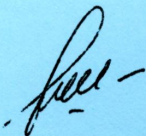


622.276.53(043)
с 79

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стефанишин Оксана Іванівна



УДК 622.276.53:621.671(047)

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ
РЕДУКТОРІВ ВЕРСТАТІВ-ГОЙДАЛОК**

05.05.12- **Машини нафтової та газової промисловості**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2012



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Копей Богдан Володимирович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри морських нафтогазових технологій.**

Офіційні опоненти:

**доктор технічних наук, професор
Петрина Юрій Дмитрович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
завідувач кафедри технології нафтогазового машинобудування**

**кандидат технічних наук, доцент
Кичма Андрій Олексійович,
Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри
деталей машин.**

**Захист відбудеться « 1 » червня 2012р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.20.052.04 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою:
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.**

**З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою:
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.**

Автореферат розісланий

« 27 » квітня 2012 року

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д.20.052.04
кандидат технічних наук, доцент**

Пилипів Л.Д.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Більшість нафтових свердловин України обладнано засобами механізованого видобування нафти, зокрема штанговими свердловинними насосними установками (ШСНУ). Зношеність основних фондів по структурних підрозділах ПАТ «Укрнафта» досить висока, обладнання вичерпало свій ресурс роботи і потребує якісного ремонту та впровадження нових технологій під час його експлуатації.

Однією з головних причин, що ускладнюють роботу штангової свердловинної насосної установки, є вихід з ладу підземного і наземного обладнання. Із наземного обладнання найслабшою ланкою є редуктори ШСНУ.

Існуючі та інноваційні способи підвищення зносостійкості деталей редукторів допомагають збільшити їх ресурс, однак проблема виникнення аварій все ще залишається актуальною.

Існуючі технології виготовлення деталей редуктора та правила його експлуатації не враховують впливу на роботу редукторів інших складових верстата-гойдалки.

Отже, залишається актуальною необхідність розроблення нового методу прогнозування довговічності редукторів, який би враховував їх реальний технічний стан. Така наукова розробка допоможе оцінити стан редуктора та передбачити швидкість протікання процесу його зношування і попередити його відмову.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм розвитку нафтопромислового комплексу України. Роботи входять до координаційного плану Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України «Наукові основи розробки нових технологій видобутку нафти і газу, газопромислового обладнання, поглибленої переробки нафти і газу з метою отримання високоякісних моторних яєлив, мастильних матеріалів, допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини». Вказаний план входить до національної програми «Нафта і газ України».

Мета роботи. Підвищення ресурсу редукторів верстатів-гойдалок та оцінка їх фактичного технічного стану в процесі експлуатації з використанням методів вібродіагностування.

Основні завдання наукового дослідження:

1. Проаналізувати причини зношування зубчастих передач верстатів-гойдалок, способи попередження їх відмов та вдосконалити класифікацію їх відмов.

2. Дослідити надійність нових та відремонтованих редукторів ШСНУ в промислових умовах та провести розрахунок імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов з метою оцінки їх ресурсу.

3. Дослідити вплив експлуатаційних чинників на технічний стан редуктора з використанням створеного модельного лабораторного стенду методом вібродіагностування, на основі повнофакторного експерименту встановити залежності між експлуатаційними параметрами.

4. Створити логічну діагностичну модель редуктора ШСНУ та розробити метод прогнозування його довговічності і визначити критерії відбракування на основі вібродіагностування та провести його дослідно-промислово перевірку.

5. Дослідити та впровадити у виробництво методи зміцнення поверхонь зубів зубчастих передач редукторів ШСНУ з використанням ХАДО-технології та добавками м'яких металів, які відповідають умовам експлуатації обладнання та можливостям ремонтного підприємства і розробити методику зниження витрат на ремонт редуктора на основі функціонально-вартісного аналізу.

Об'єктом досліджень є: процес зношування робочих органів редукторів під час механізованого способу видобування нафти за допомогою штангових свердловинних насосних установок, викликаний розвитком дефектів, що призводить до зміни технічного стану установки та аварійних ситуацій.

Предмет досліджень – прогнозування зношування робочих органів редукторів ШСНУ із застосуванням вібродіагностики.

Методи дослідження - для вирішення поставлених задач використані методи теорії надійності, методи математичної статистики, методи спектрального та кореляційного аналізу, методи технічної діагностики, експериментальні вібродіагностичні дослідження редукторів в лабораторних та промислових умовах, метод функціонально-вартісного аналізу, металографічні методи аналізу зміцнених зубчастих коліс.

Положення, що захищаються. Оцінка технічного стану редукторів в процесі експлуатації та після ремонту за допомогою вібродіагностики і підвищення їх ресурсу.

Наукова новизна: Автором самостійно:

1. Визначено параметри надійності нових і відремонтованих редукторів Ц2НШ-750 ШСНУ в промислових умовах та проведено розрахунок ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності їх відмов.
2. Проведено аналіз причин зношування зубчастих передач редукторів ШСНУ та удосконалено класифікацію відмов.
3. Вперше розроблені критерії відбракування редукторів верстатів-гойдалок на основі вібродіагностування та отримана залежність значення загального рівня вібрації в залежності від часу напрацювання.
4. Вдосконалено та досліджено методи зміцнення поверхонь зубів зубчастих передач редукторів ШСНУ з використанням ХАДО-технології та добавками м'яких металів, які найбільше відповідають умовам експлуатації обладнання та можливостям підприємства.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено стенди для випробування редукторів ШСНУ після ремонту з контролем їх вібраційних характеристик;
- на основі розробленої методики зниження витрат на ремонт редукторів з використанням функціонально-вартісного аналізу зменшено металомісткість

заготовок деталей редуктора на 20-30% та трудові витрати на їх виготовлення, що зменшило собівартість ремонту редуктора;

- розроблено критерії відбракування редукторів верстатів-гойдалок на основі вібродіагностування, які дають можливість вчасно зняти з експлуатації редуктори та попередити аварійні ситуації на свердловині;

- розроблено логічну діагностичну модель, що дає змогу встановити і класифікувати розвиток дефектів, визначати напрямок їх розвитку та причинно-наслідковий зв'язок з іншими дефектами;

- розроблено методику прогнозування та підвищення довговічності редукторів верстатів-гойдалок для визначення їх залишкового ресурсу. Своєчасне діагностування дає можливість уникнути аварійних ситуацій під час експлуатації свердловини, підвищити продуктивність роботи та збільшити тривалість міжремонтного періоду свердловини.

- створено метод зміцнення поверхонь зубів зубчастих передач редукторів ШСНУ струмами високої частоти з подальшим використанням ХАДО-технології та добавки м'яких металів і впроваджено у виробництво ремонтного підприємства в сукупності з відповідними методами змашування під час експлуатації попередить надмірне зношування поверхонь зубів зубчастих передач редукторів ШСНУ.

Розроблено «Методику оцінки технічного стану після ремонту та прогнозування ресурсу редукторів ШСНУ в процесі експлуатації свердловин за допомогою вібродіагностування» та прийнято для подальшого впровадження в Бориславській ЦБВО та НГВУ «Бориславнафтогаз». Річний економічний ефект від впровадження методики становить 580326 грн.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін «Нафтогазове обладнання» для студентів напряму підготовки 0503 – нафтогазова справа, спеціальність: видобування нафти і газу, спеціалізація: морські нафтогазові технології, освітньо-кваліфікаційний рівень 6.05304 – бакалавр, а також при проведенні практичних занять із названої дисципліни та при підготовці дипломних і магістерських робіт.

Впроваджено у виробничий процес Бориславської ЦБВО стенд для обкатування редукторів ШСНУ після їх ремонту.

Особистий внесок здобувача. Проведено віброобстеження натурних та модельних редукторів створеною мобільною вимірювальною системою [2], де особистий внесок здобувача становить 20%. Проведено аналіз та розрахунок надійності редукторів верстатів-гойдалок [3], де особистий внесок здобувача становить 40%. Розроблено методику функціонально-вартісного аналізу (ФВА) в умовах БЦБВО [4, 6] з метою забезпечення економічності будь-яких дій і рішень, пов'язаних з формуванням вартості, де особистий внесок здобувача становить 40%. Проведено діагностичні обстеження діючих свердловин та проведено аналіз оброблених результатів дослідження [5, 7, 21,22], де особистий внесок здобувача становить 20 %. Запропоновано стенди для випробування натурних редукторів у

двох варіантах, а також модельний стенд редуктора [9, 20], де особистий внесок здобувача становить 30%. Розроблено метод тарування апаратури із застосуванням динамічної тарувальної функції в робочому діапазоні коливань [8], де особистий внесок здобувача становить 20%. Проведено аналіз зношування та причини відмов редукторів верстатів-гойдалок [10], де особистий внесок здобувача становить 50%. Запропоновано вимірювання швидкості мобільними інформаційно-вимірювальними системними комплексами та методи і прилади контролю якості [11], де особистий внесок здобувача становить 20%. Запропоновано методи зменшення зношування деталей редукторів верстатів-гойдалок [12], де особистий внесок здобувача становить 50%. Проведено аналіз причин неякісного ремонту та розроблено методику підвищення якості відремонтованого обладнання в умовах БЦБВО [19], де особистий внесок здобувача становить 40%. Оптимізовано розміщення давачів мобільних вимірювальних систем [14], де особистий внесок здобувача становить 30%. Створено методику прогнозування зношування деталей редукторів верстатів-гойдалок [17], де особистий внесок здобувача становить 30%. Проведено діагностичні обстеження пасових передач редукторів верстатів-гойдалок [13], де особистий внесок здобувача становить 30%. Розроблена методика розрахунку допустимих вібрацій редуктора ШСНУ [1], де особистий внесок здобувача становить 100%. Оптимізовано склад мобільної вимірювальної системи [15], де особистий внесок здобувача становить 20%. Підвищено ресурс роботи редукторів ШСНУ шляхом додавання м'яких металів до мастильних матеріалів [16,18], де особистий внесок здобувача становить 40%. Запропоновано спосіб підвищення чутливості давача [23], де особистий внесок 25%.

Апробація та реалізація результатів дисертації. Результати дисертаційних досліджень доповідались на Міжнародній науково-технічній конференції «Повищення якості, надійності и довговечности технических систем и технологических процессов» (3-10 грудня 2006 р., м. Шарм ель Шейх, Єгипет), на Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії» (16-20 вересня 2008 р., Івано-Франківськ), на Міжнародній науково-технічній конференції « Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи » (20-23 жовтня 2009 р., Івано-Франківськ) і на Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми трибології» (19-21 травня 2010 р., м. Київ,) Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми трибології» (19-21 травня 2010 р., м. Київ,) і на Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика - 2011» (10-14 жовтня 2011 р., м. Івано-Франківськ). Крім цього, робота заслуховувалась на наукових семінарах кафедри нафтогазового обладнання та на розширеному науковому семінарі ІФНТУНГ.

Публікації. Результати дисертаційної роботи висвітлені у двадцяти трьох працях: в 16 статях, опублікованих у фахових виданнях України, з них в 1 - одноосібно, одному деклараційному патенті [23], матеріалах конференцій [18-22] та

монографії «Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості» [2].

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 174 найменувань та 5 додатків. Робота викладена на 204 аркушах машинописного тексту комп'ютерного набору, містить 85 рисунків і 24 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета, предмет та основні завдання досліджень, подані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Визначено особистий внесок здобувача та подано інформацію про апробацію результатів роботи.

У першому розділі проаналізовано відмови зубчастих передач редукторів штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) в процесі експлуатації та удосконалено класифікацію відмов, яка враховує умови роботи ШСНУ на основі проведеного статистичного аналізу. Результати аналізу дають підставу стверджувати, що аварії спричинені конструктивними, технологічними та експлуатаційними чинниками, удосконалення яких підвищить надійність, а отже експлуатаційний ресурс роботи обладнання.

За даними значної кількості спостережень за роботою обладнання досліджено надійність нових редукторів ШСНУ та редукторів після проведеного капітального ремонту. Розраховано імовірність безвідмовної їх роботи та інтенсивність відмов.

Відомі результати досліджень в загальному машинобудуванні таких вчених, як Реціков В.Ф., Гаркунов Н.Д., Генкін М.Д., Глухарьов Є.Г., Новіков М.Л., Короткін В.І., Попов А.П., Павленко А.В., Корабльов А.И., Журавльов Г.А., Бабаєв С.Г. та багатьох інших, проте виникає потреба у попередженні відмов редукторів ШСНУ шляхом використання методів діагностики та підвищенні їх ресурсу. На підставі проведеного аналізу сучасного стану проблеми сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі розглядаються умови та обираються засоби, необхідні для проведення лабораторних досліджень. Для цього автором спеціально виготовлено лабораторну установку - масштабовану модель ШСНУ.

Проведено планування експериментів та виведено рівняння регресії, яке свідчить, що зменшення тривалості роботи призводить до зменшення параметру оптимізації, тобто рівня віброшвидкості y . Рівняння регресії з використанням матриці планування має вигляд:

$$y=1,43+1,066 x_1+ 0,16 x_2 - 1,06 x_1x_2 ,$$

де x_1 – тривалість роботи, год;

x_2 – навантаження на головку балансира, Н.

Запропоновано конструкції стендів для випробовування натурних редукторів з метою визначення якості ремонту методом вібродіагностики. Конструкції натурних стендів спроектовано в залежності від кількості однотипних редукторів та від об'єму ремонту редукторів на одному ремонтному підприємстві.

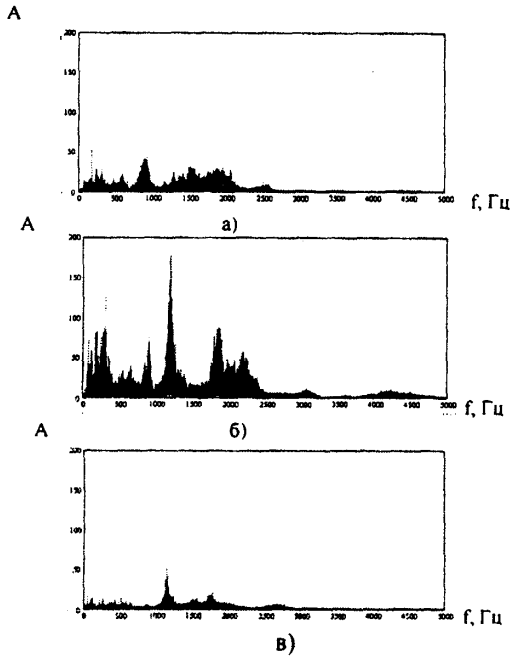
Визначено положення та місце розташування давачів мобільної виміральної системи контролю на корпусі редуктора ШСНУ.

У третьому розділі наведено результати досліджень з оцінки технічного стану редуктора ШСНУ. Визначено вплив дефектів зубчастої передачі редуктора та інших елементів верстата-гойдалки, а також якості мастильних матеріалів на вібраційні характеристики та довговічність редуктора. Дослідження проводились в промислових умовах та на спеціально розробленій та виготовленій установці.

Промислові діагностичні обстеження проводились в НГВУ “Долина нафтогаз” на трьох свердловинах, обладнаних ШСНУ. До складу ШСНУ входили редуктори із евольвентним зачеплення та зачепленням Новікова. Оскільки свердловини обладнані верстатами-гойдалками однакового типу, працювали з однаковими робочими параметрами (кількість качань за хвилину, маса і розташування зрівноважуючих вантажів) та розташовані на невеликій відстані одна від одної, тому схожими є механічні параметри підземного обладнання та фізичні характеристики пласта і рідини, що видобувається. Порівняння вібраційних характеристик редукторів з подібним характером навантаження в даному випадку дає змогу коректно визначити вплив часу напрацювання редукторів на його вібраційний стан. Однаковий час напрацювання для редукторів в приблизно однакових умовах дозволяє також провести порівняння вібраційних характеристик редукторів з різними типами зачеплення.

Обробка результатів проводилась в середовищі MathCAD. Спектри будувались на основі вибірки довжиною близько 1млн. значень, що дає змогу досягти роздільної здатності за частотою на рівні 0,04Гц. Отримані спектральні характеристики вібраційного сигналу редукторів, що наведені на рис.1, свідчать про суттєво більший рівень вібрації практично в усьому діапазоні частот для зношеного редуктора в порівнянні з нещодавно відремонтованим. Також спостерігається велика різниця між амплітудами вібрації редукторів з евольвентним зачепленням та зачепленням Новікова - від 3 до 3,5 разів.

Проведені дослідження дають підставу зробити висновок: підвищити достовірність діагностування редукторів верстатів-гойдалок можна шляхом врахування при спектральному аналізі внеску власних коливань всіх елементів ШСНУ та особливостей її роботи, що спричиняють нестационарність вібросигналу впродовж періоду качання.



а – евольвентне зачеплення відремонтованого редуктора;
 б – евольвентне зачеплення зношеного редуктора; в – редуктор із зачепленням
 Новікова, зношений

Рисунок 1 - Спектри вібрації редукторів СШНУ

В результаті аналізу спектрів вібраційного сигналу, виміряного на корпусі редуктора модельної ШСНУ, було встановлено, що при взаємному змищенні шківів клинопасової передачі збільшується амплітуда вібраційних складових на деяких характерних частотах і зростає середньоквадратичне значення рівня вібрації. Неправильні монтаж і експлуатація приводного паса можуть мати значний вплив на робочий процес і зношування механізму. Тому діагностування редукторів верстатів-гойдалок слід проводити із врахуванням особливості роботи пасових передач в різних режимах експлуатації.

Досліджено, що із збільшенням навантаження в точці підвішування штанг зростає значення амплітуди на частоті зубозачеплення.

Отримана залежність часу напрацювання конкретного редуктора (рис.2) дозволяє прогнозувати зміну рівня його вібрації, і, за наявності відомих граничних значень, що відповідають незадовільному технічному стану, можна визначити прогнозований час нормальної роботи механізму. За допомогою вбудованих функцій середовища MathCAD було оцінено коефіцієнти рівняння експоненційної

регресії $y(x) = a \cdot e^{bx} + c$ для отриманої послідовності значень, в результаті чого встановлено, що при значеннях коефіцієнтів $a = 0.249$, $b = -0.0035$, $c = -0.0916$ відхилення лінії регресії від експериментальних даних не перевищує 5%.

А

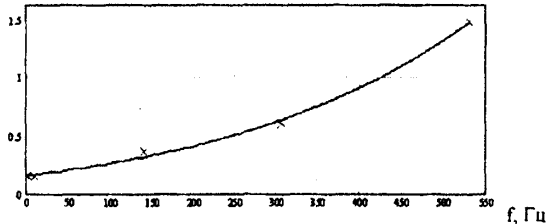


Рисунок 2 - Значення загального рівня вібрації в залежності від часу напрацювання

Запланувавши технічний огляд редуктора з врахуванням такого прогнозу, можна уникнути серйозних поломок, які можуть бути викликані недопустимим зростанням навантажень на деталі механізму, що супроводжується значними вібраціями. Виявлення дефектів на стадії їх утворення дає змогу спостерігати за їхнім розвитком та своєчасно планувати проведення робіт з ремонту та обслуговування редуктора.

Встановлено, що погіршення якості оливи в процесі зношування редуктора призводить до підвищення рівня вібрації та може пришвидшувати процес зношування зубчастих поверхонь редуктора, тому вчасна заміна оливи є важливим чинником підвищення надійності редукторів ШГНУ.

У четвертому розділі досліджено дані щодо відмов редукторів, які надійшли на Бориславську ЦБВО для ремонту після відпрацювання певного часу на свердловині. Дані дають уяву про характер відмов редукторів вітчизняного та румунського виробництва. Виявлено, що значний відсоток відмов виникає через дефекти промислового виготовлення. Також спостерігалась значна кількість втомних пошкоджень, які виникають здебільшого через розвиток тріщин в деталях зубчастих передач, особливо внаслідок вібраційних циклічних навантажень. З 112 випадків відмов виявлено 18 - катастрофічного характеру, в решті випадків експлуатацію було припинено через пошкодження, що були класифіковані як небезпечні. Тому виникає потреба у вдосконаленні технологічного процесу зміцнення поверхні зубів зубчастих передач редукторів ШСНУ.

Для проведення металографічних досліджень сталі 40Х, з якої виготовлені деталі зубчастої передачі редукторів, було виготовлено шість взірців, зміцнених різними методами. Запропоновано для зменшення шорсткості поверхні зубів та збільшення її твердості використання ХАДО-технології з додаванням порошку міді, використання якого значно зменшує рівень вібрації редуктора.

У п'ятому розділі на основі функціонально-вартісного аналізу розроблена методика зниження витрат на ремонт редуктора Ц2НШ-750. Зокрема зменшено

металомісткість заготовок деталей редуктора на 20-30% та трудові витрати на їх виготовлення, що зменшить собівартість ремонту редуктора.

Для визначення придатності редуктора до подальшої експлуатації виникла потреба в методиці розрахунку допустимого рівня вібрації. Для визначення амплітуди механічних коливань опори y_2 , викликаних збуджуючими силами, що діють з кутовою швидкістю ω , застосовуємо метод Лагранжа та отримуємо диференційне рівняння (рис.3):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k}, \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

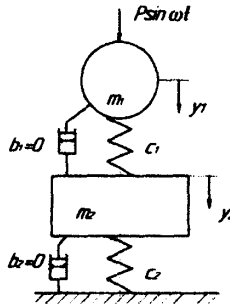


Рисунок 3 - Математична модель опори

Тут за узагальнені координати q_1 і q_2 прийнято абсолютні вертикальні переміщення тіл y_1 і y_2 з положення їх статичної рівноваги. Тоді кінетична T , потенціальна Π енергія і функція Релея R описуватимуться виразами:

$$T = \frac{1}{2} a_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} a_2 \dot{q}_2^2, \quad \Pi = \frac{1}{2} c_1 q_1^2 + \frac{1}{2} c_2 (q_2 - q_1)^2, \quad R = \frac{1}{2} b_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} b_2 \dot{q}_2^2. \quad (2)$$

На розглянуту систему діють потенціальні пружні сили і сили ваги, тому потенціальна енергія системи дорівнює:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_1 [(q_1 + \lambda_{cm1})^2 - \lambda_{cm1}^2] + \frac{1}{2} c_2 [(q_2 + \lambda_{cm2} - q_1)^2 - \lambda_{cm2}^2] - m_1 g q_1 - m_2 g q_2,$$

або після перетворення:

$$\Pi = \frac{1}{2} c q_1^2 + c_1 q_1 \lambda_{cm1} + \frac{1}{2} c_2 (q_2 - q_1)^2 + c_2 (q_2 - q_1) \lambda_{cm2} - m_1 g q_1 - m_2 g q_2.$$

Тут: g – пришвидшення вільного падіння тіл;

λ_{cm1} і λ_{cm2} – статичні деформації пружини під дією сил ваги тіл масою m_1 і m_2 .

В положенні рівноваги:

$$\left. \frac{\partial \Pi}{\partial q_2} \right|_{\substack{q_1=0 \\ q_2=0}} = c_2 \lambda_{cm2} - c_1 \lambda_{cm1} - m_2 g,$$

$$\left. \frac{\partial \Pi}{\partial q_1} \right|_{\substack{q_1=0 \\ q_2=0}} = c_1 \lambda_{cm1} - m_1 g.$$

Отже, потенціальна енергія з урахуванням останніх виразів набуде вигляду:

$$P = \frac{1}{2}c_1q_1^2 + \frac{1}{2}c_2(q_2 - q_1)^2. \quad (3)$$

У виразі для визначення кінетичної енергії інерційні коефіцієнти a_1 і a_2 дорівнюють масам тіл вала m_1 і опори m_2 . Оскільки демпфуванням підшипників можна знехтувати, то коефіцієнти b_1 і b_2 у функції Релея дорівнюють нулю. Підставляючи ці вирази у рівняння Лагранжа другого роду, отримаємо диференціальні рівняння руху системи:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{y}_1 + c_1(y_1 - y_2) &= P_0 \sin \omega t; \\ m_2\ddot{y}_2 + (c_1 + c_2)y_2 - c_1y_1 &= 0; \end{aligned} \quad (4)$$

де $Q_1 = P_0 \sin \omega t$ – збурююча сила.

Загальний розв'язок отриманої системи диференціальних рівнянь є сумою загального розв'язку відповідної системи однорідних рівнянь і часткового розв'язку неоднорідних рівнянь.

Загальний розв'язок системи однорідних диференціальних рівнянь характеризує власні коливання системи, якими в даному випадку можна знехтувати. Частковий розв'язок системи диференціальних рівнянь (4), який визначає вимушені коливання системи, шукатимемо у вигляді:

$$\begin{aligned} y_1 &= A_1 \sin \omega t; \\ y_2 &= A_2 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставляючи (5) у диференціальні рівняння (4) і скоротивши на $\sin \omega t$, отримаємо:

$$\begin{aligned} (C_1 - m_1\omega^2) A_1 - C_1 A_2 &= P_0, \\ (C_1 + C_2 - m_2\omega^2) A_2 - C_1 A_1 &= 0. \end{aligned}$$

З цієї системи алгебраїчних рівнянь отримаємо формули для амплітуд вимушених коливань тіл системи:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{P_0 C_1}{(C_1 + C_2 - m_2\omega^2)(C_1 - m_1\omega^2) - C_1^2}; \\ A_1 &= \frac{P_0 (C_1 + C_2 - m_2\omega^2)}{(C_1 + C_2 - m_2\omega^2)(C_1 - m_1\omega^2) - C_1^2}. \end{aligned}$$

З отриманих виразів маємо приведену жорсткість двох паралельно з'єднаних пружних систем:

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= C_{\text{пр}}. \\ C_{\text{пр}} - m_2\omega^2 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

Тоді, для

$$\text{матимемо: } A_1 = 0; A_2 = -\frac{P_0}{C_1}.$$

тобто

$$y_1 = 0; \quad y_2 = -\frac{P_0}{C_1} \sin \omega t. \quad (7)$$

За цієї умови вимушені коливання першого тіла будуть повністю погашені. Це спостерігатиметься для таких параметрів другого тіла:

якщо частота власних коливань - $K_2 = \sqrt{\frac{C_{np}}{m_2}}$, тоді згідно (6) маємо:

$$K_2^2 - \omega^2 = 0$$

$$\omega = K_2 = \sqrt{\frac{C_{np}}{m_2}}. \quad (8)$$

Тобто, коли частота K_2 співпадає з частотою збурюючої сили, відбувається погашення першої маси.

Після розрахунку допустимого значення віброшвидкості виявлено, що отримане значення добре узгоджується з експериментальними та має досить низький рівень в порівнянні з допустимими вібраціями, що регламентовані стандартами.

Розроблено логічну причинно-наслідкову модель редуктора (рис.4), використання якої дає змогу відслідковувати «найслабші» ланки редуктора і детально досліджувати послідовність розвитку дефектів та їх взаємозв'язок.

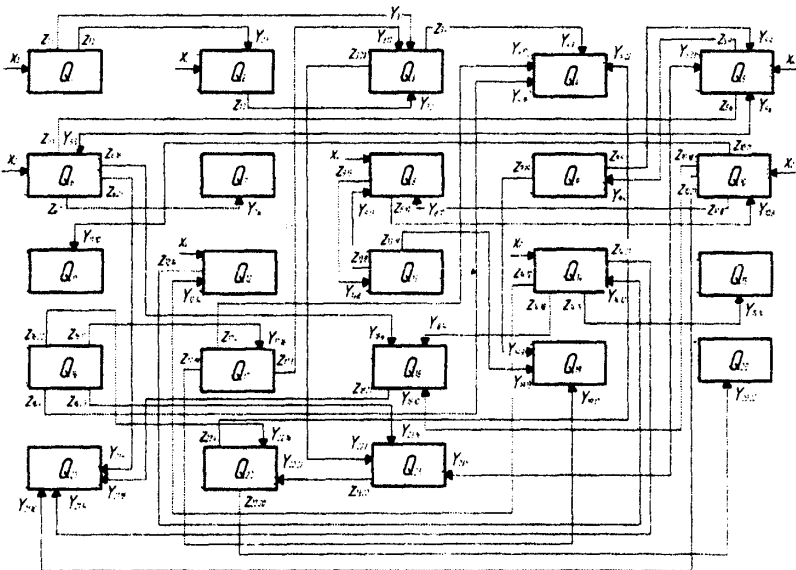


Рисунок 4 - Логічна діагностична модель привода редуктора ШІСНУ

Використано фізичне моделювання як метод експериментального вивчення фізичних явищ, який базується на їх фізичній подібності. Створена дослідна лабораторна установка зберігає фізичну подібність процесів моделі тим процесам, які виникають в ШЧНУ в натурі.

Впродовж всього терміну експлуатації редукторів ШЧНУ важливим завданням є прогнозування моментів заміни деталей редукторів з уникнення виходу з ладу його складових. Встановлено оптимальний рівень віброшвидкості, за яким можна зробити висновок про необхідність проведення ремонту та якість його проведення.

За результатами проведених досліджень побудовано криву прогнозування довговічності редуктора РН-2300 ШЧНУ (рис.5), згідно якої прогнозований ресурс роботи цього редуктора становитиме 36-38 тис. год.

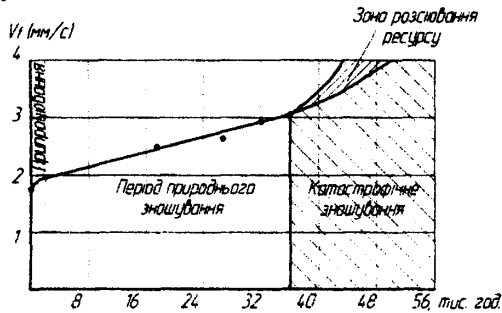
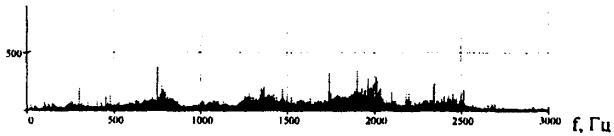


Рисунок 5 - Крива прогнозування довговічності редукторів ШЧНУ

З метою зниження амплітуди вібрації досліджено вплив на вібраційні характеристики редуктора використання ХАДО-технології з додаванням м'яких металів до мастильних матеріалів. Дослідження проводилися на модельній установці. В картер редуктора модельної установки заливали оливу І-40 з добавкою ХАДО для механічних трансмісій і редукторів, виробництва ТОВ «ХАДО-Технологія». Після припрацювання (згідно інструкції виробника) в картер редуктора додавали 7,5% дрібнозернистого порошку міді ПГ-19М-01 ТУ У 322-19-004-96. В процесі експлуатації знімались частотні спектри вібрації редуктора модельної установки (рис.6).

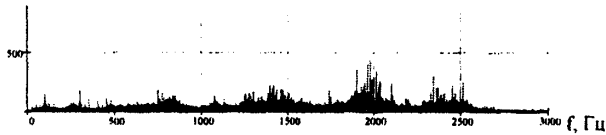
Наведені спектри майже не відрізняються за середнім рівнем вібрації, однак мають деякі локальні відмінності, що помітні при їх накладанні (рис. 6в).

А



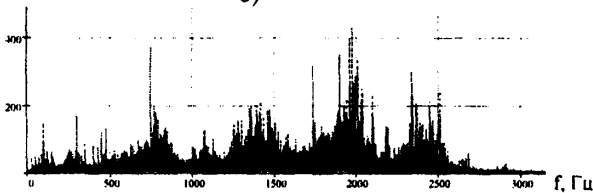
А

а)



А

б)



в)

а) використання оливи І-40 із додаванням ХАДО; б) використання оливи І-40 із додаванням ХАДО та порошку міді до мастильного матеріалу; в) суміщені спектри

Рисунок 6 - Спектри вібрації редуктора ШСНУ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації подано нове рішення науково-технічного завдання, яке полягає у розробці методу та засобів контролю технічного стану редукторів ШСНУ для підвищення їх надійності та забезпечення повного використання закладеного в них ресурсу.

Основні результати полягають в наступному:

1. Проаналізовано причини зношування зубчастих передач редукторів верстатів-гойдалок, способи попередження їх відмов, що допоможе більш точно ще на етапі зародження дефекту попередити його розвиток та удосконалена класифікація відмов, яка враховує умови роботи ШСНУ.

2. Визначено такі параметри надійності нових та відремонтованих редукторів ШСНУ в промислових умовах, як імовірність безвідмовної роботи та інтенсивність їх відмов, що дало можливість аналітично оцінити середній ресурс нового редуктора (26 тис. год.) та після ремонту (8 тис. год.).

3. Проведено дослідження впливу експлуатаційних факторів таких як навантаження, тривалість роботи, неспіввісність шківів пасової передачі, впливу

якості оливи на величину амплітуди віброшвидкості на базі створеного модельного лабораторного стенду. В результаті запропоновано рівняння регресії на основі повнофакторного експерименту для оцінки впливу основних експлуатаційних чинників на амплітуду віброшвидкості.

4. Створена логічна діагностична модель, яка допоможе встановити і класифікувати розвиток дефектів, визначити напрямок їх розвитку та причинно-наслідковий зв'язок з іншими дефектами і дає наочне представлення про найбільш схильні до виникнення дефектів елементи та вузли редуктора. На основі логічної діагностичної моделі розроблена методика прогнозування та підвищення ресурсу редукторів верстатів-гойдалок, за допомогою якої визначається їх залишковий ресурс. Розроблено критерії відбракування редукторів верстатів-гойдалок на основі вібродіагностування, які добре узгоджуються з експериментальними значеннями і уточнюють їх величину в порівнянні з рекомендаціями стандартів та дають можливість попередити аварійні ситуації на свердловині.

5. Досліджено та впроваджено у виробництво методи зміцнення поверхонь зубів зубчастих передач редукторів ШЧНУ із застосування ХАДО-технології та добавки м'яких металів, яке відповідає умовам експлуатації обладнання та можливостям ремонтного підприємства. Розроблена методика зниження витрат на ремонт редуктора на основі функціонально-вартісного аналізу, в результаті чого металомісткість заготовок деталей редуктора та собівартість їх виготовлення зменшено в середньому на 20-30%, що в загальному суттєво не вплине на технічну характеристику обладнання.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Стефанишин О.І. Визначення допустимих вібрацій редукторів верстатів-гойдалок / О.І.Стефанишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2011. - № 1(38). - С.107-112.

2. Копей Б.В. Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості: Монографія / Б.В.Копей, В.В.Лопатін, О.І.Стефанишин. –Івано-Франківськ, вид-во ІФНТУНГ, 2010. – 356 с.

3. Копей Б.В. Аналіз надійності редукторів верстатів-качалок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин, І.Б. Копей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2006. - №4(21). - С.96-99.

4. Копей Б.В. Передумови використання функціонально-вартісного аналізу для вдосконалення технології ремонту редукторів штангових свердловинних насосних установок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин, М.О. Данилюк // Нафтогазова енергетика. – 2007. - №4(5). - С. 27-30.

5. Копей Б.В. Вібраційна діагностика технічного стану редукторів верстатів-качалок / Б.В. Копей, Л.М. Заміховський, О.В. Євчук та інші// Нафтогазова енергетика. – 2008. - №1(6). - С. 61-64.

6. Копей Б.В. Зниження витрат на ремонт редукторів штангових свердловинних насосних установок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. - № 1(26). - С.64-67.

7. Bohdan Kopey Diagnostics and life prediction of pumping unit reducers by vibration analysis / Bohdan Kopey, Stanislaw Biednarz, Oksana Stefanyshyn // Wiertnictwo, Nafta, Gaz. -2008- t. 25, z. 2, s. 371-379. Streszcz., Summ. – toz. CD-ROM.

8. Копей Б.В. Дослідження адаптації інерційного давача МП-95 для вимірювання лінійних прискорень / Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин // Науковий вісник ІФНТУНГ. -2008. - №2(18). - С.99-105.

9. Копей Б.В. Стенди для випробувань натурних і модельних редукторів верстатів-качалок / Б.В. Копей, О.І.Стефанишин, В.В. Копей [та ін.]// Нафтогазова енергетика. – 2008. - №3(8). - С. 50-54.

10. Копей Б.В. Аналіз зношування деталей редукторів верстатів-гойдалок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2009. - №1(30). - С.108-114.

11. Копей Б.В. Вимірювання швидкості мобільними інформаційно-вимірювальними системними комплексами / Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин // Методи і прилади контролю якості. – 2009. - №22. - с.81-85.

12. Копей Б.В. Зменшення спрацювання деталей редуктора верстата-гойдалки / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2009. -№ 2 (31). - С. 71-75.

13. Копей Б.В. Вібраційні характеристики пасових передач редукторів верстатів-качалок / Б.В. Копей, О.В. Євчук, О.І. Стефанишин [та ін.]. // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. - №2(24). - С.94-100.

14. Копей Б.В. Оптимізація розміщення давачів мобільних вимірювальних систем / Б.В.Копей, О.І.Стефанишин, В.В.Лопатін // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. - №2 (35). - С.107-111.

15. Копей Б.В. Оптимізація вибору складу мобільної вимірювальної системи / Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин та ін. // Науковий вісник ІФНТУНГ.– 2011. - № 1(27). - С.91-96.

16. Копей Б.В. Підвищення ресурсу роботи редукторів ШСНУ методом використання добавок м'яких металів до мастильних матеріалів / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин, Ю.І. Парайко [та ін.]// Проблеми тертя та зношування: наук. - техн. збірник / гол. ред. Кіндрачук М.В. – К.: Вид. Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк».-2011 – Вип. 56. - С.94-105.

17. Копей Б.В. Прогнозування зношування деталей редукторів верстатів-гойдалок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин, О.В. Євчук [та ін.]// Проблеми тертя та зношування: наук. - техн. збірник / гол. ред. Кіндрачук М.В. – К.: Вид. Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2010. – Вип.53. – С. 42-58.

18. Копей Б.В. Використання добавок м'яких металів до мастильних матеріалів для підвищення ресурсу редукторів верстатів-гойдалок / Б.В. Копей, О.І.

Стефанишин, О.В. Євчук: анотації Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених « Нафтогазова енергетика - 2011 », (Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011р). – Івано-Франківськ: Факел, 2011. - С.29.

19. Копей Б.В. Підвищення якості ремонту редукторів штангових свердловинних насосних установок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин, М.О. Данилюк: матеріали Міжнародної конференції “Підвищення якості, надійності та довговічності технічних систем і технологічних процесів”, (м. Шарм Ель Шейх (Єгипет), 3-10 грудня), 2006. -С.28-33.

20. Копей Б.В. Стенди для випробувань натурних і модельних редукторів верстатів-качалок / Б.В. Копей, О.І. Стефанишин: анотації Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії», (Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008р.). - Івано-Франківськ: Факел, 2008. - С.22.

21. Копей Б.В. Вібраційний контроль модельного редуктора верстата-гойдалки / Б.В. Копей, О.В. Євчук, О.І. Стефанишин [та ін.]: анотації Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених[« Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи »], (Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р). - Івано-Франківськ: Факел, 2009. - С.65 .

22. Копей Б.В. Вібраційний контроль моделі редуктора верстата-гойдалки / Б.В. Копей, О.В. Євчук, О.І. Стефанишин [та ін.>// Сучасні проблеми трибології: тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 19-21 травня 2010 року).- К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010. - С.189.

23. Україна, МПК⁷ E21B17/00, № 49754. Давач для вимірювання навантажень, що діють на колону насосних штанг[текст]. / Б.В. Копей, І.Б. Копей, О.В. Євчук, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин; заявник і патентовласник ІФНТУНГ.- №u200911722, заявл. 9.11.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл.№9,, 2010.

АНОТАЦІЯ

Стефанишин О.І. Прогнозування та підвищення ресурсу редукторів верстатів-гойдалок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12- Машини нафтової і газової промисловості. - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2012.

Дисертація присвячена питанню підвищення ресурсу та контролю стану редукторів штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ).

В дисертації розроблено метод прогнозування та підвищення ресурсу редукторів верстатів-гойдалок, визначено їх залишковий ресурс та отримано тренд для розрахунку залишкового ресурсу роботи редуктора і обчислено його величину. Удосконалено мастильні матеріали; розроблено критерії відбракування редукторів

верстатів-гойдалок методом вібродіагностування; розроблено методику зниження витрат на ремонт редуктора на основі функціонально-вартісного аналізу; розроблено логічну причинно-наслідкову модель редуктора; запропоновано місце розташування давачів на редукторі з метою його вібродіагностування, розроблено стенди для випробування натурних редукторів.

Розроблений метод і технічні засоби пройшли промислову апробацію в НГВУ «Бориславнафтогаз» та Бориславській ЦБВО і прийняті до впровадження.

Ключові слова: вібрація, технічна діагностика, ШСНУ, редуктор.

АННОТАЦИЯ

Стефанишин О.И. Прогнозирование и повышение ресурса редукторов станков-качалок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.12 - Машины нефтяной и газовой промышленности. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2012.

Диссертация посвящена вопросу повышения ресурса и контроля состояния редукторов штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ). Проведен анализ отказов редукторов штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ) в процессе эксплуатации и дана их классификация.

Наличие поврежденных деталей редуктора определяли методом вибрационной диагностики. Исследовано влияние вибрации ШСНУ на долговечность редуктора. опыты проводились в промышленных условиях и на специально разработанной и изготовленной лабораторной установке, которая являет собой масштабированную модель ШСНУ. Исследовалось влияние дефектов редуктора и других элементов станка-качалки на вибрационные характеристики редуктора.

Собраны и проанализированы данные отказов редукторов, которые поступили для ремонта на Бориславскую ЦБПО. Данные дают представление о характере отказов редукторов отечественного и румынского производства.

Проведены металлографические исследования стали 40Х, которая используется для изготовления зубчатых передач редукторов. Для этого изготовили шесть образцов стали, обработанные разными способами упрочнения. Предлагаются стенды для испытания натурных редукторов, которые проектируются в зависимости от количества однотипных редукторов и от объема ремонта редукторов на одном ремонтном предприятии.

На основе функционально-стоимостного анализа разработана методика снижения расходов на ремонт редуктора ШСНУ. Использование методики позволило уменьшить металлоемкость заготовок деталей редуктора, в результате чего снизилась себестоимость его изготовления.

Разработана логическая причинно-следственная модель редуктора, использование которой позволит следить за самыми слабыми звеньями редуктора и детально исследовать последовательность развития дефектов и их взаимосвязь. По результатам экспериментальных данных спрогнозирован остаточный ресурс редуктора ШСНУ. Проведен расчет допустимого значения виброскорости, которое хорошо согласовывается с экспериментальными значениями и имеют достаточно низкий уровень по сравнению с рекомендациями стандартов.

Исследовано влияние ХАДО-технологии и использование добавок мягких металлов к смазочным материалам. Для исследования в картер редуктора модельной установки заливали чистое масло И-40 с добавкой ХАДО для механических трансмиссий и редукторов и засыпали 7,5% мелкозернистого порошка меди ПГ-19М-01 ТУ 322-19-004-96. Снятые частотные спектры с применением и без применения порошка меди имеют некоторые локальные отличия, заметные при наложении этих спектров.

Разработанный метод и технические средства апробировано в НГДУ «Бориславнафтогаз» и Бориславской ЦБПО и приняты к промышленному внедрению.

Ключевые слова: вибрация, техническая диагностика, ШСНУ, редуктор.

ANOTATION

Stefanyshyn O.I. Prognostication and increasing of resource of reducing gears of pumping units. It is a manuscript.

Dissertation for a scientific degree of candidate of engineerings sciences on speciality 05.05.12- Machines of oil and gas industry. Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, 2012.

Dissertation is devoted to the question of check of technical state of reducing gears of pumping units (PU). The method of prognostication and increasing of resource of reducing gears of PU is developed in dissertation, where their remaining resource and certainly optimum class of sentinel is delineated to trend for the calculation of remaining resource of work of reducing gear, where his dependence is calculated for a concrete case. Lubricating goods are designed with the additives of compounds and soft metals; the criteria of rejecting of reducing gears of PU are designed on the basis of vibrodiagnostics; the method of cutting of costs is designed on the repair action of reducing gear on the basis of functionally-cost evaluation; the logical design of reducing gear is designed; the method of determination of jarring actions is offered; stands are offered for examination of model reducing gears in two variants.

The method and engineerings facilities drove industrial approbation in NGVU «Borislavnaftogaz» and Borislavska CBVO and inspected to installation.

Keywords: vibration, technical diagnostics, pumping unit, reducer.