



УКРАЇНА

(19) UA (11) 91465 (13) C2  
(51) МПК (2009)  
F04D 27/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) АКУСТИЧНИЙ СПОСІБ КОНТРОЛЮ ПЕРЕДПОМПАЖНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА

1

2

(21) а200907520

(22) 17.07.2009

(24) 26.07.2010

(46) 26.07.2010, Бюл.№ 14, 2010 р.

(72) БЕККЕР МИХАЙЛО ВІКТОРОВИЧ, ШИМКО РОМАН ЯРОСЛАВОВИЧ, СЕМЕНЦОВ ГЕОРГІЙ НИКИФОРОВИЧ, БЛЯУТ ЮРІЙ ЄВСТАХОВИЧ, ГІРЕНКО СЕРГІЙ ГЕНАДІЙОВИЧ, ПЕТЕШ МИКОЛА ОРЕСТОВИЧ, СУКАЧ ОЛЕКСІЙ ВАСИЛЬОВИЧ, РЕПЕТА АНДРІЙ ФЕДОРОВИЧ

(73) ІВАНО-ФРАКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

(56) UA 83304 C2, 25.06.2008

UA 88532 C2, 26.10.2009

UA 89302 C2, 11.01.2010

US 6298718 B1, 09.19.2001

RU 2136972 C1, 10.09.1999

US 2008/0101914 A1, 01.05.2008

US 5161408 A, 10.11.1992

П'янило Я.Д. Аналітико-числове моделювання масопереносу в газопроводах та природних пористих середовищах, Автореф., 01.05.02- "Математичне моделювання та обчислювальні методи", д-р.тех.наук, Львів, 18.05.2007

(57) Акустичний спосіб контролю передпомпажного стану відцентрового нагнітача, який полягає в то-

му, що акустичні коливання, генеровані контрольованим об'єктом, перетворюють у відповідні аналого-цифрові сигнали і подають їх в систему обробки для отримання характеристик процесів, які генеруються самим вимірюваним об'єктом, який **відрізняється** тим, що для отримання акустичних сигналів, на робочих поверхнях нагнітача - на вхідному і вихідному конфузорах, встановлюють акустичні сенсори, які формують вихідний сигнал в аналого-цифровій формі, пропорційній амплітуді акустичних коливань, який через систему автоматичного керування надходить по оптоволоконному каналу передачі даних на робочу станцію оператора, де в автоматичному режимі здійснюється алгоритмічна обробка отриманих від акустичних сенсорів сигналів, після чого, шляхом аналізу та співставлення отриманих сигналів відносно відомих наперед критеріїв оцінки виникнення передпомпажних коливань, системою формується попереджувальний сигнал про початок помпажних явищ, який надходить в систему автоматичного керування для формування сигналу керуючої дії на виконавчі механізми, що забезпечують виведення газоперекачувального агрегату в зону стійкої роботи.

Винахід належить до галузі транспортування газу, а саме - до способів виявлення та контролю передпомпажних явищ відцентрових нагнітачів. Може використовуватись на докачуючих компресорних станціях (ДКС) для забезпечення надійного сезонного відбору газу з підземних сховищ (ПСГ) в систему магістральних газопроводів та закачування газу в ПСГ в літній період формування запасів газу. Призначений для захисту агрегатів від аварій.

Сезон відбору газу з ПСГ із застосуванням газоперекачувальних агрегатів (ГПА) починається, коли пластовий тиск стає недостатнім для подавання газу в магістральний трубопровід за рахунок перепаду тисків "самопливом". В цьому випадку вводять в експлуатацію одну або декілька ДКС з метою забезпечення достатньої об'ємної продук-

тивності та тиску природного газу в трубопровідну систему.

При відборі газу з ПСГ режим роботи ДКС характеризується безперервним зниженням тиску на вході в компресорні агрегати, в зв'язку з чим підвищується їх потужність, а це призводить до втрати газодинамічної стійкості роботи нагнітальних машин.

Газодинамічна стійкість роботи нагнітачів - одна з головних умов їх надійності. Режим нестійкості який носить назву "помпаж" викликає інтенсивні коливання газу в системі, здатні довести до аварії або до значного зниження надійності і ресурсу турбомашини. Для явища помпажу характерні зміни параметрів потоку газу на лопатях робочого колеса нагнітача. Із збільшенням опору мережі робоча точка нагнітача пересувається по характеристиці вліво до межі помпажу. Робочому колесу

(13) C2

(11) 91465

(19) UA

недостатньо енергії для проштовхування газу в трубовід нагнітача і кількість газу буде зменшуватись. На окремих лопатях робочого колеса починається зрив потоку газу, що призводить до пульсації газу в цьому потоці, які відповідні передпомпажним коливанням. Параметри (частота) передпомпажних коливань співпадають з параметрами (частотою) коливань газу в стаціонарному режимі роботи нагнітача, що призводить до появи резонансу, при якому навіть безмежно мала по величині принуджуюча сила (збурююча) викликає значне збільшення амплітуди коливань. Коливання, розповсюджуючись в повітрі, створюють пружні хвилі, які лежать в області інфразвуковим частот (менше 16 Гц).

Тривалість передпомпажного стану вираховується десятками хвилин, а перехід в зону помпажу відбувається за доли секунди. При збільшенні кількості зривних зон потоку, ними охоплюється більше лопатей, які не працюють. Зривні зони виходять за межі робочого колеса і досягають дифузора та конфузора нагнітача. Задіюються об'єми газу, як в області робочого колеса, так і самому нагнітачі. Коливання в потоці газу досягають 50% і мають гармонійний характер. Цей режим роботи нагнітача називають "м'який помпаж". Розвиток і збільшення зривних зон призводить до охоплення ближніх областей об'язки нагнітача, при цьому частота коливань збільшується, а потужність зростає. Форма коливань наближається до гармонійних в області інфразвукових частот. Пружні хвилі з частотою менше 16Гц людським вухом не сприймаються, тому виявити їх можна тільки спецобладнанням. При цьому режимі шум, викликаний входженням нагнітача в нестійкий режим роботи, зменшується внаслідок появи інфразвукових гармонійних коливань. Загроза м'якого помпажу полягає у тому, що спочатку змін у параметрах нагнітача не відбувається, але через деякий час роботи нагнітача в такому режимі, якщо не здійснити випереджувальної дії, нагнітач може розігрітись до такого стану, що спалахне.

У випадку, коли перекачуються великі об'єми газу, що обумовлюють різке збільшення потужності коливань, і хвильовий потік охоплює не тільки нагнітач і його контур, але й магістраль зі сторони всмоктування або нагнітання, нагнітач може увійти в режим жорсткого помпажу. Механічні коливання, які при цьому виникають - вібрація, стають джерелом звуку, який складається не тільки із шумів вихрових та турбулентних потоків газу та повітря, але й з шуму вібруючих підшипників, корпусу нагнітача, трубопроводів об'язки, тощо, тобто всієї системи ДКС, на вібрацію якої передається енергія хвильового потоку газу. Пружні хвилі, які при цьому створюються, знаходяться в області ультразвукових частот.

Відомі способи, де на основі аналізу спектральних характеристик акустичних коливань контрольованого середовища, здійснюють акустичний каротаж свердловин, оцінюють статистичні характеристики газового потоку для вимірювання витрати газу, вимірюють звукові тиски високої інтенсивності в авіаційній, космічній, автомобільній галузях техніки.

Відомий спосіб акустичного контролю геометричних характеристик труб, який полягає в тому, що прямий суміщений ультразвуковий перетворювач і співвіссю з ним встановлений конусний відбивач встановлюють усередині по вісі контрольованої труби, заповненої рідиною. В осьовому напрямку збуджують ультразвукові коливання, приймають відбиті від стінок труби сигнали, та за розміщенням в часі пари імпульсів, відбитих від внутрішньої та зовнішньої поверхонь труб, визначають необхідні геометричні характеристики. Відбивач виконаний у вигляді симетричних конусоподібних частин з кутом нахилу твірних 45°, з яких кожен наступний відносно попередньої зміщують у напрямку повздовжньої вісі труби на певну віддаль так, щоб відбиті від цієї частини сигнали попадали на перетворювач в часі, відмінному від часу приходу сигналів, відбитих від інших частин, та повертають на кут 360 для забезпечення сканування всього периметра труби.

Відомий спосіб дозволяє отримати при чотирьох відбивачах вісім інформаційних каналів, розділених у часі, і одного вимірювального каналу, що дозволяє з великою точністю контролювати відхилення геометричних розмірів труб при їх виготовленні (АС. СССР №61587, Бюл. №11; 07.11.2003. Спосіб акустического контролю геометрических характеристик труб).

Відомий спосіб акустичного пошуку перешкод усередині трубопроводу, що полягає у збудженні акустичних хвиль акустичним перетворювачем, одну частину хвиль з якого пропускають по робочому агенту, а другу по стінці труби, визначають час розповсюдження і швидкість хвиль у робочому агенті і тілі труби і за різницею величин співвідношень  $c_{p,a} \cdot t_{p,a}/2$  та  $c_T \cdot t_T/2$  визначають відстань від акустичного перетворювача до перешкоди за виразом

$$L = c_{p,a} \cdot t_{p,a}/2 = c_T \cdot t_T/2,$$

де L - відстань від акустичного перетворювача до перешкоди, м;

$t_{p,a}$  - час розповсюдження акустичних хвиль в робочому агенті;

$t_T$  - час розповсюдження акустичних хвиль в трубопроводі, с;

$c_{p,a}$  - швидкість розповсюдження акустичних хвиль в робочому агенті, м/с;

$c_T$  - швидкість розповсюдження акустичних хвиль в трубопроводі. (заявка На 200714646, дата подання 24.12.2007).

Спосіб дозволяє визначити місцезнаходження механічної перешкоди довільної геометричної форми в трубопроводі з робочим агентом в газоподібному або рідинному фазовому стані.

Відома система для визначення координат місця пошкодження трубопроводу (Патент України №83304, Бюл. №12; 25.06.2008). Систему використовують при газопостачанні населених пунктів для виявлення несанкціонованих врізувань до газопроводу мереж населених пунктів. На початку газопроводу встановлюють лічильник об'єму газу, п'єзодавач з аналізатором акустичного сигналу. У порожнині газопроводу встановлюють еластичний поршень з приєднаним до нього на пружних еле-

ментах металевими ударниками, які завдяки пружним елементам притискаються до внутрішніх стінок труби і ковзають по них. Під дією тиску газу поршень пересувається по газопроводу, а при наявності опору ударник ударяє по краю отвору, створюючи при цьому акустичний сигнал, який сприймається п'єзодавачем та аналізується аналізатором. За показами лічильника об'єм газу та приладів для вимірювання тиску і температури розраховують відстань від початку газопроводу до місця відрізування. Завдяки малому коефіцієнту затухання у металі акустичного сигналу від удару кульки поршня, можливо приймати та аналізувати акустичний сигнал на значній відстані.

Як і в попередніх аналогах, в цьому винаході акустичні коливання в об'єкті, який контролюється, збуджують штучно, сприймають відбиті від стінок труби сигнали і за розміщенням в часі імпульсів, відбитих від внутрішньої та зовнішньої поверхонь труб, визначають необхідні параметри об'єкта.

Найбільш близьким за функціональним призначенням до винаходу відомий акустичний спосіб вимірювання витрати та кількості газу, який ґрунтується на зміні спектральних характеристик випадкових процесів, що генеруються самим вимірюваним середовищем, перетворюються у відповідні електричні сигнали, після чого здійснюється їх трансформування в цифрові інформаційні пакети.

Для отримання спектральних характеристик випадкових процесів, що генеруються самим вимірюваним середовищем під час його переміщення, попередньо визначають їх коваріаційні функції.

Суть способу полягає в тому, що випадкові акустичні коливання, - аналогові сигнали, які генеруються контрольованим середовищем перетворюються у відповідні електричні, після чого здійснюють їх трансформування в цифрові інформаційні пакети. Для отримання спектральних характеристик цифрових інформаційних пакетів попередньо визначають їх коваріаційні функції. В результаті проведення проміжного перетворення акустичних сигналів після аналого-цифрового перетворення, отримують залежності, які використовують для вимірювання величини витрати та об'єму. Підвищення точності вимірювання та зменшення впливу зовнішніх чинників забезпечується за рахунок виділення частотних смуг, які максимально залежні від витрати контрольованого середовища і не зазнають змін при наявності інших впливів (періодична вібрація, зміна температури, наявність мікрочастинок). (Методи і прилади контролю якості, №11, 2003).

Різниця в параметрах об'єктів та фізико-хімічних властивостях середовища, які контролюються у відомому і заявленому винаходах, робить відомий спосіб неприйнятним для контролю явищ помпажу. Оскільки не враховує вібрації і хвильовий процес, який при цьому виникає, як інформативний параметр сигналізацію явища помпажу і його розвиток.

ДКС є надзвичайно складним і важливими об'єктами газотранспортної системи, які забезпечують надійний сезонний відбір з ПСГ в систему магістральних газопроводів та закачування газу в ПСГ в літній період, коли формуються запаси газу. Широке застосування ГПА в газотранспортній сис-

темі вимагає підвищення якості їх безаварійної роботи і застосування нових методів та засобів контролю їх технічних характеристик, зокрема - помпажних. Явища помпажу з'являється в тому випадку, коли ГПА не спроможні забезпечити перекачування необхідного об'єму газу через нагнітач при певних технологічних параметрах, таких як:

- підвищена ступень стиснення  $\frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}$  ;

- недостатня потужність на валу привідного газотурбінного двигуна (ГТП);

- недостатня продуктивність ПСГ.

Явище помпажу виявляється в періодичній зміні параметрів ГПА, що мають знакозмінну характеристику з циклом тривалості 1-2 сек. і наростаючу амплітуду.

На даний час контроль за настанням явищ помпажу і керуюча дія для припинення виниклого процесу здійснюється системами автоматики або вручну змінним персоналом у випадках, коли в основних технологічних параметрах, які сигналізують про факт виникнення помпажу, простежуються такі відхилення як стрибкоподібні (до 800-1000 об./хв.) зміни в обертах ГТП; розрахункова продуктивність нагнітача наближається до межі 0-100м<sup>3</sup>/год, з'являються попереджувальні сигнали від давачів вібропереміщення та осьового зсуву валу нагнітача, періодичні (1-2 Гц) звукові коливання, відчутні людським вухом.

До параметрів, що в першу чергу сигналізують про передпомпажний стан нагнітача, належать акустичні сигнали, викликані передпомпажними коливаннями газу і нагнітача, які знаходяться в області інфразвукових частот (менше 16Гц) - у випадку настання м'якого помпажу, та акустичні сигнали, які знаходяться в області ультразвукових частот (більше 20кГц) - у випадку настання жорсткого помпажу. Як одні, так і другі сигнали не сприймаються людським вухом, але їх контроль є дуже важливим, оскільки механічні коливання (вібрація), що їх викликають, є руйнівними для ГПА.

Задачою винаходу є створення акустичного способу контролю передпомпажного стану відцентрового нагнітача, який би на підставі вимірювання і контролю параметрів акустичних сигналів, що генеруються самим контрольованим нагнітачем і потоком газу при його переміщенні, дозволив своєчасно виявити зміни у формі характеристики компресора, по якій діагностувати передпомпажний стан ГПА і здійснити заходи по його усуненню. Застосування способу забезпечить максимальне завантаження агрегату за умови знаходження робочої точки характеристики нагнітача поблизу межі помпажної зони. Своєчасне виявлення передпомпажного стану ГПА дозволить зменшити кількість аварійних зупинок скоротити простої обладнання ДКС і зекономити кошти за рахунок запобігання аварійних ситуацій з руйнуванням обладнання.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що в акустичному способі контролю передпомпажного стану відцентрового нагнітача, який полягає в тому, що акустичні коливання, які генеруються контрольованим об'єктом, перетворюються у відповідні аналого-цифрові сигнали і подають їх в систему обробки для отримання характеристик про-

цесів, які генеруються самим вимірюваним об'єктом, згідно з винаходом для отримання акустичних сигналів, на робочих поверхнях нагнітача - на вхідному і вихідному конфузорах встановлюють акустичні сенсори, які формують вихідний сигнал в аналого-цифровій формі, пропорційній амплітуді акустичних коливань, який через систему автоматичного керування надходить по оптоволоконному каналу передачі даних на робочу станцію оператора, де в автоматичному режимі здійснюється алгоритмічна обробка отриманих від акустичних сенсорів сигналів, після чого шляхом аналізу та співставлення отриманих сигналів відносно відомих наперед критеріїв оцінки виникнення передпомпажних коливань, системою формується попереджувальний сигнал про початок помпажних явищ, який надходить в систему автоматичного керування для виробки сигналу керуючої дії на виконавчі механізми.

Перевага акустичного контролю передпомпажного стану нагнітача полягає в тому, що швидкість розповсюдження акустичних коливань неспіврозмірно більша за швидкість переміщення газів, що дозволяє визначити передпомпажний стан раніше його настання і відповідною керуючою дією забезпечити виведення ГПА в зону стійкої роботи, забезпечивши при цьому мінімальну рециркуляцію через нагнітач.

Встановлення акустичних давачів саме на вхідному і вихідному конфузорах нагнітача диктується тим, що саме в цих точках концентрується енергія зривного потоку газу, що зривається з лопатей робочого колеса і призводить до пульсацій газу в цьому потоці. Контроль за розвитком помпажних явищ в нагнітачі із використанням винаходу дозволяє спрогнозувати їх виникнення, уникнути роботи ГПА в режимі помпажу випереджувальним регулюванням.

Винахід ілюструється кресленням, де на Фіг. 1 - зображено структурну схему вимірювального каналу здійснення способу контролю; на Фіг.2 - отримані за допомогою способу акустичні сигнали, які відповідають передпомпажному стану ГПА і "жорсткому помпажу".

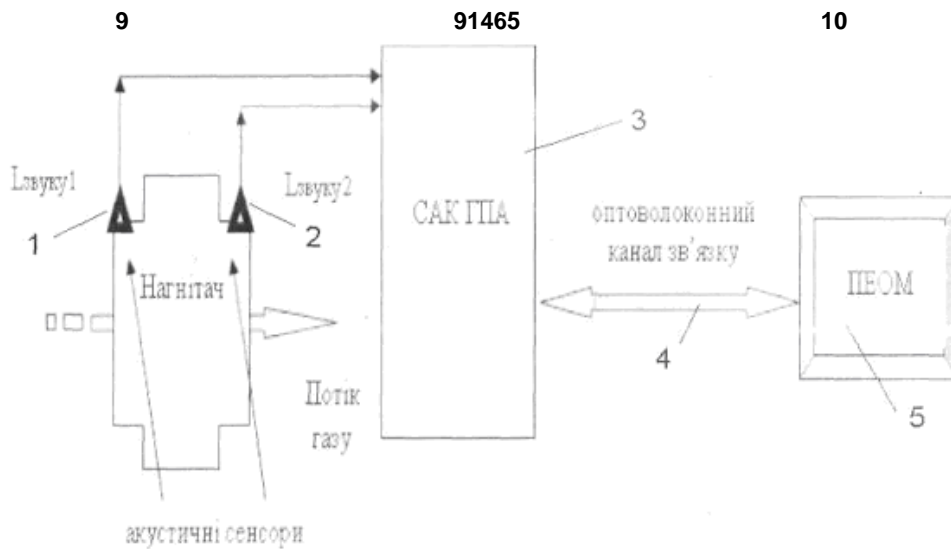
Структурна схема вимірювального каналу містить акустичні давачі (сенсори) - 1, 2, систему автоматичного керування газоперекачувального агрегату (САК ГПА) - 3, оптоволоконний канал зв'язку - 4, головний комп'ютер (робочу станцію оператора) (ПЕОМ) - 5.

Спосіб здійснюють наступним чином.

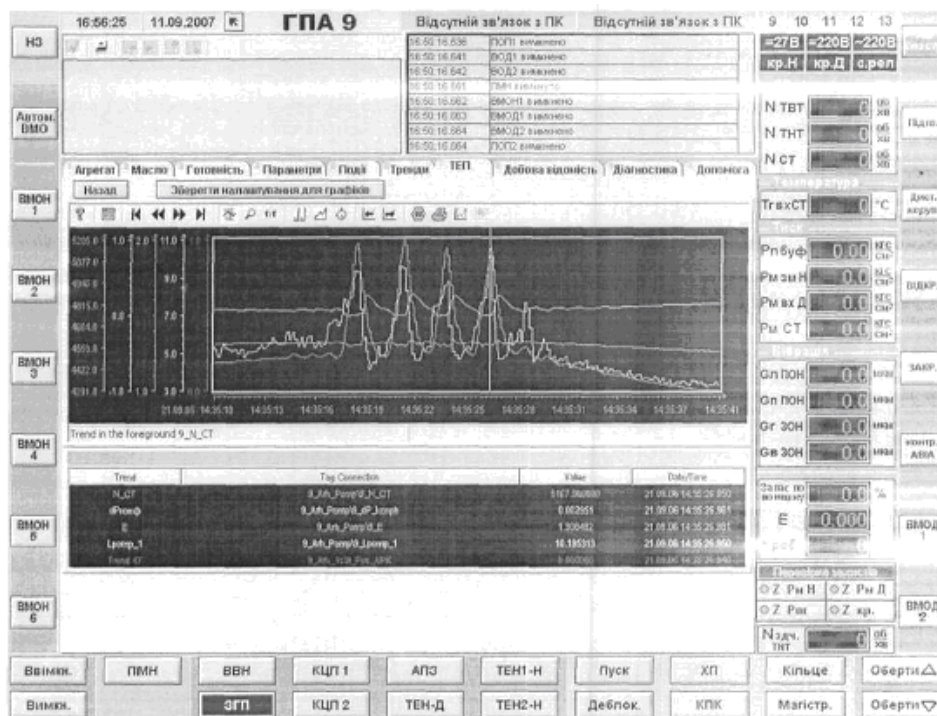
На робочих поверхнях нагнітача - на вхідному та вихідному конфузорі встановлюють акустичні давачі (сенсори) 1 та 2 з діапазоном сприйняття акустичних сигналів від 16Гц до 20кГц. Акустичні сенсори містять інтегровану систему електронних модулів, яка складається з дворівневого перетворювача акустичних коливань в вихідний сигнал та модуля живлення. Ці модулі, інтегровані в акустичний давач, дозволяють визначити рівень акустичного стану нагнітача ГПА за показниками амплітуди і характером коливань, що пропорційні вихідному аналоговому сигналу  $0,08 \div 10V$ , який формується з виходу сенсорів. Встановлення давачів на робочих поверхнях нагнітача забезпечує перетворення динамічного акустичного сигналу від пульсацій газового потоку в тілі труби до стандартного вихідного сигналу  $0,08 \div 10V$ , в якому значенню  $0,08$  відповідає непрацюючий стан ГПА без акустичних коливань, а значенню  $10V$  - максимальна амплітуда звукових коливань, які виникають при значних збуреннях газового потоку, що проходить через нагнітач. Акустичний сенсор оснащений перетворювачем, що самостійно формує вихідний сигнал, пропорційний амплітуді акустичних коливань. Сигнали з акустичних давачів надходять через САК ГПА - 3 на головний комп'ютер 5 по оптоволоконному каналу 4 передачі даних. Робоча станція оператора призначена для вироблення керуючої дії над технологічними процесами ГПА через САК ГПА.

Алгоритмічна обробка отриманих від акустичних сенсорів сигналів здійснюється в автоматичному режимі з тактом не більше 10 мілісекунд, що дозволяє миттєво реагувати на зміну стану ГПА. Шляхом аналізу та співставлення отриманих сигналів відносно відомих наперед критеріїв виникнення передпомпажних коливань, системою робиться висновок про початок помпажних явищ. Випереджувальним впливом на виконавчі механізми, такі як регулятор подачі паливного газу (дозатор газу) або рециркуляційний антипомпажний клапан вдається запобігти входженню нагнітача ГПА в стан помпажу.

За допомогою розробленого вимірювального каналу (Фіг. 1) досліджено акустичні сигнали ГПА під час передпомпажних і помпажних явищ. Приклад одного з графіків зміни акустичного сигналу в часі наведено на Фіг.2. На графіку спостерігаються коливання з різною амплітудою і частотою, які відповідають передпомпажному стану ГПА і "жорсткому" помпажу.



Фіг. 1



Фіг. 2

В описі до патенту на винахід графічні зображення та текст подаються в редакції заявника

Комп'ютерна верстка О. Гапоненко

Підписне

Тираж 28 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601