magnitud de perturbación del calor (q_F) aportado mediante el recalentador (6) al vapor (8) se define como estado (x_5) y se utiliza en el algoritmo de regulación.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el observador establece el calor aportado en el recalentador al vapor.
- 15 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el calor (q_F) aportado en el recalentador (6) al vapor (8) se establece mediante un integrador (38).
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque como magnitudes de estado se utilizan entalpías del vapor (8).
7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado porque como magnitudes de estado se utilizan desviaciones de las entalpías absolutas de valores nominales de entalpía.
- 20 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque mediante una conversión de valores de medición de temperatura y valores nominales de temperatura a entalpías se linealiza el problema matemático del regulador.
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la reconducción de estado se realiza a través de una ecuación matricial, cuyos parámetros se determinan al menos parcialmente mediante la utilización de valores de medición actuales.
- 25 10. Procedimiento según la reivindicación 9, caracterizado porque la ecuación matricial se calcula mediante una técnica de conducción de la instalación de vapor.
11. Procedimiento según la reivindicación 9 ó 10, caracterizado porque la ecuación matricial se transfiere a una serie de ecuaciones diferenciales escalares.
- 30 12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado porque la serie de ecuaciones diferenciales escalares se resuelve mediante integración con signo inverso.
13. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el observador (42) trabaja con independencia del regulador de estado (46).
- 35 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque para el cálculo de estado se utiliza un modelo del tramo de regulación del recalentador (6), cuyo retraso en el tiempo se determina mediante un cociente entre una constante de tiempo y una señal de carga (LA) de la instalación de vapor (2).
- 40 15. Dispositivo para regular la temperatura (ϑ_D) de vapor (8) para una instalación de vapor (2), con un regulador de estado (46) para editar una temperatura nominal de vapor (ϑ_{NKS}) como magnitud de ajuste, mediante la reconducción de varios estados de vapor de un recalentador (6) para sobrecalentar el vapor (8), un observador (42) que calcula estos estados, y otro regulador (32) para regular la temperatura (ϑ_{NK}) con base en la temperatura nominal de vapor (ϑ_{NKS}), caracterizado porque el regulador de estado (46) es un regulador lineal cuadrático.

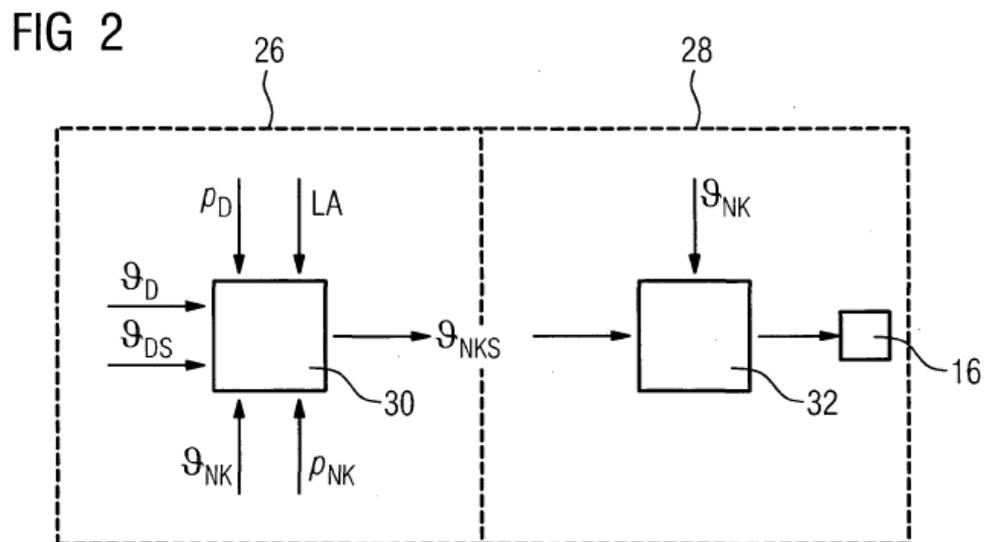
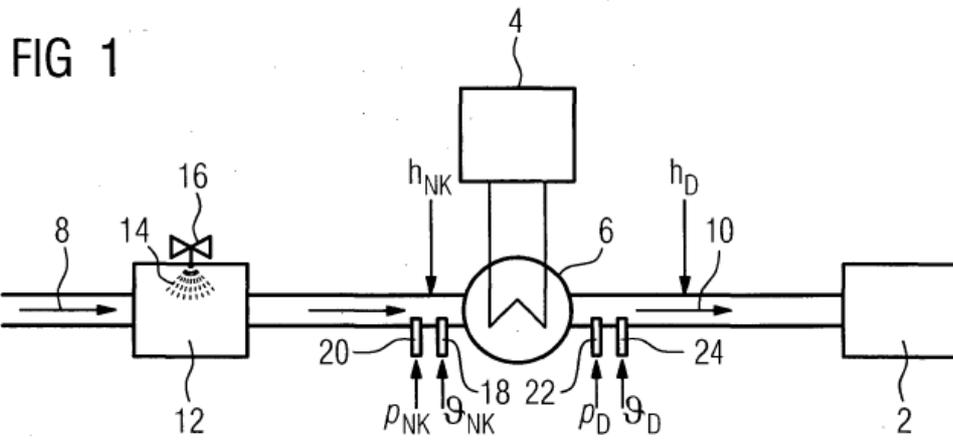


FIG 3

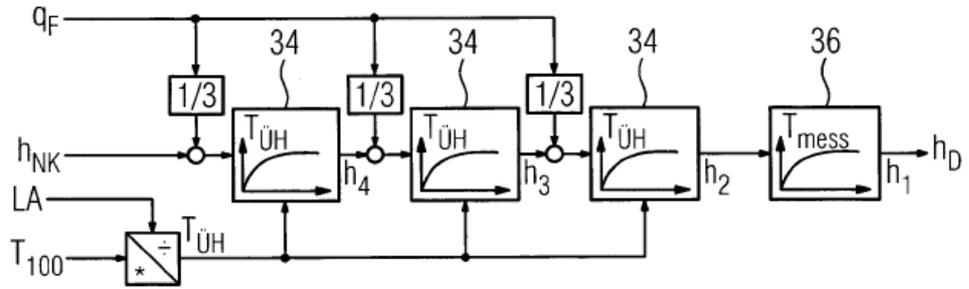


FIG 4

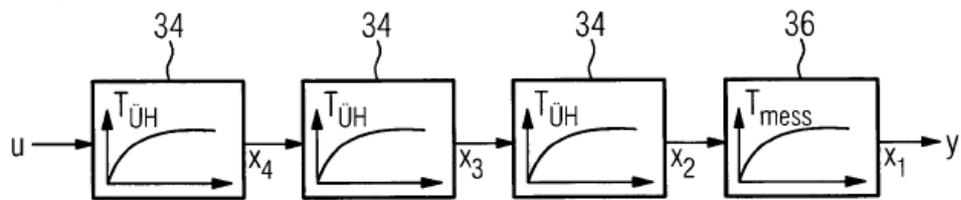


FIG 5

