

091.7.052
i-19
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

Іванишин Володимир Петрович

4.052(043)
УДК 622.691: 621.515
i-19

КОНТРОЛЬ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин
п/мв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук
4/5

Івано-Франківськ – 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Заміховський Леонід Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
завідувач кафедри комп'ютерних технологій в системах управління
і автоматики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент,
Ігуменцев Євген Олександрович,
Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут",
м. Харків, професор кафедри приладів та методів неруйнівного контролю;

кандидат технічних наук,
Соляник Володимир Григорович,
ДП "Укртрансгаз" м. Київ, начальник управління експлуатації та
реконструкції компресорних станцій.

Провідна установа:

Вінницький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України, м. Вінниця.

Захист відбудеться " 25 " лютого 2005р. о 10 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 20.052.03 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за
адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.).

Автореферат розісланий 24 січня 2005р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, кандидат технічних наук, доцент

Дранчук М.М.



Актуальність роботи. Основним елементом компресорних станцій (КС), які забезпечують ефективне функціонування газотранспортної системи України, є газоперекачувальні агрегати (ГПА), технічний стан яких визначає режими і надійність експлуатації КС.

Об'єктивна оцінка технічного стану вузлів ГПА і агрегату в цілому може бути отримана в результаті вирішення трьох задач: контролю працездатності (запасу працездатності), пошуку дефектів і прогнозування стану. Вирішення останньої задачі дозволить проводити ремонтні роботи за фактичною потребою і, тим самим, попередити виникнення можливих аварійних ситуацій. Реалізація відмічених задач вимагає широкого впровадження методів і засобів технічної діагностики, зокрема, методів віброакустичної діагностики.

Незважаючи на широке впровадження методів і засобів контролю вібраційного стану ГПА та методів усунення вібрації, їм властиві ряд недоліків, які, як показує практика, викликають хибне спрацювання аварійної сигналізації, а підвищення вібрації призводить до вимушених пробних пусків агрегату з метою виявлення їх причин у процесі проведення діагностичних обстежень.

Тому, не дивлячись на високий рівень методів віброакустичної діагностики, стосовно ГПА, існує ряд невирішених наукових проблем, пов'язаних з розробкою методів і засобів вібраційного контролю стану як його окремих вузлів і елементів (трубопроводної об'язки - ТО, силових елементів-підшипників тощо), так і ГПА в цілому. У зв'язку з цим їх вирішення є актуальною задачею, яка має важливе народно господарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм по розвитку нафтогазового комплексу України і базується на результатах держбюджетної науково-дослідної роботи "Діагностування стану технічних об'єктів на основі обмеженої інформації про переміщення точок їх поверхні", частина науково-дослідної теми Д 6-Ф, номер держреєстрації в УкрНДІНТІ № 0198U005799, що входить у координаційний план Міністерства освіти і науки "Наукові основи розробки нових технологій видобутку нафти і газу, газопромислового обладнання, поглибленої переробки нафти і газу з метою отримання високоякісних моторних палив, мастильних матеріалів, допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини", а також науково-дослідної роботи "Розробка методики і автоматичної мікропроцесорної системи діагностування силових елементів ГПА", договір №246/99 від 5.03.1999р. з УМГ "Прикарпаттрансгаз".

Мета роботи. Забезпечення більш повного використання ресурсу, закладеного в ГПА, включаючи ТО, та підвищення ефективності його експлуатації за рахунок оперативної і вірогідної інформації про фактичний технічний стан, який визначається розробленими методом вібраційного контролю та стратегією оптимі-

Для досягнення поста



as1052

зачів на корпусі ГПА.
и наступні задачі:

- проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку методів і засобів діагностування ГПА;
- провести теоретико-експериментальні дослідження методу вібраційного контролю ТО ГПА;
- розробити методичне, технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень вібраційного стану ГПА;
- розробити стратегію оптимального розташування вібродавачів на корпусі ГПА для контролю його вібростану;
- вдосконалити метод обробки діагностичного параметру вібраційного стану ГПА;
- розробити систему контролю вібраційного стану ГПА і її програмного забезпечення та програмного забезпечення методики підбалансування роторів ГПА.

Об'єкт дослідження – ГПА з ТО, в процесі експлуатації якого виникають дефекти, що призводять як до зміни його вібраційного стану і, відповідно, до зниження ефективності роботи ГПА, так і подальшого виникнення відмов.

Предметом дослідження є розробка методу контролю вібраційного стану ГПА з ТО та стратегії оптимального розташування вібродавачів на його корпусі.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися: теоретичні положення аналітичної геометрії, диференціальної геометрії, методи теорії пружності, чисельні методи, методи математичного моделювання, методи обробки сигналів, спектрально-кореляційного аналізу, основні положення віброакустичної діагностики машин і механізмів.

При розробці технічних засобів використовувалися методи схеми- та системотехніки.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблена математична модель процесу деформування ТО ГПА (на прикладі нагнітального патрубку), в основу якої покладено гіпотезу про характер деформування його тороїдальної ділянки при зміні вібраційного стану ГПА, згідно з якою, після деформування ділянка залишається тороподібною. При цьому змінюється радіус кривизни осі та величина кута, під яким видно ділянку з центру кола, що визначає вісь ділянки. Останнє дозволяє одержати значення механічних напружень (осьових та зсувних), що діють на ділянку, та їх розподіл по об'єму нагнітального патрубка за результатами оцінки вібраційного стану ГПА;
- вперше при параметричному представленні деформованої осі нагнітального патрубка використано інтерполяційні многочлени Ерміта різних степенів, причому вісь першої прямолінійної та прилеглої до неї конічної ділянки моделюється одним многочленом, що дозволяє встановити значення максимальних напружень, які виникають в матеріалі саме конічної ділянки нагнітального патрубка. При цьому отриманий результат підтверджується статистичними даними про виникнення відмов даного елемента конструкції ГПА;

– дістав подальший розвиток метод обробки вібраційних сигналів з контрольних точок ГПА на основі “wavelet” –перетворення, використання якого дозволило отримати оперативну і вірогідну інформацію про вібраційний стан ГПА;

– вперше розроблено метод оптимального розташування вібродавачів на корпусі ГПА на основі вдосконалення двовимірної кореляційної матриці, використання якого дозволяє без втрат інформації про вібраційний стан ГПА зменшити кількість вібродавачів, що вивільнює обчислювальні ресурси системи та прискорює процес обробки віброакустичної інформації в режимі реального часу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

– алгоритмів визначення НДС трубопровідної об’язки ГПА за результатами контролю її вібраційного стану, використання яких дозволяє прогнозувати момент виникнення аварійних ситуацій, пов’язаних з відмовою елементів ТО;

– алгоритму фільтрації вібраційних сигналів на основі “wavelet”–перетворення, реалізація якого дозволяє підвищити точність визначення критерію вібраційного стану ГПА;

– стаціонарної системи контролю вібраційного стану ГПА, використання якої дозволяє отримувати оперативну і вірогідну інформацію про фактичний технічний стан ГПА та проводити ремонтні роботи за потребою, а не у визначені системою ППР терміни;

– програмного забезпечення методики підбалансування роторів ГПА на основі отриманої інформації про його вібростан, що дозволяє зекономити час та матеріальні витрати, при забезпеченні необхідної точності розрахунків мас зрівноважуючого вантажу та графічного представлення місця його установки.

Розроблені методика кількісної оцінки НДС трубопровідної об’язки ГПА за результатами контролю його вібраційного стану; стратегія оптимального розташування вібродавачів на корпусі ГПА; система контролю вібраційного стану ГПА та програмне забезпечення методики балансування роторів ГПА, як складова частина прикладного програмного забезпечення системи контролю, пройшли промислову апробацію на ГТК-10-4 №3, 4 і 7 Долинського ЛВУМГ. Розроблена система контролю стану ГПА стаціонарно встановлена на ГТК-10-4 №9 у лютому 2003 року і продовжує використовуватися.

Методика кількісної оцінки НДС трубопровідної об’язки ГПА використана в Долинському ЛВУМГ при розробці заходів по підвищенню надійності експлуатації нагнітального патрубку головного масляного насоса ГТК-10-4, а також при проектуванні конфігурації аналогічного патрубка з демпфером коливань (сильфоном) для ГПА Ц-16С.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін “Основи теорії надійності і технічної діагностики систем”, “Методи і засоби діагностування об’єктів нафтогазового комплексу”, “Проектування

систем діагностування”, які читаються студентам спеціальності 7.091401 – “Системи управління та автоматики”.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Проведено моделювання процесу коливання елементів конструкції ГПА на експериментальних даних [1], розроблена математична модель вібраційного стану ТО ГПА [2], проведено моделювання процесу деформування елементів конструкції ГПА під дією вібраційних навантажень [3].

У роботах, опублікованих у співавторстві, здійснена постановка задачі дослідження параметрів вібрації ГПА [4], визначені реальні траєкторії кривих, отриманих в процесі вимірювання вібрації вузлів ГПА [5], визначено НДС трубопроводів за даними внутрітрубною інспекції [6] та проведена корекція математичної моделі на основі отриманих експериментальних даних [7], розроблена структурна схема системи контролю вібростану ГПА [8] і її програмного забезпечення [9], та проведено його налагодження. Автор приймав безпосередню участь у проведенні промислових досліджень і обробці експериментальних даних.

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XV, XVI, XVII, XVIII і XIX Міжнародних міжвузівських школах-семінарах “Методи і засоби технічної діагностики” (м. Йошкар-Ола (Росія)–1998, 2000, 2002р.р., м. Івано-Франківськ – 1999, 2001, 2003 р.), 9-й Міжнародній науково-технічній конференції “Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання”, (м. Суми, 1999р.), III-му Краківському симпозиумі “Комп’ютерні системи і засоби в науці, промисловості і транспорті”, (м. Закопане, 1999р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Надійність машин та прогнозування їх ресурсу”, (м. Івано-Франківськ, 2000р.), 5-му і 6-му Міжнародних симпозиумах “Неруйнівний контроль та діагностування в медицині та техніці”, (м. Ньюпорт-Біч, США, 2000-2001р.р.), 4-й національній науково-технічній конференції і виставці “Неруйнівний контроль і технічна діагностика” (м. Київ, 2003р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, з них три одноособові, а 5 опубліковано у фахових журналах.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, висновків, , викладених на 142 сторінках тексту, 63 рисунків, 8 таблиць, списку використаних джерел, що містить 137 найменувань, та 5 додатків на 38 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми дисертації, сформульовано мету та визначено завдання дослідження, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

У першому розділі аналізується сучасний стан проблеми контролю вібраційного стану ГПА та його ТО. Розглянуто питання нормування вібрації ГПА та її вплив на розвиток дефектів ГПА, проведено аналіз методів і технічних засобів вібродіагностування ГПА, а також проаналізовані дослідження, пов'язані з оцінкою впливу вібрації на НДС трубопровідної обв'язки ГПА. В результаті проведеного аналізу встановлено, що сьогодні нормативними документами загальний вібраційний стан ГПА в цілому визначається рівнем вібрації в 34-36 штатних точках агрегату. При цьому їх кількість і вибір місця не обґрунтовується. Останнє не дозволяє розробити стаціонарну систему контролю вібростану ГПА, оскільки така кількість давачів 34 з врахуванням трьох напрямків контролю вібрації по кожному вимагають 102 каналів передачі інформації з подальшою їх обробкою. При цьому нормування вібрації за загальним рівнем в широкій смузі частотного спектру в кожній із точок є недосконалим з точки зору контролю працездатності ГПА. Крім того, сьогодні відсутні методи контролю вібростану ТО і визначення через нього НДС з метою виявлення найбільш небезпечних, з точки зору подальшої відмови, її ділянок, а конструктивні особливості ГПА призводять у процесі його експлуатації до накладання вібраційних сигналів від розташованих поряд джерел вібрації і занулення корисних сигналів, що обумовлює необхідність їх фільтрації.

На підставі проведеного аналізу сучасного стану проблеми сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено математичну модель процесу деформування ТО ГПА, на прикладі її основного елемента – нагнітального патрубку головного масляного насоса, обґрунтовано вибір кількості вібродавачів та місце їх установки на об'єкті дослідження, проведено оцінку НДС трубопровідної обв'язки ГПА за результатами контролю його вібраційного стану.

Елемент обв'язки ГПА в початковий момент часу моделюється як циліндричне тіло з криволінійною віссю та змінною формою поперечного перерізу, що поділене на 6 ділянок (I, II, III, IV, V, VI, (рис.1), кожна з яких має наступну геометричну конфігурацію:

Ділянки I, IV та VI є прямолінійними циліндричними тілами з відомими геометричними характеристиками: довжиною L , зовнішнім та внутрішнім радіусами – R_1 , R_2 . Для їх параметричного подання використовується циліндрична система координат.

Ділянка II є конічним циліндричним тілом (з відомими геометричними характеристиками L , R_M , R_B), для параметризації якої використовується наступна система координат:

$$\vec{r}_0 = \begin{cases} x = S & S \in [S_0; S_1] \\ y = \rho(S, r) \cos \varphi & \varphi \in [0; 2\pi] \\ z = \rho(S, r) \sin \varphi & r \in [0; \delta], \end{cases} \quad (1)$$

де S_0 та S_1 – поздовжня координата початкової та кінцевої точки осі ділянки;
 δ – товщина стінки.

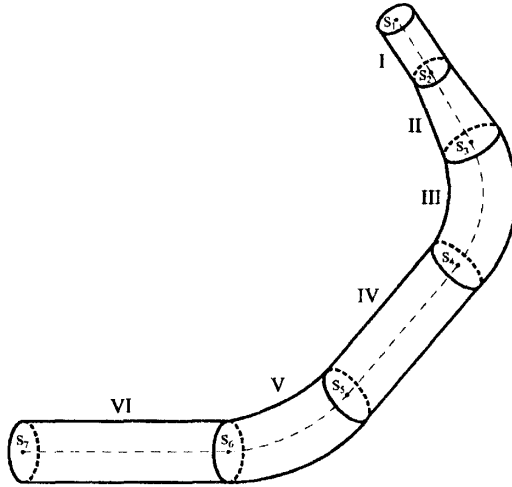


Рис. 1.– Елемент трубопровідної обв'язки ГПА

Функція $\rho(S, r)$ задається наступним чином:

$$\rho(S, r) = \frac{R_B - R_M}{S_1 - S_0} S + \frac{R_M S_1 - R_B S_0}{S_1 - S_0} + r, \quad (2)$$

де R_M та R_B – внутрішній радіус початкової та кінцевої точки кінчної ділянки.

Ділянки III та V є тороподібними ділянками, для їх параметризації використовується тороїдальна система координат.

Після деформування ділянки параметричне подання ділянки задається наступним чином:

Для ділянки III, V:

$$\vec{r} = \begin{cases} x = (R_k^1 + r \cos \varphi) \cos \theta & \varphi \in [0; 2\pi], \\ y = (R_k^1 + r \cos \varphi) \sin \theta & r \in [R_1^i, R_2^i], \quad i = 3, 5, \\ z = r \sin \varphi & \theta \in [\varphi_0^i; \varphi_1^i]. \end{cases} \quad (3)$$

при цьому параметри $\tilde{\varphi}_0^i, \tilde{\varphi}_1^i; R_1^i; R_2^i$ $i=3,5$ визначаються з урахуванням допущення про те, що тороподібні ділянки після деформації зберігають форму тора зі змішеними характеристиками – радіусом кривизни осі та кутом тороїдальності, які визначаються з використанням даних про вібропереміщення точок за відомими методами аналітичної геометрії;

для ділянки II параметричне подання задається у вигляді:

$$\vec{r} = \begin{cases} x = S + (\alpha_n^e(S) \sin \varphi + \alpha_b^e(S) \cos \varphi) \rho(S, r) \\ y = y(S) + (\beta_n^e(S) \sin \varphi + \beta_b^e(S) \cos \varphi) \rho(S, r) \\ z = z(S) + (\gamma_n^e(S) \sin \varphi + \gamma_b^e(S) \cos \varphi) \rho(S, r). \end{cases} \quad (4)$$

$$S \in [S_0^1; S_1^1]; \quad \varphi \in [0; 2\pi];$$

$$\rho(S, r) = \frac{R_B^1 - R_M^1}{S_1^1 - S_0^1} S + \frac{R_M^1 S_1^1 - R_M^1 S_0^1}{S_1^1 - S_0^1} + r, \quad (5)$$

де $r \in [0, \delta]$, δ – товщина стінки;

R_B^1, R_M^1 – внутрішній радіус початкової та кінцевої точки кінцевої ділянки після деформації;

$\vec{r}\{S; y(S); z(S)\}$ – радіус-вектор деформованої осі ділянки II;

$\vec{n}\{\alpha_n^e(S); \beta_n^e(S); \gamma_n^e(S)\}$ – компоненти одиничного вектора нормалі до осі ділянки II;

$\vec{b}\{\alpha_b^e(S); \beta_b^e(S); \gamma_b^e(S)\}$ – компоненти одиничного вектора бінормалі до осі ділянки II. Вектори нормалі та бінормалі визначаються з використанням відомих методів диференціальної геометрії.

Параметричне подання ділянок I, IV, VI одержується з урахуванням даних про деформацію осі кожного досліджуваного сектору, від двох давачів, розташованих на границях сектора. Загальний вигляд параметричного подання вказаних ділянок записується у вигляді:

$$\vec{r} = \begin{cases} x = S + (\alpha_n^e(S) \sin \varphi + \alpha_b^e(S) \cos \varphi) \rho(S, \varphi, r) \\ y = y(S) + (\beta_n^e(S) \sin \varphi + \beta_b^e(S) \cos \varphi) \rho(S, \varphi, r) \\ z = z(S) + (\gamma_n^e(S) \sin \varphi + \gamma_b^e(S) \cos \varphi) \rho(S, \varphi, r). \end{cases} \quad (6)$$

$$S \in [S_i^1; S_{i+1}^1], \quad i = 1; 4; 6, \quad \varphi \in [0; 2\pi].$$

де $\rho(S, \varphi, r)$ – функція, що задає закон зміни радіуса патрубку.

При побудові $\bar{r}(S; y(S); z(s))$ для ділянок IV та VI використовуються допущення, що для даних ділянок виконуються умови:

$$y(S_0) = y_0; \quad y'(S_0) = y_1; \quad y(S_1) = y_2; \quad y'(S_1) = y_3. \quad (7)$$

За вказаними умовами будуватиметься многочлен Ерміта третього степеня.

На основі викладених міркувань стосовно відтворення просторової конфігурації патрубку в початковий та контрольний момент часу, визначено, що загальна кількість давачів, необхідна для одержання адекватної інформації про його деформування, дорівнює 9, що є достатнім за умов застосування обраного математичного апарата. При моделюванні процесу деформування тороподібних ділянок використовувалися 3 давачі, оскільки в допущенні, що після деформації вісь цієї ділянки залишається лінією з постійним радіусом кривини, для її відтворення необхідно задати 3 точки, які лежать на цьому колі.

Розрахунок НДС елементів ТО ГПА проводився в рамках моделі пружньо-деформованого тіла за відомими значеннями вібропереміщень точок досліджуваних ділянок. Результати розрахунків наведено в табл.1, в якій подано осереднені значення вібропереміщень для кожної з ділянок по трьом координатам x , y , z , а також значення максимальних осьових σ_{ii} та зсувних σ_{ij} , $i \neq j$ напружень, де i, j – індекси відповідних криволінійних координат для кожної ділянки.

Таблиця 1

Результати розрахунку НДС елементів трубопровідної обв'язки ГПА

№ діл.	Осереднені вібропереміщ., мкм			Максимальні напруження, МПа				
	S_x	S_y	S_z	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{13}
1	10.78	18.845	2.305	145.53	62.31	0.276	41.57	1.387
2	7.365	13.62	1.005	306.98	144.11	0.519	107.36	3.217
3	6.36	6.33	4.136	0.612	6.786	0.043	0	0
4	5.245	3.811	7.475	231.77	99.17	0.627	65.94	2.631
5	4.23	12.056	4.89	1.814	9.289	0.059	0	0
6	3.095	10.052	3.909	236.16	102.22	0.645	68.27	2.711

Як видно з табл.1 небезпечною, з точки зору розвитку можливих дефектів є кінчна ділянка, оскільки напруження більші 200 МПа, які циклічно діють на елемент конструкції, можуть призвести до росту розмірів дефектів та подальшого руйнування патрубку.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням вібраційного стану ГПА. Проведена розробка технічного забезпечення експериментальних досліджень – системи збору і обробки віброакустичної інформації, основу якої складає – тривісний давач типу AP-21 з диференційним підсилювачем на базі операційного підсилювача АД 745 фірми Analog Devices, який має низький рівень власних шумів та високу лінійність, під'єднаних до АЦП звукової карти ПК типу Note book. Останній виконує роль пристрою зберігання, обробки та представлення записаних даних.

Використання вібродавача AP 21 з магнітним вузлом кріплення та ПК, дозволяє отримувати оперативну і вірогідну інформацію про вібраційний стан ГПА в будь-якій його точці, враховуючи трубопровідну обв'язку.

При записі вібросигналів з давача застосовувався програмний продукт Wavelab 3.0, а при їх обробці – спеціально розроблене для роботи з вібраційними сигналами програмне забезпечення, яке має широкі можливості по перетворенню, фільтрації та аналізу частотних спектрів записаних вибірок сигналів.

При вимірюванні вібрації 3-го опорного підшипника, розташованого на валу ротора ТНТ (рис.4) виникали значні труднощі, обумовлені високою температурою (до 400°C). Тому для отримання вірогідної інформації про його стан був проведений експеримент, у процесі якого паралельно знімалася інформація з штатно встановленого вібродавача типу MV-39 ($t_{\max} = 400^{\circ}C$) та AP-21, закріпленого на площадці спеціального кронштейну над термозахисним кожухом. Після чого розраховувався коефіцієнт передачі.

Це, як показали проведені розрахунки, дозволяє отримати інформацію про стан 3-го підшипника з достатньою для інженерних розрахунків 16.0 % точністю.

З метою одержання вірогідної інформації про вібраційний стан ГПА запропоновано:

- проводити фільтрацію вібраційних процесів від випадкових шумів та їх розклад на низько- та високочастотну складові на основі використання wavelet-перетворень, зокрема алгоритму Mallat algorithm – швидкого wavelet-перетворення. Останній дає змогу в реальному часі проводити аналіз сигналу, його розділення на складові та відтворення за коефіцієнтами. Алгоритм реалізується в програмному пакеті Matlab.

Структурна схема моделі Mallat algorithm приведена на рис.2;

- проводити фільтрацію та подальший розрахунок середньоквадратичного значення віброшвидкості (ефективна віброшвидкість $-v_{\text{еф}}$), яка є критерієм оцінки вібростану не в широкій смузі спектру, а у найбільш інформативних для кожної контрольної точки, смугах.

Останнє дозволяє більш точно оцінити вібростан, оскільки $U_{\text{еф}}$ для визначених смуг буде дещо більшим. Це призведе до того, що стан ГПА реально можна буде класифікувати, як “хороший”, в той час як за прийнятою методикою визначення $U_{\text{еф}}$ він буде вважатися “відмінним”.

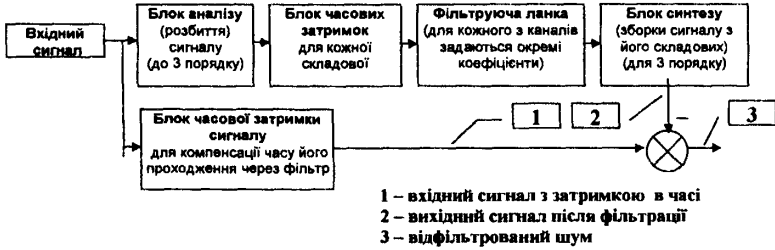


Рис.2 Блок-схема процедури фільтрації вібраційного сигналу

Як приклад в табл.2 наведені значення $U_{\text{еф}}$ для вибраних точок контролю (рис. 4) для ГТК 10-4 № 9, де $U_{\text{еф1}}$ -смуга $f_1 = 10 + 1000 \text{Гц}$; $U_{\text{еф2}}$ -смуга $f_1 = 10 + 700 \text{Гц}$ і $U_{\text{еф3}}$, розраховане для роторної частоти f_p при $n = 2660 \text{об/хв}$. Як видно з табл.2 різниця в сторону збільшення значення $U_{\text{еф}}$ при зменшенні частотної смуги складає від 29.3% до 34.4%. Візуально що різницю видно зі спектротрам, наведених на рис.3.

Таблиця 2

Значення ефективної віброшвидкості в контрольних точках ГПА для різних частотних смуг

Точка контр.	1	2	5	10	11	15	16	18	19	21	24	27
$U_{\text{еф1}}$, мм/с	0,177	0,165	0,094	0,095	0,093	0,187	0,088	0,093	0,102	0,191	0,110	0,092
$U_{\text{еф2}}$, мм/с	0,234	0,215	0,125	0,126	0,125	0,241	0,116	0,123	0,135	0,247	0,146	0,122
$U_{\text{еф3}}$, мм/с	1,3190	1,4197	0,7852	0,6693	0,6079	1,5050	0,7420	0,6364	0,8658	1,3194	0,7873	0,7287

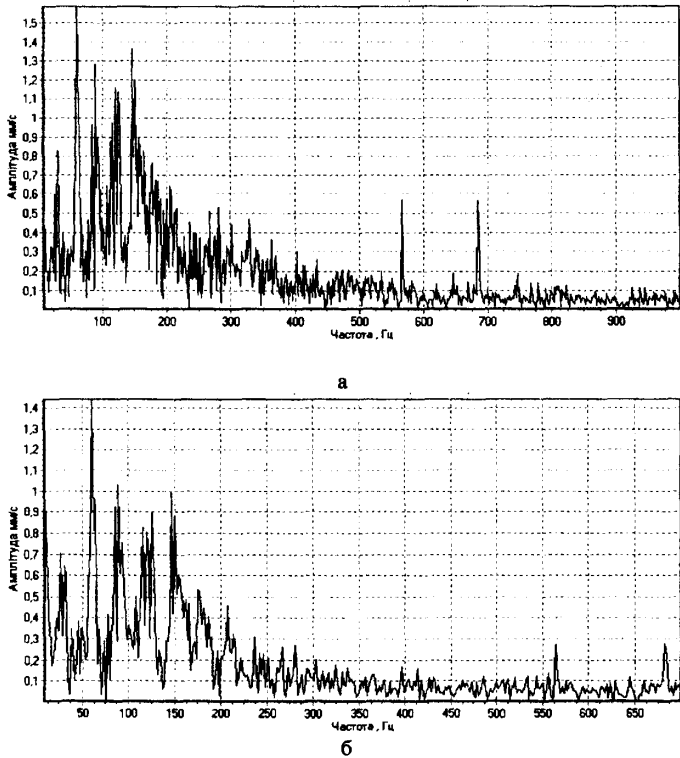


Рис. 3 Спектрограми вібраційного сигналу знятого в точці 2,
 а – у смузі до 1000Гц без фільтрації;
 б – у смузі до 700Гц з фільтрацією (wavelet- перетворення) сигналу.

Четвертий розділ присвячено розробці стратегії оптимального розміщення вібродавачів на корпусі ГПА. На основі результатів експериментальних досліджень вібростану ГПА у відповідності до технологічної карти точок вимірювання вібрації ГПА ГТК-10-4 (рис.4) проведено кореляційний аналіз джерел вібрації ГПА з ТО. Задача полягала у відборі тих точок, які несуть найбільш повну інформацію про стан ГПА та відсіюванні точок, що корелюють з ними.

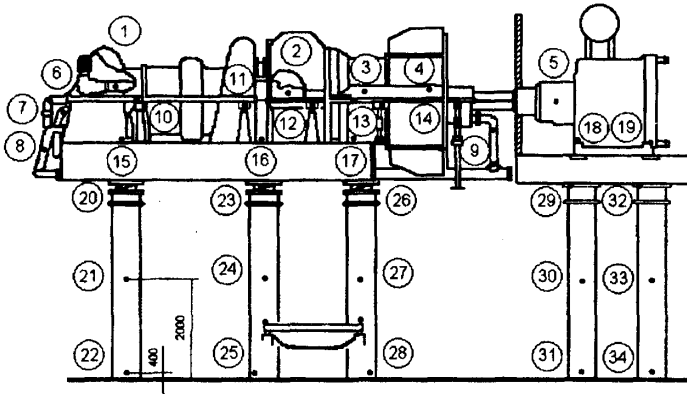


Рис. 4 Технологічна карта штатних точок вимірювання вібрації ГПА ГТК-10-4

Розроблена методика оптимального розташування вібродавачів на корпусі ГПА і ТО, яка полягає в побудові кореляційної матриці та визначенні, за заданим пороговим рівнем між двома окремими точками і їх відсотковим співвідношенням точок, рівень кореляції для яких перевищує пороговий ($R_k = 0.7$), до всіх точок по стовпчику, тих точок, які є найбільш інформативними. Так, відповідно, з розробленою методикою, для вертикальної складової вібрації з 34 точок було відібрано 19, тобто 44.1% інформації була надлишковою, на збір і обробку якої витрачалося приблизно стільки ж машинного часу та ресурсів.

Для реалізації методики було розроблено програмне забезпечення, яке є складовим модулем системи контролю вібростану ГПА та дає змогу при вказанні каталогу з файлами, проводити автоматичний пошук файлів віброзаписів і будувати кореляційну матрицю у відповідності із запропонованим методом.

У н'ятому розділі здійснена розробка системи контролю вібраційного стану ГПА, основу якої складає програмно керований багатоканальний комутатор, що забезпечує переключення давачів під'єднаних до його входів на один вихід – який під'єднаний до АЦП. Комутатор дистанційно керується оператором з персонального комп'ютера через паралельний порт принтера LPT1. Структурна схема комутатора системи контролю приведена на рис 5.

Комутатор реалізований на сучасній елементній базі з використанням швидкодіючих багатоканальних мультиплексорів AD 409 фірми Analog Devices та операційних підсилювачів ОРА 4130. Загальна похибка системи складає 15% і обумовлена похибкою вібродавачів.

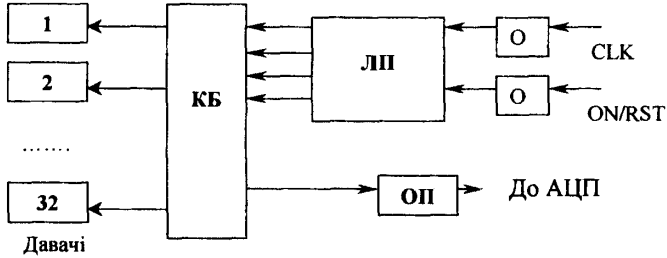


Рис 5. – Структурна схема комутатора

КБ – комутуючий блок, ЛП – логічний пристрій,

ОП – операційний підсилювач, О – опторозв'язка

За критерій організації системи контролю при її проектуванні було використано показник готовності Пг. Розрахунок Пг здійснено на основі побудови моделі взаємодії між ГПА та технічними засобами контролю (ТЗК), що базується на використанні апарату напівмарківських випадкових процесів. Модель представляє собою орієнтований граф (рис. 6), вершинами якого є узагальнені стани системи контролю, а операторами віток є ймовірності переходу із стану в стан та час перебування системи контролю у відповідному стані до переходу в наступний стан. Початковий стан (I) відповідає знаходженню ГПА в робочому режимі, ТЗК виключені, але можливі їх відмови з ймовірностями $Q_0(t)$ та $Q_3(t)$. Всі інші можливі стани розрізняються станами ГПА (працездатний чи непрацездатний) або ТЗК (працездатні чи непрацездатні).

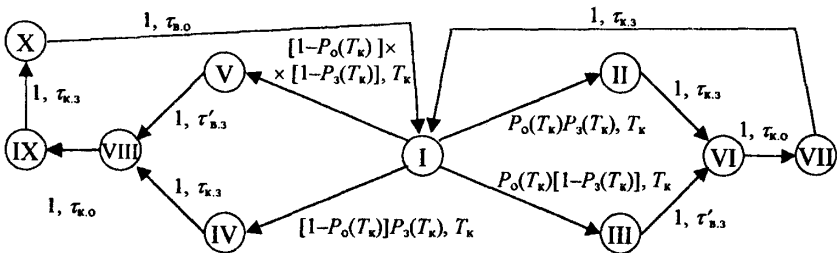


Рис 6. – Модель взаємодії ГПА та ТЗК

 $P_0(T_k)$ – ймовірність безвідмовної роботи ОД протягом періоду контролю $[0, T_k]$; $P_3(T_k)$ – аналогічно, ймовірність безвідмовної роботи ТЗД; $\tau_{к,0}$ та $\tau_{в,0}$ – відповідно час контролю та відновлення ГПА; $\tau_{к,3}$ та $\tau'_{в,3}$ – відповідно час контролю та сумарний час відновлення ТЗК)

Впровадження спроектованої системи контролю дозволяє забезпечити ймовірність знаходження ГПА в працездатному стані на рівні 0.96

Приведено оцінку ефективності розробленої системи контролю. Встановлено, що вірогідність контролю за допомогою застосованого методу контролю вібростану ГПА і системи становить 0.98.

Розроблено програмне забезпечення системи, яке складають наступні функціональні модулі:

- модуль збору вібраційних сигналів з 32 вібродавачів;
- модуль перегляду часової розгортки записаних вібросигналів;
- модуль занесення даних в базу даних та побудови схем прив'язки характерних точок до вібродавачів;
- модуль перегляду записів з бази даних (включаючи інформацію про дату останнього запису в кожній точці);
- модуль аналізу та обробки спектрів за гармонічними складовими;
- модуль автопобудови спектрів на основі записаних вібраційних сигналів.

Для завантаження програми потрібно запустити файл `Gra_16.exe`, який знаходиться в тому каталозі, куди було проведено інсталяцію програмного забезпечення. Після запуску на екрані з'являється головне вікно програми – функціональна схема ГПА з нанесеними на ній контрольними точками.

Враховуючи складність і трудоємкість процедури підбалансування ротора турбіни, яку зачасто приходится виконувати в процесі експлуатації ГПА з метою пониження рівня вібрації корпусу було розроблено програмне забезпечення вдосконаленої методики балансування, як складової частини програмного забезпечення системи контролю вібраційного стану ГПА. Розроблена програма написана на алгоритмічній мові Paskal під ОС MS-DOS і має зручний інтерфейс користувача.

На рис.7 приведено вивід результатів розрахунку з якого видно, що для контрольного прикладу масу вантажу потрібно змінити з 20 г на 30,79, а кут $79,21^\circ$ вказує, на яку величину потрібно змістити вантаж відносно початкового місцезнаходження для підбалансування турбіни. Використання вдосконаленої методики дозволяє провести підбалансування турбіни за один вихід на режим з встановленим пробним вантажем масою $m_{пр}$, замість трьох пробних запусків згідно існуючої методики.

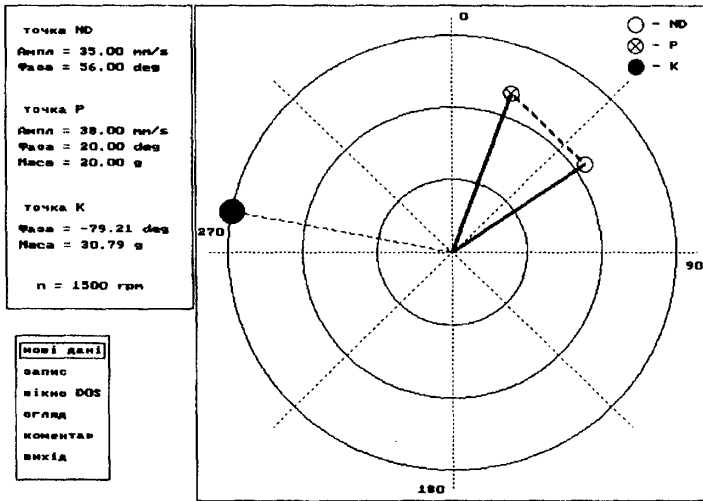


Рис. 7 – Векторна діаграма результату розрахунку
потрібної маси вантажу

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі вібраційного контролю технічного стану ГПА, що обумовлюється методом контролю стану ТО ГПА, стратегією оптимального вибору точок контролю та методом обробки діагностичної інформації про стан ГПА.

1. На основі аналізу сучасного стану діагностування ГПА встановлено:

- сьогодні відсутні роботи по дослідженню вібраційного стану безпосередньо ТО ГПА, що не дозволяє оцінити вплив вібростану ГПА на останню та розрахувати виникаючі в ній механічні напруження і, тим самим, попередити виникнення її відмови;

- існуючі стаціонарні системи контролю технічного стану ГПА орієнтовані в основному на контроль чи діагностування лише окремих його вузлів та елементів (силових елементів – підшипників, лопаткового апарата тощо), що не дозволяє отримати інформацію про загальний технічний стан ГПА. Останній визначають сьогодні за результатами періодичних обстежень згідно існуючого регламенту.

2. Розроблена математична модель процесу деформування ТО ГПА, використання якої дозволяє отримати значення механічних напружень (осьових та зсувних), що діють на ділянку

обв'язки будь-якої просторової конфігурації, та їх розподіл по її об'єму за результатами оцінки вібраційного стану ГПА.

3. Розроблено забезпечення експериментальних досліджень вібраційного стану ГПА з ТО:

- методичне, використання якого дозволяє зменшити об'єм експериментальних досліджень і, відповідно, їх тривалість та трудоемкість;

- технічне – мобільну систему контролю вібростану ГПА, основу якої складають тривісний вібродавач типу AP 21 з магнітним вузлом кріплення та ПК типу Notebook на базі процесора Pentium-3, використання якого дозволяє отримувати оперативну і вірогідну інформацію про вібраційний стан ГПА в будь-якій його точці, включаючи ТО;

- програмне, використання якого сумісно з програмним продуктом Wavelab 3 дозволяє в процесі експерименту оперативно проводити запис, фільтрацію та збереження часових реалізацій вібросигналів з метою їх подальшого аналізу.

4. Вдосконалено метод побудови кореляційної матриці, на основі якої розроблена стратегія оптимального розташування вібродавачів на корпусі ГПА і ТО, що полягає у виборі точок контролю не лише за коефіцієнтом кореляції, а за відсотковим співвідношенням по кожному рядку (стовпцю) кількості точок, що перевищують заданий поріг кореляції, який вибрано рівним 0,7. Розроблено програмне забезпечення для реалізації вказаної стратегії, використання якого дозволяє зменшити кількість точок контролю до 48% без втрати інформації про вібростан ГПА

5. Вдосконалено метод обробки діагностичної інформації на основі використання вейвлет-перетворення, апробація якого на вібраційних сигналах з контрольних точок ГПА підтвердила його ефективність.

6. Розроблене технічне і програмне забезпечення системи контролю вібраційного стану ГПА, включаючи ТО, використання якого дозволяє отримувати оперативну і вірогідну інформацію про їх вібраційний стан в режимі реального часу. Розроблена система контролю вібраційного стану ГПА, пройшла промислову апробацію в Долинському ЛВУМГ на ГПА ГТК-10-4 №9 в 2002 році і продовжує експлуатуватися, а результати теоретико-експериментальних досліджень механічних напружень (осьових та зсувних) нагнітального патрубку головного масляного насосу за вібраційним станом дозволили запропонувати його нову конфігурацію з демпфером коливань (сильфоном), який встановлено на нових ГПА типу Ц-16С.

7. Вдосконалена методика підбалансування ротора турбіни ГПА і розроблено програмне забезпечення для її реалізації, використання якого дозволяє зменшити кількість пусків агрегату та трудоемкість процесу балансування.

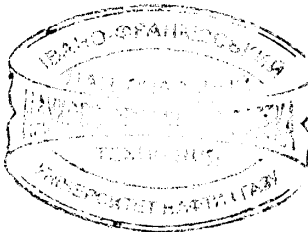
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Іванишин В.П. Моделювання процесу коливання елементів конструкції газоперекачувальних агрегатів // "Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ", № 37 (т.8), – 2000.–с.40-44.
2. Іванишин В.П. Математичне моделювання вібраційного стану трубопровідної обв'язки газоперекачувальних агрегатів // Матеріали 4-ої Національної науково-технічної конференції і виставки "Неруйнівний контроль і технічна діагностика-2003", м. Київ, – 2003.–с.285-286.
3. Іванишин В.П. Математичне моделювання процесу деформування елементів конструкції газоперекачувального агрегату під дією вібраційних навантажень // Наукові вісті інституту менеджменту і економіки "Галицька академія", м. Івано-Франківськ, – 2003.–с.128-134.
4. Іванишин В.П., Замиховський Л.М., Олійник А.П. Математический аппарат вибродиагностирования ГПА // Труды 9-й Международной научно-технической конференции «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования», г. Сумы: Ризограф, Сум ГУ, – 1999.–т.2.–с.62-65.
5. Ivanyshyn V.P., L.Zamichovski, A.Olijnik. Methods of smoothing and interpretation for experimental data in technical diagnostics problem // III Krakjowe symposium "Komputerowe systemy wspomagania prac nauczni przemysle i transporcie".–Zakopane, –1999.–с.–435-438.
6. Іванишин В.П., Замиховський Л.М., Олійник А.П. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів за даними внутрітрубної інспекції // Міжнародна науково-технічна конференція "Надійність машин та прогнозування їх ресурсу", м. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, Факел, –2000.–с.292-294.
7. Ivanyshyn V.P., L.Zamichovski, A.Olijnik. Nondestructive control of stress-strained state for pipelines using the internal radius change data // SPIE's 6-th International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics. Newport Beach, California, USA, –2001.–с.4336-4337.
8. Іванишин В.П., Замиховський Л.М. Розробка системи автоматичного діагностування газоперекачуючих агрегатів // Методи і засоби технічної діагностики, м. Івано-Франківськ, –1999.–с.95-102.
9. Іванишин В.П., Замиховський Л.М., Соколан Д.Я. Программное обеспечение системы автоматического диагностирования газоперекачивающих агрегатов // Методы и средства технической диагностики, г. Йошкар-Ола, –1998.–с.184-187.

АНОТАЦІЯ

Іванишин В.П. Контроль вібраційного стану газоперекачувальних агрегатів.–

Рукопис.



Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Робота присвячена контролю вібраційного стану ГПА. Проаналізовано вплив вібрації на розвиток дефектів ГПА та можливості використання її для контролю вібраційного стану з урахуванням ТО.

Створена математична модель процесу деформування труб з криволінійною віссю та змінним поперечним січенням, на основі якої можна отримати кількісну оцінку НДС ТО ГПА за результатами контролю його вібраційного стану.

Вдосконалено метод побудови кореляційної матриці, на основі якої розроблена методика оптимального розташування вібродавачів на корпусі ГПА з ТО, використання якої дозволяє до 48% зменшити кількість вібродавачів і спростити схемотехнічні рішення при розробці системи контролю вібростану ГПА.

Вдосконалено метод обробки діагностичної інформації на основі використання вейвлет-перетворення, апробація якого на вібраційних сигналах з контрольних точок ГПА підтвердила його ефективність.

Розроблена стаціонарна система контролю вібраційного стану ГПА з ТО і її програмне забезпечення, використання якої дозволяє отримувати оперативну і вірогідну інформації про їх вібраційний стан в режимі реального часу. Вдосконалена методика підбалансування ротора турбіни і розроблено програмне забезпечення для її реалізації, використання якої дозволяє зменшити кількість пусків агрегату та трудоемкість процесу підбалансування.

Ключові слова: вібраційний стан, ГПА, контроль, трубопровідна обв'язка, вейвлет – перетворення, система контролю, кореляційна матриця.

АННОТАЦІЯ

Иванишин В.П. Контроль вибрационного состояния газоперекачивающих агрегатов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. г. Ивано-Франковск, 2004.

Работа посвящена вопросам контроля вибрационного состояния газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Цель работы состоит в обеспечении более полного использования ресурса

заложенного в ГПА, включая ТО, и повышение эффективности его эксплуатации за счет оперативности и достоверности информации о его фактическом техническом состоянии, который определяется разработанным методом вибрационного контроля и стратегией оптимального размещения вибродатчиков на корпусе ГПА.

Проанализованы: влияние вибрации на развитие дефектов ГПА, методы и технические средства вибродиагностирования ГПА, а также исследования по оценке влияния вибрации на напряженно-деформированное состояние НДС ТО ГПА. На основании проведенного анализа современного состояния проблемы сформулированы задачи диссертационной работы.

Создана математическая модель процесса деформирования труб с криволинейной осью и переменным сечением, на основании которого можно получить количественную оценку НДС ТО ГПА за результатами контроля его вибрационного состояния. Проведенные тестовые расчеты для реальных элементов конструкции ГПА показали, что наибольшие напряжения имеют конические участки, амплитуда которых (200-300МПа) является опасной с точки зрения развития возможных дефектов.

Усовершенствован метод построения корреляционной матрицы, на основании которой разработана методика оптимального размещения вибродатчиков на корпусе ГПА с ТО, использование которой позволяет до 48% уменьшить количество вибродатчиков и упростить схемотехнические решения при разработке стационарной системы контроля вибросостояния ГПА.

Разработана портативная система сбора и предварительной обработки результатов экспериментальных исследований на базе вибродатчика AP 21 с магнитным узлом крепления и ПК типа Notebook, и ее программное обеспечение, имеющее широкие возможности по преобразованию, фильтрации и анализу вибрационных процессов. Обоснован способ установки вибродатчика на кронштейн с целью контроля вибросостояния 3-го силового подшипника, находящегося в зоне высоких температур.

Проведено усовершенствование метода обработки диагностической информации на основе использования вейвлет-преобразования, апробация которого на вибрационных сигналах с контрольных точек ГПА подтвердила его эффективность.

Разработана стационарная система контроля вибрационного состояния ГПА с трубопроводной обвязкой и ее программное обеспечение, использование которой позволяет получить оперативную и достоверную информацию о их вибрационных состояниях в режиме реального времени.

Усовершенствована методика подбалансировки ротора турбины и разработано программное обеспечение для ее реализации, использование которой позволяет уменьшить количество пусков агрегата и трудоемкость процесса подбалансировки.

ABSTRACT**Ivanyshyn V.P Gas-pumping aggregates vibrational state control. – Manuscript.**

The thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by speciality 05.11.13 – “Methods and Devices of Testing and Defining of Matter Composition” – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2005.

The dissertation work is devoted to the gas-pumping aggregates vibrational state control (GPA). The influence of vibration on the GPA defects development is analyzed, the possibilities of the one's using for the GPA vibrational state control taking to account the pipeline manifold are estimated.

The mathematical model of the pipeline's deformation process is created, taking to consideration the curvilinear axes and the variable transversal cuts. Using this model the receiving of the quantitative estimation of the stress-strained state of the pipeline manifold of GPA is possible taking to consideration the results of one's vibrational state control.

The method of construction of correlation matrix is improved, on the basis of which the method of optimum location of the vibrosensors on the GPA surface with the pipeline manifold is designed, the use of which allows to receive the 48% decreasing of the vibrosensor's quantity and to simplify circuit technique solutions in the process of the GPA vibrational state control system design.

The method of the diagnostical information treatment is improved passed on the wave-let transformation using the results of Matlab 6.0 environment modeling. The one's approbation on the noisy reference signal confirmed its efficiency.

The stationary microprocessor checking system and for the GPA and pipeline manifold vibrational state control is designed both with the its software, the using of which allows to get the operative and reliable information about the vibration state of the tested objects in the real time mode.

The method of the GPA rotors balancing is improved, the original software to realize this method is made, the using of such method allows to decrease the quantity of aggregate's starting and the labour intensiveness of the balancing process.

Key words: vibrational state; gas-pumping aggregate; control; pipeline manifold; wave-let transformation, the checking system; correlation matrix.



as1052