



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**(21)(22) Заявка: **2010121150/08, 19.09.2008**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**19.09.2008**

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:  
**26.10.2007 EP 07021041.4**(43) Дата публикации заявки: **10.12.2011** Бюл. № 34(45) Опубликовано: **27.04.2013** Бюл. № 12(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: **RU 2005141148 A, 27.05.2006. US 7027953  
B2, 11.04.2006. US 2002/0013664 A1, 31.01.2002.  
RU 2005112459 A, 10.09.2005.**(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на  
национальной фазе: **26.05.2010**(86) Заявка РСТ:  
**EP 2008/062538 (19.09.2008)**(87) Публикация заявки РСТ:  
**WO 2009/053183 (30.04.2009)**

Адрес для переписки:

**129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр.3,  
ООО "Юридическая фирма Городисский и  
Партнеры"**

(72) Автор(ы):

**ПФАЙФЕР Уве (DE),  
ШТЕРЦИНГ Фолькмар (DE)**

(73) Патентообладатель(и):

**СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ (DE)****(54) СПОСОБ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ**

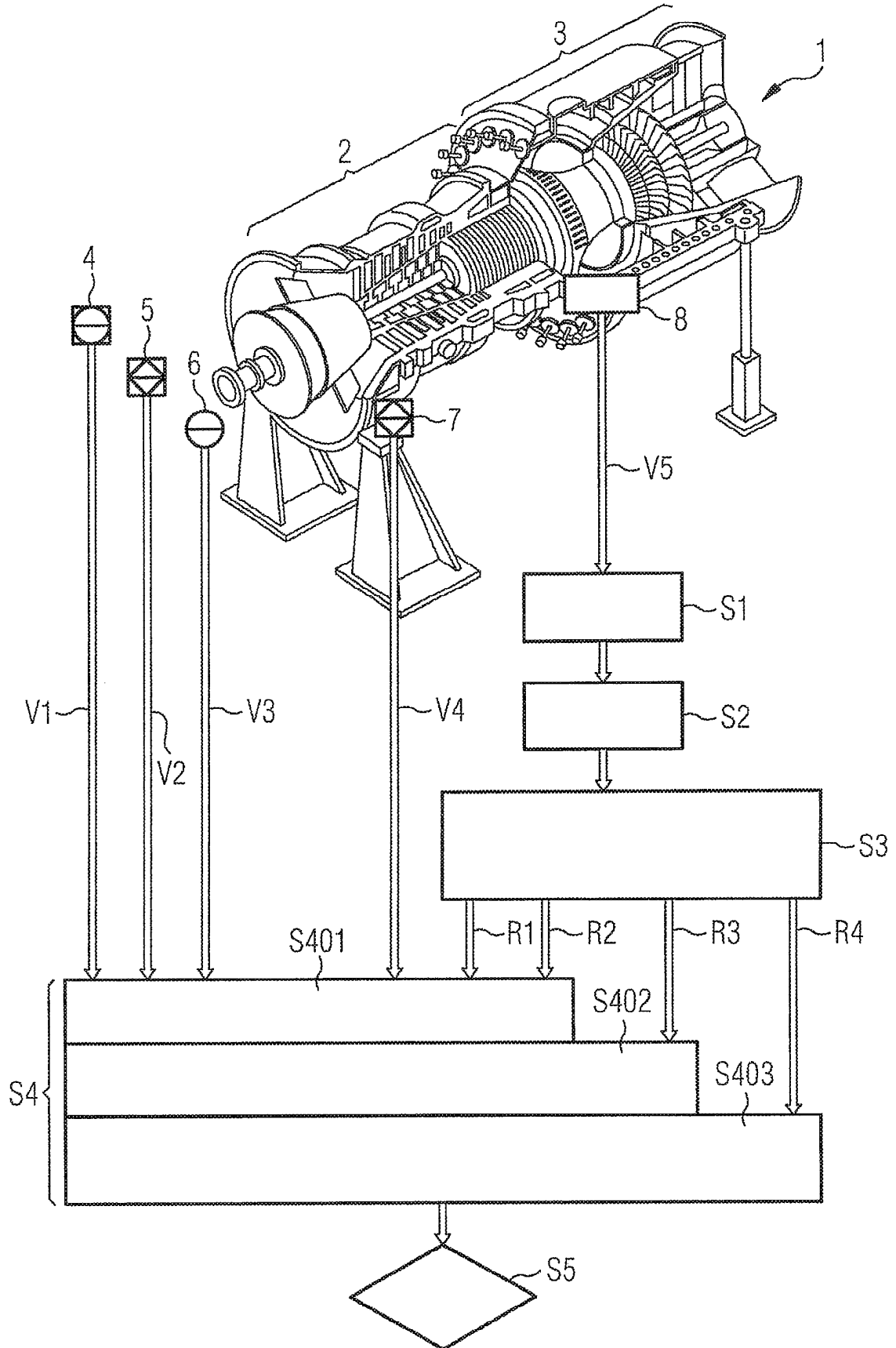
(57) Реферат:

Изобретение относится к способу анализа функционирования газовой турбины, а также к способу контроля функционирования газовой турбины. Технический результат - увеличение точности диагностики износа и повреждений турбины. Изобретение описывает способ, при котором, по меньшей мере, один динамический сигнал давления измеряется посредством, по меньшей мере, одного датчика давления в или на компрессоре турбины, а также измеряется один или более рабочих параметров турбины с помощью одного или более других датчиков при нормальном режиме работы турбины,

и/или динамический сигнал давления, а также один или более других рабочих параметров, которые измерены в нормальном режиме работы турбины, считываются, причем динамический сигнал давления подвергается частотному анализу, посредством чего определяются один или более параметров частотного спектра сигнала давления. Базируясь на одном или более измеренных рабочих параметрах и одном или более параметрах частотного спектра сигнала давления, обучаются одна или более нейронных сетей, которые в качестве входных величин имеют один или более измеренных

рабочих параметров и один или более параметров частотного спектра сигнала давления, а в качестве выходной величины имеют, по меньшей мере, один показатель

диагностики, который представляет меру вероятности для наличия нормального режима работы турбины в зависимости от входных величин. 5 н. и 23 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 1

RU 2480806 C2

RU 2480806 C2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2010121150/08, 19.09.2008**

(24) Effective date for property rights:  
**19.09.2008**

Priority:

(30) Convention priority:  
**26.10.2007 EP 07021041.4**

(43) Application published: **10.12.2011 Bull. 34**

(45) Date of publication: **27.04.2013 Bull. 12**

(85) Commencement of national phase: **26.05.2010**

(86) PCT application:  
**EP 2008/062538 (19.09.2008)**

(87) PCT publication:  
**WO 2009/053183 (30.04.2009)**

Mail address:

**129090, Moskva, ul. B. Spasskaja, 25, str.3, OOO  
"Juridicheskaja firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**PFAJFER Uve (DE),  
ShTERTsING Fol'kmar (DE)**

(73) Proprietor(s):

**SIMENS AKT'sIENGEZELL'ShAFT (DE)**

(54) **GAS TURBINE OPERATION ANALYSIS METHOD**

(57) Abstract:

FIELD: machine building.

SUBSTANCE: at least one dynamic pressure signal is measured by means of at least one pressure sensor in or on the turbine compressor, as well as one or more operating parameters of the turbine are measured by means of one or more other sensors under normal operating conditions of the turbine, and/or dynamic pressure signal, as well as one or more other operating parameters, which have been measured under normal operating conditions of the turbine, are read out; at that, dynamic pressure signal is subject to frequency analysis, by means of which one or more parameters of frequency spectrum

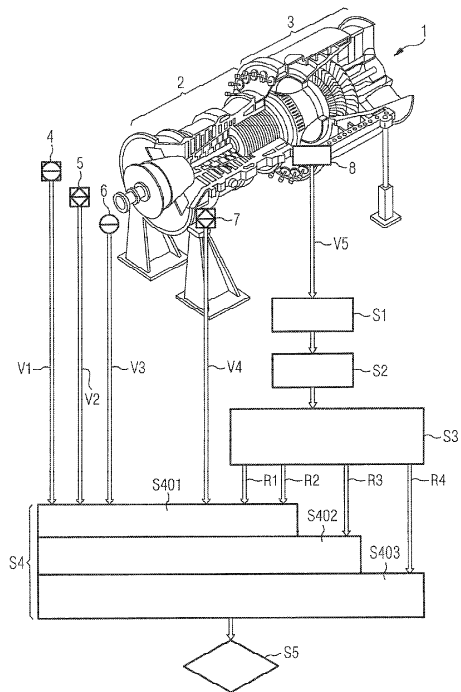
of pressure signal are determined. Based on one or more measured operating parameters and one or more parameters of frequency spectrum of pressure signal, one or more neutron networks are trained, which have one or more measured operating parameters and one or more parameters of frequency spectrum of pressure signal as input values, and have at least one diagnostics parameter as the output value, which represents the measure of probability for availability of normal operating conditions of the turbine depending on input values.

EFFECT: improving diagnostics accuracy of wear and damages to the turbine.

28 cl, 3 dwg

RU 2 480 806 C2

RU 2 480 806 C2



Фиг. 1

Изобретение относится к способу анализа функционирования газовой турбины, а также к способу контроля функционирования газовой турбины.

5  
Современные газовые турбины для применений генерации энергии и промышленных применений, а также для авиационных двигателей включают в себя чаще всего многоступенчатые осевые компрессоры, которые в процессе функционирования подвергаются действию разнообразных механизмов износа, загрязнения и других механизмов повреждения, которые отрицательно влияют на функционирование компрессора. Своевременное распознавание таких состояний  
10 машины, отклоняющихся от нормальных состояний, образует существенную предпосылку для введения мероприятий профилактического ремонта, чтобы избежать как критических рабочих состояний, так и недопустимого износа.

При диагностике и контроле современных газовых турбин особенно важны однозначная классификация и количественная оценка износа и повреждений. В  
15 частности, желательно, чтобы в газовых турбинах с многоступенчатыми осевыми компрессорами можно было точно указать, в какой компрессорной ступени возникает признак износа или повреждения и насколько сильным является или как далеко пошло повреждение по отношению к установленному предельному значению. Кроме того,  
20 такие способы диагностики и контроля должны проводиться в ходе нормальной эксплуатации и не требовать остановки турбины.

Из уровня техники известны различные способы диагностики и контроля для турбин. Например, в DE 4012278 A1 описана система диагностики состояния для  
25 установки паровой турбины с нейронной сетевой моделью. С помощью модели система может заранее изучить многие информационные образцы касательно зависимых от рабочего состояния колебаний, чтобы при их возникновении выработать выходной сигнал, указывающий рабочее состояние. Для этого применяются и обрабатываются различные формы волн механических или  
30 акустических колебаний, вибрации или электромагнитные колебания.

Также из US 2002/0013664 A1 известно введение классификации для контроля вращающихся компонентов на основе состояний машины. При этом в качестве  
возможных входных параметров могут привлекаться пульсации давления воздуха компрессора. Другой способ известен из US 7027953 B2.

35 Эти способы, как, например, способ согласно US 7027953 B2, при которых для каждой наблюдаемой ступени компрессора используются датчики давления, требуют очень большого инструментального оснащения в форме большого количества датчиков, и они могут обнаруживать только серьезные повреждения, как, например,  
40 потерю лопатки. Кроме того, такие способы в газовых турбинах с многоступенчатыми компрессорами могут неточно соотносить повреждения с компрессорной ступенью.

Задачей изобретения является создание способа анализа и контроля функционирования газовой турбины, который с помощью небольшого числа  
45 датчиков дает возможность точной диагностики износа и повреждений турбины.

Эта задача решается согласно независимым пунктам формулы изобретения. Дальнейшие развития изобретения определены в зависимых пунктах.

Согласно способу, соответствующему изобретению, базируясь на нормальном  
50 режиме работы газовой турбины, обучаются одна или более нейронных сетей. При этом сначала измеряется динамический сигнал давления посредством, по меньшей мере, одного датчика давления в, или на, или за компрессором турбины, причем динамический сигнал давления означает, что определяется изменение во времени

сигнала давления. Предпочтительные частоты выборки для определения сигнала давления лежат в диапазоне кГц. Изменения давления в компрессоре возникают при этом при прохождении рабочих лопаток мимо направляющих лопаток, что приводит к соответствующим колебаниям давления в сжатом воздухе. Наряду с этим динамическим сигналом давления также измеряется один или более рабочих параметров газовой турбины с помощью других датчиков. Способ, соответствующий изобретению, может, таким образом, выполняться во время функционирования турбины. При необходимости, динамический сигнал давления, а также другие рабочие параметры могут быть определены заранее и затем для применения в способе, соответствующем изобретению, считываются, например, из массива данных.

Динамический сигнал давления согласно изобретению подвергается частотному анализу, посредством чего определяются один или более параметров частотного спектра сигнала давления. При этом становится известно, что для каждой ступени компрессора за счет взаимодействия направляющих лопаток и рабочих лопаток в компрессоре вырабатываются периодические колебания давления, которые приводят к периодическому сигналу, который может быть применен для того, чтобы специфицировать нормальный режим работы или отклоняющееся от него рабочее состояние.

Наконец, базируясь на измеренном(ых) рабочем(их) параметре(ах) и параметре(ах) частотного спектра сигнала давления, обучаются одна или более нейронных сетей, которые в качестве входных величин включают измеренный(е) рабочий(е) параметр(ы) и параметр(ы) частотного спектра сигнала давления, а в качестве выходной величины имеют, по меньшей мере, один показатель диагностики, который представляет меру вероятности для наличия нормального режима работы газовой турбины в зависимости от входных величин.

Способ, соответствующий изобретению, характеризуется тем, что посредством анализа динамического сигнала давления в комбинации с нейронными сетями с незначительным числом датчиков может быть описан нормальный режим работы компрессора газовой турбины. При этом способ универсально применим к любым газовым турбинам и должен только сначала обучаться посредством измерения рабочих параметров и динамического сигнала давления рассматриваемой газовой турбины. В последующем режиме контроля можно затем с помощью нейронных сетей простым способом устанавливать отличие от изученного нормального режима или отклонение от него тем, что определенные при контроле рабочие параметры, включая динамический сигнал давления, подаются в качестве входных величин в нейронные сети.

Способ, соответствующий изобретению, используется для многоступенчатого компрессора газовой турбины с некоторым числом компрессорных ступеней, причем в этом случае посредством частотного анализа в качестве параметра частотного спектра для каждой компрессорной ступени определяется характеристическая частотная полоса, и для каждой характеристической частотной полосы вычисляется содержащаяся в ней доля энергии сигнала давления, в частности, как среднеквадратичное (RMS) значение. Эта доля энергии затем применяется как входная величина для одной или более нейронных сетей. RMS-значение хорошо известно из уровня техники и получается путем интегрирования амплитуд, соотнесенных с отдельными частотами, по частотам в частотной полосе. Способ, соответствующий изобретению, очень хорошо подходит для многоступенчатого компрессора, так как характеристики отдельных ступеней компрессора очень хорошо описываются

посредством соответствующей частотной полосы, которая определяется посредством частотного анализа из динамического сигнала давления. Таким способом создается возможность обнаруживать работу со сбоями конкретно для отдельных компрессорных ступеней. В качестве альтернативы или дополнительно к RMS-значению, в качестве входных величин могут также применяться амплитудное максимальное значение частотной составляющей или амплитудные максимальные значения нескольких смежных частотных составляющих характеристической частотной полосы.

Предпочтительным образом в способе, соответствующем изобретению, применяются так называемые сети радиальных базисных функций (также называемые RBF-сетями), которые известны из уровня техники. Также могут применяться дальнейшие развития таких сетей. Эти сети включают в себя множество радиальных базисных функций, например гауссовских функций, в скрытом слое, причем параметры этих гауссовских функций обучаются. В описываемом здесь изобретении в качестве целевого параметра радиальных базисных функций осуществляется обучение в отношении вероятности того, что в нормальном режиме работы возникнет комбинация измеренных рабочих параметров и динамического сигнала давления. В документе WO 99/48020 A2 описано применение сетей радиальных базисных функций в связи с контролем усилия прокатки в сталепрокатной установке. Описанные там принципы могут аналогичным образом быть перенесены на соответствующий изобретению анализ компрессора газовой турбины.

В другой предпочтительной форме выполнения способа, соответствующего изобретению, по меньшей мере, один показатель диагностики представляет собой доверительное значение, которое нормировано в диапазоне значений от 0 до 1 и представляет вероятность того, что соответствующая комбинация параметров входных величин является известной комбинацией параметров нормального режима работы газовой турбины. Таким способом создается простое представление показателя диагностики, причем доверительное значение вблизи 1, в частности, показывает, что имеет место нормальный режим работы газовой турбины, а доверительное значение менее 0,5 показывает, что возникла необычная комбинация параметров, которая позволяет предположить, что в функционировании компрессора имеет место сбой.

В другом выполнении способа, соответствующего изобретению, в качестве другого параметра частотного спектра для обучения нейронной сети может учитываться отношение доли энергии характеристической частотной полосы к долям энергии высших гармоник характеристической частотной полосы.

При применении способа, соответствующего изобретению, в многоступенчатых компрессорах предпочтительно для каждой компрессорной ступени обучается нейронная сеть, причем соответствующей нейронной сети в качестве входных величин поставлены в соответствие параметры частотного спектра, относящиеся к характеристической частотной полосе. Это соответствие получается, таким образом, за счет характеристической частоты соответствующей компрессорной ступени, которая определяется из числа лопаток компрессорной ступени и действительного числа оборотов газовой турбины. При этом каждая нейронная сеть имеет показатель диагностики в качестве выходной величины, причем этот показатель диагностики представляет меру вероятности наличия нормального режима работы соответствующей компрессорной ступени в зависимости от входных величин. Таким способом при применении нейронной сети для контроля газовой турбины можно

определить, в какой компрессорной ступени имеет место сбой функционирования. В другой форме выполнения отдельные показатели диагностики компрессорных ступеней могут быть сведены к общему показателю диагностики, причем такое объединение осуществляется на основе определенных правил, например, на основе правил нечеткой логики или на основе дискретных правил.

В предпочтительной форме выполнения способа, соответствующего изобретению, для частотного анализа динамического сигнала давления применяется быстрое преобразование Фурье, требующее малого времени вычислений, которое преобразует сигнал из временной области в частотную область.

В качестве рабочих параметров, которые наряду с динамическим сигналом давления определяются в соответствии с изобретением, могут приниматься во внимание один или более из следующих параметров:

- число оборотов газовой турбины,
- нагрузка газовой турбины,
- давление окружающей среды,
- температура окружающей среды,
- влажность воздуха,
- положение направляющих лопаток на компрессоре газовой турбины.

Подходящий нормальный режим работы, при котором определяются соответствующие рабочие параметры и динамический сигнал давления, предпочтительно создается таким образом, что во время этого режима работы газовая турбина эксплуатируется с постоянным числом оборотов для различных нагрузок и/или положений направляющих лопаток.

Вышеописанный способ, в котором нейронные сети обучаются на базе нормального режима работы газовой турбины, может быть реализован, в частности, как компьютерный программный продукт. Этот компьютерный программный продукт содержит программный код, сохраненный на машиночитаемом носителе, для выполнения способа, когда программа исполняется на компьютере.

Как изложено выше, обученные согласно изобретению нейронные сети затем применяются для контроля газовой турбины для установления рабочих состояний, отклоняющихся от нормального режима работы. Поэтому изобретение также включает в себя способ контроля газовой турбины, базируясь на одной или более нейронных сетях, обученных согласно вышеописанному способу. При этом способе контроля измеряются, по существу, те же величины, что и в соответствующем способе обучения. Вместо обучения нейронных сетей измеренные величины подаются теперь в обученные сети в качестве входных величин, и в качестве результата получают соответствующий показатель диагностики, который воспроизводит, с какой вероятностью имеет место нормальный режим работы.

В частности, в способе контроля во время работы газовой турбины осуществляются следующие этапы:

- по меньшей мере, один динамический сигнал давления измеряется, по меньшей мере, одним датчиком давления в или на компрессоре газовой турбины, и, кроме того, один или несколько рабочих параметров газовой турбины измеряются посредством других датчиков;
- динамический сигнал давления подвергается частотному анализу, благодаря чему определяется один или более параметров частотного спектра динамического сигнала давления;
- один или более измеренных рабочих параметров и один или более параметров

частотного спектра динамического сигнала давления подаются в качестве входных величин в одну или более обученных нейронных сетей, а в качестве выходной величины одной или более нейронных сетей выдается, по меньшей мере, один показатель диагностики.

5 При необходимости, в способе контроля может выдаваться предупреждение, если один или более показателей диагностики находятся вне предварительно  
определенного диапазона значений, то есть если посредством показателя диагностики  
указывается, что с высокой вероятностью имеет место состояние, отклоняющееся от  
10 нормального режима работы газовой турбины.

Наряду с вышеописанным способом контроля изобретение также относится к устройству для контроля газовой турбины, которое выполнено таким образом, что может выполняться вышеописанный способ контроля.

В частности, такое устройство содержит следующие компоненты:

- 15 - по меньшей мере, один датчик давления для измерения, по меньшей мере, одного динамического сигнала давления в или на компрессоре газовой турбины, а также один или несколько других датчиков для измерения одного или более рабочих параметров газовой турбины при функционировании газовой турбины;
- 20 - устройство частотного анализа, посредством которого динамический сигнал давления может подвергаться частотному анализу, благодаря чему определяется один или более параметров частотного спектра динамического сигнала давления;
- одна или более обученных нейронных сетей, на которые могут подаваться один  
или более измеренных рабочих параметров и один или более параметров частотного  
25 спектра динамического сигнала давления в качестве входных величин и которые в качестве выходных величин могут выдавать, по меньшей мере, один показатель  
диагностики.

Предпочтительным образом это устройство контроля также содержит средство, с  
30 помощью которого вышеописанное обучение нейронных сетей может проводиться в нормальном режиме работы.

Изобретение также относится к газовой турбине, которая содержит соответствующее изобретению устройство для контроля газовой турбины.

35 Примеры выполнения изобретения далее описаны на основе приложенных чертежей, на которых показано следующее:

Фиг.1 - схематичное представление способа контроля функционирования газовой турбины согласно форме выполнения изобретения;

40 Фиг.2 - диаграмма, которая представляет параметры частотного спектра динамического сигнала давления, определенные согласно форме выполнения изобретения; и

45 Фиг.3 - представление, которое изображает изменение во времени определенных в варианте выполнения изобретения среднеквадратичных значений сигнала давления газовой турбины в зависимости от изменяющейся нагрузки и положения направляющих лопаток.

Фиг.1 показывает блок-схему, отображающую основные этапы способа формы выполнения соответствующего изобретению способа контроля функционирования газовой турбины. В форме выполнения по фиг.1 контролируется газовая турбина, конструкция которой сама по себе известна и поэтому описывается лишь кратко.  
50 Газовая турбина содержит многоступенчатый осевой компрессор 2 с несколькими рабочими дисками и рядами направляющих лопаток, причем в компрессоре выполнено множество компрессорных ступеней с направляющими лопатками и

рабочими лопатками. Посредством направляющей лопатки устанавливается угол потока воздуха в компрессоре на рабочую лопатку, и рабочая лопатка сжимает и накачивает воздух дальше. К многоступенчатому осевому компрессору 2 в турбине примыкает камера сгорания, в которой сжигается соответствующее топливо с помощью подводимого через компрессор воздуха, посредством чего турбина приводится в действие.

В показанной на фиг.1 турбине предусмотрено множество датчиков, которые определяют соответствующие рабочие параметры турбины. Датчик 4 является датчиком температуры, который измеряет окружающую температуру и выдает соответствующий измеренный сигнал V1. Датчик 5 является датчиком давления, который измеряет давление воздуха в окружающей среде и выдает соответствующий измеренный сигнал V2. Ссылочной позицией 6 обозначен датчик влажности, который измеряет влажность воздуха и выдает соответствующий измеренный сигнал V3. Кроме того, предусмотрен датчик 7, который на входе компрессора измеряет положение имеющихся там регулируемых направляющих лопаток, причем положение направляющих лопаток в газовой турбине может изменяться с помощью соответствующего регулирующего устройства. Измеренное значение положения направляющих лопаток на фиг.1 обозначено как V4.

Наконец на выходе компрессора предусмотрен датчик 8 давления, который динамически измеряет давление на выходе компрессора в форме измеренного сигнала V5. При этом «динамически» означает, что определяется изменение во времени звукового давления с соответствующей частотой выборки, так что определяется временной режим давления. Измерение, в особенности, является динамическим в том случае, если частота выборки лежит в диапазоне кГц и выше. Измеренный сигнал давления возникает при этом за счет того, что в отдельных компрессорных ступенях при работе рабочая лопатка компрессора проходит мимо направляющей лопатки и тем самым генерируются периодические волны давления в сжатом воздухе, причем период волны давления зависит от числа направляющих и рабочих лопаток соответствующей компрессорной ступени. Определенный динамический сигнал давления содержит, таким образом, ввиду множества компрессорных ступеней, множество периодических составляющих.

Вместо применения единственного датчика 8 давления может также использоваться несколько датчиков давления, в частности, для измерений могут привлекаться уже имеющиеся датчики давления, которые во многих турбинах используются в зоне горения для контроля стабильности горения. Иначе может применяться установка датчика давления в выходном диффузоре или в зоне воздухозаборника компрессора газовой турбины. В соответствии с изобретением сигнал V5 сначала на этапе S1 подвергается аналого-цифровому (A/D) преобразованию, и с оцифрованным сигналом затем на этапе S2 выполняется быстрое преобразование Фурье (FFT) для определения частотного спектра сигнала. Выполняемое на этапе S2 FFT-преобразование при этом настолько точно настраивается на частоты, получающиеся из числа оборотов газовой турбины и числа направляющих и рабочих лопаток, что отдельные частоты четко по отдельности могут быть соотнесены с компрессорными ступенями. В качестве результата FFT-преобразования получают характеристические частотные полосы с соответствующими амплитудами отдельных частот.

Подобный частотный спектр показан для примера на диаграмме на фиг.2. Эта диаграмма обозначается как диаграмма Кэмпбелла (Campbell). По оси абсцисс показаны частоты  $f$  в сигнале давления, а по оси ординат - время  $t$ . Амплитуда

отдельных частот на фиг.2 имеет цветовой код, причем ввиду черно-белого представления это цветовое кодирование не видно. Обычно красный цвет используется для индикации высоких амплитуд. Для примера на фиг.2 отмечен диапазон В, в котором имеются высокие амплитуды. В представлении на фиг.2 по времени  $t$  имело место изменение определенных рабочих параметров турбины. В частности, изменялась нагрузка и положение направляющих лопаток компрессора. Отсюда получаются изменяющиеся амплитуды, причем, однако, характеристические частотные полосы по времени остаются прежними. Особенно явно видны на фиг.2 частотные полосы F1, F2, F3 и F4. Каждая из частотных полос с F1 по F4 представляет при этом компрессорную ступень осевого компрессора 2 газовой турбины 1, то есть с каждой компрессорной ступенью при функционировании с определенным числом оборотов соотносится частотная полоса с характеристической частотой.

Согласно этапу S3 по фиг.1 затем осуществляется оценка показанных на фиг.2 частотных полос, причем, при необходимости, осуществляется коррекция с помощью соответствующей модели. На этапе S3 для каждой частотной полосы посредством интегрирования по частотам полосы определяется доля энергии сигнала давления в соответствующей частотной полосе, причем эта доля энергии выдается как так называемое среднеквадратичное (RMS) значение. Это RMS-значение является параметром, хорошо известным специалисту. В качестве результата этапа S3 получают, таким образом, для каждой компрессорной ступени характеристическое RMS-значение, причем на фиг.1 для примера представлены четыре RMS-значения от R1 до R4 для четырех компрессорных ступеней.

Фиг.3 еще раз показывает на соответствующей диаграмме временное представление RMS-значений в турбине с 20 характеристическими частотными полосами, которые соотнесены с соответствующей одной компрессорной ступенью компрессора газовой турбины. Вдоль оси абсцисс здесь нанесено время в секундах, а вдоль оси ординат - соответствующие RMS-значения отдельных полос. Диаграмма также имеет цветовой код, причем каждая полоса представлена другим цветом, что, однако, ввиду черно-белого представления на фиг.3 не видно. При этом отдельные частотные полосы от полосы 1 до полосы 20 изображены на диаграмме на условных обозначениях справа. Наряду с RMS-значениями диаграмма на фиг.3 содержит также осуществляемое во время работы турбины изменение нагрузки и положения направляющих лопаток. Это показано посредством соответствующих линий с обозначением «нагрузка» для нагрузки и «IGV» для направляющих лопаток на условных обозначениях. Для заметности соответствующего графика линии временного изменения нагрузки обозначены посредством L1, а положения направляющих лопаток - посредством L2. Отдельные значения для нагрузки или положения направляющих лопаток при этом представлены как пропорциональные значения посредством ординаты на правом краю диаграммы.

Из фиг.3 можно видеть, что при изменении мощности, что достигается изменением массового потока компрессора, получаются очень четкие отклики в RMS-значениях даже при незначительном изменении массового потока. С другой стороны, также видно, что комплексные отклики системы могут быть получены в зависимости от рабочего состояния. С помощью RMS-значений в комбинации с другими рабочими параметрами, из которых на фиг.3 показаны нагрузка и положение направляющих лопаток, можно в соответствии с изобретением сделать вывод относительно отклоняющегося от нормального состояния газовой турбины или компрессора.

Для того чтобы из измеренных рабочих параметров, а также из RMS-значений соответствующим образом вывести показатель диагностики, в соответствии с изобретением используются нейронные сети. В описываемой здесь форме выполнения изобретения применяется нейронная модель, предпочтительно базирующаяся на

радиальных базисных функциях, которая известна также как RBF-сеть. Принципиальная структура таких сетей хорошо известна из уровня техники, и поэтому здесь детально не поясняется. Такие сети состоят из слоя ввода и вывода и изучают параметры из радиальных базисных функций, например гауссовых функций, на основе входных величин в слое ввода, чтобы отсюда аппроксимировать функциональное поведение и распределение входных величин. В описываемой здесь форме выполнения для каждой компрессорной ступени соответствующая RBF-сеть обучалась на рабочих параметрах, а также соответствующих RMS-значениях компрессорной ступени, причем обучение проводилось на основе измерений в нормальном режиме работы газовой турбины.

Отдельные RBF-сети вырабатывают в качестве выходной величины нормированное между 0 и 1 доверительное значение, которое для набора входных величин, то есть для имеющихся в определенный момент времени рабочих параметров и соответствующего RMS-значения, показывает насколько высока вероятность того, что в нормальном режиме работы возникнет такая комбинация из RMS-значения и рабочих параметров. Чем выше это доверительное значение, тем вероятнее имеет место фактически нормальный режим работы. Напротив, малые доверительные значения означают, что с высокой вероятностью имеет место работа со сбоями в соответствующем компрессоре газовой турбины.

Соответственно обученные нейронные сети функционируют как аппроксимативные инкапсуляторы данных, и на этапе S4 по фиг.1 получают в качестве входных величин отдельные рабочие параметры согласно измеренным сигналам V1-V4 и RMS-значения R1-R4. Этап S4 для примера разделен на три подэтапа S401, S402 и S403. На этапе S401 рабочие параметры и RMS-значения R1 и R2 подаются в соответствующие нейронные сети соответствующей компрессорной ступени. На этапе S402 RMS-значение R3 и на этапе S403 RMS-значение R4 подаются в нейронную сеть соответствующей компрессорной ступени. В качестве результата этапа S4 получают для каждой нейронной сети соответствующее доверительное значение в диапазоне значений от 0 до 1. При этом для доверительного значения между 0,5 и 1 мог бы быть сделан вывод, что имеет место нормальный режим работы, в то время как для доверительного значения менее 0,5 диагностируется, что имеет место режим работы со сбоями. Эти диагностические значения выдаются на этапе S5. При выборе рабочих параметров в качестве входных величин для нейронных сетей при этом не требуется, чтобы отдельные параметры находились в однозначной взаимосвязи. Напротив, каждое распределение комбинаций параметров может изучаться, если в распоряжении имеется достаточно рабочих данных для обучения нейронных моделей. Для высокой избирательности при распознавании необычных состояний является целесообразным все параметры, оказывающие заметное влияние на систему, использовать в качестве входных величин при обучении нейронной сети.

В итоге по вышеописанному способу для характеристических значений энергии частотных полос каждой компрессорной ступени один или несколько инкапсуляторов данных в форме RBF-сетей обучаются на широком спектре различных комбинаций параметров, причем обученные инкапсуляторы данных затем используются для контроля газовой турбины, чтобы обнаруживать режим работы со сбоями. В качестве

параметров при обучении или контроле газовой турбины принимаются во внимание, в частности, число оборотов, нагрузка, положение направляющих лопаток, давление воздуха, давление окружающей среды, влажность воздуха и т.п. Эти величины наряду с амплитудами энергий характеристических частот представляют собой важные входные величины инкапсуляторов данных. Дополнительно может использоваться отношение RMS-значений характеристических частот к их высшим гармоникам в более высокочастотных полосах. Кроме того, в одной форме выполнения соответствующего изобретению способа доверительные значения отдельных инкапсуляторов данных могут объединяться. Тем самым можно, например, определить общую достоверность наличия нормального режима работы. Это может, в частности, осуществляться на основе правил нечеткой логики или дискретных правил, которые выражают известные взаимосвязи для поведения и взаимодействия отдельных компрессорных ступеней. В результате можно с помощью описанной здесь формы выполнения соответствующего изобретению способа на основе измеренных значений небольшого числа датчиков давления диагностировать качество и состояние отдельных компрессорных ступеней осевого компрессора газовой турбины.

С помощью соответствующего изобретению способа обеспечивается ряд преимуществ. В частности, уже при незначительном количестве датчиков давления, например, уже с одним датчиком давления для всего компрессора может диагностироваться состояние компрессора, что снижает общие затраты на контроль функционирования газовой турбины. Кроме того, соответствующий изобретению способ может быть просто согласован с различными газовыми турбинами за счет того, что конкретно для данной газовой турбины сначала в режиме обучения нейронные сети обучаются, а затем на основе таких обученных сетей выполняется контроль газовой турбины. Кроме того, с помощью соответствующего изобретению способа возможен быстрый и высокочастотный контроль всего компрессора газовой турбины во время работы, причем обеспечивается возможность получения долговременной информации для срока службы газовой турбины. Кроме того, могут также распознаваться скрытые изменения по отношению к нормальному режиму работы газовой турбины посредством определения доверительных значений в течение длительного времени. Тем самым можно снизить затраты на техническое обслуживание, так как посредством соответствующей изобретению диагностики повреждения обнаруживаются своевременно, и тем самым могут проводиться соответствующие обнаруженным повреждениям мероприятия по ремонту вместо того, чтобы проводить ремонт с жестко установленными интервалами или чисто профилактически.

#### Формула изобретения

1. Способ анализа функционирования многоступенчатого компрессора (2) газовой турбины (1) с некоторым числом компрессорных ступеней, при котором одна или более нейронных сетей обучаются, базируясь на нормальном режиме работы газовой турбины (1), при этом измеряется, по меньшей мере, один динамический сигнал (V5) давления посредством, по меньшей мере, одного датчика (8) давления в или на компрессоре (2) газовой турбины (1), а также измеряется один или более рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) газовой турбины (1) с помощью одного или более других датчиков (4, 5, 6, 7) при нормальном режиме работы газовой турбины (1), и/или считываются динамический сигнал (V5) давления, а также один или более рабочих параметров (V1,

V2, V3, V4) газовой турбины (1), которые были измерены в нормальном режиме работы газовой турбины (1);

динамический сигнал (V5) давления подвергается частотному анализу, посредством чего определяются один или более параметров частотного спектра сигнала (V5) давления;

базируясь на одном или более измеренных рабочих параметрах (V1, V2, V3, V4) и одном или более параметрах частотного спектра сигнала (V5) давления, обучаются одна или более нейронных сетей, которые в качестве входных величин имеют один или более измеренных рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) и один или более параметров частотного спектра сигнала (V5) давления, а в качестве выходной величины имеют, по меньшей мере, один показатель диагностики, который представляет меру вероятности для наличия нормального режима работы газовой турбины (1) в зависимости от входных величин,

отличающийся тем, что в качестве параметра частотного спектра для каждой компрессорной ступени определяется характеристическая частотная полоса (F1, F2, F3, F4) на основе числа оборотов газовой турбины и числа направляющих лопаток и рабочих лопаток соответствующей компрессорной ступени, и для каждой характеристической частотной полосы вычисляется содержащаяся в ней доля энергии сигнала (V5) давления, в частности среднеквадратичное значение, и/или амплитудный максимум и/или несколько смежных амплитудных максимумов частотных составляющих внутри характеристической частотной полосы (F1, F2, F3, F4) для применения в качестве входных величин одной или более нейронных сетей.

2. Способ по п.1, в котором одна или более нейронных сетей представляют собой сети радиальных базисных функций.

3. Способ по п.1 или 2, в котором, по меньшей мере, один показатель диагностики представляет собой доверительное значение, которое нормировано в диапазоне значений от 0 до 1 и представляет вероятность того, что соответствующая комбинация параметров входных величин является известной комбинацией параметров нормального режима работы газовой турбины (1).

4. Способ по п.1 или 2, в котором в качестве другого параметра частотного спектра учитывается отношение доли энергии характеристической частотной полосы (F1, F2, F3, F4) к долям энергии высших гармоник характеристической частотной полосы (F1, F2, F3, F4) для применения в качестве входных величин одной или более нейронных сетей.

5. Способ по п.3, в котором в качестве другого параметра частотного спектра учитывается отношение доли энергии характеристической частотной полосы (F1, F2, F3, F4) к долям энергии высших гармоник характеристической частотной полосы (F1, F2, F3, F4) для применения в качестве входных величин одной или более нейронных сетей.

6. Способ по п.1 или 2, в котором для каждой компрессорной ступени обучается нейронная сеть, причем соответствующая нейронная сеть в качестве входных величин имеет параметры частотного спектра, относящиеся к характеристической частотной полосе (F1, F2, F3, F4), и причем каждая нейронная сеть имеет показатель диагностики в качестве выходной величины,

причем этот показатель диагностики представляет меру вероятности наличия нормального режима работы соответствующей компрессорной ступени в зависимости от входных величин.

7. Способ по п.3, в котором для каждой компрессорной ступени обучается

нейронная сеть, причем соответствующая нейронная сеть в качестве входных величин имеет параметры частотного спектра, относящиеся к характеристической частотной полосе (F1, F2, F3, F4), и причем каждая нейронная сеть имеет показатель диагностики в качестве выходной величины,

5       причем этот показатель диагностики представляет меру вероятности наличия нормального режима работы соответствующей компрессорной ступени в зависимости от входных величин.

8. Способ по п.5, в котором для каждой компрессорной ступени обучается  
10 нейронная сеть, причем соответствующая нейронная сеть в качестве входных величин имеет параметры частотного спектра, относящиеся к характеристической частотной полосе (F1, F2, F3, F4), и причем каждая нейронная сеть имеет показатель диагностики в качестве выходной величины,

15       причем этот показатель диагностики представляет меру вероятности наличия нормального режима работы соответствующей компрессорной ступени в зависимости от входных величин.

9. Способ по п.6, в котором на основе определенных правил, в особенности на основе правил нечеткой логики, определяется общий показатель диагностики из значений показателей диагностики соответствующих компрессорных ступеней.

10. Способ по п.7 или 8, в котором на основе определенных правил, в особенности на основе правил нечеткой логики, определяется общий показатель диагностики из значений показателей диагностики соответствующих компрессорных ступеней.

11. Способ по п.1 или 2, в котором для частотного анализа динамического  
25 сигнала (V5) давления применяется быстрое преобразование Фурье.

12. Способ по п.3, в котором для частотного анализа динамического сигнала (V5) давления применяется быстрое преобразование Фурье.

13. Способ по п.4, в котором для частотного анализа динамического сигнала (V5)  
30 давления применяется быстрое преобразование Фурье.

14. Способ по любому из пп.5, 7, 8 или 9, в котором для частотного анализа динамического сигнала (V5) давления применяется быстрое преобразование Фурье.

15. Способ по п.10, в котором для частотного анализа динамического сигнала (V5) давления применяется быстрое преобразование Фурье.

35 16. Способ по п.1 или 2, в котором в качестве рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) измеряются или считываются один или более из следующих параметров:

число оборотов газовой турбины (1),

нагрузка газовой турбины (1),

40       давление окружающей среды,

температура окружающей среды,

влажность воздуха,

положение направляющих лопаток на компрессоре (2) газовой турбины (1).

17. Способ по п.3, в котором в качестве рабочих параметров (V1, V2, V3, V4)  
45 измеряются или считываются один или более из следующих параметров:

число оборотов газовой турбины (1),

нагрузка газовой турбины (1),

давление окружающей среды,

50       температура окружающей среды,

влажность воздуха,

положение направляющих лопаток на компрессоре (2) газовой турбины (1).

18. Способ по любому из пп.5, 7, 8, 9, 12, 13 или 15, в котором в качестве рабочих

параметров (V1, V2, V3, V4) измеряются или считываются один или более из следующих параметров:

число оборотов газовой турбины (1),  
 нагрузка газовой турбины (1),  
 давление окружающей среды,  
 температура окружающей среды,  
 влажность воздуха,  
 положение направляющих лопаток на компрессоре (2) газовой турбины (1).

19. Способ по п.4, в котором в качестве рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) измеряются или считываются один или более из следующих параметров:

число оборотов газовой турбины (1),  
 нагрузка газовой турбины (1),  
 давление окружающей среды,  
 температура окружающей среды,  
 влажность воздуха,  
 положение направляющих лопаток на компрессоре (2) газовой турбины (1).

20. Способ по п.6, в котором в качестве рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) измеряются или считываются один или более из следующих параметров:

число оборотов газовой турбины (1),  
 нагрузка газовой турбины (1),  
 давление окружающей среды,  
 температура окружающей среды,  
 влажность воздуха,  
 положение направляющих лопаток на компрессоре (2) газовой турбины (1).

21. Способ по п.16, в котором измеренные рабочие параметры (V1, V2, V3, V4) и динамический сигнал (V5) давления соответствуют нормальному режиму работы, при котором газовая турбина (1) эксплуатируется с постоянным числом оборотов для различных нагрузок и/или положений направляющих лопаток.

22. Способ по любому из пп.17, 19 или 20, в котором измеренные рабочие параметры (V1, V2, V3, V4) и динамический сигнал (V5) давления соответствуют нормальному режиму работы, при котором газовая турбина (1) эксплуатируется с постоянным числом оборотов для различных нагрузок и/или положений направляющих лопаток.

23. Способ по п.18, в котором измеренные рабочие параметры (V1, V2, V3, V4) и динамический сигнал (V5) давления соответствуют нормальному режиму работы, при котором газовая турбина (1) эксплуатируется с постоянным числом оборотов для различных нагрузок и/или положений направляющих лопаток.

24. Машиночитаемый носитель, содержащий сохраненный на нем программный код для выполнения способа по любому из предыдущих пунктов, когда программный код исполняется на компьютере.

25. Способ контроля газовой турбины (1), базируясь на одной или более нейронных сетей, обученных согласно способу по любому из пп.1-23, в котором во время работы газовой турбины:

измеряется, по меньшей мере, один динамический сигнал (V5) давления, по меньшей мере, одним датчиком (8) давления в или на компрессоре (2) газовой турбины (1), а также измеряются один или несколько рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) газовой турбины (1) посредством других датчиков (4, 5, 6, 7) при нормальном режиме работы газовой турбины (1);

динамический сигнал (V5) давления подвергается частотному анализу, благодаря чему определяется один или более параметров частотного спектра сигнала (V5) давления;

5 один или более измеренных рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) и один или более параметров частотного спектра сигнала (V5) давления подаются в качестве входных величин в одну или более обученных нейронных сетей, а в качестве выходной величины одной или более нейронных сетей выдается, по меньшей мере, один показатель диагностики.

10 26. Способ по п.25, в котором выдается предупредительный сигнал, если один или более показателей диагностики находятся вне предварительно определенного диапазона значений.

15 27. Устройство для контроля газовой турбины (1), содержащее одну или более обученных нейронных сетей, осуществляющих способ по любому из пп.1-23, содержащее:

по меньшей мере, один датчик (8) давления для измерения, по меньшей мере, одного динамического сигнала (V5) давления в или на компрессоре (2) газовой турбины (1), а также один или несколько других датчиков для измерения одного или более рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) газовой турбины (1) при функционировании газовой турбины (1);

устройство частотного анализа, посредством которого динамический сигнал (V5) давления может подвергаться частотному анализу, благодаря чему определяется один или более параметров частотного спектра сигнала (V5) давления;

25 одну или более обученных нейронных сетей, которые были обучены, и на которые в качестве входных величин могут подаваться один или более измеренных рабочих параметров (V1, V2, V3, V4) и один или более параметров частотного спектра сигнала (V5) давления, и которые в качестве выходных величин могут выдавать, по меньшей мере, один показатель диагностики.

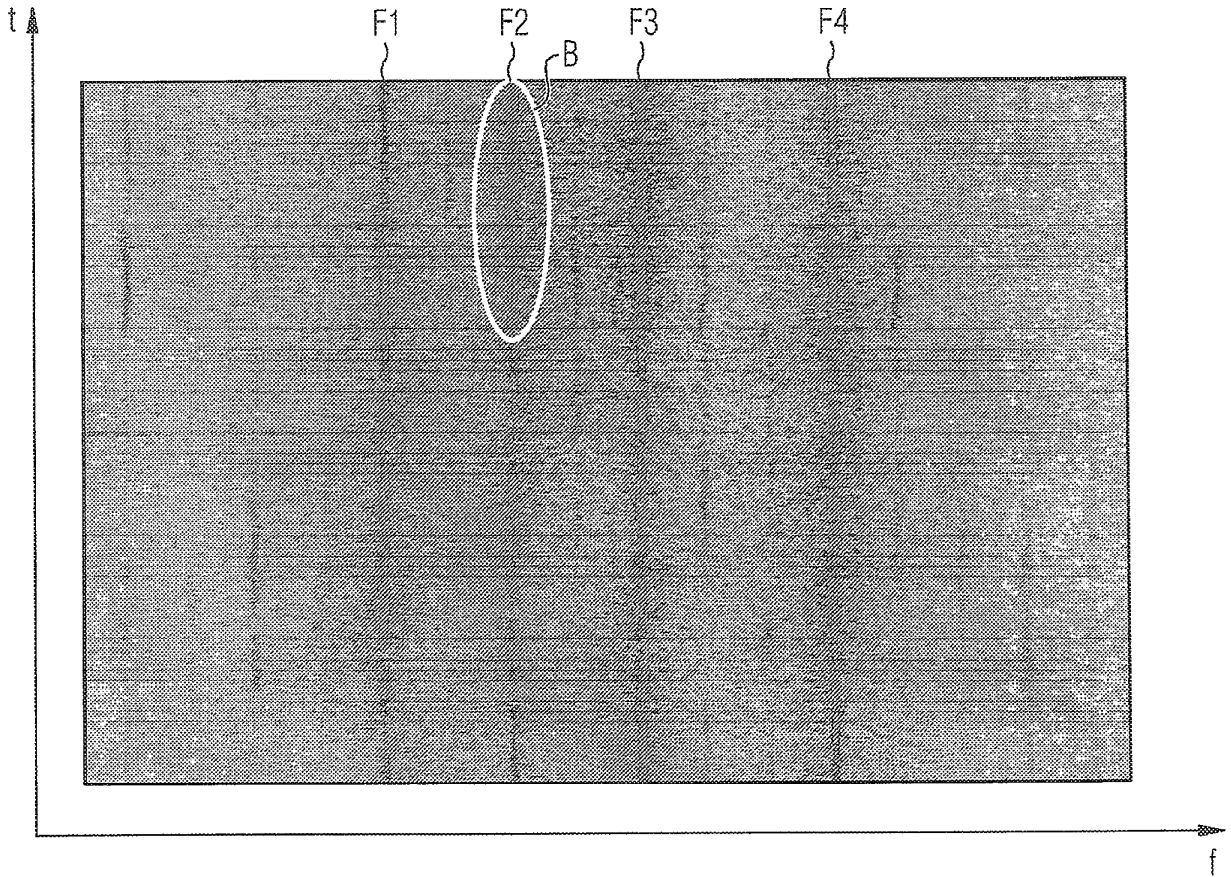
30 28. Газовая турбина, содержащая устройство по п.27.

35

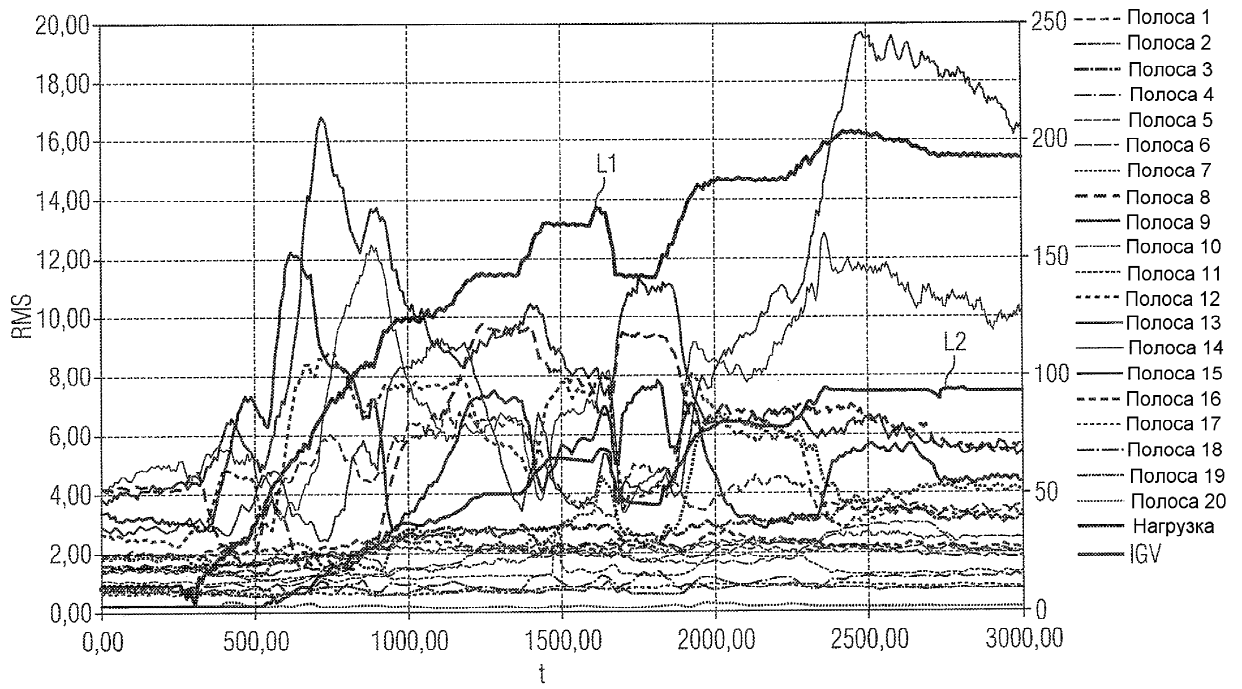
40

45

50



ФИГ.2



ФИГ.3