НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Кропачек Ольга Юріївна

УДК 681.54

МЕТОДИ І ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ВІБРОПРИСКОРЕНЬ СТІНОК ПАЛИВОПРОВОДУ ВИСОКОГО ТИСКУ ДИЗЕЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут", Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Самсонов Володимир Петрович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м.Харків,
завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Ігуменцев Євген Олександрович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м.Харків,
професор кафедри приладів та методів неруйнівного контролю

кандидат технічних наук
Кравченко Поліна Олександрівна,
Харківський державний технічний університет сільського господарства, м.Харків,
доцент кафедри загальної електротехніки

Провідна установа: Національний університет "Львівська політехніка", кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

Захист відбудеться: 16.12.2004р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.09 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут", за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий 08.11.2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Удосконалення методів і пристроїв контролю стану паливних систем об'єктів класу дизельних агрегатів (ДА) за рахунок розробки та впровадження безрозбірних технологій і неруйнівного контролю є важливою науковою та практичною проблемою вітчизняного господарства. Існуючі методи діагностики та контролю спираються на часткову або повну розборку предмету дослідження, що призводить не тільки до практичних незручностей, але і знижує техніко-економічні показники при вказаній процедурі. Дані дослідження покликані вирішити задачі розробки, виробництва і запровадження апаратурних, методичних і програмних засобів, здатних реалізувати ефективний контроль стану вузлів паливної системи тепловозних дизелів шляхом оцінки параметрів вібрації стінок паливопроводу високого тиску.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних робіт кафедри теоретичних основ електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", зокрема: договору про співдружність "Розробка алгоритму діагностування тепловозного дизель-генератора на базі мікроЕОМ" між Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" і ДП "Завод ім. Малишева" (м.Харків), госпдоговором "Розробка системи управління і автоматики дизель-генераторів, газодизелів і газомоторних агрегатів" між Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" і державним НВП "Метенергомаш" (м.Харків), комплексним планом НДР і ДКР ДП "Завод ім. Малишева", комплексним планом НДР і ДКР НВП "Метенергомаш", комплексним планом НДР "Локомотивне депо "Основа" (м.Харків).

Здобувач у відмічених роботах був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи заключається в розробці апаратурних, методичних і програмних засобів при створенні пристрою контролю (ПК), які підвищують ефективність роботи ДА за рахунок використання засобів безрозбірних технологій і неруйнівного контролю при визначенні поточного стану паливної системи ДА.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд основних задач. Такими є:

- обґрунтування використання методів неруйнівного контролю при визначенні стану паливної системи ДА,

- аналіз і класифікація зовнішніх дестабілізуючих факторів, які впливають на ДА під час ведення процедури контролю,

- побудова моделей інформаційного сигналу і моделей розглядаємого ДА, доведення їх адекватності,

- вибір цільової функції, яка має найбільші переваги при контролі стану паливної системи ДА,

- синтез і дослідження вимірювального перетворювача цільової функції,

- розробка структури ПК ДА,

- синтез алгоритмів контролю і моделювання їх на ЕОМ,

-розробка засобів контролю, необхідних для нормального функціонування синтезованих алгоритмів.

Об'єкт дослідження – процес проведення аналізу паливної системи дизелів, що породжує проблемну ситуацію з удосконалення апаратурних, алгоритмічних та програмних засобів контролю ДА.

Предмет дослідження – методи та пристрій контролю віброприскорень стінок паливопроводу високого тиску ДА.

Методи дослідження базуються на використанні теорії ймовірності і математичної статистики, дисперсійного, кореляційного і спектрального аналізів при дослідженні вимірювальних вібросигналів з ДА, теорії ідентифікації при розробці детермінованих моделей ДА, теорії планування експерименту при доведенні адекватності моделей реальним об'єктам і процесам, теорії надійності при побудові ПК ДА, теорії вимірювань при оцінці похибки вимірювального перетворювача і ПК ДА в цілому.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблена і досліджена методика визначення і обробки інформаційного сигналу, який характеризує поточний функціональний стан паливної системи ДА,

- синтезований і перевірений оригінальний алгоритм компенсації гармонічних складових інформаційного сигналу при впливі на корисний сигнал перехресних зв'язків,

- синтезована функціональна залежність зміни залишкового ресурсу предмету контролю при кількісній зміні амплітуди вібросигналу в момент відкривання форсунки ДА.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційної роботи заключається у використанні її результатів:

- на державному підприємстві "Завод ім. Малишева" (м.Харків) - вітчизняному виробнику ДА,

- на науково-виробничому підприємстві "Метенергомаш" (м.Харків) - вітчизняному розробнику і виробнику силових енергоустановок на базі дизелів і газодизелів,

- в локомотивному депо Основа (м.Харків).

Особистий внесок здобувача у виконану роботу і публікації заключається в розробці математичних, фізичних та ін. моделей, проведенні

експериментальних досліджень і аналізі розрахункових даних, формулюванні висновків та рекомендацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на Міжнародних науково-технічних конференціях microCAD "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків 1999р., 2003р. 2004р.), 3-й Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці" (Львів 1999р.), Всеукраїнській конференції молодих вчених з теоретичної і експериментальної фізики "Евріка-2002" (Львів 2002р.), 1-й обласній конференції молодих вчених "Тобі Харківщино – пошук молодих" в рамках обласного форуму "Освіта, наука, виробництво – шляхи інтеграції" (Харків 2002р.), 4-й науково-технічній конференції "Удосконалення систем і засобів метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки" (Харків 2003р.), 3-й Міжнародній конференції "Проблеми інформатики і моделювання-2003" (Харків 2003р.). Окремі фрагменти роботи і вся робота в цілому доповідались на семінарах кафедри теоретичних основ електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 робіт, у тому числі 12 статей, 6 тез доповідей на конференціях і отримано два патенти. Особистий внесок здобувача у публікації заключається в розробці математичних, фізичних та ін. моделей, проведенні експериментальних досліджень і аналізі розрахункових даних, формулюванні висновків і рекомендацій.

Структура і об'єм роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, чотирьох додатків. Повний обсяг роботи складає 214 сторінок, які включають 20 ілюстрацій по тексту, 17 ілюстрацій не по тексту на 17 сторінках, 9 таблиць по тексту і 3 таблиці не по тексту на 3 сторінках, чотири додатки на 34 сторінках, 107 використаних літературних джерел на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі вибраний предмет досліджень, проаналізовані його характеристики, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

ДА – це установка, яка структурно складається з великої кількості функціональних вузлів і деталей. На нормальне функціонування ДА весь час впливає велика кількість дестабілізуючих факторів, тому підтримання ДА в нормальному функціональному стані пов'язане з необхідністю постійного контролю його складових. Як показує практика, основну увагу необхідно зосередити на контролі технічного стану паливної апаратури ДА, одним з найбільш важливих вузлів якої є форсунка.

При виникненні несправності у форсунці паливної апаратури важливо оперативно продіагностувати тип несправності. Подібний контроль необхідний як при настройці, так і в робочій фазі ДА. Особливий інтерес представляють методи неруйнівного контролю при контролі ДА. Для аналізу таких методів в розділі, по апріорним даним, в якості основного непрямого параметру, віддзеркалюючого якість роботи дизеля, використовується параметр вібрації стінок паливопроводу.

У розділі приведений аналіз апаратурних і методичних характеристик вимірювання вібрації, приведений аналіз методів і пристроїв діагностики та контролю паливної апаратури ДА вітчизняних і закордонних виробників. Вивчення даного питання в області контролю показало на ряд недоліків і необхідність їх зниження.

Виходячи з усього сказаного, критеріями оцінки стану паливної апаратури ДА в даній дисертаційній роботі прийняті:

- оцінка функціональної готовності форсунки по принципу "принадний-непринадний",
- оцінка типової несправності форсунки,
- оцінка залишкового ресурсу роботи (у випадку принадності), а також визначення тенденції зміни технічних показників форсунки при подальшій експлуатації.

У другому розділі отримані і проаналізовані параметри вимірювального сигналу вібросенсора, виявлена методика для здійснення подальшого контролю стану форсунок ДА, розроблена і досліджена модель інформаційного сигналу, синтезований алгоритм класифікації по принципу "принадний-непринадний" досліджуваної форсунки, оцінена похибка класифікації, синтезований алгоритм ідентифікації типу непринадності у форсунці.

Інформаційним сигналом при оцінці якості функціонування форсунок ДА та їх принадності для подальшої експлуатації є вібросигнал. У розділі проведений аналіз вібросигналів, отриманих в ході експериментів при контролі паливної апаратури як з принадною форсункою, так і з форсунками, які мають різні типи непринадності.

Аналіз можливостей розробки алгоритмів неруйнівного контролю стану форсунок ДА пов’язаний з вибором методичного базису. Попередній аналіз показав, що до такого можна віднести:

- аналіз енергетичних параметрів вібросигналу,
- спектральний аналіз вібросигналу,
- подання вібросигналу згортанням детермінованого ядра і випадкового породжуючого процесу з подальшим аналізом властивостей ядра.

Дослідження методичного базису показало, що оцінювання принадності форсунки ДА до подальшої експлуатації доцільно виконувати на основі аналізу

енергетичних параметрів вібросигналу, визначення типової непринадності форсунки – на основі спектрального аналізу.

При аналізі енергетичних параметрів вібросигналу виконується згладжування квадрату досліджуваного процесу за допомогою ковзаного середнього по часу на інтервалі набагато меншому періоду відповідно зі співвідношенням:

$$\xi_c^2(t_k) = \frac{\sum_{j=k}^{k+n-1}(\xi^2(t_j))}{n},$$

де ξ^2 – квадрат досліджуваного випадкового процесу, n – кількість реалізацій в ансамблі, t_j – поточний момент часу, $k \in \{0, N-n-1\}$ (n=10), N – кількість точок виміру за період.

На рис.1 показані діаграми сигналу для принадної і непринадної форсунок. Аналізуючи дані діаграми, можна зробити висновок про те, що амплітуда сигналу в момент відкривання нормально-функціонуючої форсунки (перший з двох викидів сигналу на рис.1) (рис.1,а) приблизно в 10 раз перевищує амплітуду непринадної форсунки (рис.1, б).

а) – нормально-функціонуюча форсунка,
б) – несправна форсунка

Рис. 1. Результати обробки вібросигналу шляхом аналізу його енергетичних параметрів

В основу класифікації стану предмету контролю покладена ознака, яка визначена на основі кількісної оцінки амплітуди процесу $\xi(t)$ в моменти відкривання форсунки (рис.1).

Випадковий процес $\xi(t)$ несе в собі інформацію про три, по меншій мірі, стани предмету контролю, потребуючих або які не потребують активного руйнівного втручання в паливну систему ДА:

- предмет контролю принадний, заміна форсунки не потрібна,
- предмет контролю непринадний, потрібна термінова заміна форсунки для забезпечення нормального функціонування ДА,

- однозначне вирішення питання про придатність форсунки для подальшої експлуатації прийнято бути не може.

Класифікація перечислених станів контролюємого предмету призводить до моделі прийняття рішення у просторі однієї інформаційної ознаки – ξ_M. В цьому просторі можна виділити три області прийняття рішень:

-А – область нормального функціонування форсунки,

-В – область ненормального функціонування форсунки,

-С – суперечлива область, в якій важко віддати перевагу одному з двох рішень (принадний або непринадний).

Кінцева мета процедур контролю поточного стану – встановлення, з деякою ймовірністю $P_Д$, належності робочої точки до однієї з трьох областей А, В або С.

Для перевірки припущень про належність вибірки $[\xi(t_1), \dots \xi(t_N)]$ значень процесу $\xi(t)$ на інтервалі $(0;t)$ області А, В або С використовуємо критерій максимальної правдоподоби, відповідно якої приймається те з рішень γ_j, $j=1 \div 3$, для якої функція правдоподоби вибірки $W_ф(\xi/S_{cj})$, більше інших функцій правдоподоби $W_ф(\xi/S_{ck})$, $k \neq j$. При цьому символом S_j позначено стан предмету: А, якщо j=1; В, якщо j=2; С, якщо j=3.

$$W_ф(\frac{\xi}{S_{cj}}) = \prod_j \frac{1}{\sigma_{\xi j}\sqrt{2\pi}} \exp\{-\frac{1}{2}(\frac{\xi(t_i)-\overline{\xi}}{\sigma_{\xi j}})^2\},$$

де σ_ξ – середньоквадратичне відхилення.

Ймовірність похибки, яка може виникнути через неправильну класифікацію двох сусідніх станів S_3-S_1 або S_3-S_2, знайдена, при застосуванні критеріїв відношення правдоподоби.

На основі розрахованих похибок першого (α_{31}, α_{32}) і другого (β_{31}, β_{32}) роду при класифікації прикордонних станів S_3-S_1 або S_3-S_2 стало очевидним, що повна ймовірність похибки при класифікації станів А і С не перевищує величини 0.2% при впливі різних дестабілізуючих факторів.

Задача виявлення типової непринадності (стани $S_{т1}$, $S_{т2}$, $S_{т3}$, $S_{т4}$) основана на зміні спектральних характеристик вібросигналу у реальному часі і залежить від вигляду ймовірнісної моделі тестуємого вібросигналу. При вирішенні даної задачі застосовані тестові статистики виявлення змін, які використовуються в алгоритмах прийняття рішень.

При розгляді питання виявлення змін дисперсії вібросигналу застосовуємо Т-статистику, яка є класичною в плані виявлення змін дисперсії сигналу, і відображає одномодельний підхід при розпізнаванні випадкових інформаційних сигналів, стаціонарних по середньому значенню на періоді спостереження $T_н$.

Т-статистику виявлення представимо як:

$$T = \frac{\zeta - m_\zeta}{\sqrt{D_\zeta}} = \frac{1}{\sqrt{2n}} \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{e_k^2}{\sigma_0^2} - 1\right)$$

де e_k^2 - залишки випадкового процесу $\xi(t)$, $\zeta = \sum_{k=1}^{n} \frac{e_k^2}{\sigma_0^2}$, n - випадкова величина з χ^2-розподіленням і n степенями свободи, $n = \frac{T_н}{\Delta t}$, σ_0^2 - дисперсія процесу $\xi(t)$, яка відповідає нормальному стану $S_{то}$ предмету контролю (гіпотеза H_o), m_ζ, D_ζ - середнє і дисперсія випадкової статистики ζ.

Досліджуючи поведінку Т-статистики при зміні дисперсії σ_0^2 на дисперсію σ_1^2, після появи порушень в технічному стані предмету контролю, коли стан предмету стане $S_{т1}$, бачимо, що середнє і дисперсія Т-статистики стануть дорівнювати:

$$\begin{cases} m_T^{(1)} = \sqrt{\frac{n}{2}}\left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^2 - 1\right], \\ D_T^{(1)} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^4. \end{cases}$$

Розрахуємо умовні щільності розподілення Т-статистики $f(T/S_{т0})$ і $f(T/S_{т1})$:

$$\begin{cases} f(T/S_{т0}) \sim N(0, 1), \\ f(T/S_{т1}) \sim N\left(\sqrt{\frac{n}{2}}\left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^2 - 1\right], \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^4\right). \end{cases}$$

Приведені співвідношення дають можливість перевірки значимості альтернативної гіпотези H_1 – стан предмету змінився і став дорівнювати $S_{т1}$.

Ймовірність виявлення похибок першого і другого роду відповідно дорівнюють:

$$\begin{cases} \alpha = 1 - 2\Phi_0(U_{\alpha/2}), \\ \beta = \Phi_0\left(\frac{U_{\alpha/2} - m_T^{(1)}}{\sqrt{D_T^{(1)}}}\right) - \Phi_0\left(\frac{-U_{\alpha/2} - m_T^{(1)}}{\sqrt{D_T^{(1)}}}\right), \end{cases}$$

де $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$ – нормована функція Лапласа, $U_{\alpha/2}$ – відсоткова точка нормованого розподілення для заданого рівня значимості α і надійності виявлення змін P=1-α.

Зміни частотних властивостей процесу $\xi(t)$ знаходять своє відображення в зміні нормованої кореляційної функції $R(\tau)$, так як остання зв'язана з енергетичним спектром (теорема Хінчина-Вінера). Виявлення змін автокореляційної функції зручно проводити за допомогою статистики, яка функціонально залежить від інтервалу кореляції τ_0, що розділяє відліки процесу

$\xi(t)$. При цьому визначається частота перетину нульового рівня досліджуваним процесом.

Таким чином, для виявлення змін частоти перетину нульового рівня процесом $\xi(t)$ введено статистику:

$$Q = \frac{q^* - m_{q^*}}{\sqrt{D_{q^*}}}.$$

Зміна інтервалу кореляції внаслідок переходу предмету контролю зі стану $S_{т0}$ в стан $S_{т1}$ змінює ймовірність зміни знаку q. Якщо нову ймовірність позначити як q_1, то середнє значення і дисперсія нормованої статистики Q стануть дорівнювати відповідно:

$$\begin{cases} m_Q^{(1)} = \dfrac{q_1 - 0.5}{0.5}\sqrt{n}, \\ D_Q^{(1)} = 4q_1(1 - q_1). \end{cases}$$

Ймовірності похибок першого і другого роду при використанні статистики Q для виявлення зміни інтервалу кореляції, а значить, і нормованої спектральної щільності процесу $\xi(t)$, дорівнюють відповідно:

$$\begin{cases} \alpha = 1 - 2\Phi(U_{\alpha/2}), \\ \beta = \Phi_0\left(\dfrac{U_{\alpha/2} - m_Q^{(1)}}{\sqrt{D_Q^{(1)}}}\right) - \Phi_0\left(\dfrac{-U_{\alpha/2} - m_Q^{(1)}}{\sqrt{D_Q^{(1)}}}\right). \end{cases}$$

Ефективність тестових статистик T і Q, як інформаційних параметрів, перевірялась при моделюванні чотирьох основних типів непринадного стану форсунок ДА (стани $S_{т1}$, $S_{т2}$, $S_{т3}$, $S_{т4}$). При цьому, враховуючи періодичний характер нестаціонарності процесу $\xi(t)$ на інтервалах коли відбувається відкривання та закривання форсунки, використовувались оцінки максимальних значень статистик T і Q при фіксованому розмірі часового вікна ідентифікації моделі $T_н = 3.7 \cdot 10^{-2}$сек. і інтервалі дискретизації $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$сек., який забезпечує виконання умови $q_0 = 0.5$. Кількість відліків у цьому випадку n=74. Значення максимальної частоти в спектрі досліджуваного вібросигналу $F_m \geq 10^3$ Гц.

Аналізуючи ефективність тестових статистик виявлення при однопараметровому контролі змін спектральної щільності вібросигналу по результатам обчислення потужності і ймовірності похибки критеріальних статистик T і Q, визначено, що потужність T-статистики вище, ніж статистики Q. Однак, при ідентифікації станів $S_{т0}$ і $S_{т3}$ ймовірності похибок однопараметрового (або по T-статистиці, або по Q-статистиці) контролю приблизно однакові і недопустимо великі (у три рази більше заданого рівня значимості α=0.05). Тому в дисертаційній роботі було прийняте рішення використовувати двохпараметровий контроль.

Апріорний аналіз ймовірнісних ознак статистик T и Q, як інформаційних параметрів контролю стану паливної апаратури ДА, дозволяє синтезувати комплексний параметр контролю на основі умовних функцій правдоподоби:

$$W(X/S_{тj}), \quad \text{при} \quad j=\overline{0,4},$$

де X – вектор спостережень у просторі використовуємих статистик T и Q.

Комплексний параметр контролю представлений у формі статистики типу відношення правдоподоби:

$$l(X)=\frac{W(X/S_{т0})}{W(X/S_{тk})} \underset{\gamma_k}{\overset{\gamma_0}{<>}} 1,$$

коли рішення γ_0 приймають, якщо:

$$l(X)>1,$$

а рішення γ_k, коли виконується протилежна нерівність.

Дослідження комплексної статистики контролю зручно проводити, коли вона представлена як логарифм відношення l(X):

$$g(X)=\ln[l(X)] \underset{\gamma_k}{\overset{\gamma_0}{<>}} 0.$$

Комплексний параметр g(X) є також випадковою величиною ς з одномірною умовною щільністю розподілення $f(\varsigma/S_{тj})$.

Розклавши нормовану щільність $f(\bar{\varsigma}/S_{тj})$ в ряд Еджворта:

$$f(\bar{\varsigma}/S_{тj})=f^{*}(\bar{\varsigma}/S_{тj})+(2\pi)^{-1/2}\exp\{(-\frac{\bar{\varsigma}^{(j)2}}{2})[\frac{H_4^{(j)}}{24}(\gamma_{k4}^{(j)}-\frac{6}{\nu^{(j)}})+\frac{H_5^{(j)}}{120}(\gamma_{k5}^{(j)}-\frac{24}{\nu^{(j)3/2}})+$$

$$+\frac{H_7^{(j)}}{144}(\gamma_{k4}^{(j)}-\frac{6}{\nu^{(j)}})+...]\},$$

де $H_r^{(j)}$, r=4, 5,… – поліноми Ерміта порядків 4, 5, … для випадку $S_т \in S_{тj}$, можемо обчислити значення α і β чисельним методом з наперед заданою похибкою, яка визначає кількість членів розкладу:

$$\begin{cases} \alpha = 1-\int\limits_{\frac{-\phi_1^{(0)}}{\sqrt{\phi_2^{(0)}}}}^{\infty} f(\bar{\varsigma}/S_{т0})d\bar{\varsigma}, \\ \beta = \int\limits_{\frac{-\phi_1^{(k)}}{\sqrt{\phi_2^{(k)}}}}^{\infty} f(\bar{\varsigma}/S_{тk})d\bar{\varsigma}. \end{cases}$$

Розрахувавши ймовірності повних похибок двохпараметрового контролю за допомогою комплексної статистики ς, в задачі, яка є альтернативною

ідентифікації станів $S_{т0}$ і $S_{тk}$, $k=\overline{1,4}$ і при ідентифікації непринадних станів $S_{тk}$, $k=\overline{1,4}$ форсунок ДА, визначено, що максимальна похибка складає не більше 0.5%. Діагностування типу порушень є більш складною задачею і хоча для діагностики станів $S_{т1}$, $S_{т2}$ похибка складає 35%, для інших п’яти варіантів з шести вона лежить в межах 0-6% .

Дані розрахунки, які отримані у другому розділі дисертаційної роботи, були підтверджені експериментально на одноциліндровому стенді дизельної установки на ДП "Завод ім. Малишева".

У третьому розділі розроблена модель робочої зони ДА шляхом заміни реального предмету з розподіленими параметрами предметом з зосередженими параметрами з урахуванням існуючих перехресних зв'язків, методом ідентифікації отримані структури і параметри передаточної функції досліджуваного предмету і взаємних впливів, визначена міра багатозв'язності ДА у статиці, синтезований і досліджений динамічний компенсатор, який компенсує вплив перехресних зв'язків на досліджуваний предмет, синтезований алгоритм фільтрації високочастотної складової інформаційного сигналу.

Перевірка результатів другого розділу на розгорнутому тепловозному дизелі продемонструвала значне зашумлення корисного сигналу, що призвело до значних похибок при виявленні принадності форсунок до подальшої експлуатації, а також при визначенні типової несправності. Тому інформаційний сигнал, який знімається з трубки паливного насосу високого тиску, в роботі був представлений у вигляді загальнопромислового випадкового процесу:

$$y(t)=y_{п}(t)+y_{ш}(t)+y_{г}(t)+y_{т}(t),$$

де $y_{п}(t)$ – корисна складова сигналу, $y_{ш}(t)$ – високочастотна центрована складова сигналу, $y_{г}(t)$ – гармонічна складова сигналу, $y_{т}(t)$ – низькочастотна складова сигналу (тренд).

Три останні складові реального вимірювального сигналу є шкідливими дестабілізуючими факторами з якими необхідно боротись. Синтез алгоритмів зниження впливу шкідливих факторів неможливе без наявності математичної моделі розглядаємого предмету чи процесу.

В даній дисертаційній роботі прийнята наступна структура динамічної моделі ДА:

$$\mathbf{W_o}=\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \cdots & W_{nn} \end{bmatrix},$$

де W_{ii} – функції, які визначають передачу впливу з боку форсунок (циліндрів) на сигнал вимірювального каналу, W_{ij} - функції, що відображають перехресні впливи.

Для визначення структури і параметрів передаточних функцій W_{ii} і функцій взаємного впливу W_{ij} використаний метод ідентифікації, алгоритм якого реалізований на основі експериментальної установки. За результатами ідентифікації визначена матриця, яка описує модель робочої зони розглядаємого чотирьохциліндрового ДА у вигляді:

$$\mathbf{W_o}=\begin{bmatrix} \dfrac{0.40}{2.74\cdot10^{-5}p^2+2.59\cdot10^{-3}p+1} & \dfrac{0.13}{2.17\cdot10^{-5}p^2+2.01\cdot10^{-3}p+1}e^{-3\cdot10^{-3}p} \\ \dfrac{0.15}{4.76\cdot10^{-5}p^2+2.35\cdot10^{-3}p+1}e^{-2\cdot10^{-3}p} & \dfrac{0.38}{3.13\cdot10^{-5}p^2+2.37\cdot10^{-3}p+1} \\ \dfrac{0.03}{7.51\cdot10^{-3}p+1}e^{-10^{-2}p} & \dfrac{0.12}{1.43\cdot10^{-5}p^2+9.69\cdot10^{-4}p+1}e^{-2\cdot10^{-3}p} \\ 0 & \dfrac{0.04}{6.11\cdot10^{-3}p+1}e^{-8\cdot10^{-3}p} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dfrac{0.03}{4.2\cdot10^{-3}p+1}e^{-9\cdot10^{-3}p} & 0 \\ \dfrac{0.15}{2.57\cdot10^{-5}p^2+7.8\cdot10^{-4}p+1}e^{-4\cdot10^{-3}p} & \dfrac{0.02}{6.85\cdot10^{-3}p+1}e^{-9\cdot10^{-3}p} \\ \dfrac{0.36}{3.91\cdot10^{-5}p^2+2.3\cdot10^{-3}p+1} & \dfrac{0.11}{3.64\cdot10^{-5}p^2+6.25\cdot10^{-4}p+1}e^{-2\cdot10^{-3}p} \\ \dfrac{0.18}{2.09\cdot10^{-5}p^2+1.14\cdot10^{-3}p+1}e^{-3\cdot10^{-3}p} & \dfrac{0.37}{3.2\cdot10^{-5}p^2+1.79\cdot10^{-3}p+1} \end{bmatrix}.$$

Багатозв'язність ДА в процесі роботи визначається за допомогою матриці Бристоля **Λ**. Для досліджуваної моделі чотирьохциліндрового ДА **Λ** записується:

$$\mathbf{\Lambda}=\begin{bmatrix} 1.153 & -0.14 & 6.12\cdot10^{-3} & 0 \\ -0.179 & 1.327 & -0.228 & 5.26\cdot10^{-3} \\ 4.2\cdot10^{-3} & -0.135 & 1.357 & -0.117 \\ 0 & 6.8\cdot10^{-3} & -0.3 & 1.18 \end{bmatrix}.$$

Матриця Бристоля для чотирьохциліндрового ДА, яка отримана у ході дослідження наглядно демонструє високий рівень багатозв'язності вже у статиці. Тому для розв'язання каналів, в даному конкретному випадку, було прийняте рішення удатися до використання компенсаторів перехресних зв'язків.

Модель динамічного компенсатора має наступний вигляд:

$$W_к(p)=\mathrm{diag}W_0(p)W_0^{-1}(p),$$

де $W_к(p)$, $W_0(p)$, $\mathrm{diag}W_0(p)$ – динамічні моделі компенсатора, предмету без компенсації, предмету з компенсацією перехресних зв'язків відповідно.

В дисертаційній роботі була синтезована динамічна модель компенсатора для реальної установки чотирьохциліндрового ДА, яка забезпечила компенсацію $y_г(t)$ вимірювального сигналу.

Високочастотна складова сигналу $y_ш(t)$ виключається за допомогою цифрового фільтру. Передаточна функція фільтру, що досліджувалась в каналах контролю різноманітних параметрів режиму роботи ДА, апроксимована виразом:

$$H(p) = \frac{K_ф}{p^2 + T_{ф1}p + a},$$

де $K_ф$ – коефіцієнт передачі, $T_{ф1}$ – постійна часу, a – константа.

Записаній передаточній функції відповідає фільтр Беселя. Передаточна функція цифрового фільтру знаходиться за допомогою апроксимації Ейлера. Результуюча передаточна функція цифрового фільтру, яка отримана з допомогою Z-перетворення має вигляд:

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} = \frac{K_ф T^2}{Z^{-2} - (2 + T_{ф1}T)Z^{-1} + (1 + T_{ф1}T + aT^2)}.$$

Якість фільтрації високочастотної складової інформаційного сигналу оцінювалось на ДП "Завод ім. Малишева".

Четвертий розділ присвячений розробці ПК на основі аналітичних і експериментальних даних, розробці та дослідженню вимірювального перетворювача ПК, визначення метрологічних характеристик перетворювача, виробленню алгоритмічних заходів для підтвердження вірогідності отриманих результатів, розробці загального алгоритму функціонування ПК ДА.

Для визначення принципової можливості побудови вимірювального пристрою, який оцінює залишковий ресурс працездатності форсунок, було вирішено дві задачі: 1) визначена функціональна залежність зміни амплітуди сигналу вимірювача $U_{ип}$ ПК від часу роботи форсунки Δt:

$$U_{ип}=f(\Delta t),$$

2) визначена функціональна залежність зміни параметру R, який відповідає залишковому ресурсу працездатності форсунок ДА, від амплітуди сигналу вимірювача:

$$R=f(U_{ип}).$$

Аналітичне рівняння розглядаємого вимірювального перетворювача базується на теорії надійності і представляється у вигляді:

$$R = 1 + t_н K_2 \ln\left(\frac{U_{ип}}{K_3}\right),$$

де K_2 – коефіцієнт, який залежить від часу експлуатації форсунки ДА, K_3 – коефіцієнт пропорціональності, $t_н$ – номінальний час безвідмовної роботи форсунки.

Ця аналітична характеристика була перевірена на адекватність експериментально. В ПК лінеаризація цієї характеристики здійснюється

програмним методом на основі синтезу лінеаризуючої нелінійності з подальшою автоматичною корекцією характеристики вимірювального перетворювача.

В даному розділі роботи визначені метрологічні характеристики вимірювального перетворювача оцінки залишкового ресурсу в залежності від амплітуди сигналу $U_{ип}$.

Систематична складова похибки визначалась як похибка перетворювача по входу:

$$\Delta U_{ип} = U_{ипн} - U_{ип}, \quad (1)$$

де $U_{ипн}$ - номінальне значення вхідного сигналу, яке визначається з теоретичної залежності, $U_{ип}$ - поточне значення вхідного сигналу. Максимальне значення систематичної складової похибки по входу: $\Delta U_{ип} = 0.056$ при $U_{ип} = 1В$.

Розрахунок випадкової складової похибки по входу здійснюється на основі формули (1), де $U_{ипн}$ визначається з виразу:

$$R_1 = \overline{D}_{ус} U_{ипн} + \overline{E} \pm 1{,}92\sigma_{R1}, \quad (2)$$

де 1.92 - постійний коефіцієнт, що відповідає ймовірності $P_Д$=0.95.

Максимальне значення випадкової складової похибки по входу виходячи з (1), (2): $\Delta U_{ип} = 0.032$ при $U_{ип} = 1В$, $P_Д$ =0.95.

Випадкова складова похибки по виходу пропорційна середньоквадратичному відхиленню випадкової величини і була визначена з виразу:

$$\sigma_{R1} = \sqrt{D_{D_{ус}} U_{ип}^2 + D_E}$$

де $D_{D_{ус}}$, D_E - дисперсії коефіцієнтів $D_{ус}$ і E дійсної функції перетворювання. При цьому адитивна складова даної похибки визначається дисперсією коефіцієнта E, а мультиплікативна - дисперсією коефіцієнта $D_{ус}$. Максимальне значення випадкової складової похибки по виходу: $\sigma_{R1} = 0.04045$ при $U_{ип} = 1В$, для $P_Д = 0.95$.

При ймовірності $P_Д$=0.95 чутливість перетворювача знаходиться як:

$$S = \overline{D}_{ус} \pm 1.92\sqrt{\frac{D_{D\,ус}}{N}},$$

де N - кількість досліджуваних однотипних форсунок. Для даного випадку чутливість перетворювача: $S=0.9371 \pm 0.0135$, при $P_Д = 0.95$.

Визначення порогу чутливості для адитивної складової похибки по входу здійснюється на основі виразу:

$$\Delta_0 = \left|\overline{E} + 1.92\sqrt{D_E}\right|.$$

Для досліджуваного вимірювального перетворювача поріг чутливості дорівнює: $\Delta_o = 0.053$ при $P_Д = 0.95$.

Працездатність пристрою і ступінь довіри до отриманих результатів оцінюють загальні функціональні характеристики. Відхід параметрів ПК від

робочих, може здійснюватись за рахунок впливу багатьох дестабілізуючих факторів. Вплив всіх зовнішніх дестабілізуючі факторів на роботу ПК інтегрально можна представити як низькочастотний тренд $y_т(t)$ у вібросигналі. Виявлення існування тренду при контролі стану форсунки свідчить про несправність ПК в цілому.

Загальний алгоритм роботи ПК ДА, який забезпечує визначення принадності форсунки для подальшої експлуатації, реалізований в макетному зразку, який ілюстративно представлений в дисертаційній роботі.

П'ятий розділ присвячений питанням вирішення задач, пов'язаних з практичним застосуванням теоретичних результатів, отриманих в дисертаційній роботі, що закінчуються створенням дослідного зразка ПК ДА.

Перший етап досліджень відносився до збору попередніх довідок про досліджуваний предмет в частині визначення принципових позицій відносно можливостей безрозбірного контролю його стану. Практичними результатами вказаних досліджень стали висновки про принципову можливість безрозбірного контролю стану форсунок ДА та використання п'єзоелектричного сенсору вібрації. Дослідження проходили на ДП "Завод ім. Малишева".

На другому етапі (на НВО "Метенергомаш") були виявлені дестабілізуючі фактори, які впливають на похибку визначення стану форсунок, визначений рівень багатозв'язності процесів в робочій зоні ДА, розроблена установка для ідентифікації моделей ДА.

Третій етап був присвячений розробці програмних засобів попередньої фільтрації отриманих даних з вимірювального каналу, їх статистичній обробці, визначенню метрологічних характеристик ПК.

На останньому етапі, за результатами дисертаційної роботи, створений і досліджений у локомотивному депо "Основа" макетний зразок ПК ДА.

ВИСНОВКИ

В дисертації представлено теоретичне узагальнення і перспективне вирішення науково-практичної задачі синтезу ПК ДА. Основні результати даної дисертаційної роботи формулюються наступним чином:

- обґрунтовано використання методів неруйнівного контролю при визначенні стану паливної системи ДА,
- проаналізовані зовнішні дестабілізуючі фактори, які впливають на ДА під час ведення процедури контролю, запропонована їх класифікація,
- синтезовані і досліджені ймовірнісні моделі інформаційного сигналу, на основі яких розроблена та досліджена методика визначення типової непринадності у форсунках ДА з застосуванням безрозбірних технологій,

- отримана детермінована модель робочої зони ДА шляхом практичної ідентифікації та синтезований компенсатор перехресних зв'язків, на основі якого здійснений розв'язок контурів ДА,

- вибрана інформаційна ознака, яка має найбільші переваги при контролі стану паливної системи ДА, а також розроблена класифікація стану форсунок ДА у просторі цієї інформаційної ознаки,

-досліджені метрологічні характеристики вимірювального перетворювача ПК ДА,

- розроблені структура і алгоритм функціонування ПК ДА,

- розроблений та досліджений макетний зразок ПК ДА та запроваджені у виробництво методи неруйнівного контролю стану паливної системи ДА.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ПРАЦЬ

1. Борисенко А.Н., Кропачек О.Ю., Свистун В.Г. Оптимизация рабочей частоты электромагнитного датчика топливоподачи для системы диагностирования и регулирования дизельного двигателя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: ХГПУ. –2000. –Вып.92. –С.155-159.

Здобувач розробив алгоритм оптимізації робочої частоти електромагнітного сенсора.

2. Валуйская О.Ю. Оценка и пути снижения влияния помехи на точность устройства диагностирования топливовпрыскивающей форсунки дизеля // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.–Харьков: ХГПУ. –2000. –Вып.125. –С.22-26.

3. Валуйская О.Ю. Анализ фазовой погрешности регистрации пьезодатчиком и передачи по линии связи сигнала топливоподачи дизеля / Український метрологічний журнал. –Харків, 2002. –Вип.1. –С.31-34.

4. Валуйская О.Ю. Обработка вибросигналов с целью определения параметров для экспресс-диагностики топливной аппаратуры дизельных агрегатов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". –Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". –2002. –Вип.9, т.7. –С.31-34.

5. Мигущенко Р.П., Валуйская О.Ю. Методика идентификации процессов рабочей зоны ДГУ // Системи обробки інформації. –Харків: ХВУ. –2003. –Вип. 3. –С.75-80.

Здобувач виконав розрахунки з отримання моделі робочої зони ДА.

6. Самсонов В.П., Валуйская О.Ю. Вероятностная модель диагностического сигнала вибродатчика при исследовании топливной

аппаратуры дизельных установок // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". –Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". –2003. –Вип.7, т.3. –С.149-154.

Здобувач синтезував ймовірнісну модель інформаційного сигналу вібросенсору.

7. Самсонов В.П., Кропачек О.Ю. Оценка частотных спектров нестационарного диагностического вибросигнала при исследовании топливной аппаратуры дизельной установки // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". –Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". –2003. –№ 21. –С.197-201.

Здобувач дослідив частотні спектри інформаційного сигналу.

8. Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю. Исследование точностных характеристик измерительного преобразователя диагностической установки дизельных агрегатов / Східно-Європейський журнал передових технологій. –Харків, 2003. –№ 5. –С.84-85.

Здобувач виконав розрахунки метрологічних характеристик вимірювального перетворювача.

9. Мигущенко Р.П., Гусельников В.К., Кропачек О.Ю. Исследование абсолютного остаточного ресурса работоспособности форсунок дизель-генераторных установок // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". –Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут".–2003. –№ 26. –С.115-118.

Здобувач провів експериментальні дослідження з оцінок залишкового ресурсу форсунок ДА.

10. Мигущенко Р.П., Гусельников В.К., Валуйская О.Ю. Классификация состояния форсунок дизель-генераторной установки по числовым характеристикам // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". –Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут".–2004. –№ 5. –С.88-92.

Здобувач визначив похибки класифікації форсунок у просторі інформаційної ознаки.

АНОТАЦІЇ

Кропачек О.Ю. Методи і пристрій контролю віброприскорень стінок паливопроводу високого тиску дизельних агрегатів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004р.

Дисертація присвячена дослідженню, розробці та впровадженню методичних, апаратурних і програмних засобів для системи контролю дизельних агрегатів. Мета дисертаційної роботи заключається у підвищенні ефективності контролю стану паливної системи за рахунок використання методів неруйнівного контролю і безрозбірних технологій. В роботі вирішені питання оцінки принадності форсунки для подальшої експлуатації, оцінки типової несправності у форсунці, оцінки залишкового ресурсу працездатності форсунки дизельних агрегатів. В дисертації розроблені класифікація визначення стану форсунок за принципом "принадний-непринадний", алгоритм визначення типової несправності; синтезовані динамічний компенсатор і цифровий фільтр нижніх частот; синтезована аналітична залежність зміни залишкового ресурсу працездатності форсунки від амплітуди вимірювального сигналу; запропонований оригінальний алгоритм підвищення вірогідності індицюємих результатів; розроблений і застосований на практиці макетний зразок пристрою контролю.

Ключові слова: пристрій контролю, метод контролю, математична модель, дизельний агрегат, форсунка, точність, вірогідність, надійність, динамічний компенсатор

Кропачек О.Ю. Методы и устройство контроля виброускорений стенок топливопровода высокого давления дизельных агрегатов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2004р.

Диссертация посвящена исследованию, разработке и внедрению методических, аппаратурных и программных средств для системы контроля дизельных агрегатов. Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности контроля состояния топливной системы за счет использования методов неразрушающего контроля и безразборных технологий.

В диссертационной работе проведен анализ существующих и возможных решений для достижения цели, определен круг основных задач исследования. К таковым отнесены: оценка функциональной готовности форсунки дизельных агрегатов по принципу "годен-негоден", оценка типовой неисправности форсунки, оценка остаточного ресурса роботы (в случае пригодности), а также определение тенденции изменения технических показателей форсунки при

дальнейшей эксплуатации. Для решения выдвинутых задач в работе использовался вибросигнал со стенок топливопровода высокого давления.

При оценке функциональной готовности форсунки для дальнейшей эксплуатации была разработана и исследована классификация состояния предмета исследования в пространстве одного информационного признака, каким является квадрат амплитуды среднеквадратического отклонения вибросигнала в моменты открытия и закрытия клапана форсунки, определена погрешность классификации, проведены практические испытания пригодности форсунок в производственных условиях.

При оценке типовой неисправности форсунки дизельных агрегатов рассмотрены тестовые статистики при однопараметровом и двухпараметровом контроле изменений спектральной плотности вибросигнала. Для однопараметрового контроля сделан сравнительный анализ эффективности применения T- и Q-статистик обнаружения возможных нарушений в функционировании топливной системы дизельных агрегатов. Синтезирована комплексная двухпараметровая статистика на основе функций правдоподобия. Результаты методики и погрешностей определения типовой неисправности проверены имитационным моделированием на ЭВМ.

Для получения надежных результатов контроля информационный сигнал, снимаемый с трубки топливного насоса высокого давления, обрабатывался на предмет снижения влияния внешних низкочастотных и высокочастотных дестабилизирующих факторов. Устранение влияние вредной низкочастотной составляющей информационного сигнала производилось путем применения синтезированного динамического компенсатора, устранение высокочастотной помехи – за счет фильтрации сигнала цифровым фильтром нижних частот.

При оценке остаточного ресурса работоспособности форсунки в диссертационной работе синтезированы функциональная и регрессионная зависимости изменения показателя остаточного ресурса от квадрата амплитуды среднеквадратического отклонения вибросигнала. Произведена линеаризация указанных характеристик, оценены метрологические характеристики разработанного измерительного преобразователя для оценки остаточного ресурса форсунок и определены тенденции изменения технических показателей форсунок при дальнейшей эксплуатации.

Для проверки аналитических результатов, полученных в диссертационной работе, разработан и исследован в производственных условиях макетный образец устройства контроля состояния топливной аппаратуры дизельных агрегатов.

Ключевые слова: устройство контроля, метод контроля, математическая модель, дизельный агрегат, форсунка, точность, достоверность, надежность, динамический компенсатор.

Kropachek O. Yu. Methods and device of the control acceleration of vibration of walls of a fuel wire of high pressure of diesel units. - Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by speciality 05.11.13 - devices both methods of the control and definition of structure of substances. - National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2004p.

The dissertation is devoted to research, development and introduction methodical, hardware and software for diagnostic system of diesel units. The purpose of the dissertation consists in increase of efficiency of diagnostics of fuel system at the expense of use of methods of the not destroying control and not folding technologies. In work the questions of an estimation of suitability of the spraying device for the further operation, estimation of typical malfunction in spraying devices, estimation of a residual resource of serviceability of the spraying device of diesel units are decided. In the dissertation are developed classification of definition of a condition of the spraying device by a principle the algorithm of definition of typical malfunction "suitable-unsuitable"; are synthesized the dynamic equaliser and digital filter of the top frequencies; the analytical dependence of change of a residual resource of serviceability of the spraying device from amplitude of a measuring signal is synthesized; The original algorithm of increase of reliability of results of indication is offered; is developed and the model sample of diagnostic system is tested in practice.

Key words: device of control, method of control, mathematical model, diesel unit, spraying device, accuracy, reliability, dynamic equaliser.