



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 214 635 B9**

(12) **CORRECTED EUROPEAN PATENT SPECIFICATION**

Note: Bibliography reflects the latest situation

(15) Correction information:
Corrected version no 1 (W1 B1)
Corrections, see page(s) 6

(48) Corrigendum issued on:
07.01.2004 Bulletin 2004/02

(45) Date of publication and mention
of the grant of the patent:
02.04.2003 Bulletin 2003/14

(21) Application number: **00951066.0**

(22) Date of filing: **20.06.2000**

(51) Int Cl.7: **G05D 7/06, G01F 1/56**

(86) International application number:
PCT/US2000/040251

(87) International publication number:
WO 2001/004716 (18.01.2001 Gazette 2001/03)

(54) **A SYSTEM AND METHOD FOR A DIGITAL MASS FLOW CONTROLLER**

VERFAHREN UND VORRICHTUNG FÜR EINEN DIGITALEN MASSENDURCHFLUSSREGLER
SYSTEME ET PROCEDE DE COMMANDE NUMERIQUE DE DEBIT MASSE

(84) Designated Contracting States:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE**

(30) Priority: **10.07.1999 US 351120**

(43) Date of publication of application:
19.06.2002 Bulletin 2002/25

(73) Proprietor: **Mykrolis Corporation**
Billerica, MA 01821-4600 (US)

(72) Inventor: **VYERS, Emmanuel**
San Diego, CA 92130 (US)

(74) Representative: **Schäfer, Wolfgang, Dipl.-Ing.**
Dreiss, Fuhlendorf, Steimle & Becker
Postfach 10 37 62
70032 Stuttgart (DE)

(56) References cited:
DE-A- 3 005 414 **US-A- 4 632 085**

EP 1 214 635 B9

Note: Within nine months from the publication of the mention of the grant of the European patent, any person may give notice to the European Patent Office of opposition to the European patent granted. Notice of opposition shall be filed in a written reasoned statement. It shall not be deemed to have been filed until the opposition fee has been paid. (Art. 99(1) European Patent Convention).

DescriptionTECHNICAL FIELD OF THE INVENTION

[0001] This invention relates generally to a method and system for controlling the flow of gas in a mass flow controller and more specifically to a method and system for generating a digital control signal with a fast response to set point step input in a digital mass flow controller.

BACKGROUND OF THE INVENTION

[0002] A mass flow controller (MFC) is a closed loop device that sets, measures, and controls the flow of the mass of a process gas. Semiconductor applications have been and continue to be the driving force behind product development in mass flow controller technology. Nonetheless, mass flow control is useful in other industries such as the pharmaceutical industry and food industry. Digital mass flow controllers have been described, eg., in US-A-4,632,085.

[0003] A thermal mass flow controller is composed of a front half which includes a flow sensor and a back half which includes a control valve. The flow sensor is often composed of two resistance temperature sensors wound around a capillary tube. When gas flows through the sensor, heat is carried downstream and the temperature difference is proportional to the mass flow rate of the gas. The control valve receives a signal via electronics from the flow sensor to regulate gas flow. Solenoid activated valves are often used as control valves because of their simplicity, quick response, robustness and low cost.

[0004] Unfortunately, thermal flow sensors have a slow response time since thermal changes take place over a relatively long period of time. For instance, in FIGURE 1, a graphical representation of an actual flow versus time is shown alongside a graphical representation of sensed flow versus time. The y-axis indicates flow rate while the x-axis indicates time. The actual flow is represented as an approximation to a unit step function $u(t)$ where the flow rate reaches a steady state value within a negligible amount of time. τ is denoted as the time constant it takes for the sensed flow to reach 63% of the actual flow. This may be as much as 1.7 seconds. It takes approximately 5τ to reach at least 99% of the actual flow. Unfortunately, the time delay needed to establish an accurate measurement of the actual flow from the sensed flow can introduce errors in the valve control. Information regarding the flow rate through the control valve is fed back to the control valve. Delay in accurate feedback of this information may contribute to undesirable errors in the flow of gas into a process chamber.

[0005] FIGURE 2 represents a method used in the prior art to compensate for the time delay in the sensed flow as compared to the actual flow. The actual flow is a unit step function of magnitude f_o . FIGURE 2 shows a first derivative feedback control loop 10 where a flow sense signal 12 is input into both a first gain stage 14, with gain=1, and a differentiator stage 16. The output of the differentiator 16 is input into a second gain stage 18, with gain= τ . The output of gain stage 14 and gain stage 18 are added to produce output 20 of first derivative feedback control loop 10.

[0006] This method approximates flow signal 12 as an exponential signal given by,

$$f(t) = f_o (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad \text{eqn.1}$$

where f_o is the final steady state flow rate, t is the time and τ is the time constant associated with the flow sensor. The output 20 is given by,

$$\text{output} = f(t) + \tau \frac{df(t)}{dt}. \quad \text{eqn.2}$$

Inserting eqn. 1 into eqn. 2 yields

$$\text{output} = f_o u(t). \quad \text{eqn.3}$$

The output of first derivative feedback control system 10 is a step response of magnitude f_o that is equal to the actual flow $f_o u(t)$. Therefore the actual flow is more closely approximated using first derivative feedback control system 10 than using just sensed flow signal 12.

[0007] The prior art method detailed in FIGURE 2 has three disadvantages. The first disadvantage is that flow sensors typically do not exhibit linear behavior. Therefore, there is a certain amount of error innate in the flow sensor signal

that is input into a control system.

[0008] The second disadvantage is that differentiator is typically an analog device. Hardware implementation of a differentiation device is difficult to realize in the analog domain and consequently these methods often use approximate differentiation implemented by linear circuits.

[0009] Lastly, first derivative feedback control systems fail to recognize that the flow of gas through the mass flow controller is really not a true first order exponential. Therefore, there is a certain amount of error innate to this type of system.

[0010] Ultimately, there is a need for a method that accurately calculates the actual gas flow within a mass flow controller. The method should reduce or eliminate the non-linearities of the flow sensor. This method should also more accurately approximate the flow sense signal which is not a true exponential signal.

SUMMARY OF THE INVENTION

[0011] The present invention provides a system and method for controlling gas flow within a digital mass flow controller that substantially eliminates or reduces disadvantages and problems associated with previously developed systems and methods for controlling gas flow within a digital mass flow controller.

[0012] The present invention provides a method that calculates a digitally enhanced flow rate signal that more accurately represents an actual flow rate through the digital mass flow controller. The digitally enhanced flow rate signal is calculated using a sensed flow rate signal output from a flow sensor, a scaled first derivative of the sensed flow rate signal, and a scaled second derivative of the sensed flow rate signal. A set-point signal is compared to the digitally enhanced flow rate signal to create a digital error signal. The digital error signal is provided to a digitally realized PI (proportional integral) controller. The PI controller generates a digital control signal that is used to control a valve in the digital mass flow controller.

[0013] One advantage of the present invention is that the use of a second derivative enables a more accurate approximation of the sensor signal than the use of a first derivative alone. A more accurate approximation of the sensor flow rate signal enables a more precise and responsive control of the gas flow in a process.

[0014] Another advantage of the present invention is that the use of digital signals readily enables interfacing with digital processors such as computers. High speed digital processors can be accessed to aid in rigorous computations, during calibration for example, which may be too lengthy for any on-board DSP controller in the mass flow controller.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0015] A more complete understanding of the present invention and the advantages thereof may be acquired by referring to the following description, taken in conjunction with the accompanying drawings in which like reference numbers indicate like features and wherein:

FIGURE 1 illustrates the output of a flow sensor in comparison to the actual flow rate in a mass flow controller vs. time;

FIGURE 2 is a basic control diagram of prior art methods of analog first differentiation and feedback to better approximate the actual flow from the sensed flow;

FIGURE 3 is one embodiment of the present invention illustrating a system for a digital mass flow controller;

FIGURE 4 is a graphical representation of the effects of the first gain stage on a continuous representation of the digitally enhanced flow rate signal;

FIGURE 5 is a graphical representation of the effects of the second gain stage on a continuous representation of the digitally enhanced flow rate signal; and

FIGURE 6 is a graphical representation of the effects of the filter time constant on a continuous representation of the digitally enhanced flow rate signal.

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

[0016] Preferred embodiments of the present invention are illustrated in the figures, like numerals being used to refer to like and corresponding parts of various drawings.

[0017] In accordance with the invention a method for controlling a gas flow and a method for generating a digitally enhanced flow rate signal are defined in claims 1 and 14 respectively, corresponding apparatus are defined in claims 25 and 40.

[0018] The present invention provides a method for controlling the gas flow within a digital mass flow controller. The method calculates a digitally enhanced flow rate signal that more accurately represents an actual flow rate through the digital mass flow controller. The digitally enhanced flow rate signal is calculated using a sensed flow rate signal output

from a flow sensor, a scaled first derivative of the sensed flow rate signal, and a scaled second derivative of the sensed flow rate signal. A set-point signal is compared to the digitally enhanced flow rate signal to create a digital error signal. The digital error signal is provided to a digitally realized PI (proportional integral) controller. The PI controller generates a digital control signal which is used to control a valve in the digital mass flow controller.

[0019] FIGURE 3 represents one embodiment of the present invention. In FIGURE 3, actual flow 24 in mass flow controller 22 is measured by sensor 26. Sensor 26 may include two resistive wound coils 28 and 30 wrapped around capillary tube 32. Sensor 26 outputs are the sensed flow rate signal 34 which can be input into A-to-D converter 36. The output of the A-to-D converter 36 is digital sensed flow signal 38. Digital sensed flow signal 38 is input into microcontroller 44.

[0020] Microcontroller 44 is programmed to perform the computational requirements of the processes represented by linearization module 40, differentiation module 46, and PI controller 54. Microcontroller 44, a digital signal processor (DSP) controller, has software programmed in its on-chip flash program memory array that can be reprogrammed multiple times. The software incorporates all the instruction necessary to the implementation of the functions described within microcontroller 44. The constant coefficients (filter coefficients, linearization coefficients, and various gain factors) are computed in computer 55 and downloaded for microcontroller 44 to use. Linearization module 40 may implement a least squares method to linearize digital flow signal 38. Digital sensed flow signal 38 needs to be linearized since sensor 26 generally produces a sensed flow signal 34 that is a non-linear function of actual flow 24. Linearization module 40 outputs digitally linearized sensed flow signal 42. There are many methods for linearization of the digital sensed flow signal. These methods include least squares methods and other regression techniques known to those skilled in the art. Digitally linearized sensed flow signal 42 can be input into differentiation module 46. Differentiation module 46 creates a digitally enhanced flow rate signal 48. Digitally enhanced flow rate signal 48 more accurately represents actual flow 24 and compensates for the inaccuracies of sensor 26. A detailed description of differentiation module 46 is discussed later in the detailed description.

[0021] Digitally enhanced flow rate signal 48 is compared with set-point signal 50. Set-point signal 50, provided by a customer, may be a step input for the desired actual flow 24. Set-point signal 50 may be either an analog signal that is digitized by an embedded A/D converter in microcontroller 44 or it can be a digital signal transmitted to microcontroller 44. An embedded A/D converter in microcontroller 44 allows microcontroller 44 of the present invention to be used as a drop-in replacement in prior art systems. The difference between set-point signal 50 and digitally enhanced flow rate signal 48 is error signal 52. Error signal 52 may be input to PI controller 54 to generate digital control signal 56 that drives solenoid activated valve 58. Solenoid activated valve 58 governs the actual flow 24 in the mass flow controller 22.

[0022] Differentiation module 46 in FIGURE 3 represents the process performed by microcontroller 44 using parameters calculated by and downloaded from computer 55 to generate digitally enhanced flow rate signal 48. The block diagram within differentiation module 46 is a continuous-time representation with Laplace transforms representing first differentiation operation 60, second differentiation operation 68, and filter operation 72 having time constant τ_2 . The system, however, is realized digitally. Linearized digital sensor signal 42 is input into first differentiation operation 60 and into first gain stage 62 to output weighted first derivative 64 of linearized digital sensor signal 42. Subsequently, the first derivative of linearized digital sensor signal 42 is input into second differentiation operation 66 and into gain stage 68 to create weighted second derivative 70 of linearized digital sensor signal 42. This weighted second derivative 70 is input into lowpass filter operation 72 to create filtered weighted second derivative 74 of linearized digital sensor signal 42. Weighted first derivative 64 is fed forward to adder 78 and linearized digital sensor signal 42 is fed forward through feed forward loop 76 to adder 78. At adder 78, filtered weighted second derivative 74 of linearized digital sensor signal 42 is combined with weighted first derivative 64 of linearized digital sensor signal 42 and with linearized digital sensor signal 42 to construct digitally enhanced flow rate signal 48. Digitally enhanced flow rate signal 48 more closely represents actual flow 24 in mass flow controller 22 than does sensed flow rate signal 34 obtained from sensor 26.

[0023] As stated previously, the operations performed by microcontroller 44, a DSP, are realized digitally. A one-to-one transformation between the analog Laplace representations and their discrete-time counterpart can be easily made. Linear constant coefficient differential equations can be easily transformed to discrete-time linear constant coefficient difference equations. The discrete equivalent of a constant coefficient differential equation,

$$\sum_{k=1}^N a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = \sum_{k=1}^M b_k \frac{d^k f(t)}{dt^k}, \quad \text{eqn. 4}$$

is

$$\sum_{k=1}^N a_k y[n-k] = \sum_{k=1}^M b_k f[n-k] , \quad \text{eqn. 5}$$

where a_k and b_k are constant coefficients, $f(t)$ is an analog input into the analog system, $y(t)$ is an analog output of the analog system, $\frac{d^k y(t)}{dt^k}$ and $\frac{d^k f(t)}{dt^k}$ are the k^{th} derivatives of $y(t)$ and $f(t)$, $f[n]$ is a discrete input into the equivalent discrete system, $y[n]$ is a discrete output out of the equivalent discrete system, $f[n-k]$ and $y[n-k]$ are the k^{th} delay values of $f[n]$ and $y[n]$, t is time, and n and k are the integer values representing discrete samples of the discrete functions at a specified sampling interval.

[0024] A continuous lowpass filter operation can also be implemented in a discrete mode using difference equations. The analog time domain representation of the Laplace lowpass filter operation 72 is the differential equation,

$$f(t) = \frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_f} y(t) = \sum_{k=0}^1 \frac{a_k}{b_k} \frac{dy^k(t)}{dt^k} , \quad \text{eqn. 6}$$

where a_k and b_k are constant coefficients, $f(t)$ is an analog input into the filter, $y(t)$ is an analog output of the filter, $\frac{d^k y(t)}{dt^k}$ is the k^{th} derivatives of $y(t)$ and τ_f is the time constant associated with the filter operation. Eqn. 6 can be discretely realized using a difference equation according to eqn. 5. For the sake of simplicity, however, the system has been represented with the various Laplace transforms to illustrate the differentiation and filtering of the linearized digital sensor signal 42.

[0025] First gain stage 62 (Gain 1) is designed to cancel the time constant τ_1 associated with sensor 26. First gain stage 62 is adjusted to correct for a sensor response from sensor 26 that takes a long time to settle. FIGURE 4 illustrates the effects of varying first gain stage 62 on a continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48. If gain stage 62 is too small, there may be an initial overshoot before the continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48 settles to the steady-state value. If gain stage 62 is too large, there may be an initial undershoot before the continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48 settles to the steady-state value. Due to the variability of the system, first gain stage 62 is uniquely calculated for process gas species and a given mechanical platform. The first gain stage 62 is uniquely determined and is a function of the sensor construction and the process gas. Computational fluid dynamic (CFD) models, empirical testing and mathematical solution have been developed primarily in an effort to minimize the time constant τ_1 of the sensor. The relationship of temperature rise, coil length, gap between coils, tube internal diameter, tube wall thickness, tube thermal conductivity and insulation were analyzed and will be further discussed. Practically speaking, one sensor employed by one embodiment of the present invention displays a 1.7s time constant τ_1 . The gas type effect displays a tendency for the sensor time constant τ_1 to increase in proportion to the gas weight (typically 5% at most). The time constant τ_1 is set to a default value (1.7) and fine tuned by observation of the actual response.

[0026] Since sensed flow rate signal 34 is not a true exponential signal, first weighted derivative 64 does not completely correct sensed flow rate signal 34 to accurately approximate actual flow 24. To more accurately approximate actual flow 24, a second time constant τ_2 is incorporated in the approximation of sensed flow rate signal 34. Therefore, sensed flow rate signal 34 can be approximated as

$$f(t) = (1 - e^{-t/\tau_1})(1 - e^{-t/\tau_2}) \quad \text{eqn.7}$$

where t is time, $f(t)$ is sensed flow rate signal 34, τ_1 is a first time constant and τ_2 is a second time constant. Assuming a steady-state step input f_0 and according to FIGURE 3, digitally enhanced flow rate signal 48 can be represented in the analog domain as

$$f(t) + (\text{Gain } 1) \frac{df(t)}{dt} + (\text{Gain } 2) \frac{d^2 f(t)}{dt^2}$$

with Gain 1 = $\tau_1 + \tau_2$ and Gain 2 = $\tau_1 * \tau_2$. The time lags that can contribute to τ_1 and τ_2 are pneumatic lag between sensor

26 and the seat of solenoid-activated valve 58 and to a limited extent the solenoid activating solenoid activated-valve 58 when dealing with hysteresis, friction and line pressure dependent preload forces holding the seat shut of solenoid-activated valve 58.

[0027] Therefore, second derivative operation 66 is implemented with the corresponding second gain stage 68 (Gain 2). Second derivative operation 66 corrects for the front end of the sensed flow rate signal 34 which does not accurately approximate a true exponential rise. As with first gain stage 62, second gain stage 68 is adjustable by programming. FIGURE 5 illustrates the effects of varying second gain stage 68 on a continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48. If second gain stage 68 is small, there may be an initial overshoot before the continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48 settles to the steady-state value, while if second gain stage 68 is large, there may be an initial undershoot of the signal before the continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48 settles to the steady-state value. Thus, second gain stage 68 can be properly calibrated to minimize or eliminate overshoot or undershoot. Second gain stage 68 is also adjusted by observation as described above.

[0028] Lowpass filter operation 72 is implemented to reduce the noise generated in digitally enhanced flow rate signal 48 when implementing second differentiation operation 66. Lowpass filter operation 72 has associated time constant τ_f . By adjusting time constant τ_f , the response of lowpass filter operation 72 can be over-corrected or under-corrected. FIGURE 6 illustrates the effects of varying time constant τ_f on a continuous representation of digitally enhanced flow rate signal 48. For large filter time constant τ_f , the filter response may be too slow, while for a small filter time constant τ_f , the filter response may be too fast. The filter time constant τ_f is chosen to adjust the speed of signal 48.

[0029] The system in FIGURE 3 may also use a computer 55 to perform rigorous computations that require more speed and power than that available in microcontroller 44 during calibration and test. Computational results can be downloaded from computer 55 to microcontroller 44 via electrical communication connection 57, such as a bus or cable.

[0030] Overall, the system of FIGURE 3 may be realized easily by implementing a thermal flow sensor with conditioning circuitry with -1.7 second primary time constant. A 16-bit-accuracy A/D converter with a sampling rate of 610 Hz, a 16-bit digital signal processor microcontroller, a PC, and pulse width modulated or continuous valve drive circuitry which controls the a solenoid-activated, low power, throttling ball/seat valve can also be included. Many circuit configurations can be implemented for the valve drive circuitry.

[0031] Mass flow controllers can implement a closed loop control algorithm.

[0032] A major technical advantage of the present invention is that it is realized in the discrete-time domain. Rigorous mathematical computations can be performed or aided by computer 55. Although some prior art methods implement discrete controllers, these methods typically do not possess digital platforms with the power to generate the mathematics which include both a first and a second derivative. Consequently, these methods are limited to digital implementations of the first derivative. Through the use of a powerful computer 55, however, the present invention is able to perform rigorous mathematical computations. Parameter calculations such as first gain stage 62, second gain stage 68, and time constant τ_f can be worked out on computer 55 and then downloaded into an erasable memory array such as an EEPROM in microcontroller 44. Microcontroller 44 then can access these values from the EEPROM when calculating digitally enhanced flow rate signal 48.

[0033] Another important technical advantage of the present invention is that with the implementation of second differentiation operation 66, digitally enhanced flow rate signal 48 closely approximates actual flow 24. Since sensed flow rate signal 34 is not a pure exponential signal, implementation of the first differentiation operation 60 alone does not sufficiently approximate actual flow 24. Weighted first derivative 64 and weighted second derivative 70 accelerate the response of the sensed flow rate signal 34 to more closely approximate actual flow 24. Subsequent filtering of weighted second derivative 70 reduces noise associated with implementing second differentiation operation 66.

[0034] Still yet another technical advantage of the present invention is that through the use embedded A/D converters in microcontroller 44, microcontroller 44 can easily replace prior art systems used to control gas in a manufacturing process. These processes, which may have used analog methods and continuous set-point voltage inputs to control the gas flow, can still use microcontroller 44. The analog signals, such as sensed flow rate signal 34 and set-point signal 50, are digitized and then used for computations in microcontroller unit 44.

[0035] Although the present invention has been described in detail herein with reference to the illustrative embodiments, it should be understood that the description is by way of example only and is not to be construed in a limiting sense. It is to be further understood, therefore, that numerous changes in the details of the embodiments of this invention and additional embodiments of this invention will be apparent to, and may be made by, persons of ordinary skill in the art having reference to this description. It is contemplated that all such changes and additional embodiments are within the spirit and true scope of this invention as claimed below.

Claims

1. A method for controlling a gas flow within a digital mass flow controller having a valve that governs the flow rate

of gas in said digital mass flow controller and a flow sensor that measures an actual gas flow rate through said digital mass flow controller and outputs a sensed flow rate signal, said method comprising:

generating a digitally enhanced flow rate signal representing a final steady-state flow rate in said digital mass flow controller based on a summation of a weighted first derivative of said sensed flow rate signal, a filtered weighted second derivative of said sensed flow rate signal, and said sensed flow rate signal; comparing a set-point signal with said digitally enhanced flow rate signal to generate a digital feedback error signal; and generating a digital control signal that controls said valve in said digital mass flow controller by inputting said digital feedback error signal into a proportional integral (PI) controller and outputting from said PI controller said digital control signal.

2. The method of Claim 1, further comprising the step of converting said sensed flow rate signal to a digital sensed flow rate signal using an A-to-D converter prior to generating said digitally enhanced flow signal.

3. The method of Claim 2, further comprising the step of converting said digital sensed flow rate signal to a digitally linearized sensed flow rate signal using a least squares method prior to generating said digitally enhanced flow rate signal.

4. The method of Claim 3, further comprising the step of weighting a first derivative with a first weight to generate said weighted first derivative, said first weight is uniquely calculated based on a gas species in said digital mass flow controller and a given mechanical platform.

5. The method of Claim 4, further comprising the step of weighting a second derivative with a second weight, to generate said weighted second derivative, said second weight is calculated to correct where said digitally linearized sensed flow rate signal does not approximate a true exponential rise.

6. The method of Claim 5, further comprising the step of implementing a digital lowpass filter operation to filter said weighted second derivative to generate said filtered weighted second derivative and compensate for noise added to said digitally enhanced signal due to said weighted second derivative.

7. The method of Claim 6, wherein said digital lowpass filter operation further comprises a time constant, said time constant is determined empirically.

8. The method of Claim 7, further comprising the step of converting said set-point signal to a digital set-point signal prior to the step of comparing said set-point signal with said digitally enhanced flow rate signal.

9. The method of Claim 8, wherein the steps of generating said digitally enhanced flow rate signal, comparing said set-point signal with said digitally enhanced signal, and generating said digital control signal are executed by a digital signal processor controller.

10. The method of Claim 9, wherein said digital signal processor controller is executable to communicate with a computer, said computer is executable to perform calculations including said first weight, said second weight, and said time constant.

11. The method of Claim 10, further comprising the step of downloading calculations performed by said computer to a storage device in said digital signal processor controller via a connection between said computer and said digital signal processor controller to aid said digital signal processor controller in calculating said digital control signal.

12. The method of Claim 11, wherein said storage device is a EEPROM.

13. The method of Claim 1, wherein said weighted first derivative, said filtered weighted second derivative, said digitally enhanced flow rate signal, and said digital control signal are calculated using difference equations.

14. A method for generating a digitally enhanced flow rate signal that represents a final steady-state flow rate from a sensed flow rate signal provided by a flow sensor in a digital mass flow controller, said method comprising:

calculating a first derivative of said sensed flow rate signal;

calculating a second derivative of sensed flow rate signal;
 weighting said first derivative with a first weight to generate a weighted first derivative signal;
 weighting said second derivative with a second weight to generate a weighted second derivative;
 implementing a digital lowpass filter operation on said weighted second derivative to generate a filtered weight-
 ed second derivative; and
 summing said sensed flow rate signal with said weighted first derivative signal and said filtered weighted
 second derivative signal to generate said digitally enhanced flow rate signal.

15. The method of Claim 14, further comprising the step of converting said sensed flow rate signal to a digital sensed
 flow rate signal prior to the steps of calculating said first derivative and calculating said second derivative.

16. The method of Claim 15, further comprising the step of converting said digital sensed flow rate signal to a digitally
 linearized sensed flow rate signal using a least squares method prior to the steps of calculating said first derivative
 and calculating said second derivative.

17. The method of Claim 16, wherein said first weight for said weighted first derivative is calculated based on a gas
 species in said digital mass flow controller and a given mechanical platform.

18. The method of Claim 17, wherein said second weight for said weighted second derivative is calculated to correct
 where said digitally linearized sensed flow rate signal does not approximate a true exponential rise.

19. The method of Claim 18, wherein said digital lowpass filter operation further comprises a time constant determined
 empirically.

20. The method of Claim 19, wherein the steps of calculating said first derivative, calculating said second derivative,
 weighting said first derivative, weighting said second derivative, implementing said digital lowpass filter operation,
 and summing said sensed flow rate signal with said weighted first derivative and said weighted second derivative
 are executed by a digital signal processor controller.

21. The method of Claim 20, wherein said digital signal processor controller is executable to communicate with a
 computer via a connection between said digital signal processor controller and said computer, said computer is
 executable to perform calculations including said first weight, said second weight, and said time constant.

22. The method of Claim 21, further comprising the step of downloading calculations performed by said computer to
 a storage device in said digital signal processor controller to aid said digital signal processor controller in calculating
 said digitally enhanced flow rate signal.

23. The method of Claim 22, wherein said storage device is a EEPROM.

24. The method of Claim 13, wherein said weighted first derivative, said filtered weighted second derivative, and said
 digitally enhanced flow rate signal are calculated using difference equations.

25. A digital mass flow controller for controlling the flow of gas in a process, said digital mass flow controller comprising:

a flow sensor that measures an actual gas flow rate through said digital mass flow controller and outputs a
 sensed flow rate signal;
 a digital microcontroller which generates a digital control signal using said sensed flow rate signal, a first
 derivative of said sensed flow rate signal, a filtered second derivative of said sensed flow rate signal, and a
 set-point signal; and
 a valve in said digital mass flow controller which is controlled by said digital control signal.

26. The system of Claim 25, wherein said microcontroller is executable to:

calculate said first derivative of said sensed flow rate signal;
 calculate a second derivative of said sensed flow rate signal;
 weight said first derivative with a first weight to generate a weighted first derivative;
 weight said second derivative with a second weight to generate a weighted second derivative;
 implement a digital lowpass filter operation on said weighted second derivative to generate a filtered weighted

second derivative; and
sum said sensed flow rate signal with said weighted first derivative signal and said weighted second derivative signal to generate a digitally enhanced flow rate signal.

5 **27.** The system of Claim 26, wherein said sensed flow rate is converted to a digital sensed flow rate signal prior to:

calculating said first derivative;
calculating said second derivative; and
10 summing said digital sensed flow rate signal with said weighted first derivative signal and said weighted second derivative signal.

28. The system of Claim 27, wherein said digital sensed flow rate signal is converted to a digitally linearized sensed flow rate signal using a least squares method prior to:

15 calculating said first derivative;
calculating said second derivative; and
summing said digital sensed flow rate signal with said weighted first derivative signal and said weighted second derivative signal.

20 **29.** The system of Claim 28, wherein said first weight is calculated based on gas species in said digital mass flow controller and a given mechanical platform.

30. The system of Claim 29, wherein said second weight is calculated to correct where said digitally linearized sensed flow rate signal does not approximate a true exponential rise.

25 **31.** The system of Claim 30, wherein said digital lowpass filter operation further comprises a time constant which is determined empirically.

30 **32.** The system of Claim 31, wherein said digital microcontroller is further executable to:

compare said set-point signal with said digitally enhanced flow rate signal to generate a digital error signal; and
implement a digital PI (proportional integral) control operation on said digital error signal to generate a digital control signal.

35 **33.** The system of Claim 25, wherein said set-point signal is a digital signal.

34. The system of Claim 32, wherein said set-point signal is converted to a digital set-point signal prior to comparing said set-point signal with said digitally enhanced flow rate signal.

40 **35.** The system of Claim 34, wherein said digital microcontroller is a digital signal processor microcontroller.

36. The system of Claim 35, wherein said digital signal processor microcontroller is executable to communicate with a computer via a connection between said computer and said digital signal processor controller, said computer is executable to perform calculations including said first weight, said second weight, and said time constant.

45 **37.** The system of Claim 36, wherein said computer is further executable to download said calculations performed by said computer to a storage device in said digital signal processor controller to aid said digital signal processor controller in calculating said digital control signal.

50 **38.** The system of Claim 37, wherein said storage device is an EEPROM.

39. The system of Claim 26, wherein said weighted first derivative, said weighted second derivative, said filtered weighted second derivative, and said digital control signal are calculated using difference equations.

55 **40.** A system for generating a digitally enhanced flow rate signal from a sensed flow rate signal provided by a flow sensor in a mass flow controller, said system having a computer program stored on a digital signal processor controller, said digital signal processor controller executable to:

calculate a first derivative of said sensed flow rate signal;
 calculate a second derivative of sensed flow rate signal;
 weight said first derivative with a first weight to generate a weighted first derivative signal;
 weight said second derivative with a second weight to generate a weighted second derivative;
 5 implement a digital lowpass filter operation on said weighted second derivative to generate a filtered weighted second derivative; and
 sum said sensed flow rate signal with said weighted first derivative signal and said filtered weighted second derivative signal to generate said digitally enhanced flow rate signal.

41. The system of Claim 40, wherein said sensed flow rate is converted to a digital sensed flow rate prior to calculating said first derivative, calculating said second derivative, and summing said sensed flow rate signal with said weighted first derivative and said filtered weighted second derivative.

42. The system of Claim 41, wherein said digital sensed flow rate is converted to a digitally linearized sensed flow rate using a least squares method prior to calculating said first derivative, calculating said second derivative, and summing said sensed flow rate signal with said weighted first derivative and said filtered weighted second derivative.

43. The system of Claim 42, wherein said first weight for said weighted first derivative is calculated based on a gas species in said digital mass flow controller and a given mechanical platform.

44. The system of Claim 43, wherein said second weight for said weighted second derivative is calculated to correct where said digitally linearized sensed flow rate signal does not approximate a true exponential rise.

45. The system of Claim 44, wherein said digital lowpass filter operation further comprises a time constant, said time constant is empirically determined.

46. The system of Claim 45, wherein said digital signal processor controller is executable to communicate with a computer via a connection between said digital signal processor controller and said computer, said computer is executable to perform calculations including said first weight, said second weight, and said time constant.

47. The system of Claim 46, wherein said computer is further executable to download calculations performed by said computer to a storage device in said digital signal processor controller to aid said digital signal processor controller in generating said digitally enhanced flow rate signal.

48. The system of Claim 47, wherein said storage device is an EEPROM.

49. The system of Claim 40, wherein said weighted first derivative, said weighted second derivative, and said filtered weighted second derivative are calculated using difference equations.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines Gasflusses innerhalb eines digitalen Massenflussreglers mit einem Ventil, welches die Gasflussrate in dem digitalen Massenflussregler steuert und einem Flusssensor, der eine Ist-Gasflussrate durch den digitalen Massenflussregler misst und ein Messflussratensignal ausgibt, welches Verfahren umfasst:

Erzeugen eines digital verstärkten Flussratensignals, welches eine Endgleichgewichtsflussrate in dem digitalen Massenflussregler darstellt, basierend auf einer Summierung einer gewichteten ersten Ableitung des Messflussratensignals, einer gefilterten zweiten Ableitung des Messflussratensignals und dem Messflussratensignal;

Vergleichen eines Sollwertsignals mit dem digital verstärkten Flussratensignal um ein digitales Rückkopplungsfehlersignal zu erzeugen; und

Erzeugen eines digitalen Steuersignals, welches das Ventil in dem digitalen Massenflussregler steuert, durch Zuführen des digitalen Rückkopplungsfehlersignals in einen Proportional-Integral (PI)-Regler und Ausgeben des digitalen Steuersignals von dem PI-Regler.

EP 1 214 635 B9 (W1B1)

2. Verfahren nach Anspruch 1, welches ferner den Schritt umfasst: Umwandeln des Messflussratensignals in ein digitales Messflussratensignal, wobei ein Analog-zu-Digital-Wandler vor dem Erzeugen des digital verstärkten Flusssignals verwendet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, welches ferner den Schritt umfasst: Umwandeln des digitalen Messflussratensignals in ein digital linearisiertes Messflussratensignal, wobei eine Methode der kleinsten Quadrate vor dem Erzeugen des digital verstärkten Flussratensignals verwendet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, welches ferner den Schritt umfasst: Gewichten einer ersten Ableitung mit einem ersten Gewicht um die gewichtete erste Ableitung zu erzeugen, wobei das erste Gewicht basierend auf einer Gassorte in dem digitalen Massenflussregler und einer gegebenen mechanischen Plattform einmal berechnet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, welches ferner den Schritt umfasst: Gewichten einer zweiten Ableitung mit einem zweiten Gewicht um die gewichtete zweite Ableitung zu erzeugen, wobei das zweite Gewicht berechnet wird, um zu korrigieren, wo sich das digital linearisierte Messflussratensignal nicht einem echten Exponentialanstieg annähert.

6. Verfahren nach Anspruch 5, welches ferner den Schritt umfasst: Implementieren einer digitalen Tiefpassfilterung zur Filterung der gewichteten zweiten Ableitung und Erzeugung der gefilterten, gewichteten zweiten Ableitung um ein Rauschen auszugleichen, das dem digital verstärkten Signal durch die gewichtete zweite Ableitung hinzugefügt wurde.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei welchem die digitale Tiefpassfilterung ferner eine Zeitkonstante umfasst, welche empirisch bestimmt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, welches ferner den Schritt umfasst: Umwandeln des Sollwertsignals in ein digitales Sollwertsignal, und zwar vor dem Vergleichen des Sollwertsignals mit dem digital verstärkten Flussratensignal,.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei welchem die Schritte zum Erzeugen des digital verstärkten Flussratensignals, Vergleichen des Sollwertsignals mit dem digital verstärkten Signal und Erzeugen des digitalen Steuersignals von einem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller durchgeführt werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei welchem der digitale Signalverarbeitungs-Kontroller mit einem Computer kommunizieren kann, welcher Computer Berechnungen, einschließlich des ersten Gewichts, des zweiten Gewichts und der Zeitkonstanten, durchführen kann.

11. Verfahren nach Anspruch 10, welches ferner den Schritt umfasst: Laden der von dem Computer durchgeführten Berechnungen in einen Speicher in dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller über eine Verbindung zwischen dem Computer und dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller, um den digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller bei der Berechnung des digitalen Steuersignals zu unterstützen.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei welchem der Speicher ein EPROM ist.

13. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem die gewichtete erste Ableitung, die gefilterte, gewichtete zweite Ableitung, das digital verstärkte Flussratensignal und das digitale Steuersignal durch Verwenden von Differenzgleichungen berechnet werden.

14. Verfahren zum Erzeugen eines, eine Endgleichgewichtsflussrate darstellenden, digital verstärkten Flussratensignals, aus einem, von einem Flusssensor in einem digitalen Massenflussregler stammenden, Messflussratensignal t, welches Verfahren umfasst:

Berechnen einer ersten Ableitung des Messflussratensignals;

Berechnen einer zweiten Ableitung des Messflussratensignals;

Gewichten der ersten Ableitung mit einem ersten Gewicht zum Erzeugen einer gewichteten ersten Ableitung;

Gewichten der zweiten Ableitung mit einem zweiten Gewicht zum Erzeugen einer gewichteten zweiten Ablei-

tung;

Implementieren einer digitalen Tiefpassfilterung der gewichteten zweiten Ableitung zum Erzeugen einer gefilterten, gewichteten zweiten Ableitung, und

Summieren des Messflussratensignals mit dem gewichteten ersten Ableitungssignal und dem gefilterten, gewichteten zweiten Ableitungssignal zum Erzeugen des digital verstärkten Flussratensignals.

15. Verfahren nach Anspruch 14, welches ferner den Schritt umfasst: Umwandeln des Messflussratensignals in ein digitales Messflussratensignal, und zwar vor den Schritten zum Berechnen der ersten Ableitung und Berechnen der zweiten Ableitung.

16. Verfahren nach Anspruch 15, welches ferner den Schritt umfasst: Umwandeln des digitalen Messflussratensignals in ein digital linearisiertes Messflussratensignal, wobei eine Methode der kleinsten Quadrate vor den Schritten zum Berechnen der ersten Ableitung und Berechnen der zweiten Ableitung verwendet wird.

17. Verfahren nach Anspruch 16, bei welchem das erste Gewicht für die gewichtete erste Ableitung basierend auf einer Gassorte in dem digitalen Massenflussregler und einer gegebenen mechanischen Plattform berechnet wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, bei welchem das zweite Gewicht für die gewichtete zweite Ableitung berechnet wird, um zu korrigieren, wo sich das digital linearisierte Messflussratensignal nicht einem echten Exponentialanstieg annähert.

19. Verfahren nach Anspruch 18, bei welchem die digitale Tiefpassfilterung ferner eine empirisch bestimmte Zeitkonstante umfasst.

20. Verfahren nach Anspruch 19, bei welchem die Schritte zum Berechnen der ersten Ableitung, Berechnen der zweiten Ableitung, Gewichten der ersten Ableitung, Gewichten der zweiten Ableitung, Implementieren der digitalen Tiefpassfilterung und Summieren des Messflussratensignals mit der gewichteten ersten Ableitung und der gewichteten zweiten Ableitung von einem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller durchgeführt werden.

21. Verfahren nach Anspruch 20, bei welchem der digitale Signalverarbeitungs-Kontroller mit einem Computer über eine Verbindung zwischen dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller und dem Computer kommunizieren kann, welcher Computer Berechnungen, einschließlich des ersten Gewichts, des zweiten Gewichts und der Zeitkonstanten, durchführen kann.

22. Verfahren nach Anspruch 21, welches ferner den Schritt umfasst: Laden der von dem Computer durchgeführten Berechnungen in einen Speicher in dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller um den digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller bei der Berechnung des digital verstärkten Flussratensignals zu unterstützen.

23. Verfahren nach Anspruch 22, bei welchem der Speicher ein EPROM ist.

24. Verfahren nach Anspruch 13, bei welchem die gewichtete erste Ableitung, die gefilterte, gewichtete zweite Ableitung, das digital verstärkte Flussratensignal durch Verwenden von Differenzgleichungen berechnet werden.

25. Digitaler Massenflussregler zum Steuern des Gasflusses in einem Prozess, welcher digitaler Massenflussregler umfasst:

einen Flusssensor, welcher eine Ist-Gasflussrate durch den digitalen Massenflussregler misst und ein Messflussratensignal ausgibt;

einen digitalen Mikrokontroller, der ein digitales Steuersignal erzeugt, wobei das Messflussratensignal, eine erste Ableitung des Messflussratensignals, eine gefilterte zweite Ableitung des Messflussratensignals und ein Sollwertsignal verwendet wird; und

ein Ventil in dem digitalen Massenflussregler, das durch das digitale Steuersignal gesteuert wird.

26. System nach Anspruch 25, bei welchem der Mikrokontroller durchführen kann:

Berechnen einer ersten Ableitung des Messflussratensignals;

Berechnen einer zweiten Ableitung des Messflussratensignals;

5 Gewichten der ersten Ableitung mit einem ersten Gewicht zum Erzeugen einer gewichteten ersten Ableitung;

Gewichten der zweiten Ableitung mit einem zweiten Gewicht zum Erzeugen einer gewichteten zweiten Ableitung;

10 Implementieren einer digitalen Tiefpassfilterung der gewichteten zweiten Ableitung zum Erzeugen einer gefilterten, gewichteten zweiten Ableitung, und

Summieren des Messflussratensignals mit dem gewichteten ersten Ableitungssignal und dem gewichteten zweiten Ableitungssignal zum Erzeugen eines digital verstärkten Flussratensignals.

15 **27.** System nach Anspruch 26, bei welchem die Messflussrate in ein digitales Messflussratensignal umgewandelt wird, vor dem:

Berechnen der ersten Ableitung;

20 Berechnen der zweiten Ableitung; und

Summieren des digitalen Messflussratensignals mit dem gewichteten ersten Ableitungssignal und dem gewichteten zweiten Ableitungssignal.

25 **28.** System nach Anspruch 27, bei welchem das digitale Messflussratensignal in ein digital linearisiertes Messflussratensignal umgewandelt wird, wobei eine Methode der kleinsten Quadrate verwendet wird vor dem:

Berechnen der ersten Ableitung;

Berechnen der zweiten Ableitung; und

30 Summieren des digitalen Messflussratensignals mit dem gewichteten ersten Ableitungssignal und dem gewichteten zweiten Ableitungssignal.

29. System nach Anspruch 28, bei welchem das erste Gewicht basierend auf einer Gassorte in dem digitalen Massenflussregler und einer gegebenen mechanischen Plattform berechnet wird.

35 **30.** System nach Anspruch 29, bei welchem das zweite Gewicht berechnet wird, um zu korrigieren, wo sich das digital linearisierte Messflussratensignal nicht einem echten Exponentialanstieg annähert.

31. System nach Anspruch 30, bei welchem die digitale Tiefpassfilterung ferner eine Zeitkonstante umfasst, die empirisch bestimmt wird.

40 **32.** System nach Anspruch 31, bei welchem der digitale Mikrokontroller ferner ausführen kann:

Vergleichen des Sollwertsignals mit dem digital verstärkten Flussratensignal zum Erzeugen eines digitalen Fehlersignals; und

45 Implementieren einer digitalen PI (Proportional-Integral)-Regelung des digitalen Fehlersignals zum Erzeugen eines digitalen Steuersignals.

33. System nach Anspruch 25, bei welchem das Sollwertsignal ein digitales Signal ist.

50 **34.** System nach Anspruch 32, bei welchem das Sollwertsignal vor dem Vergleichen des Sollwertsignals mit dem digital verstärkten Flussratensignal in ein digitales Sollwertsignal umgewandelt wird.

55 **35.** System nach Anspruch 34, bei welchem der digitale Mikrokontroller ein digitaler Signalverarbeitungs-Mikrokontroller ist.

36. System nach Anspruch 35, bei welchem der digitale Signalverarbeitungs-Mikrokontroller mit einem Computer über eine Verbindung zwischen dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller und dem Computer kommunizieren kann,

welcher Computer Berechnungen, einschließlich des ersten Gewichts, des zweiten Gewichts und der Zeitkonstanten, durchführen kann.

- 5 **37.** System nach Anspruch 36, bei welchem der Computer ferner die von dem Computer durchgeführten Berechnungen in einen Speicher in dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller laden kann, um den digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller bei der Berechnung des digitalen Steuersignals zu unterstützen.
- 10 **38.** System nach Anspruch 37, bei welchem der Speicher ein EPROM ist.
- 10 **39.** System nach Anspruch 26, bei welchem die gewichtete erste Ableitung, die gewichtete zweite Ableitung, die gefilterte, gewichtete zweite Ableitung und das digitale Steuersignal durch Verwenden von Differenzgleichungen berechnet werden.
- 15 **40.** System zum Erzeugen eines digital verstärkten Flussratensignals aus einem Messflussratensignal, das von einem Flusssensor in einem Massenflussregler stammt, welches System ein in einem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller gespeichertes Computerprogramm aufweist, wobei der digitale Signalverarbeitungs-Kontroller durchführen kann:
- 20 Berechnen einer ersten Ableitung des Messflussratensignals;
- 20 Berechnen einer zweiten Ableitung des Messflussratensignals;
- Gewichten der ersten Ableitung mit einem ersten Gewicht zum Erzeugen einer gewichteten ersten Ableitung;
- 25 Gewichten der zweiten Ableitung mit einem zweiten Gewicht zum Erzeugen einer gewichteten zweiten Ableitung;
- Implementieren einer digitalen Tiefpassfilterung der gewichteten zweiten Ableitung zum Erzeugen einer gefilterten, gewichteten zweiten Ableitung, und
- 30 Summieren des Messflussratensignals mit dem gewichteten ersten Ableitungssignal und dem gefilterten, gewichteten zweiten Ableitungssignal zum Erzeugen des digital verstärkten Flussratensignals.
- 35 **41.** System nach Anspruch 40, bei welchem die Messflussrate in ein digitales Messflussratensignal umgewandelt wird, und zwar vor dem Berechnen der ersten Ableitung, Berechnen der zweiten Ableitung und Summieren des Messflussratensignals mit der gewichteten ersten Ableitung und der gefilterten, gewichteten zweiten Ableitung.
- 40 **42.** System nach Anspruch 41, bei welchem das digitale Messflussratensignal in eine digital linearisierte Messflussrate umgewandelt wird, wobei eine Methode der kleinsten Quadrate verwendet wird, und zwar vor dem Berechnen der ersten Ableitung, Berechnen der zweiten Ableitung und Summieren des Messflussratensignals mit der gewichteten ersten Ableitung und der gefilterten, gewichteten zweiten Ableitung.
- 45 **43.** System nach Anspruch 42, bei welchem das erste Gewicht für die gewichtete erste Ableitung basierend auf einer Gassorte in dem digitalen Massenflussregler und einer gegebenen mechanischen Plattform berechnet wird.
- 45 **44.** System nach Anspruch 43, bei welchem das zweite Gewicht für die gewichtete zweite Ableitung berechnet wird, um zu korrigieren, wo sich das digital linearisierte Messflussratensignal nicht einem echten Exponentialanstieg annähert.
- 50 **45.** System nach Anspruch 44, bei welchem die digitale Tiefpassfilterung ferner eine Zeitkonstante umfasst, welche empirisch bestimmt wird.
- 55 **46.** System nach Anspruch 45, bei welchem der digitale Signalverarbeitungs-Mikrokontroller mit einem Computer über eine Verbindung zwischen dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller und dem Computer kommunizieren kann, welcher Computer Berechnungen, einschließlich des ersten Gewichts, des zweiten Gewichts und der Zeitkonstanten, durchführen kann.
- 47.** System nach Anspruch 46, bei welchem der Computer ferner von dem Computer durchgeführte Berechnungen

in einen Speicher in dem digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller laden kann, um den digitalen Signalverarbeitungs-Kontroller bei der Erzeugung des digital verstärkten Flussratensignals zu unterstützen.

48. System nach Anspruch 47, bei welchem der Speicher ein EPROM ist.

49. System nach Anspruch 40, bei welchem die gewichtete erste Ableitung, die gewichtete zweite Ableitung und die gefilterte, gewichtete zweite Ableitung durch Verwenden von Differenzgleichungen berechnet werden.

Revendications

1. Procédé de commande d'un débit de gaz dans un régulateur de débit massique numérique possédant une vanne qui pilote le débit de gaz dans ledit régulateur de débit massique numérique et un capteur de débit qui mesure un débit de gaz effectif traversant ledit régulateur de débit massique numérique et délivre en sortie un signal de débit détecté, ledit procédé comprenant les étapes consistant à :

générer un signal de débit amélioré numériquement qui représente un débit final en régime établi dans ledit régulateur de débit massique numérique sur la base d'une sommation d'une dérivée première pondérée dudit signal de débit détecté, d'une dérivée seconde pondérée filtrée dudit signal de débit détecté et dudit signal de débit détecté ;

comparer un signal de consigne audit signal de débit amélioré numériquement afin de générer un signal d'erreur de rétroaction numérique ; et

générer un signal de commande numérique qui commande ladite vanne dans ledit régulateur de débit massique numérique en introduisant ledit signal d'erreur de rétroaction numérique dans un régulateur proportionnel intégral (PI) et en délivrant ledit signal de commande numérique à la sortie dudit régulateur PI.

2. Procédé selon la revendication 1, comprenant en plus l'étape consistant à convertir ledit signal de débit détecté en un signal de débit détecté numérique en utilisant un convertisseur analogique/numérique avant de générer ledit signal de débit amélioré numériquement.

3. Procédé selon la revendication 2, comprenant en plus l'étape consistant à convertir ledit signal de débit détecté numérique en un signal de débit détecté linéarisé numériquement en utilisant une méthode des moindres carrés avant de générer ledit signal de débit amélioré numériquement.

4. Procédé selon la revendication 3, comprenant en plus l'étape consistant à pondérer une dérivée première avec une première pondération afin de générer ladite dérivée première pondérée, ladite première pondération étant calculée de manière unique sur la base d'une espèce de gaz dans ledit régulateur de débit massique numérique et d'une plate-forme mécanique donnée.

5. Procédé selon la revendication 4, comprenant en plus l'étape consistant à pondérer une dérivée seconde avec une deuxième pondération afin de générer ladite dérivée seconde pondérée, ladite deuxième pondération étant calculée pour introduire une correction lorsque ledit signal de débit détecté linéarisé numériquement ne s'approche pas d'une croissance exponentielle vraie.

6. Procédé selon la revendication 5, comprenant en plus l'étape consistant à effectuer une opération de filtre passe-bas numérique afin de filtrer ladite dérivée seconde pondérée pour générer ladite dérivée seconde pondérée filtrée et compenser le bruit ajouté audit signal amélioré numériquement à cause de ladite dérivée seconde pondérée.

7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel ladite opération de filtre passe-bas numérique comprend une constante de temps, ladite constante de temps étant déterminée empiriquement.

8. Procédé selon la revendication 7, comprenant en plus l'étape consistant à convertir ledit signal de consigne en un signal de consigne numérique avant l'étape de comparaison dudit signal de consigne avec ledit signal de débit amélioré numériquement.

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel les étapes consistant à générer ledit signal de débit amélioré nu-

EP 1 214 635 B9 (W1B1)

mériquement, comparer ledit signal de consigne audit signal amélioré numériquement et générer ledit signal de commande numérique sont exécutées par un contrôleur à processeur de signal numérique.

- 5 **10.** Procédé selon la revendication 9, dans lequel ledit contrôleur à processeur de signal numérique peut être configuré pour communiquer avec un ordinateur, ledit ordinateur pouvant être configuré pour effectuer des calculs comprenant ladite première pondération, ladite deuxième pondération et ladite constante de temps.
- 10 **11.** Procédé selon la revendication 10, comprenant en plus l'étape consistant à télécharger des calculs effectués par ledit ordinateur vers un dispositif de stockage dans ledit contrôleur à processeur de signal numérique, par l'intermédiaire d'une connexion entre ledit ordinateur et ledit contrôleur à processeur de signal numérique, afin d'aider ledit contrôleur à processeur de signal numérique à calculer ledit signal de commande numérique.
- 15 **12.** Procédé selon la revendication 11, dans lequel ledit dispositif de stockage est une EEPROM.
- 15 **13.** Procédé selon la revendication 1, dans lequel ladite dérivée première pondérée, ladite dérivée seconde pondérée filtrée, ledit signal de débit amélioré numériquement et ledit signal de commande numérique sont calculés au moyen d'équations différentielles.
- 20 **14.** Procédé pour générer un signal de débit amélioré numériquement qui représente un débit final en régime établi à partir d'un signal de débit détecté fourni par un capteur de débit dans un régulateur de débit massique numérique, ledit procédé comprenant les étapes consistant à :
- calculer une dérivée première dudit signal de débit détecté ;
- 25 calculer une dérivée seconde dudit signal de débit détecté ;
- pondérer ladite dérivée première avec une première pondération afin de générer un signal de dérivée première pondérée ;
- 30 pondérer ladite dérivée seconde avec une deuxième pondération afin de générer une dérivée seconde pondérée ;
- effectuer une opération de filtre passe-bas numérique sur ladite dérivée seconde pondérée afin de générer une dérivée seconde pondérée filtrée ; et
- 35 sommer ledit signal de débit détecté avec ledit signal de dérivée première pondérée et ledit signal de dérivée seconde pondérée filtrée afin de générer ledit signal de débit amélioré numériquement.
- 40 **15.** Procédé selon la revendication 14, comprenant en plus l'étape consistant à convertir ledit signal de débit détecté en un signal de débit détecté numérique avant les étapes de calcul de ladite dérivée première et de calcul de ladite dérivée seconde.
- 45 **16.** Procédé selon la revendication 15, comprenant en plus l'étape consistant à convertir ledit signal de débit détecté numérique en un signal de débit détecté linéarisé numériquement en utilisant une méthode des moindres carrés avant les étapes de calcul de ladite dérivée première et de calcul de ladite dérivée seconde.
- 50 **17.** Procédé selon la revendication 16, dans lequel la première pondération pour ladite dérivée première pondérée est calculée sur la base d'une espèce de gaz dans ledit régulateur de débit massique numérique et d'une plateforme mécanique donnée.
- 55 **18.** Procédé selon la revendication 17, dans lequel ladite seconde pondération pour ladite dérivée seconde pondérée est calculée pour introduire une correction lorsque ledit signal de débit détecté linéarisé numériquement ne s'approche pas d'une croissance exponentielle vraie.
- 55 **19.** Procédé selon la revendication 18, dans lequel ladite opération de filtre passe-bas numérique comprend en plus une constante de temps déterminée empiriquement.
- 20 **20.** Procédé selon la revendication 19, dans lequel les étapes consistant à calculer ladite dérivée première, calculer

ladite dérivée seconde, pondérer ladite dérivée première, pondérer ladite dérivée seconde, effectuer ladite opération de filtre passe-bas numérique et sommer ledit signal de débit détecté avec ladite dérivée première pondérée et ladite dérivée seconde pondérée sont exécutées par un contrôleur à processeur de signal numérique.

5 **21.** Procédé selon la revendication 20, dans lequel ledit contrôleur à processeur de signal numérique peut être configuré pour communiquer avec un ordinateur par l'intermédiaire d'une connexion entre ledit contrôleur à processeur de signal numérique et ledit ordinateur, ledit ordinateur pouvant être configuré pour effectuer des calculs comprenant ladite première pondération, ladite deuxième pondération et ladite constante de temps.

10 **22.** Procédé selon la revendication 21, comprenant en plus l'étape consistant à télécharger des calculs effectués par ledit ordinateur vers un dispositif de stockage dans ledit contrôleur à processeur de signal numérique afin d'aider ledit contrôleur à processeur de signal numérique à calculer ledit signal de débit amélioré numériquement.

15 **23.** Procédé selon la revendication 22, dans lequel ledit dispositif de stockage est une EEPROM.

24. Procédé selon la revendication 13, dans lequel ladite dérivée première pondérée, ladite dérivée seconde pondérée filtrée et ledit signal de débit amélioré numériquement sont calculés au moyen d'équations différentielles.

20 **25.** Régulateur de débit massique numérique pour commander le débit de gaz dans un process, ledit régulateur de débit massique numérique comprenant :

 un capteur de débit qui mesure un débit de gaz effectif traversant ledit régulateur de débit massique numérique et délivre un signal de débit détecté ;

25 un microcontrôleur numérique qui génère un signal de commande numérique en utilisant ledit signal de débit détecté, une dérivée première dudit signal de débit détecté, une dérivée seconde filtrée dudit signal de débit détecté et un signal de consigne ; et

30 une vanne dans ledit régulateur de débit massique numérique qui est commandée par ledit signal de commande numérique.

26. Système selon la revendication 25, dans lequel ledit microcontrôleur peut être configuré pour:

35 calculer ladite dérivée première dudit signal de débit détecté ;

 calculer une dérivée seconde dudit signal de débit détecté ;

 pondérer ladite dérivée première avec une première pondération afin de générer une dérivée première pondérée ;

40 pondérer ladite dérivée seconde avec une deuxième pondération afin de générer une dérivée seconde pondérée ;

45 effectuer une opération de filtre passe-bas numérique sur ladite dérivée seconde pondérée afin de générer une dérivée seconde pondérée filtrée ; et

 sommer ledit signal de débit détecté avec ledit signal de dérivée première pondérée et ledit signal de dérivée seconde pondérée afin de générer un signal de débit amélioré numériquement.

50 **27.** Système selon la revendication 26, dans lequel ledit débit détecté est converti en un signal de débit détecté numérique avant de :

 calculer ladite dérivée première ;

55 calculer ladite dérivée seconde ; et

 sommer ledit signal de débit détecté numérique avec ledit signal de dérivée première pondérée et ledit signal de dérivée seconde pondérée.

EP 1 214 635 B9 (W1B1)

28. Système selon la revendication 27, dans lequel ledit débit détecté numérique est converti en un signal de débit détecté linéarisé numériquement avant de :

calculer ladite dérivée première ;

calculer ladite dérivée seconde ; et

sommer ledit signal de débit détecté numérique avec ledit signal de dérivée première pondérée et ledit signal de dérivée seconde pondérée.

29. Système selon la revendication 28, dans lequel ladite première pondération est calculée sur la base d'une espèce de gaz dans ledit régulateur de débit massique numérique et d'une plate-forme mécanique donnée.

30. Système selon la revendication 29, dans lequel ladite deuxième pondération est calculée pour introduire une correction lorsque ledit signal de débit détecté linéarisé numériquement ne s'approche pas d'une croissance exponentielle vraie.

31. Système selon la revendication 30, dans lequel ladite opération de filtre passe-bas numérique comprend en plus une constante de temps qui est déterminée empiriquement.

32. Système selon la revendication 31, dans lequel ledit microcontrôleur numérique peut être configuré en plus pour :

comparer ledit signal de consigne audit signal de débit amélioré numériquement afin de générer un signal d'erreur numérique ; et

effectuer une opération de commande numérique PI (proportionnelle intégrale) sur ledit signal d'erreur numérique afin de générer un signal de commande numérique.

33. Système selon la revendication 25, dans lequel ledit signal de consigne est un signal numérique.

34. Système selon la revendication 32, dans lequel ledit signal de consigne est converti en un signal de consigne numérique avant de comparer ledit signal de consigne audit signal de débit amélioré numériquement.

35. Système selon la revendication 34, dans lequel ledit microcontrôleur numérique est un microcontrôleur à processeur de signal numérique.

36. Système selon la revendication 35, dans lequel ledit microcontrôleur à processeur de signal numérique peut être configuré pour communiquer avec un ordinateur par l'intermédiaire d'une connexion entre ledit ordinateur et ledit contrôleur à processeur de signal numérique, ledit ordinateur pouvant être configuré pour effectuer des calculs comprenant ladite première pondération, ladite deuxième pondération et ladite constante de temps.

37. Système selon la revendication 36, dans lequel ledit ordinateur peut être configuré en plus pour télécharger lesdits calculs effectués par ledit ordinateur vers un dispositif de stockage dans ledit contrôleur à processeur de signal numérique afin d'aider ledit contrôleur à processeur de signal numérique à calculer ledit signal de commande numérique.

38. Système selon la revendication 37, dans lequel ledit dispositif de stockage est une EEPROM.

39. Système selon la revendication 26, dans lequel ladite dérivée première pondérée, ladite dérivée seconde pondérée, ladite dérivée première pondérée filtrée et ledit signal de commande numérique sont calculés au moyen d'équations différentielles.

40. Système pour générer un signal de débit amélioré numériquement à partir d'un signal de débit détecté fourni par un capteur de débit dans un régulateur de débit massique, ledit système possédant un programme informatique stocké dans un contrôleur à processeur de signal numérique, ledit contrôleur à processeur de signal numérique pouvant être configuré pour :

calculer une dérivée première dudit signal de débit détecté ;

calculer une dérivée seconde du signal de débit détecté ;

pondérer ladite dérivée première avec une première pondération afin de générer un signal de dérivée première pondérée ;

pondérer ladite dérivée seconde avec une deuxième pondération afin de générer une dérivée seconde pondérée ;

effectuer une opération de filtre passe-bas numérique sur ladite dérivée seconde pondérée afin de générer une dérivée seconde pondérée filtrée ; et

sommer ledit signal de débit détecté avec ledit signal de dérivée première pondérée et ledit signal de dérivée seconde pondérée filtrée afin de générer ledit signal de débit amélioré numériquement.

41. Système selon la revendication 40, dans lequel ledit signal de débit détecté est converti en un signal de débit détecté numérique avant de calculer ladite dérivée première, de calculer ladite dérivée seconde et de sommer ledit signal de débit détecté avec ladite dérivée première pondérée et ladite dérivée seconde pondérée filtrée.

42. Système selon la revendication 41, dans lequel ledit signal de débit détecté numérique est converti en un signal de débit détecté linéarisé numériquement en utilisant une méthode des moindres carrés avant de calculer ladite dérivée première, de calculer ladite dérivée seconde et de sommer ledit signal de débit détecté avec ladite dérivée première pondérée et ladite dérivée seconde pondérée filtrée.

43. Système selon la revendication 42, dans lequel ladite première pondération pour ladite dérivée première pondérée est calculée sur la base d'une espèce de gaz dans ledit régulateur de débit massique numérique et d'une plateforme mécanique donnée.

44. Système selon la revendication 43, dans lequel ladite deuxième pondération pour ladite dérivée seconde pondérée est calculée pour introduire une correction lorsque ledit signal de débit détecté linéarisé numériquement ne s'approche pas d'une croissance exponentielle vraie.

45. Système selon la revendication 44, dans lequel ladite opération de filtre passe-bas numérique comprend en plus une constante de temps, ladite constante de temps étant déterminée empiriquement.

46. Système selon la revendication 45, dans lequel ledit contrôleur à processeur de signal numérique peut être configuré pour communiquer avec un ordinateur par l'intermédiaire d'une connexion entre ledit contrôleur à processeur de signal numérique et ledit ordinateur, ledit ordinateur pouvant être configuré pour effectuer des calculs comprenant ladite première pondération, ladite deuxième pondération et ladite constante de temps.

47. Système selon la revendication 46, dans lequel ledit ordinateur peut être configuré en plus pour télécharger des calculs effectués par ledit ordinateur vers un dispositif de stockage dans ledit contrôleur à processeur de signal numérique afin d'aider ledit contrôleur à processeur de signal numérique à générer ledit signal de débit amélioré numériquement.

48. Système selon la revendication 47, dans lequel ledit dispositif de stockage est une EEPROM.

49. Système selon la revendication 40, dans lequel ladite dérivée première pondérée, ladite dérivée seconde pondérée et ladite dérivée seconde pondérée filtrée sont calculées au moyen d'équations différentielles.

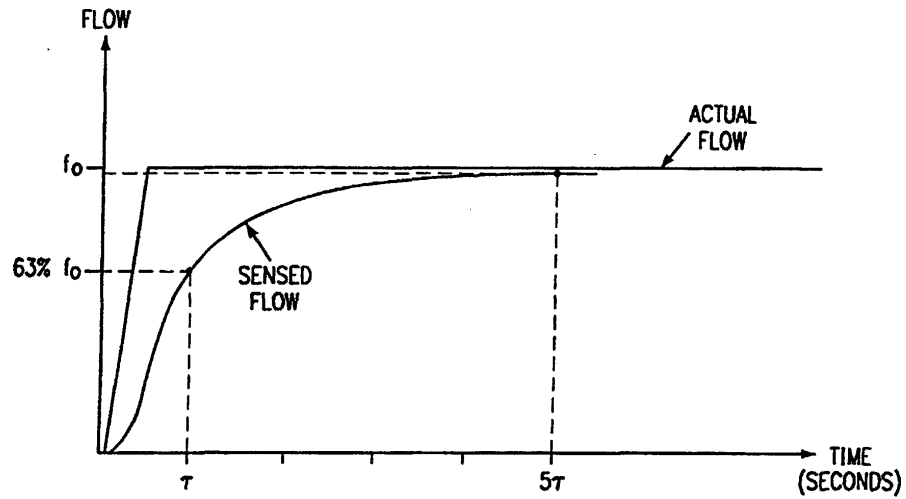


FIG. 1
(PRIOR ART)

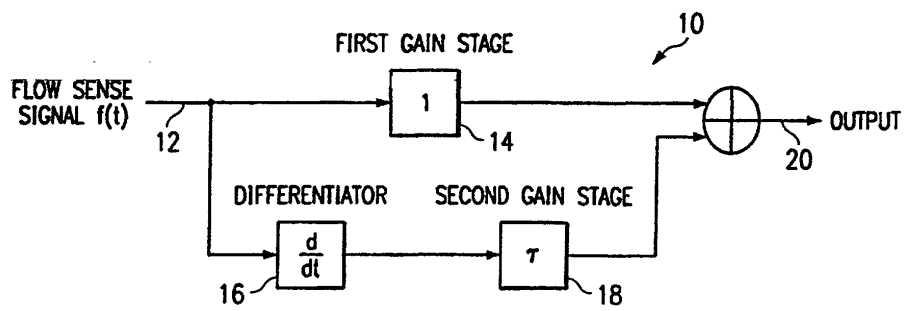


FIG. 2
(PRIOR ART)

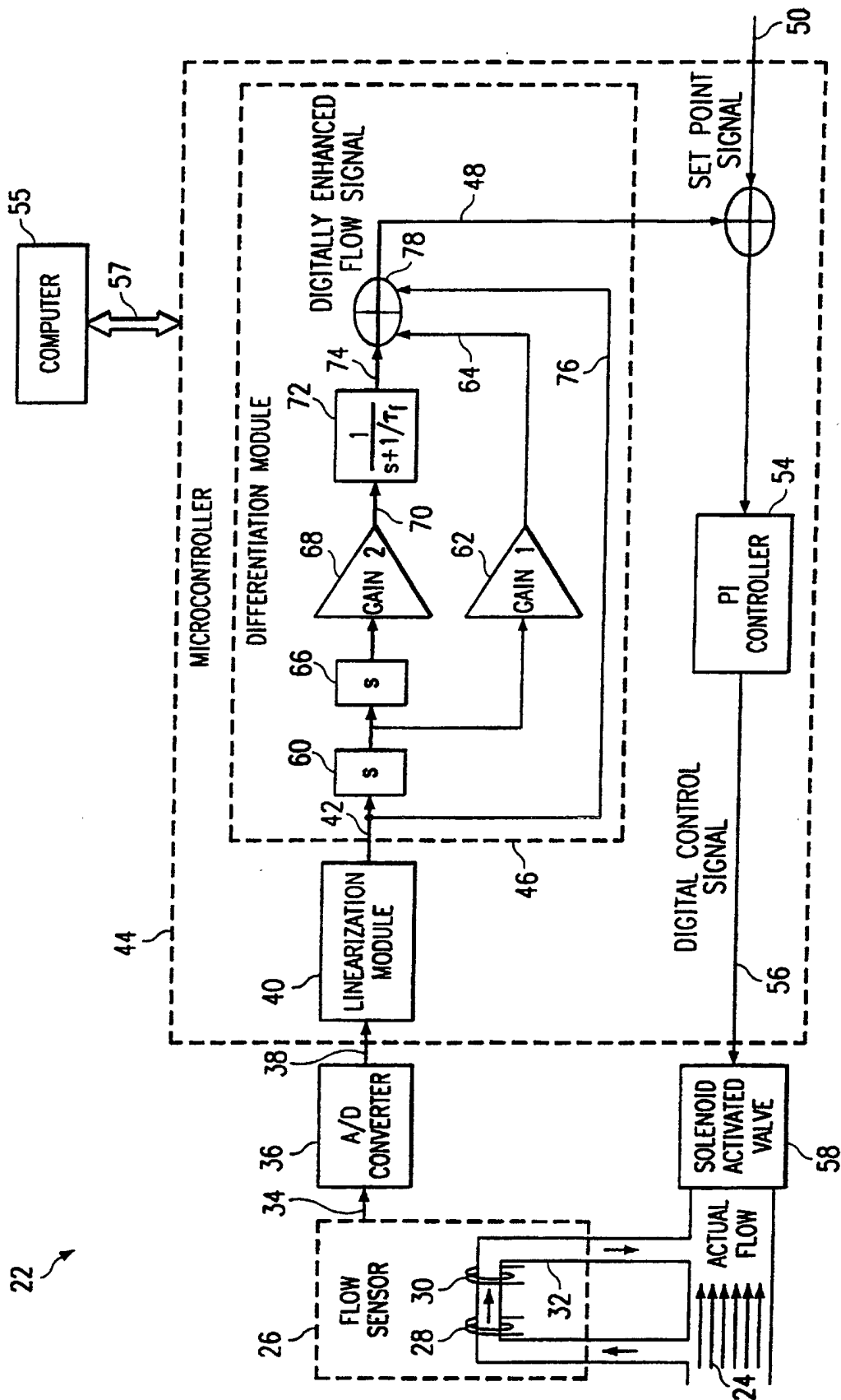


FIG. 3

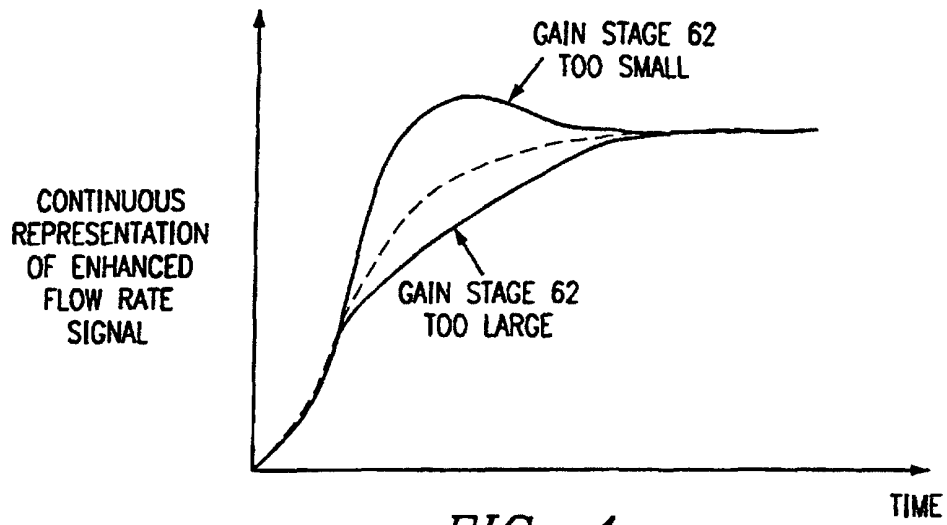


FIG. 4

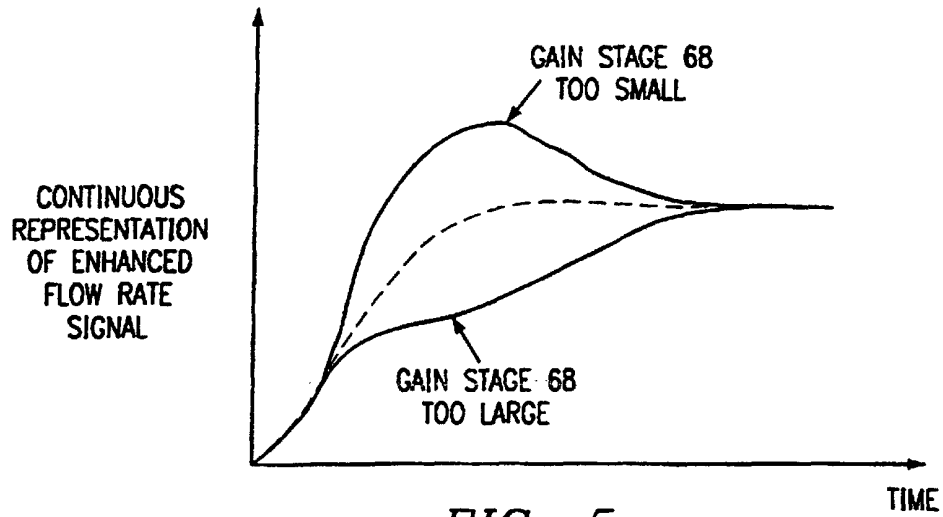


FIG. 5

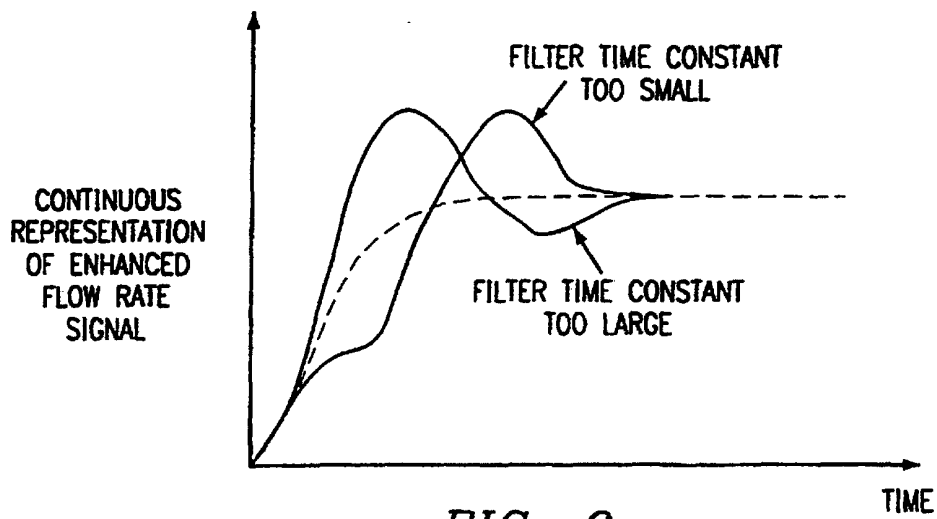


FIG. 6