

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **038297**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2021.08.05**

(51) Int. Cl. **G01V 1/145 (2006.01)**

(21) Номер заявки  
**201592069**

(22) Дата подачи заявки  
**2015.01.21**

---

(54) **УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

---

(31) **61/929,656**

(56) US-A1-2011162906  
WO-A2-2009153595  
US-A1-2012243377  
US-A-4142171

(32) **2014.01.21**

(33) **US**

(43) **2016.06.30**

(86) **PCT/US2015/012278**

(87) **WO 2015/112622 2015.07.30**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**БИПИ КОРПОРЕЙШН НОРД  
АМЕРИКА, ИНК. (US)**

(72) Изобретатель:  
**Деллинджер Джозеф Энтони, Харпер  
Марк Френсис Люсьен (US)**

(74) Представитель:  
**Гизатуллина Е.М. (RU)**

---

(57) Способ управления траекторией морского резонансного источника сейсмических волн предусматривает регулирование частоты источника и управление траекторией движения. Регулирование частоты источника предусматривает расчет частоты источника на основании его внутреннего состояния и состояния его окружения, выведение погрешности частоты в качестве разности между расчетной частотой и частотой требуемой траектории, сведение погрешности частоты к нулю. Управление траекторией движения предусматривает определение траектории движения источника, выведение погрешности траектории движения в качестве разности между требуемой траекторией движения и определенной траекторией движения, а также сведение погрешности траектории движения к нулю.

**B1**

**038297**

**038297**

**B1**

Согласно настоящей заявке испрашивается приоритет согласно п.119(е) свода 35 законов США предварительной заявки на патент США № 61/929656, озаглавленной "Operational Control in a Seismic Source", которая была подана 21 января 2014 г. на имя заявителей Марка Фрэнсиса Люсьена Харпера (Mark Francis Lucien Harper) и Джозефа Энтони Деллиджера (Joseph Anthony Dellinger). Эта заявка включена в настоящий документ во всей полноте посредством ссылки.

#### **Область техники настоящего изобретения**

Настоящее изобретение относится к источникам сейсмических волн для морской сейсмической разведки и, в частности, к стратегии управления резонансным источником сейсмических волн с регулируемой частотой, в котором применяется механический генератор колебаний.

#### **Предпосылки к созданию настоящего изобретения**

Под сейсмической разведкой понимают комплекс мероприятий, направленных на изучение залегающих пластов на основании отражения от этих пластов звуковых волн. В естественных условиях создают звуковые волны, которые проходят через земные слои исследуемой геологической структуры. Ввиду своих особенностей пласты возвращают проходящие через них звуковые волны на поверхность, где эти обратные сигналы записывают. После этого записанные сигналы отраженных волн обрабатывают для получения информации об этих пластах.

Среди видов сейсмической разведки известна "морская" сейсмическая разведка. Термин "морская" означает только то, что разведку осуществляют в воде или на ее поверхности. Это не означает, что разведка должна выполняться только в среде с соленой водой. Морская сейсмическая разведка может выполняться как в соленой воде, например в океане, так и в солоноватых водах, например в бухтах, в устьях рек и приливных болотах. Также разведывательные работы могут проводиться в пресных водах, например в озерах, в маршах и на болотистой местности.

Существует множество источников сейсмических волн, которые, как правило, конструктивно выполняют под условия их эксплуатации. Для морской сейсмической разведки очень часто применяют так называемый источник с "качающейся частотой". Термин "с качающейся частотой" связан с принципом работы таких источников, которые во время передачи сейсмического сигнала "качаются" в пределах диапазона частот.

Одним из достижений морской сейсмической разведки является регистрация данных "гудящих" сигналов, т.е. данных, получаемых от сигнала, генерируемого "гудящим" источником ("зуммерным" источником). Для получения "гудящего" сигнала применяют неимпульсный источник с регулируемой частотой, который работает, по существу, на одной частоте. Ввиду практических ограничений стабильности вместо этого источник может смещаться в пределах узкого диапазона частот управляемым или неуправляемым образом, при этом оставаясь, как правило, в пределах плюс-минус одной десятой октавы номинальной частоты. Такой источник иногда называют "монохроматическим" или "почти монохроматическим", как, например, в заявке № 13/327524.

Регистрация "гудящих" сигналов может осуществляться несколькими способами. Например, ступенчатая регистрация "гудящих" сигналов предполагает последовательную регистрацию "гудящих" сигналов, в которой один источник за один раз пропускает группу из двух или более дискретных частот. Время, потраченное на перемещение между частотами, должно быть существенно меньшим по сравнению со временем, затрачиваемым для прохождения каждой частоты. В качестве другого примера можно указать регистрацию гармонических гудящих сигналов, которая представляет собой регистрацию гудящих сигналов, создаваемых одновременно одним или несколькими источниками на разных дискретных частотах. Более подробно такой способ описан в заявке № 13/327524.

Еще одним способом регистрации данных сейсмической разведки, открытым недавно, является "низкочастотная" регистрация. Обычно для выполнения сейсмической разведки используют частоты сейсмических сигналов в диапазоне 10-250 Гц, поскольку именно в этом диапазоне частоты характеризуются стабильностью при возникающих в ходе сейсмической разведки сложностях. Под термином "низкие частоты" понимаются частоты, ниже которых достижение традиционными источниками достаточного отношения сигнал-шум при уменьшении частоты быстро усложняется (т.е. ниже приблизительно 6-8 Гц).

Один пример низкочастотного источника, способного работать в режиме качающейся частоты, или создавать гул, или и то и другое, при этом выполняя все это на низкой частоте, описан в заявке на выдачу патента США № 12/995763, которая была подана 17 июня 2009 г. Этот источник состоит из регулируемого механического резонатора, который вместе с системой управления образует генератор колебаний с самовозбуждением. Система управления этого устройства определяет направление скорости излучающего поршня и прикладывает движущее усилие в том же направлении, что и определенная скорость, тем самым заставляя систему колебаться с собственной или близкой к ней частотой. Регулировка этой частоты происходит посредством изменения жесткости газовой пружины, так что система может колебаться с одной выбранной частотой (т.е. "создавать гудящий сигнал") или в непрерывном диапазоне частот с некоторой заданной интенсивностью (т.е. работать в режиме "качающейся частоты"). Более подробно такой способ описан в заявке № 12/995763.

Однако низкочастотные источники обладают одним недостатком, который заключается в том, что

использование такой частоты обуславливает возникновение проблем, которые, как правило, не характерны для сейсмических частот. Одним из способов решения этих недостатков является точное и прецизионное управление работой источника. Например, одним известным способом управления является управление стабильностью частоты, согласно которому управление работой источника осуществляется для упрощения стабилизации частоты, на которой проходят сейсмические сигналы.

Для поставленных целей можно использовать источники сейсмических волн, такие как описаны в указанных заявках. Однако уровень техники предусматривает возможность усовершенствований или создания альтернативных подходов, способов и конфигураций. Следовательно, в уровне техники существует необходимость в источнике сейсмических волн, описанном в настоящем документе.

#### **Краткое описание фигур**

Прилагаемые фигуры составляют часть настоящего описания, а также иллюстрируют варианты осуществления настоящего изобретения и вместе с описанием помогают изложить его основные идеи.

На фиг. 1 показан морской резонансный источник сейсмических волн, для которого могут быть применены способы настоящего изобретения.

На фиг. 2 показана одна характерная система управления, с помощью которой можно управлять работой морского источника сейсмических волн согласно фиг. 1 в соответствии с раскрытым способом управления траекторией.

На фиг. 3 схематически показан пример проведения морской сейсмической разведки с применением морского источника сейсмических волн согласно фиг. 1 и 2.

На фиг. 4 показан способ управления источником согласно фиг. 1 с помощью системы управления согласно фиг. 2 для стабилизации частоты источника во время регистрации сигналов.

На фиг. 5 показан пример операционной логики для части процесса стабилизации частоты.

На фиг. 6А и 6В показан способ управления траекторией согласно настоящему изобретению.

На фиг. 7 показана схема эквивалентного механического резонатора с одной степенью свободы, описывающая низкочастотный морской резонансный источник сейсмических волн.

На фиг. 8 показан график, описывающий усилие, необходимое для управления траекторией резонансного источника.

На фиг. 9 показан график зависимости смещения от усилия для простого генератора гармонических колебаний до и после стабилизации частоты.

На фиг. 10 показан принцип действия способа управления траекторией и способа стабилизации для простого генератора гармонических колебаний согласно фиг. 9.

#### **Подробное раскрытие вариантов осуществления**

Далее будет приведено подробное описание одного или нескольких (типичных) вариантов осуществления настоящего изобретения, один или несколько примеров которых показаны на прилагаемых фигурах. Где это целесообразно, одинаковые элементы на фигурах будут обозначены одинаковыми ссылочными позициями.

Раскрытый в настоящем документе способ управления траекторией представляет собой стратегию управления резонансным морским источником сейсмических волн с регулируемой частотой с механическим резонатором. Поскольку морской источник сейсмических волн является "резонансным", он будет стремиться колебаться с собственной резонансной частотой. Морской источник сейсмических волн содержит возбуждающий механизм, который создает энергию колебаний для преодоления, например, потерь на трение и излучение. Также он содержит исполнительный механизм, или исполнительные механизмы, который осуществляет регулирование резонансной частоты, далее - способ регулирования частоты. Однако амплитуда и частота выходного акустического сигнала морского источника сейсмических волн может ненамеренно меняться под влиянием изменений среды, например гидростатического давления, и изменений внутреннего состояния источника, например его внутренней температуры. Такое ненамеренное изменение может иметь крайне серьезные последствия для некоторых видов сейсмической разведки.

Соответственно способ управления траекторией согласно настоящему изобретению предусматривает управление траекторией с целью сохранения амплитуды и частоты выходного акустического сигнала морского источника сейсмических волн максимально близкими их целевым значениям. В данном контексте "управление траекторией" управляет движением механического генератора колебаний таким образом, чтобы он с течением времени не отклонялся от требуемой траектории. Под используемым в настоящем документе термином "траектория" следует понимать точное движение одной или нескольких движущихся частей генератора колебаний. Под "движением" может пониматься положение, или скорость, или ускорение частей, при котором определение и управление в ряде условий является наиболее удобным.

Эти условия могут меняться в зависимости от исполнения, поэтому могут быть ориентированы под это исполнение. Так, например, должна существовать возможность определения управляемого движения и его управления, несмотря на непредвиденные меняющиеся во времени возмущающие воздействия окружающей среды, которые могут отрицательно повлиять на амплитуду и частоту генератора колебаний. Или же должна существовать возможность определения и управления в тех случаях, когда амплитуда и

частота, которые описывают требуемую траекторию, могут изменяться во времени; или в тех случаях, когда доступные способы управления генератора колебаний представляют собой механизм изменения его частоты и отдельное возбуждающее усилие, прикладываемое непосредственно к одной или нескольким движущимся частям для возбуждения их движения; или в тех случаях, когда возбуждающее усилие мало по сравнению с чередующимися усилиями, которые обычно действуют в генераторе колебаний, причем возбуждающий генератор может только влиять на движение генератора колебаний, а не определяет его в целом. Остальные условия будут понятны специалистам в области техники настоящего изобретения после прочтения этого раскрытия.

Способ управления траекторией предусматривает применение двух контуров обратной связи. Первый контур обратной связи рассчитывает собственную частоту генератора колебаний, выводит в качестве разности между расчетной частотой и частотой требуемой траектории погрешность частоты и задействует механизм регулирования частоты для сведения сигнала погрешности к нулю способом, хорошо известным специалистам в области автоматического регулирования.

Второй контур обратной связи определяет траекторию движения генератора колебаний, выводит сигнал погрешности на основании разницы между требуемой и определенной траекториями и прикладывает управляющее усилие посредством возбуждающего генератора для сведения сигнала погрешности к нулю способом, хорошо известным специалистам в области автоматического регулирования.

Колебания морского источника сейсмических волн могут иметь линейный или нелинейный характер. Если колебания являются нелинейными, а требуемая траектория соответствует траектории линейного генератора колебаний, способ управления может привести к линеаризации колебаний. В соответствии с показанными вариантами осуществления примером резонатора, для поддержания колебаний которого необходимо минимум входной энергии, является высокочастотный резонатор (например, активное сопротивление в резонаторе, вызванное трением, вязкостью и т.д., значительно ниже сопротивления жесткости пружины на резонансной частоте).

Один подходящий морской источник сейсмических волн, который можно применить для осуществления раскрытого способа управления, описан и заявлен в документе США № 12/995763. Для предоставления большего понимания способа управления траекторией в соответствии с настоящим изобретением данное раскрытие будет описано далее со ссылкой на конкретный морской источник сейсмических волн. Полное раскрытие конструкции и принципа работы такого источника приведено в документе США № 12/995763, в настоящем документе будут приведены некоторые его отрывки; он несколько изменен в целях описания настоящего способа управления траекторией, а также управления стабилизацией частоты.

На фиг. 1 показан морской источник 100 сейсмических волн, который представляет собой резонансный, низкочастотный, высокочастотный источник. Именно такой источник можно применять как для качания частоты, так и для регистрации шумовых сигналов. Он содержит излучающий поршень 105 диаметром несколько метров с газовой пружиной 165 с переменной длиной хода, содержащей пространство 110а, 110b газовой пружины, каждое из которых заполнено постоянной массой газа. Регулирование резонансной частоты источника осуществляется на основании отношения массы подвижного узла 105, 125, 130, 120b (включая массу жидкости 115, как правило морской воды, увлекаемой при движении поршня 105) к суммарной жесткости газовой пружины 165 с переменной длиной хода и газа, содержащегося внутри корпуса 170. Давление газа в пружине удерживается на уровнях, при которых собственная частота поршня 105, нагруженного жидкостью 115, находится в сейсмическом диапазоне частот и может составлять 0,5 Гц.

Поршню 105 придается начальное смещение, и он начинает совершать колебания. Его колебания поддерживаются исполнительным механизмом 240 (показан на фиг. 2), состоящим из развернутой обмотки 120а линейного электродвигателя, магнитного стержня 120b и датчика 255 положения (также показан на фиг. 2). Приводной сигнал исполнительного механизма 240 выводят из скорости поршня 125 посредством датчика скорости или датчика смещения согласно способу управления в соответствии с настоящим изобретением. Морской источник 100 сейсмических волн начинает раскачивать собственную частоту, постепенно сжимая газ в пространствах 110а, 110b газовой пружины, таким образом увеличивая жесткость газовой пружины 165 с переменной длиной хода. Жесткость увеличивается не только ввиду увеличения давления, но и ввиду уменьшения длины пространств 110а, 110b газовой пружины. За счет такого двойного эффекта можно существенно повлиять на получаемую жесткость и, следовательно, добиться, что морской источник 100 сейсмических волн будет работать по меньшей мере в трех частотных октавах.

Более конкретно морской источник 100 сейсмических волн, показанный на фиг. 1, погружен в воду 115. Излучающий поршень 105, диаметр которого составляет несколько метров, прикреплен к штоку 125, свободно перемещающемуся вертикально. Кроме излучающего поршня 105 к штоку 125 также прикреплен вспомогательный поршень 130, который делит газ в цилиндре 133 газовой пружины на два объема 110а, 110b. Верхний конец пространства 110а закрыт третичным поршнем 132, который прикреплен к ярму 140.

В свою очередь, ярмо 140 прикреплено к линейному исполнительному механизму 145, который ха-

рактируется высоким механическим сопротивлением по сравнению с механическим сопротивлением газовой пружины с пространствами 110а, 110б. Исполнительный механизм 145 содержит датчик положения (не показан), который предоставляет системе управления возможность измерять положение исполнительного механизма 145 в любой момент времени и увеличивать его жесткость, используя активную обратную связь способом, хорошо известным в области промышленных систем управления. Регулирование положения третичного поршня 132 осуществляется исполнительным механизмом 145, а за счет увеличения жесткости посредством активной обратной связи на него не будут влиять изменения давление в объеме 110а газовой пружины, возникающие под действием колебаний излучающего поршня 105.

Привод исполнительного механизма 145 осуществляется посредством электродвигателя 150 через приводную ленту 155. На ярме 140 закреплена развернутая обмотка 120а линейного электродвигателя. Магнитный стержень 120б прикреплен к верхнему концу штока 125 и движется через обмотку 120а на плоских подшипниках скольжения (не показаны). Применение линейного электродвигателя обуславливается тем, что он характеризуется низким механическим сопротивлением и поэтому не ограничивает и не препятствует движению подвижного узла 105, 125, 130, 120б. Линейный электродвигатель содержит датчик положения (не показан), который предоставляет системе управления возможность измерять относительное положение стержня 120б и обмотки 120а исполнительного механизма в любой момент времени способом, хорошо известным в области промышленных систем управления.

На фиг. 2 показана одна характерная система 200 управления, с помощью которой можно управлять работой морского источника сейсмических волн согласно фиг. 1 в соответствии с раскрытым способом управления траекторией. Передача данных между задающим контроллером 205 и двумя одноосевыми сервоконтроллерами 211, 210 осуществляется по каналам 215, 220 последовательной передачи данных. Обмен данными с устройством 222 хранения осуществляется через канал 208 передачи данных способом, описанным ниже.

Сервоконтроллер 211 осуществляет управление исполнительным механизмом 225 с высоким сопротивлением, содержащим исполнительный механизм 145, электродвигатель 150 и приводную ленту 155, причем управление осуществляется по каналам 230 передачи сигналов электродвигателя. По кабелю 252 обратной связи информация о выдвигении исполнительного механизма 145 отправляется обратно от встроенного датчика 245 (например, датчика углового положения вала на электродвигателе 150) на сервоконтроллер 211. Аналогично сервоконтроллер 210 осуществляет управление исполнительным механизмом 240 с низким сопротивлением, частично состоящим из обмотки 120а и стержня 120б, по линиям 250 передачи сигналов электродвигателя.

Информация о положении излучающего поршня 105 отправляется на сервоконтроллер 210 от датчика 255 положения, прикрепленного к излучающему поршню 105, который может, например, быть линейно регулируемым дифференциальным трансформатором.

Задающий контроллер 205 загружает управляющие программы 260, 265 в сервоконтроллеры 211, 210. После активации загруженная на сервоконтроллер 211 программа 260 может отдавать исполнительному механизму 225 с высоким сопротивлением команды на выполнение требуемого выдвигения, которое может, например, состоять из начальной короткой стадии с сильным ускорением, стадии выдвигения с постоянной скоростью, последующей короткой стадии замедления, на которой исполнительный механизм 225 приходит в состояние покоя, задержки, которая может, например, составлять 10 с, и стадии возврата в исходное положение, на которой процесс выдвигения исполнительного механизма возвращается к начальному значению, и выполнение программы прекращается. Суммарное время между активацией и возвратом к начальному значению процесса расширения может быть постоянным и может быть обозначено буквой Т.

После активации загруженная на сервоконтроллер 210 программа 265 может отдавать исполнительному механизму 240 с низким сопротивлением команды на передачу начальной импульсной нагрузки на стержень 125 поршня и, следовательно, на отслеживание движения излучающего поршня 105 посредством датчика 255, а также отдавать исполнительному механизму 240 команды на приложение усилия с фиксированным значением в направлении движения, таким образом осуществляя двухпозиционное управление способом, хорошо известным в области систем управления. Затем значение усилия может быть уменьшено до нуля, и при достижении времени Т после активации выполнение программы 265 может быть прекращено.

В нормальных условиях работы задающий контроллер 205 может использовать загруженные на контроллеры 211, 210 программы 260, 265 для одновременного начала выполнения. В результате система должна выполнять качание частоты в соответствии с описанным в настоящем документе способом.

Раскрытый в настоящем документе способ управления также осуществляется задающим контроллером 205 согласно программе 270, находящейся в устройстве 222 хранения данных. Кроме отправки управляющих сигналов на исполнительный механизм 225 с высоким сопротивлением и исполнительный механизм 240 с низким сопротивлением, он также принимает от них сигнал обратной связи по каналам 215, 220. Задающий контроллер 205 срабатывает после получения сигнала обратной связи и в соответствии с программой в приложении 270 осуществляет управление траекторией поршня, как описано ниже.

Согласно изображенному на фиг. 1 варианту осуществления система 200 управления расположена

на источнике 100 сейсмических волн или в нем. Однако это не является необходимым для осуществления описанного в настоящем документе способа управления. Специалистам в области техники, к которой относится настоящее изобретение, после прочтения описания будет понятно, что некоторые части системы 200 управления могут быть расположены в любом другом месте. Например, согласно альтернативным вариантам осуществления она может быть расположена на буксирующем судне, а двухсторонняя передача сигналов может осуществляться по кабелю.

Специалистам в области техники, к которой относится настоящее изобретение, после прочтения описания также будет понятно, что описанный выше аспект способа управления траекторией согласно настоящему изобретению реализован с помощью компьютера. На фиг. 2 схематически показаны некоторые сегменты аппаратной и программной архитектуры системы 200 управления, соответствующие реализации способа управления, описанного в настоящем документе. Описанный способ управления траекторией предусматривает достаточную свободу реализации этих сегментов, причем система 200 управления может характеризоваться программным и аппаратным обеспечением, не описанным в настоящем документе.

Например, задающий контроллер 205 может представлять собой электронный процессор или группу электронных процессоров, известных в области техники. Специалистам в области техники, к которой относится настоящее изобретение, будет понятно, что, принимая во внимание известные зависящие от реализации условия, в различных вариантах осуществления будет предпочтительным применение определенных видов электронных процессоров. При проектировании обычно принимают в расчет такие факторы, как вычислительная мощность, быстродействие, стоимость и потребление мощности, которые в значительной мере зависят от конечных целей. Поскольку указанные факторы являются характерными для области техники, к которой относится настоящее изобретение, после прочтения этого описания станут понятны варианты их сочетания.

Следовательно, специалистам в области техники, к которой относится настоящее изобретение, после прочтения данного описания будет понятно, что задающий контроллер 205 теоретически может представлять собой электронный микроконтроллер, электронный контроллер, группу электронных процессоров или соответствующим образом запрограммированную специализированную интегральную микросхему (ASIC) или программируемую пользователем матрицу логических элементов (FPGA). В некоторых вариантах осуществления может использоваться даже определенная комбинация этих видов устройств обработки.

Устройство 222 хранения данных может содержать жесткий диск, и/или оперативное запоминающее устройство (RAM), и/или съемное устройство хранения данных. Устройство 222 хранения данных содержит код из ряда программных компонентов, включая программы 260, 265 и приложение 270. Оно также может содержать код другого не показанного программного обеспечения. Например, оно может содержать средства расчетного программного обеспечения, которое позволяет отправлять запрос на морской источник 100 сейсмических волн и проверять его параметры перед или во время введения его в действие. На устройстве 222 хранения данных также могут находиться другие виды программного обеспечения, например операционная система, которые не показаны.

Кроме того, функции описанной системы 200 управления не обязательно должны быть реализованы указанным выше образом. Например, приложение 265 может быть реализовано в программном компоненте другого вида, таком как программный агент или служебная программа. Функции приложения 270 не обязательно должны быть объединены в одном компоненте, они могут быть распределены по двум или более компонентам.

Следует отметить, что некоторые части подробного описания настоящего изобретения изложены в отношении программно реализованного процесса с применением условных обозначений операций с битами данных в запоминающем устройстве вычислительной системы или вычислительного устройства. Указанные описания и обозначения используются специалистами в области техники, к которой относится настоящее изобретение, для наиболее эффективного пояснения принципов их работы другим специалистам в этой области техники. При выполнении процесса или операций требуется совершение физических действий с физическими величинами, в результате которых происходит физическое преобразование конкретного устройства или системы, на которой выполняются действия или хранятся результаты. Обычно, хотя и не обязательно, эти величины имеют вид электрических, магнитных или оптических сигналов, которые можно хранить, передавать, комбинировать, сравнивать или совершать с ними другие действия. Иногда оказывается удобным, как правило, вследствие широкого использования, называть эти сигналы битами, значениями, элементами, символами, параметрами, выражениями, числами и т.п.

Однако следует помнить, что эти и аналогичные выражения должны быть связаны с соответствующими физическими величинами и представляют собой лишь подходящие обозначения этих величин. Если специально не указано или не вытекает логически, во всем документе эти описания относятся к действию и процессам электронного устройства, которое обрабатывает и преобразует данные, представленные в виде физических (электронных, магнитных или оптических) величин в некоторой части устройства хранения данных электронного устройства, в другие данные, аналогично представленные в виде физических величин в устройстве хранения данных или в устройствах передачи или отображения. Приведенные

в качестве примера термины, которые представляют такое описание, включают без ограничения термины "обработка", "компьютерное вычисление", "вычисление", "определение", "отображение" и т.п.

Кроме того, исполнение функции программного обеспечения приводит к преобразованию вычислительного устройства, на котором она выполняется. Например, регистрация данных приводит к физическому изменению данных, содержащихся в устройстве хранения данных, а также последующей обработке этих данных. Физическое изменение представляет собой "физическое преобразование", поскольку в результате изменяется физическое состояние устройства хранения данных вычислительного устройства.

Также следует отметить, что программно реализованные аспекты настоящего изобретения, как правило, закодированы на определенном носителе для хранения программ или, альтернативно, реализованы в определенном средстве передачи данных. Носитель для хранения программ может представлять собой магнитный (например, гибкий диск или жесткий диск) или оптический (например, компакт-диск для однократной записи данных или CD-ROM) носитель и может представлять собой постоянное или оперативное запоминающее устройство. Аналогично средство передачи данных может представлять собой витую пару, коаксиальный кабель, оптическое волокно или любое другое средство передачи данных, известное в области техники настоящего изобретения. Настоящее изобретение не ограничено этими аспектами для любой из указанных реализаций.

Вышеописанный способ управления траекторией осуществляют во время регистрации в ходе морской сейсмической разведки для управления амплитудой и частотой сейсмических сигналов, создаваемых морским источником сейсмических волн. Разведочные работы могут осуществляться в соответствии с обычной практикой и, как правило, предусматривают применение одного или нескольких буксирующихся судов, буксирующих один или несколько источников. В рамках настоящего изобретения один приведенный в качестве примера вариант осуществления источника, с помощью которого можно проводить разведку, представляет собой морской источник сейсмических волн согласно фиг. 1 и 2. Разведка также может предусматривать применение одной или нескольких морских сейсмических кос, известных в области техники, к которой относится настоящее изобретение.

Рассмотрим, например, морскую сейсмическую разведку 300, представленную на фиг. 3. Разведка 300 предусматривает применение судна 305, с помощью которого разворачивают и буксируют морской источник 100 сейсмических волн. В ходе сейморазведочных работ морской источник 100 сейсмических волн буксируют в водной среде 115 на глубине, частично зависящей от его частоты. На сейморазведочных судах (не показаны) размещают множество приемников 310 (указан только один). Некоторые виды морской сейморазведки предусматривают буксирование группы приемников 310, расположенных в морских косах, которые объединены в группы морских кос, которые не показаны. Однако в изображенном варианте осуществления приемники, которые входят в состав морских донных кабелей 320 (указан только одна), расположены в сторону морского дна 316.

После того как развернутый морской источник 100 сейсмических волн готов к работе, буксирующее судно 305 буксирует его вдоль профилей волны с целью выполнения сейморазведочных работ. Во время буксирования морской источник 100 сейсмических волн создает сейсмические звуковые сигналы, представленные в виде луча 325. В изображенном варианте осуществления эти сигналы могут представлять собой или сейсмические свип-сигналы, или шумовые сигналы, предназначенные для проведения сейморазведочных работ. Звуковые сигналы проходят через толщу воды 115 до морского дна 316. Одна часть сигнала отражается от морского дна 316 и проходит к морской поверхности, что представлено в виде луча 330, а другая часть походит дальше через земной пласт 315, что указано в виде луча 335. Время от времени звуковой сигнал попадает на отражатели, такие как отражатель 340, и часть отражается на приемники 310, что указано в виде луча 345, а часть продолжает проходить, пока энергия сигнала не рассеивается за пределами обнаружения приемников 310. Часть звукового сигнала может также вернуться на морское дно или морскую поверхность под действием механизмов, отличающихся от отражения, таких как рефракция или преломление (так называемая "рефрагированная волна").

Во время создания и прохождения сейсмических звуковых сигналов осуществляется описанный в настоящем документе способ управления траекторией. Контур управления стабилизацией частоты и траекторией будут описаны далее более подробно.

На фиг. 4 показана блок-схема 400 способа управления источником согласно фиг. 1 с помощью системы управления согласно фиг. 2 для стабилизации частоты источника во время регистрации сигналов. В блок-схеме 400 номинальные параметры свип-сигнала используются как для приведения источника 420 в действие, так и в качестве регулируемых пользовательских параметров при стабилизации частоты (блок 440). Эти параметры определяют во время вышеуказанных сейморазведочных работ, и они могут быть получены обычным образом. Например, стабилизация частоты (блок 440) может быть реализована с помощью приложения 270, находящегося на локальном или удаленном жестком диске или в другом устройстве хранения данных (например, устройство 222 хранения данных, показанное на фиг. 2) и выполняемого задающим контроллером 205. Задающий контроллер 205 обеспечивает слежение (блок 450) за работающим источником 100 сейсмических волн, вычисляя необходимое смещение (блок 500) от состояния равновесия и обновляет внутреннюю конфигурацию морского источника 100 сейсмических волн (блок 430) для регулирования создаваемой частоты до ее номинального значения.

Согласно фиг. 1 в ходе работы излучающий поршень 105 перемещается на величину смещения  $x$ , преодолевая давление  $P_{\text{ext}}$  расположенной снаружи толщии морской воды 115. Устройство показано в состоянии равновесия,  $x=0$ , то есть давление внутри устройства также составляет  $P_{\text{ext}}$ . Излучающий поршень 105 прикреплен к штоку 125, который перемещается в газовой пружине 165 с переменной длиной хода, содержащей две газовых объема 110а, 110b, ограниченные сжимающим поршнем 132. Газовая пружина 165 с переменной длиной хода представляет собой газовую пружину с двумя объемами 110а, 110b, образованными поршнями 132, 130 и крышкой 129 на их соответствующих уплотнениях. Поршень 130 прикреплен к штоку 125 и свободно перемещается в газовой пружине 165 в направлении оси штока и вдоль него. Уплотнения (не показаны) по периметру поршня 130 предотвращают движение газа вокруг поршня 130, создавая с каждой стороны две герметичные камеры, 110а, 110b. Сжимающий поршень 132, выполненный с возможностью перемещения вдоль оси штока 125, аналогично содержащего уплотнения по его периметру, обеспечивает возможность изменения длины пространств 110а, 110b газовой пружины и, следовательно, ее жесткости. Длина газовых пространств 110а, 110b равна общему расстоянию между ближайшими торцевыми поверхностями сжимающего поршня 132 и крышки 129 за вычетом толщины вторичного поршня 130, обозначенной "l". Давление внутри герметичных образованных сжимающими поршнями камер 110а, 110b в состоянии равновесия обозначено  $P_s$ .

Как было описано выше, морской источник 100 сейсмических волн совершает колебания с собственной частотой, определенной на основании таких параметров, как положение сжимающего поршня 132, давление газа внутри пространств 110а, 110b и внутреннее пространство корпуса 170 внутри устройства, внешнее давление воды  $P_{\text{ext}}$  (следовательно рабочая глубина устройства), а также, в меньшей степени, трение об уплотнения, время активации и усилие линейного исполнительного механизма 240 (показан на фиг. 2), который обеспечивает подачу энергии для колебаний излучающего поршня. Сжимающий поршень 132 управляет резонансной частотой источника путем одновременного изменения равновесного давления  $P_s$  внутри газовой пружины и ее длины.

Для качания заданной частоты сжимающий поршень 132 перемещается, меняя период колебаний требуемым образом, в противном случае устройство (в большинстве случаев) совершает колебания с собственной частотой с амплитудой, которой можно управлять с помощью исполнительного механизма 120а, 120b, как было описано выше. Как правило, требуемую траекторию сжимающего поршня 132 вычисляют до того, как начнется качание. Закон управления сжимающим поршнем по умолчанию, то есть вышеописанное активное увеличение жесткости, позволяет удерживать поршень 132 на соответствующей заранее установленной траектории, несмотря на возмущающие силы, создаваемые работой устройства. Другой закон управления обеспечивает отдельное управление возбуждающим механизмом 120а, 120b, так что он передает энергию для совершения требуемых колебаний или забирает ее в зависимости от необходимости.

Так, например, в соответствии с законом управления по умолчанию сжимающий поршень 132 может располагаться таким образом, что теоретически он должен будет колебаться с частотой 2,0 Гц, однако вместо этого частота его колебаний будет составлять 2,05 Гц, поскольку закон управления, основанный на теоретических выкладках, является лишь приблизительным, или же условия, включая указанное давление газа, не совпадают достаточно точно с предположениями согласно вычислениям по этому закону управления. Это как раз тот тип ошибки, который должен устранить контур (430, 450) стабилизации частоты.

Более конкретно здесь для удержания частоты устройства максимально близко к средней частоте используется активная обратная связь со сжимающим поршнем 132, тем самым обеспечивая максимальное совпадение собственной частоты устройства с требуемой частотой. Контур с обратной связью используется для регулирования управляемого параметра с целью уменьшения расхождения между требуемой частотой и собственной частотой. В показанном варианте осуществления это осуществляют путем регулирования положения сжимающего поршня 132.

Управляемым параметром в этом варианте осуществления является смещение положения от состояния равновесия ( $P$ ), которое можно использовать для заранее вычисленного положения сжимающего поршня по умолчанию (DSPP). Собственная частота ( $f$ ) источника зависит от длины ( $l$ ) газовой пружины, и мы обозначим эту зависимость как  $f(l)$ . Следует отметить, что собственная частота также зависит от множества других факторов, включая давление газа в пространствах 110а, 110b на фиг. 1 и внешнее давление жидкости  $P_{\text{ext}}$ , но эти зависимости опущены для краткости. Предположим, что расхождение  $\Delta f = f_i(l) - f_e(l)$  возникает между фактической собственной частотой, которую мы обозначим  $f_i(l)$ , и расчетной частотой  $f_e(l)$ . Например, оно может возникнуть в результате изменения температуры газа в пространствах 110а, 110b. Нам необходимо скорректировать значение  $f_e(l)$ , чтобы приблизить его к значению  $f_i(l)$ , для этого изменим длину газовой пружины  $l = \text{DSPP} + P$ . Это можно осуществить с помощью следующей простой итерационной схемы. Исходя из динамических характеристик системы, вычислим

скорость изменения  $f'_e(l) = \partial f_e(l) / \partial l$ . Чтобы скорректировать расхождение, скорректируем смещение положения от состояния равновесия  $P$  относительно положения по умолчанию сжимающего поршня DSPP



с помощью величины  $\Delta l$  с получением нового значения  $P'$

$$\Delta l = \alpha \frac{\Delta f}{f_e'(l)}$$

$$P' = P + \Delta l.$$

Здесь  $\alpha$  - значение коэффициента стабилизации в диапазоне от 0 до 1, установленное пользователем в соответствии с принципами, известными специалистам в области техники проектирования систем управления.

Величину  $f_e'(l)$  для устройства согласно фиг. 1 можно вычислить следующим образом. В этом примере будем считать, что газ внутри пружины подчиняется адиабатическому закону в течение периода действия резонанса, то есть четверть периода колебаний поршня газовой пружины является недостаточным периодом для существенного переноса тепловой энергии между металлической конструкцией и газом. Жесткость газовой пружины при малом смещении можно определить как изменение длины, необходимое для создания противодействия изменению собственной расчетной частоты.

Согласно этому примеру для смещения поршня газовой пружины на расстояние  $x$  от равновесного положения  $x=0$ , поршень газовой пружины должен приложить усилие, определяемое таким уравнением

$$F = \rho_s A_s \left( \left( \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + x} \right)^\gamma - \left( \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} - x} \right)^\gamma \right),$$

где

$x$  - смещение поршня газовой пружины от центрального положения,

$\rho_s$  - давление газа внутри газовой пружины с переменной длиной хода, когда поршень находится в состоянии покоя,

$A_s$  - площадь поршня газовой пружины,

$l$  - общая длина газового пространства газовой пружины (т.е. сумма длин обеих сторон поршня), и

$\gamma$  - показатель адиабаты (отношение теплоемкостей) газа.

Дифференцирование по  $x$  и оценивание результата при условии, что  $x=0$ , позволяет выразить жесткость газовой пружины с переменной длиной хода

$$k = - \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=0} = \frac{4\gamma \rho_s A_s}{l}$$

При определении изменения жесткости с использованием длины (т.е. положение сжимающего поршня) согласно этому варианту осуществления необходимо делать поправку на получаемое в результате изменение давления газа. Таким образом можно сделать следующее допущение, что по шкалам времени, по которым меняется длина газовой пружины, газ может приходить в термодинамическое равновесие с металлом, а частная производная  $\left( \frac{\partial p_s}{\partial l} \right)$  подчиняется закону Бойля-Мариотта

$$\frac{\partial k}{\partial l} = \frac{\partial k}{\partial l} + \frac{\partial k}{\partial p_s} \frac{\partial p_s}{\partial l} = \frac{-4\gamma \rho_s A_s}{l^2} - \frac{4\gamma A_s p_s}{l} \frac{1}{l} = -2 \frac{k}{l}.$$

Для того чтобы применить предыдущее выражение для моделирования системы управления, в соответствии с этим вариантом осуществления также необходимо составить модель влияния жесткости газовой пружины на собственную частоту. Эту модель можно получить следующим образом. Собственная частота системы в целом зависит от движущейся массы (излучающий поршень и остальные прикрепленные к нему элементы, включая шток и поршень газовой пружины), неподвижной массы (корпус и прикрепленные к нему элементы) и жесткости газовой пружины. Также она зависит от упругости газа в корпусе, в котором находится третья герметичная заполненная газом камера. Смоделировать эту систему можно на основе простого генератора гармонических колебаний, состоящего из двух параллельных пружин, расположенных между двумя массами.

Для резонансной угловой частоты колебательной системы с двумя параллельными пружинами между двумя массами существует такая формула

$$\omega = \sqrt{(k + k_v) \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}.$$

Здесь

$k_v$  - жесткость  $\frac{dF_v}{dx}$  газа внутри корпуса, где  $F_v$  - усилие, создаваемое на поршень 105 газом, находящимся внутри корпуса 170;

$m_1$  - общая масса поршня 105, штока 125, к которому он прикреплен, и остальных компонентов, прикрепленных к штоку, например поршня 130, и дополнительной массы воды, которая движется вместе с поршнем 105;

$m_2$  - масса остальных элементов источника, включая корпус 170 и жестко прикрепленные к нему элементы.

Изменение длины газовой пружины можно определить следующим образом:

$$\frac{d\omega}{dl} = \frac{d\omega}{dk} \frac{dk}{dl} = \frac{-1}{2} \frac{\omega}{(k+k_v)} 2 \frac{k}{l} = \frac{-\omega}{\left(1 + \frac{k_v}{k}\right) l}$$

Для линейной частоты ( $f$ ) вместо угловой частоты  $\omega$

$$\frac{df}{dt} = \frac{-f}{\left(1 + \frac{k_V}{k}\right)t}$$

Для определения величины  $f_c'(l)$ , присутствующей в приведенных выше уравнениях, можно использовать этот же подход.

Для того чтобы ввести в модель величину  $k_V$  предположим, что газ подчиняется адиабатическому закону в течение четверти периода, и теперь можем использовать выражение, аналогичное выражению для жесткости газовой пружины

$$k_V = \frac{\gamma p_{ext} A}{L} = \frac{\gamma p_{ext} A^2}{V},$$

где  $L$  - "эквивалентная длина" газового пространства в корпусе, равная его объему  $V$ , деленному на площадь поршня  $A$ . Коэффициент 4 отсутствует, поскольку в этом случае имеется только одно газовое пространство.

На фиг. 5 показано, как указанные уравнения могут быть использованы в соответствии с одним характерным вариантом осуществления. В соответствии с этим вариантом осуществления описанные параметры резонатора будут определены (блок 505) вместе с характеристикой свип-сигнала и  $\Delta f$ . Некоторые из этих параметров могут описывать тип используемого резонатора, а остальные, возможно, понадобятся определять для каждого резонатора отдельно. Кроме того, в некоторых случаях могут определяться параметры, вычисляемые на основании установленных выше параметров (т.е. для резонатора необходимо определить набор параметров, на основании которых будут определены параметры, описанные выше).

В соответствии с этим вариантом осуществления рассчитывают некоторые параметры, включая  $k$ ,  $k_V$  и  $df/dl$ , описанные в настоящем документе (блок 515, 520). Некоторые из этих величин вычисляют только один раз для всего исследования. Остальные параметры могут определяться повторно для каждого измерения. Например, если температура устройства меняется с течением времени или же они могут вычисляться непрерывно во время каждого качания частоты, при перемещении сжимающих поршней будут меняться значения внутреннего давления и жесткости, которые используются в алгоритме. Таким образом, хотя глядя на фиг. 4 и 5 может сложиться впечатление, что вычисление этих параметров (блок 515, 520) выполняется за пределами контура обратной связи (блок 430, 450), следует понимать, что иногда некоторые из этих величин могут подвергаться многократному вычислению, если того требует ситуация. Определяют расчетный коэффициент поправки (блок 530), а затем применяют его (блок 540).

Согласно этому примеру закон управления по умолчанию (без возмущений) используют (блок 420) для определения начального положения сжимающего поршня. Такое положение можно регулировать в зависимости от выбранного типа разведки (например, одночастотная, узкополосный свип-сигнал и т.д.) и с учетом используемых частот.

Выполняют качание частоты, соответствующее требуемой характеристике свип-сигнала (блок 430). Во время прохождения указанного свип-сигнала в соответствии с вариантом осуществления измеряют фактическую рабочую частоту резонатора, которая сравнивается с требуемым свип-сигналом. В соответствии со способом согласно настоящему изобретению это можно выполнить посредством расчета собственной частоты. В случае, когда необходим шумовой сигнал, расчет собственной частоты позволяет обеспечить непосредственное измерение точности свип-сигнала и отклонение от нее. Если резонатор работает в режиме качания в некотором диапазоне частот, также можно определить отклонение от требуемого диапазона качающихся частот, поскольку при качании в некотором диапазоне в каждый момент времени будет известна ожидаемая частота, и ее можно сравнить с собственной расчетной частотой за указанный период времени. Существует множество альтернативных способов расчета состояния системы для установления отклонения частоты поршня газовой пружины от требуемой частоты. Специалистам в области техники настоящего изобретения не составит труда определить такие способы.

При осуществлении любого такого способа необходимо знать о воздействии контура 650 управления траекторией на фактическую частоту устройства. Под расчетным отклонением частоты следует понимать разность между резонансной частотой устройства без управления траекторией (то есть "собственная частота") и требуемой частотой. Если за основу в способе расчета собственной частоты принята наблюдаемая частота устройства, необходимо принимать во внимание эффект контура 650 управления траекторией. Альтернативно собственная частота может быть рассчитана на основе расположения сжимающего поршня 132, поршня 130 газовой пружины и давления газа в пространствах 110a, 110b и внутри корпуса 170.

Наконец, учитывая некоторое отклонение частоты и используя изложенные выше уравнения (блоки 515-530) и продолжающееся качание частоты можно определить величину регулирования (блок 450).

В качестве примера рассмотрим некоторые типичные условия для устройства, например морского источника 100 сейсмических волн на фиг. 1, выполненного с возможностью создания шумового сигнала частотой 4 Гц на рабочей глубине 30 м. В данном конкретном случае диаметр излучающего поршня принимают равным 1,38 м, площадь сжимающего поршня - 0,25 м<sup>2</sup>, а внутренний объем устройства состав-

ляет  $8 \text{ м}^3$ . Используя приведенные выше уравнения, жесткость может быть вычислена следующим образом:

$$\begin{aligned}
 l &= 0,66 \text{ м (значение, соответствующее резонансу частотой 4 Гц);} \\
 p &= 400\,000 \text{ Па (давление окружающей среды на глубине воды } \sim 30 \text{ м);} \\
 A_s &= 0,25 \text{ м}^2; \\
 A &= \pi(1,38\text{м}/2)^2 = 1,50 \text{ м}^2; \\
 V &= 8 \text{ м}^3 \text{ и} \\
 \gamma &= 1,4 \text{ (показатель адиабаты двухатомного газа, например азота).} \\
 \text{Из этого вытекает, что:} \\
 k &= 8,48 \cdot 10^5 \text{ Нм}^{-1} \\
 k_V &= 1,58 \cdot 10^5 \text{ Нм}^{-1}
 \end{aligned}$$

или

$$\frac{df}{dl} = -5,11 \frac{\text{Гц}}{\text{м}}.$$

Следует отметить, что предыдущее уравнение можно рассматривать в некотором смысле как уравнение преобразования частотной ошибки в позиционную ошибку, причем позиционную ошибку можно отрегулировать в соответствии с принципами, изложенными в настоящем документе.

В рамках указанного примера из этого вытекает, что для корректировки 5% сдвига частоты (обычного для такого рода испытаний) сжимающий поршень 132 должен переместиться приблизительно на  $(0,05)(4 \text{ Гц})/(5,11 \text{ Гц/м})=0,0392 \text{ м}$  или приблизительно на 40 мм. Данное смещение положения от состояния равновесия не должно быть чрезмерно ограниченным для большинства рассматриваемых систем.

Контур обратной связи для стабилизации частоты, описанный выше, осуществляет управление собственной резонансной частотой системы, поддерживая ее близко к требуемой частоте. Раскрытый способ управления траекторией предусматривает дополнительный контур управления с обратной связью, который осуществляет высокоточное управление траекторией, тогда как контур управления частотой с обратной связью, описанный выше, поддерживает собственную частоту морского источника сейсмических волн на правильной или близкой ней частоте. Далее со ссылками на морской источник 100 сейсмических волн согласно фиг. 1 будет описан второй контур управления.

В этом случае управление траекторией предполагает относительное смещение излучающего поршня 105 и корпуса 170 ("относительная траектория"). Механизм регулирования частоты заключается в изменении положений сжимающего поршня 132 на конце газовой пружины 165 и в приложении усилия возбуждающего генератора посредством приведения в действие исполнительного механизма 240. Морской источник 100 сейсмических волн, как правило, используется циклически, его требуемая траектория воспроизводится с особой точностью, причем период времени между циклами является фиксированным или практически фиксированным. Так что описанный выше первый контур управления может определять погрешность частоты при выполнении одного цикла и применять поправочный коэффициент с помощью механизма регулирования частоты в следующем цикле. В свою очередь, второй контур управления работает в режиме реального времени (т.е. непосредственно во время работы).

В этом случае механизм управления представляется собой систему 200 управления, показанную на фиг. 2. Такой механизм является лишь одним приведенным в качестве примера способом управления работой морского источника 100 сейсмических волн. Как было описано выше, способ управления траекторией реализован в этом варианте осуществления в приложении 270 и содержит две группы из двух контуров обратной связи.

На фиг. 6А показан первый контур 600, в котором рассчитывают (блок 610) собственную частоту источника. Затем выводят (блок 620) погрешность частоты в качестве разности между расчетной частотой и частотой требуемой траектории. Затем (блок 630) применяют механизм регулирования частоты для сведения сигнала погрешности к нулю способом, хорошо известным специалистам в области автоматического регулирования.

На фиг. 6В показан второй контур 650 обратной связи, с помощью которого определяют (блок 660) траекторию движения генератора колебаний. Затем выводят (блок 670) сигнал погрешности на основании разницы между требуемой и определенной траекториями. Затем создают (блок 680) управляющее усилие с помощью возбуждающего генератора, который осуществляет попытку сведения сигнала погрешности к нулю способом, хорошо известным специалистам в области автоматического регулирования. Одним способом сведения сигнала погрешности к нулю является измерение погрешности движения между требуемым и определенным движением генератора колебаний. Затем прикладывают управляющее усилие, линейно-пропорциональное погрешности. Альтернативно, "двухпозиционное" управление можно использовать в случае приложения усилия постоянной величины в направлении, противоположном погрешности. Другие варианты осуществления управления понятны специалистам в области техники

настоящего изобретения.

Принцип действия первого контура 600 достаточно сильно соответствует способу, раскрытому в заявке на выдачу патента США № 61/894729, поданной 23 октября 2013 г., и заявке на выдачу патента США № 14/515223, поданной 15 октября 2014 г., озаглавленной "System and Method for Resonator Frequency Control by Active Squeeze Position Feedback". Однако между ними все же есть отличие, которое заключается в том, что второй контур 650 поддерживает требуемую частоту колебаний независимо от собственной частоты источника. Таким образом, когда работает второй контур, нельзя рассчитать собственную частоту простым измерением периода колебаний, что является самым простым способом расчета.

Так, один способ расчета предполагает кратковременное отключение второго контура, непосредственное измерение собственной частоты источника, применение этого значения в блоке 610 и последующее включение второго контура. Альтернативно рассчитать собственную частоту источника можно, используя измеренные значения его внутреннего состояния и состояния окружающей среды. Например, собственную частоту источника можно измерить при различных значениях давления, температуры, рабочей глубины и т.д. и с учетом измеренных значений, полученных в режиме реального времени, соответствующие табличные значения можно использовать в блоке 610. В соответствии с одним вариантом осуществления погрешность частоты можно рассчитать опосредовано, используя историю погрешностей траектории (блок 675).

Для большего понимания принципов работы контуров 600, 650 управления с обратной связью для морского источника 100 сейсмических волн согласно фиг. 1 и 2 будет приведен численно-аналитический пример. В этом примере будет показано, в частности, что усилия, необходимые для поправки траектории (блок 680), существенно зависят от собственной частоты колебаний источника (как рассчитано в блоке 610).

Предположим, что источник является простым генератором колебаний с одной степенью свободы, как показано на фиг. 7. Масса поршня  $m_1$  обозначена позицией 720, масса остальной части источника  $m_2$  обозначена позицией 710.  $k$  Н/м (730) - коэффициент жесткости пружины с переменной длиной хода,  $\gamma$  Н/(мс<sup>-1</sup>) (750) - вязкостное сопротивление, причем две массы приводятся в относительное движение с угловой частотой  $\omega$  рад/с на пиковой скорости  $v$  м/с за счет усилия, величина которого  $F$  измеряется в ньютонах.

Для нашего случая  $F$  - это возбуждающее усилие, действующее на источник;  $\omega$  - угловая частота, с которой должен совершать колебания поршень источника;  $v$  - пиковая скорость колебаний поршня источника.

Как известно специалистам в области техники динамических систем, подходящим считается следующее соотношение между усилием  $F$ , частотой  $\omega$  и свойствами генератора колебаний, выраженное в частотной области в комплексном представлении

$$F = v \left( r + i \omega m - i \frac{k}{\omega} \right).$$

Здесь  $m$  - среднее гармоническое масс  $m_1$  и  $m_2$ .

Это выражение можно переписать для собственной частоты  $\omega_0$  генератора колебаний таким образом

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$F = v \left( r + i m \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega} \right)$$

$$|F| = v \sqrt{r^2 + m^2 \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^2}{\omega^2}}.$$

После изучения указанного уравнения очевидно, что при приложении на собственной частоте  $\omega_0$  возбуждающего усилия  $f=vt$  можно получить скорость  $v$ , причем на любой другой частоте усилие, необходимое для получения той же скорости  $v$ , будет выше. Усилие возрастает с увеличением разности частот  $(\omega^2 - \omega_0^2)$ . Таким образом, если необходимо получить определенную скорость  $v$  и допустимое усилие ограничено значением  $F_{\max}$ , то собственная частота  $\omega_0$  должна поддерживаться на уровне, близком к значению требуемой частоты  $\omega$ . Из этого уравнения также очевидно, что максимальная разность между требуемой частотой и собственной частотой, при которой допустимое возбуждающее усилие будет достаточным для получения требуемой скорости  $v$ , зависит от значения  $F_{\max}$  и уменьшается с увеличением  $m$  и  $\gamma$ .

В качестве примера предположим, что источник характеризуется следующими параметрами:

$\gamma=3000$ Н/м/с;

$v=2$  м/с;

$m=3000$  кг, что в данном случае обозначает эффективную подвижную массу, как правило, среднее гармоническое масс поршня и корпуса;

требуемая частота=2 Гц;

$$F_{\max}=10000 \text{ Н};$$

На фиг. 8 показан график зависимости усилия, необходимого для управления траекторией, от регулируемой собственной частоты источника. Также изображена горизонтальная линия, обозначающая  $F_{\max}$ .

Очевидно, что необходимое усилие значительно возрастает в зависимости от погрешности частоты. В этом примере с целью эффективного управления траекторией при совершении колебаний на частоте 2 Гц с максимальной скоростью 2 м/с собственная частота генератора колебаний должна поддерживаться в диапазоне от 1,9 до 2,1 Гц. Таким образом, при управлении траекторией предотвращается возникновение отклонения частоты более чем на 0,1 Гц или 5% от требуемой частоты.

Специалистам в области техники настоящего изобретения будет очевидно, что требуемые усилия в значительной мере зависят от погрешности частоты  $\Delta f$ , следовательно для оценки в блоке 610 собственной частоты генератора колебаний в блоке 675 может применяться история корректирующих усилий, приложенных в блоке 680. В одном варианте осуществления корректирующие усилия прикладываются следующим образом. Допустим, что "fxd" - управляющее усилие, приложенное в блоке 680, умноженное на смещение подвижного узла 105, 125, 130, 120b от его положения, усредненное по циклу колебаний. Тогда для простой системы с генератором гармонических колебаний и небольшой погрешностью частоты для обеспечения точной аппроксимации значения "fxd", усредненное по циклу колебаний, будет прямо пропорционально погрешности 620 частоты.

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: зависимость смещения от усилия для простой системы с генератором гармонических колебаний подчиняется закону Гука,  $F=k \cdot x$ , где  $F$  - создаваемое пружиной усилие,  $k$  - коэффициент жесткости пружины и  $x$  - смещение от длины пружины в состоянии покоя. Если подвижная масса подчиняется указанному уравнению независимо от погрешности коэффициента жесткости  $k$ , который вместо номинального значения  $k$  принимает значение  $k_{\text{actual}}$ , то прикладываемое усилие для управления траекторией  $F_{\text{control}}$  должно точно компенсировать данную погрешность  $F = k \cdot x = F_{\text{control}} + k_{\text{actual}} \cdot x$ , следовательно  $F_{\text{control}} = (k - k_{\text{actual}}) \cdot x$ . Умножив управляющее усилие на величину смещения  $x$ , получим  $f_{\text{xd}} = F_{\text{control}} \cdot x = (k - k_{\text{actual}}) \cdot x^2$ . После усреднения по циклу колебаний  $x^2$  достигает половины своего максимального значения, и следовательно  $F_{\text{control}} \cdot x$ , усредненное по циклу колебаний, пропорционально  $k - k_{\text{actual}}$ .

Это позволяет оценить разность квадратов требуемой частоты  $\omega_{\text{des}}$  и собственной частоты  $\omega_{\text{nat}}$  следующим образом:

$$\omega_{\text{des}}^2 - \omega_{\text{nat}}^2 = \frac{k - k_{\text{actual}}}{m} = \frac{F_{\text{control}} \cdot x}{m \cdot x^2}.$$

Здесь черта сверху обозначает усреднение по периоду колебаний.

На основании этого может быть непосредственно получена собственная частота, и на стадии 610 контур 600 управления может осуществлять указанное вычисление.

Эти вычисления являются точными только в отношении линейного генератора колебаний, причем система согласно фиг. 1 предусматривает применение нелинейного генератора колебаний со сверхлинейной пружиной. В результате вышесказанного при повышении точности амплитуда колебаний будет уменьшаться, поскольку в условиях ограничения бесконечно малых движений система подчиняется линейному закону. Вышеуказанные уравнения обеспечивают только приблизительные результаты для конечных колебаний. Однако на графике согласно фиг. 8 показано, что управление траекторией будет более предпочтительным в случае обработки конечных ошибок при разности частот, так что погрешность при оценке и корректировке собственной частоты может быть в некоторой степени компенсирована.

Специалистам в области техники, к которой относится настоящее изобретение, будут очевидны другие варианты осуществления, предполагающие применение управляющего усилия 680 для оценки собственной частоты 610 и погрешности 620 частоты. На фиг. 9 и 10 изображен выраженный в числах пример работы этих взаимодействующих контуров управления, полученных с помощью компьютерных вычислений. На фиг. 9А изображена зависимость смещения от усилия для идеальной линейной пружины с коэффициентом жесткости  $k=1$  (линия 910), и для в некоторой степени нелинейной пружины, жесткость которой увеличивается при более высоких значениях смещения:  $k=(1+\text{смещение}^4)/10$  (линия 920). Спроектируем генератор гармонических колебаний, содержащий обе эти пружины, причем массу и начальную скорость выберем так, что период колебаний линейной пружины составляет 2 с, а ее максимальное смещение составляет 1 м. Цель заключается в управлении траекторией таким образом, чтобы нелинейная пружина действовала аналогично линейной пружине.

На фиг. 10А участок от 0 с (отметка 1000) до 20 с (отметка 1020) отображает отличие между линейным и нелинейным генераторами колебаний при свободных колебаниях. Пунктирной линией обозначено движение линейной пружины, а сплошной линией - движение нелинейной пружины. Основным назначением повышенной жесткости нелинейной пружины при более высоких показателях смещения является незначительное уменьшение периода колебаний. По истечении 20 с свободных колебаний накапливается существенная погрешность фазы. На фиг. 10В показана погрешность траектории, то есть разность между этими двумя вариантами.

После истечения 20 с (отметка 1020) приводится в действие контур 2 управления траекторией (блок 650). Прикладываемое управляющее усилие (показанное на фиг. 10Е) линейно пропорционально погрешности скорости, но ограничено на величину до 5% от пикового усилия линейной пружины. Погрешность траектории (фиг. 10В) снижается в результате действия управляющего усилия, приводящего фазу колебаний в соответствие с требуемой траекторией, но погрешность не становится равной нулю. Это невозможно вследствие слишком высокого усилия, необходимого для полной компенсации нелинейности пружины (оно находится за пределами пунктирных линий на фиг. 9А, отображающих максимальное отклонение усилия, которое можно откорректировать для возврата к идеальному варианту, обозначенному линией 910).

После истечения 50 с (отметка 1050) приводится в действие контур 1 управления (блок 600) для управления частотой. Он может регулировать общую жесткость пружины, но не может корректировать нелинейность пружины:  $k=(k_{\text{linear}}+\text{смещение}^4)/10$ , где  $k_{\text{linear}}$  - регулируемый параметр. На фиг. 10С изображено "fxd", которое представляет вычисленный результат умножения управляющего усилия (до его ограничения на 5%) на величину смещения. Скорость изменения линейной части коэффициента жесткости  $k_{\text{linear}}$  пропорциональна значению fxd, усредненному по двухсекундному интервалу времени (но с установленным значением максимальной скорости изменения). Отклонение от линейной части коэффициента жесткости применяют в конце каждого интервала усреднения (как в блоке 450). На фиг. 10D показан способ быстрого регулирования линейной части коэффициента жесткости для приведения периода собственных колебаний к требуемым 2 с. Регулируемая пружина по-прежнему является нелинейной, как показано на фиг. 9В, причем  $k=0,937+\text{смещение}^4/10$ , но после регулирования требуемые усилия принимают достаточно малые значения, вследствие чего управляющее усилие соответствует поставленной цели, а погрешность траектории (фиг. 10В) приводят к близкому к нулю значению.

Эта простая вычислительная модель представляет возможный способ получения на выходе из генератора колебаний, по существу, с нелинейной пружиной посредством комбинации контуров 600 и 650 управления практически идеального синусоидального движения. Специалистам в области техники теории управления будет понятно, что возможны различные альтернативные варианты осуществления в отношении простых приведенных в качестве примера вариантов; в частности законы управления могут адаптивно регулировать ("учитывать"), прогнозировать поправочные коэффициенты на основании предыдущей накопленной информации или могут включать другие источники информации, например показатели измерений среды источника (например, на основании температуры, давления или глубины).

В изображенном на фиг. 1 варианте осуществления морской источник 100 сейсмических волн согласно фиг. 1 и 2 разворачивают для регистрации согласно фиг. 3 или аналогичным образом. Во время проведения регистрации осуществляют управление работой морского источника 100 сейсмических волн как с помощью способа стабилизации частоты, изображенного на фиг. 4 и 5, так и посредством управления траекторией согласно фиг. 6. Более конкретно способ стабилизации частоты согласно фиг. 4 и 5 выполняют посредством контура 1 управления траекторией (блок 600) с целью управления морским источником 100 сейсмических волн, вследствие чего он создает резонансные колебания на надлежащей частоте или очень близко к надлежащей частоте. Кроме того, после создания резонансных колебаний на требуемой частоте контур 2 управления траекторией (блок 650) осуществляет регулирование колебательно-го движения в пределах небольшого диапазона.

Таким образом, контур 1 управления траекторией (стабилизация частоты) выполняет значительное, или "грубое", изменение частоты, в то время как контур 2 управления траекторией обеспечивает небольшое, или "точное", изменение частоты или движения. Например, небольшое изменение частоты может составлять 0,1 Гц. Или же незначительная модификация движения может изменить точную форму свип-сигнала: например, для гашения нежелательных гармонических колебаний высокой частоты или, возможно, усиления определенных гармонических колебаний. Таким образом, контур 2 управления траекторией непрерывно осуществляет подстройку или регулирование движения для поддержания его близко к требуемой номинальной траектории.

Следует отметить отличие от работы и управления наземным вибрационным источником. Наземный вибрационный источник представляет собой пример системы, характеризующейся не очень высоким резонансом. Наземный вибрационный источник подбирает выходной сигнал устройства перебором путем обеспечения перемещения управляющего поршня по определенной траектории. Таким образом, он обеспечивает перемещение излучающего поршня в предполагаемое положение независимо от значения резонансной частоты. Однако в морском источнике 100 сейсмических волн возбуждающий механизм является недостаточно мощным для настройки перебором устройства на конкретную частоту, которая существенно отличается от его собственной резонансной частоты. Вместо "точной настройки" выходного сигнала устройство уже "готово к работе" (т.е. находится на своей собственной резонансной частоте).

В тех случаях, когда в настоящем документе приведена ссылка на способ, предусматривающий две или более определенных стадии, эти стадии могут осуществляться в любом порядке или одновременно (за исключением случаев, в которых контекст исключает такую возможность), и способ также может предусматривать одну или несколько других стадий, которые осуществляют перед любой из определенных стадий, между двумя из определенных стадий или после всех определенных стадий (за исключением

случаев, в которых контекст исключает такую возможность).

Указанные далее заявки на патент и патенты включены в настоящее описание посредством ссылки во всей полноте в отношении тех частей, которые перечислены и с определенной целью изложены выше.

Заявка США № 12/995763, озаглавленная "Marine Seismic Source", которая была подана 17 июня 2009 г. на имя заявителей Мартина Томпсона (Martin Thompson) и Марка Ф. Л. Харпера (Mark F. L. Harper) и опубликована 14 апреля 2011 г. под номером публикации США № 2011/0085422, и в общем приведенная в данном документе для объяснения принципов конструкции и работы приведенного в качестве примера морского источника сейсмических волн, работающего в режиме качающейся низкой частоты, изображенного на фиг. 1.

Заявка № 13/327524, озаглавленная "Seismic Acquisition Using Narrowband Seismic Sources", которая была подана 15 декабря 2011 г. на имя заявителей Джозефа Э. Деллинджера (Joseph A. Dellinger) et al. и опубликована 21 июня 2012 г. под номером публикации США № 2012/0155217, и в общем приведенная в данном документе для объяснения принципов регистрации данных.

Заявка № 61/894729, которая была подана 23 октября 2013 г., и заявка № 14/515223, которая была подана 15 октября 2014 г., под названием "System and Method for Resonator Frequency Control by Active Squeeze Position Feedback".

В случае несоответствия любого патента, патентной заявки или документа, включенного в настоящее описание посредством ссылки, с настоящим изобретением настоящее описание имеет приоритет.

Другие варианты осуществления настоящего изобретения будут понятны специалистам в области техники настоящего изобретения на основе описания и осуществления настоящего изобретения, раскрытых в настоящем документе. Предполагается, что описание и примеры являются лишь наглядными и находятся в пределах объема настоящего изобретения, определенного в формуле настоящего изобретения.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ управления траекторией морского резонансного источника сейсмических волн, включающий управление посредством системы управления, во время работы траекторией исполнительного механизма морского резонансного источника сейсмических волн, причем управление траекторией включает

управление номинальной частотой морского резонансного источника сейсмических волн, включающее

расчет собственной частоты морского резонансного источника сейсмических волн;

выведение погрешности частоты в виде разности между расчетной собственной частотой источника и целевым значением и

сведение погрешности частоты к нулю; и

управление траекторией движения движущейся части генератора колебаний морского резонансного источника сейсмических волн после управления номинальной частотой резонансного источника сейсмических волн, причем траектория движения движущейся части включает положение, скорость и ускорение движущейся части генератора колебаний, причем управление траекторией движения движущейся части включает

определение траектории движения движущейся части генератора колебаний, причем определение траектории движения включает считывание скорости движущейся части генератора колебаний;

выведение погрешности траектории движения в виде разности между требуемой траекторией движения движущейся части генератора колебаний и определенной траекторией движения и

сведение погрешности траектории движения к нулю посредством приложения корректирующего траекторию усилия;

расчет погрешности частоты на основании значения приложенного корректирующего траекторию усилия и использование рассчитанной погрешности частоты для расчета собственной частоты морского резонансного источника сейсмических волн.

2. Способ по п.1, в котором расчет собственной частоты источника включает считывание параметра, связанного с номинальной частотой источника, и в котором сведение погрешности частоты к нулю включает изменение сигнала управления частотой до номинального.

3. Способ по п.1, в котором сведение погрешности траектории движения к нулю включает

изменение сигнала, определяющего считанный параметр скорости; и

повторение управления траекторией.

4. Способ по п.1, в котором сведение погрешности траектории движения к нулю включает

изменение сигнала, определяющего траекторию движения; и

повторение управления траекторией.

5. Способ по п.1, дополнительно включающий управление стабилизацией частоты.

6. Морской резонансный источник сейсмических волн, содержащий герметичную для жидкости камеру в поршне;

исполнительный механизм, расположенный в герметичной для жидкости камере и соединенный с поршнем, образующим часть герметичной для жидкости камеры, причем исполнительный механизм выполнен с возможностью создавать во время работы резонанс на собственной резонансной частоте; и

систему управления, расположенную внутри герметичной для жидкости камеры, выполненную с возможностью управления во время работы траекторией исполнительного механизма, причем управление траекторией содержит

управление номинальной частотой морского резонансного источника сейсмических волн, включающее

расчет собственной частоты морского резонансного источника сейсмических волн;

выведение погрешности частоты в виде разности между расчетной собственной частотой источника и требуемым значением и

сведение погрешности частоты к нулю; и

управление траекторией движения движущейся части генератора колебаний морского резонансного источника сейсмических волн после управления номинальной частотой резонансного источника сейсмических волн, причем траектория движения движущейся части включает положение, скорость и ускорение движущейся части генератора колебаний, причем управление траекторией движущейся части включает

определение траектории движения движущейся части генератора колебаний, причем определение траектории движения включает считывание скорости движущейся части генератора колебаний;

выведение погрешности траектории движения в виде разности между требуемой траекторией движения движущейся части генератора колебаний и определенной траекторией движения и

сведение погрешности траектории движения к нулю посредством приложения корректирующего траекторию усилия; и

расчет погрешности частоты на основании значения приложенного корректирующего траекторию усилия и использование рассчитанной погрешности частоты для расчета собственной частоты морского резонансного источника сейсмических волн.

7. Морской резонансный источник сейсмических волн по п.6, в котором расчет собственной частоты источника включает считывание параметра, связанного с номинальной частотой источника.

8. Морской резонансный источник сейсмических волн по п.7, в котором сведение погрешности частоты к нулю включает

изменение сигнала, определяющего считанный параметр; и

повторение управления номинальной частотой источника.

9. Морской резонансный источник сейсмических волн по п.7, в котором сведение погрешности частоты к нулю включает

изменение возбуждающего сигнала до номинального и

повторение управления номинальной частотой источника.

10. Морской резонансный источник сейсмических волн по п.6, в котором сведение погрешности траектории движения к нулю включает

изменение сигнала, определяющего считанный параметр скорости; и

повторение управления траекторией.

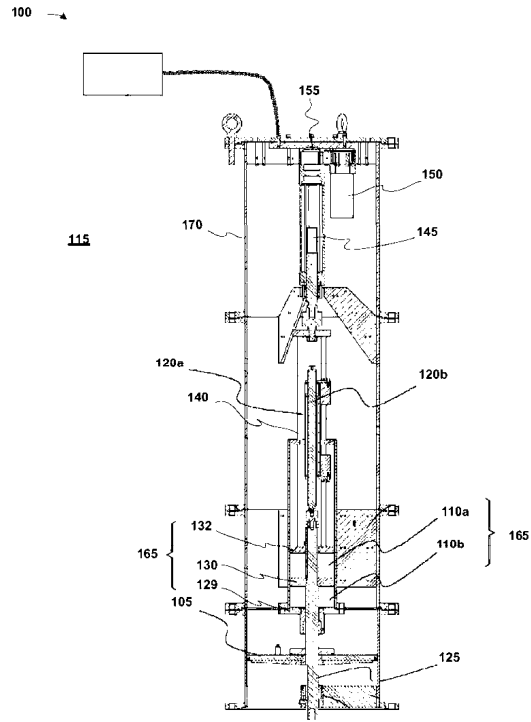
11. Морской резонансный источник сейсмических волн по п.6, в котором сведение погрешности траектории движения к нулю включает

изменение сигнала, определяющего траекторию движения; и

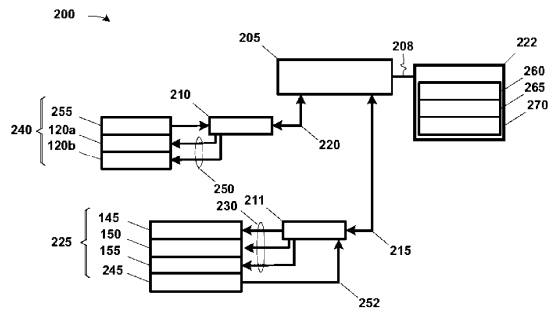
повторение управления траекторией.

12. Морской резонансный источник сейсмических волн по п.6, в котором система управления дополнительно осуществляет управление стабилизацией частоты.

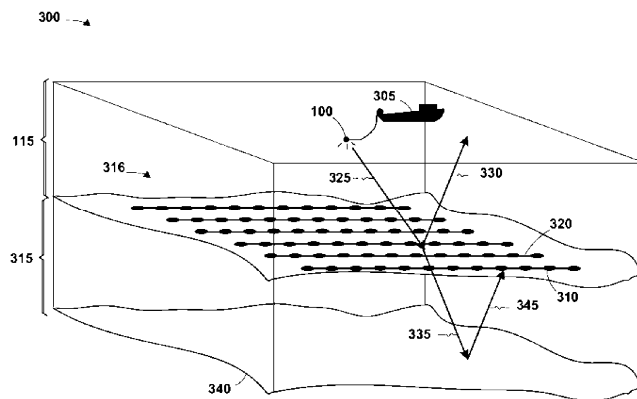




Фиг. 1

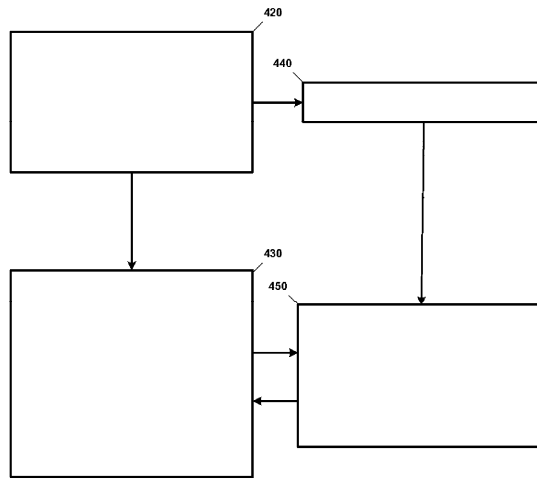


Фиг. 2



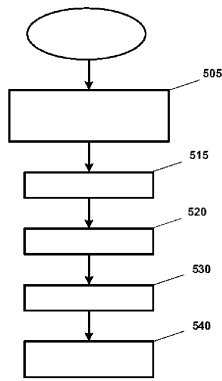
Фиг. 3

400 →



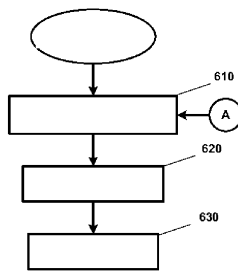
Фиг. 4

500 →



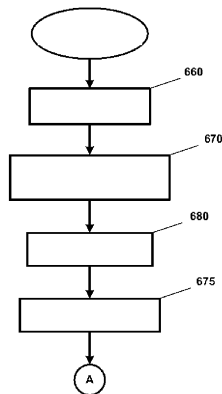
Фиг. 5

600 →

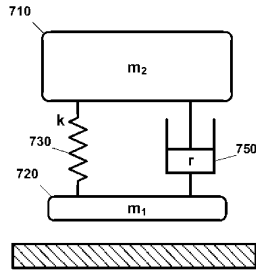


Фиг. 6А

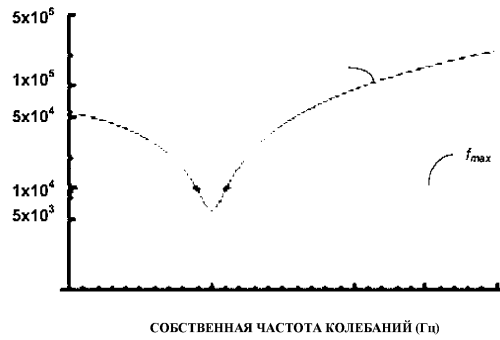
650 →



Фиг. 6В

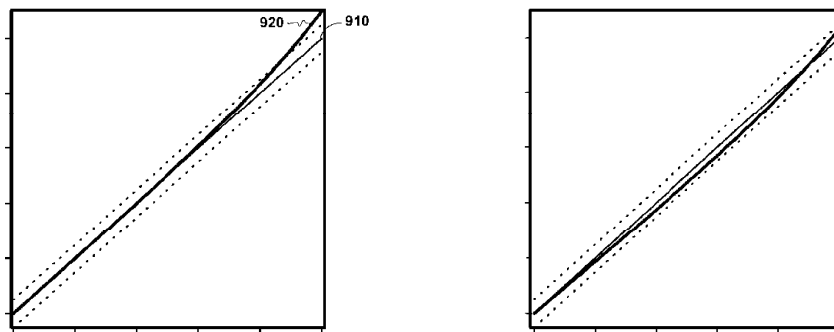


Фиг. 7

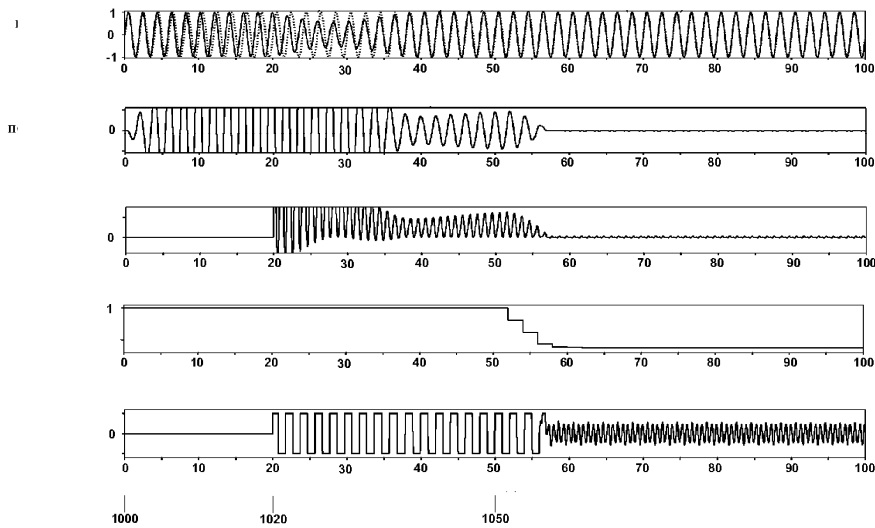


Фиг. 8

УС



Фиг. 9



Фиг. 10

