

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

**УЩАПІВСЬКИЙ ІГОР ЛЮБОМИРОВИЧ**

УДК 614.846.35:534.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ПОЖЕЖНИМИ  
АВТОМОБІЛЯМИ З ВІДЦЕНТРОВИМИ ПОЖЕЖНИМИ НАСОСАМИ**

21.06.02 – пожежна безпека

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
**Кирилів Ярослав Богданович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, провідний науковий співробітник відділу організації науково-дослідної діяльності

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Костенко Віктор Климентович**, завідувач кафедри природоохоронної діяльності Донецького національного технічного університету (м. Красноармійськ) Міністерства освіти та науки України

кандидат технічних наук, доцент,  
**Виноградов Станіслав Андрійович**, доцент кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки Національного університету цивільного захисту України

Захист відбудеться «16» жовтня 2015 року о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

Автореферат розісланий «\_\_\_\_» вересня 2015 року

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К 35.874.01  
к.т.н., доцент

В. М. Баланюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Протягом останніх п'яти років в Україні зареєстровано 322029 пожеж, під час яких загинуло 13076 та травмовано 7711 осіб, зокрема у 2014 році на 68879 пожежах загинуло 2246 та травмовано 1450 осіб, а економічні втрати перевищили 7,7 млрд. грн. Понад 90 % пожеж ліквідовують водяними та водопінними вогнегасними речовинами, які подаються стволами основних пожежних автомобілів.

Ефективність пожежогасіння значною мірою обумовлена працездатністю пожежних насосів відцентрового типу, які входять до складу пожежно-технічного оснащення основних (98 % від загальної кількості в Україні) пожежних автомобілів.

Як відомо, робота відцентрових пожежних насосів супроводжується вібраційними коливаннями, що може бути використано під час їх діагностування та технічного обслуговування.

Виявлення взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів з їхнім технічним станом є актуальною науковою задачею, розв'язання якої є науковим підґрунтям запровадження вібраційного діагностування в системі технічного обслуговування пожежних автомобілів, оснащених такими насосами для забезпечення їх працездатності та підвищення ефективності гасіння пожеж.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась відповідно до Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012-2015 роки, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 року №2348, Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012-2015 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 12.05.2012 року №590, під час виконання програми науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на тему «Покращання ефективності використання відцентрових пожежних насосів та оцінка надійності їх роботи вібраційною діагностикою технічного стану» (№ держреєстрації 0114U001777), в якій здобувач був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у застосуванні вібраційного діагностування відцентрових пожежних насосів в системі технічного обслуговування пожежних автомобілів для підвищення ефективності їх застосування під час гасіння пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт, пов'язаних з їх виникненням.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є виявлення взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів з їх технічним станом та технічними характеристиками, як основи їх вібраційного діагностування в системі технічного обслуговування.

Для досягнення визначеної мети необхідно розв'язати такі задачі досліджень:

– проаналізувати сучасний стан застосування пожежних автомобілів з відцентровими пожежними насосами для гасіння пожеж, методи діагностики їх

технічного стану і технічного обслуговування та виявити шляхи підвищення ефективності гасіння пожеж;

- розробити математичні моделі роботи відцентрових пожежних насосів та провести моделювання їх динамічних характеристик, у тому числі за наявності внутрішніх дефектів;

- розробити методику та провести експериментальні дослідження з виявлення взаємозв'язку виду несправностей (вихід з ладу підшипників, пошкодження робочого колеса, збільшення допустимих зазорів у корпусі, перекис вала тощо) відцентрового пожежного насоса пожежного автомобіля із параметрами його амплітудно-частотних характеристик;

- здійснити перевірку адекватності розроблених математичних моделей з експериментальними даними;

- з урахуванням отриманих результатів теоретичних та експериментальних досліджень із застосуванням алгоритму дискретного перетворення Фур'є та сучасних програмних комплексів розробити критерії ідентифікування несправностей і технічного стану відцентрових пожежних насосів пожежних автомобілів за спектральними характеристиками вібраційних сигналів;

- розробити методику визначення технічного стану відцентрового пожежного насоса за вібраційними показниками та порядок її застосування в системі технічного обслуговування пожежних автомобілів.

**Об'єкт дослідження** – вібраційні процеси під час роботи відцентрових пожежних насосів, які входять до пожежно-технічного оснащення пожежних автомобілів.

**Предмет дослідження** – взаємозв'язок параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів пожежних автомобілів з їх технічним станом та ефективністю застосування під час гасіння пожеж і проведення аварійно-рятувальних робіт, пов'язаних з їх виникненням.

**Методи дослідження.** Математична статистика для аналізу пожеж та ефективності застосування пожежних автомобілів під час гасіння пожеж в Україні за останні 5 років; теорія коливань та метод скінчених елементів із використанням сучасних програмних засобів тривимірного комп'ютерного моделювання вібраційних процесів під час роботи відцентрових пожежних насосів із дефектами; інженерне планування експериментальних досліджень, а також спектральна теорія обробки сигналів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у встановленні взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів з їх технічним станом та технічними характеристиками. При цьому:

- *уперше* теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність застосування вібраційних методів діагностування в системі визначення технічного стану та технічного обслуговування відцентрових пожежних насосів пожежних автомобілів України, що створило передумови підвищення ефективності гасіння пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт, пов'язаних з їх виникненням;

- *уперше* запропоновано у якості кількісних показників вібрацій за

різними напрямками використовувати параметр середньоквадратичного значення віброприскорень та відношення гармонік вібрацій, отриманих за дискретного перетворення Фур'є, до середньоквадратичного значення віброприскорень у відповідному напрямі;

– *уперше* визначено діагностичні вібраційні ознаки дефектів відцентрових пожежних насосів, а саме: засмічення робочого колеса призводить до збільшення дисбалансу, що посилює вібрації, особливо у вертикальній площині; дефект типу послаблення посадки вала у підшипниковому вузлі має дві характерні ознаки: по-перше – це істотне збільшення осьової складової вібрацій порівняно з вібраціями насоса без дефектів або з іншими дефектами, а по-друге – це виникнення дрібної гармоніки, що відповідає 0,5 частоти обертання ротора. Перший з ефектів проявляється на усіх режимах роботи та супроводжується істотною зміною у просторовій формі вібрацій, так кут нахилу еліпса вертикальної проекції просторової траєкторії вектора віброприскорень змінюється з 55 до 80 градусів; суттєво пошкоджений підшипник має аналогічні прояви, що супроводжуються збільшенням осьової складової у вібраціях (проте значно менш вираженої порівняно з послабленням посадки вала), додатково до цього спектр вібрацій має характерні «підшипникові частоти», що становлять 3,5 – 3,6 кратності частоти обертання ротора;

– *удосконалено* математичні моделі, що на відміну від існуючих, дають змогу описувати вібраційний стан відцентрових пожежних насосів під час роботи, у тому числі і для насосів, які мають внутрішні дефекти різного типу;

– *набуло подальшого розвитку* тривимірне геометричне моделювання роботи відцентрових пожежних насосів в рамках методу скінчених елементів у трьох напрямках: осьовому, вертикальному та горизонтальному.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати теоретичних та експериментальних досліджень з виявлення взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів з їх технічним станом та технічними характеристиками покладено в основу застосування вібраційного діагностування та технічного обслуговування, передбаченого розробленою «Методикою визначення технічного стану пожежного насоса в експлуатації за вібраційними показниками», затвердженою начальником ГУ ДСНС України у Львівській області та впровадженою у його практичну діяльність, про що засвідчує акт впровадження.

Розроблені тривимірні моделі, які описують роботу відцентрових пожежних насосів, використовуються на ТОВ «ПК «ПОЖМАШИНА» для уявлення про особливості роботи окремих конструктивних деталей та визначення їх впливу на експлуатаційні параметри та надійність роботи. Отримані результати створюють передумови для удосконалення технічної документації та формування рекомендацій щодо підвищення довговічності, ресурсу та надійності експлуатації відцентрових пожежних насосів, що засвідчено актом впровадження.

Основні положення роботи також впроваджено в навчальний процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності та Черкаського

інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ під час викладання дисциплін за напрямками підготовки «Пожежна безпека» та «Цивільний захист».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. Роботи [7, 11, 14] опубліковані одноосібно. В роботах у співавторстві автором:

- проведено аналіз відомих характерних дефектів, що супроводжують експлуатацію відцентрових пожежних насосів [3, 5] та теоретичні дослідження, що спрямовані на визначення закономірностей формування вібраційного стану відцентрових пожежних насосів під час їх роботи у тому числі і насосів, що мають приховані дефекти, які є характерними в експлуатації [2, 12];

- розроблено підхід до визначення технічного стану насоса, що базується на результатах вібраційної діагностики [5] та проведено теоретичні дослідження, щодо визначення впливу технічного стану насоса на його експлуатаційні характеристики та ефективність використання під час ліквідації пожеж [6, 8];

- розроблено систему контролю технічного стану відцентрових пожежних насосів в експлуатації, що базується на результатах їх вібраційної діагностики [12].

Здобувач також брав участь у комплексі експериментальних досліджень вібрацій відцентрового пожежного насоса, що встановлений на діючому аварійно-рятувальному автомобілі [1, 4, 9, 10, 13] та провів обробку отриманих сигналів, що дало змогу виявити характерні вібраційні ознаки зношення підшипників [1] та їх інших пошкоджень [10], а також послаблення посадки вала [9].

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на: Міжнародній науковій конференції з природничих, математичних та технічних наук NaMaTech-2013 (м. Будапешт, Угорщина, 2013 р.); Міжнародній п'ятій науково-технічній конференції «Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні» (м. Київ, 2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика)» (м. Харків, 2014 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (м. Луцьк, 2014 р.); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014 р.); 16 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (м. Київ, 2014 р.).

Результати дисертаційної роботи також доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (2013-2015 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 14 наукових працях, з яких 10 у фахових виданнях, серед яких 4 наукові праці у міжнародних фахових виданнях та 6 у спеціалізованих виданнях, що входять до переліку ДАК України, 4 тези доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, переліку використаних в роботі літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації – 172 сторінки, в тому числі основна частина – 148 сторінок. Дисертація містить 68 рисунків, 6 таблиць, 5 додатків. Список використаних літературних джерел із 119 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено актуальність теми дисертації, об'єкт, предмет, мету та задачі наукового дослідження. Відображено наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, а також представлено відомості щодо їх апробації, впровадження та опублікування.

У **першому розділі** представлено аналіз сучасного стану проблеми, наведено огляд існуючих конструкцій пожежних насосів та особливості їх використання (експлуатації) в аварійно-рятувальній та протипожежній техніці.

Проведений аналіз показав, що найбільшого поширення у практиці ліквідації пожеж набули відцентрові пожежні насоси (ВПН). Серед усіх ВПН найбільш поширеними є насоси серії ПН-40УВ(А). Інші насоси є зазвичай більш спеціалізованими, проте геометрично та конструктивно є подібними до ПН-40УВ. Тому в даній роботі теоретичні та експериментальні дослідження проводились із ВПН ПН-40УВ, але отримані результати якісно можуть бути використані для будь-якого ВПН.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу надійності пожежного обладнання на показники ефективності гасіння пожеж викладені у працях Болотіна В. В., Грінченка О. С., Жовдака В. О., Канарчука В. Є., Светліцкого В. О., Переверзева Є. С., Гуліди Е. М., Мовчана І. О., Яковенка Ю. Ф. та інших. Однак дослідженню взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів, їх технічному стану та технічним характеристикам приділена недостатня увага.

Разом з тим в сучасних умовах в Україні використовується велика кількість техніки, яка вже майже вичерпала свій проектний ресурс, що призводить до частих випадків її виходу з ладу під час виконання оперативних завдань. Такий стан робить актуальним та важливим створення системи ранньої діагностики технічного стану ВПН, як одного з головних елементів протипожежного обладнання підрозділів ДСНС, що застосовується при ліквідації пожеж. Тому виявлення взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів з їх технічним станом та технічними характеристиками створить основу їх вібраційного діагностування в системі технічного обслуговування з метою підвищення ефективності гасіння пожеж.

У **другому розділі** розглянуто математичне моделювання вібраційного стану ВПН ПН-40УВ. Для цього була побудована тривимірною геометрична модель, що враховує основні його структурні частини: корпус, кришку корпусу, робоче колесо, що посаджене на вал, масляну ванну із підшипниковим вузлом, а також має умовно представлені елементи колектора та трубопроводних

систем. Розрахункові дослідження проводились в рамках методу скінчених елементів для чого на всі елементи насоса було нанесено сітку (рисунок 1). Також у розділі наведені основні математичні співвідношення, що відображають суть проведених комп'ютерних симуляцій.

$$[M]\{\ddot{q}\} + \beta \cdot [K] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{Q(t)\}, \quad (1)$$

де  $[M]$  – глобальна матриця мас побудованої скінчено-елементної моделі, що формується з матриць мас окремих скінчених елементів;  $\{q\}$  – вектор стовпець вузлових переміщень (переміщення кожного вузла скінчених елементів моделі у трьох напрямках);  $\beta$  – коефіцієнт дисипації енергії, відповідно до моделі Релея-Фойгта;  $[K]$  – глобальна матриця жорсткості побудованої скінчено-елементної моделі, що формується з матриць жорсткості окремих скінчених елементів;  $\{Q\}$  – вектор вузлових сил;  $t$  – час.

Математичне формулювання проблеми визначення власних частот та форм коливань задається рівнянням (2), яке може бути отримане з загального рівняння динаміки відцентрового насоса (1) якщо не враховувати дисипативні складові та зовнішній вплив

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = 0 \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) відшукується у вигляді гармонічних рухів за яких усі точки системи відтворюють періодичність руху на одній і тій самій частоті, що називається власною:

$$\{q\} = \{\xi\} \cdot \sin(pt), \quad (3)$$

де  $\xi$  – вектор амплітуд вузлових переміщень при власних коливаннях – вектор власної форми коливань;  $p$  – власна частота системи.

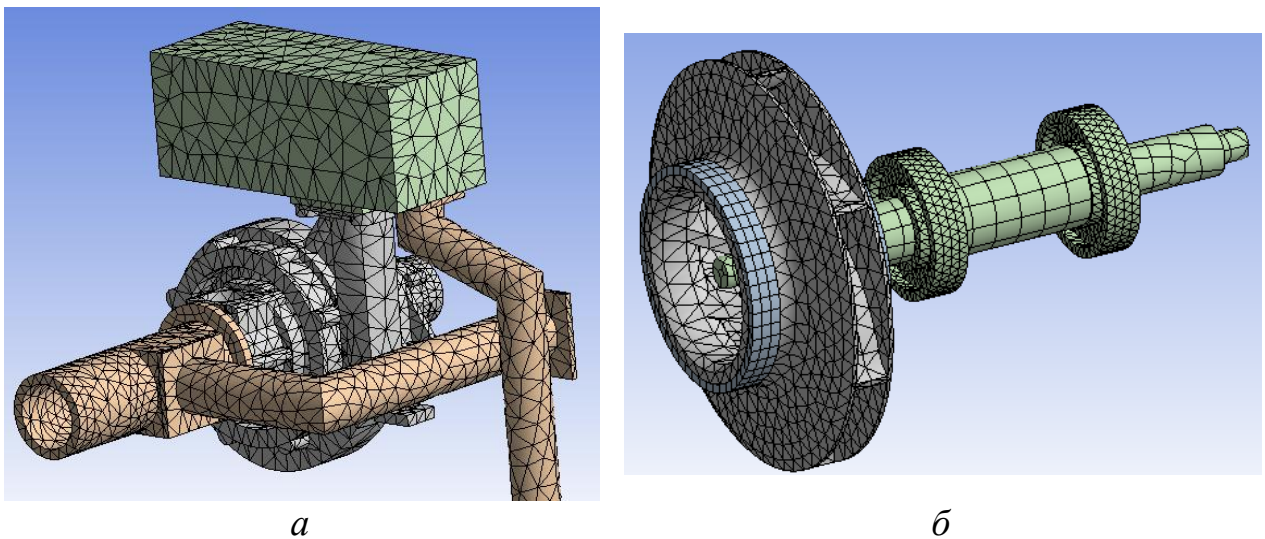


Рисунок 1 – Скінчено-елементні моделі: *a* – відцентрового пожежного насоса ПН-40УВ зібраного з трубопроводною системою; *б* – робочого колеса, що посаджене на вал у підшипниках



Тоді отримаємо рівняння (4) для визначення власних форм коливань, яке має розв'язки тільки за реалізації умови (5), що дає змогу визначити власні частоти відцентрового пожежного насоса:

$$([K] - p^2 \cdot [M]) \cdot \{\xi\} = 0 \quad (4)$$

$$\det([K] - p^2 \cdot [M]) = 0 \quad (5)$$

Проведено перевірку адекватності створених моделей. Для цього було розраховано спектри власних коливань окремих елементів: корпусу та робочого колеса, та проведені натурні випробування на імпульсне збудження вільних коливань тих самих деталей у підвішеному стані. Розбіжність у власних частотах між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 10%.

Виконано аналіз вимушених коливань насоса, що формуються внаслідок дії динамічних реакцій (прояв ефекту неспіввісності карданного вала, вібрації двигуна тощо). Побудовані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) переміщень та віброприскорень насоса (рисунок 2).

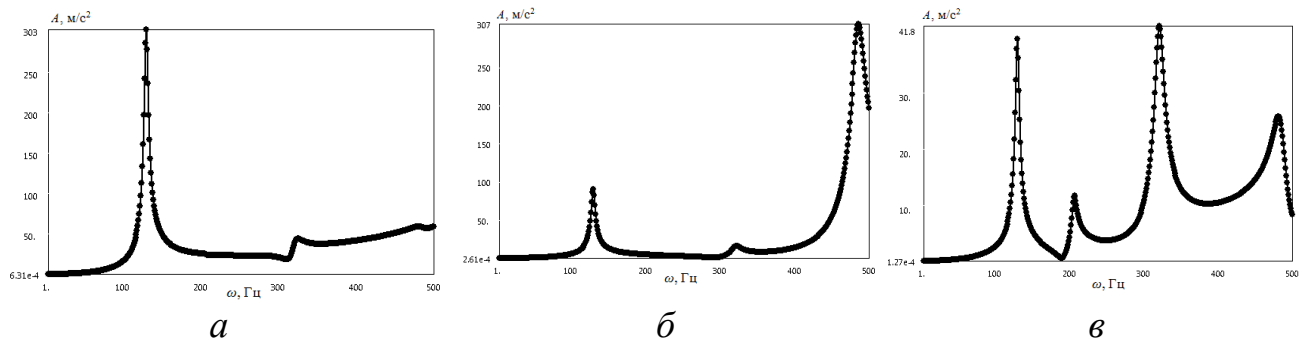


Рисунок 2 – Амплітудно-частотні характеристики віброприскорень насоса: *a* – вертикальний напрям (*Y*), *б* – осьовий напрям (*Z*), *в* – горизонтальний напрям (*X*)

АЧХ коливань дають змогу визначати гармоніки вимушених вібрацій насоса під час його роботи. Для цього необхідно скласти амплітуди гармонік на робочій частоті та гармоніки із частотами, які кратні основній. Основна гармоніка відповідає 2000 об/хв тобто 33 Гц. Доцільно розглядати 4 – 5 гармоніки. Отже, цікавим є аналіз також 66, 99, 132 Гц і т.д.

Наступним кроком у дослідженні є моделювання вібрацій насоса із дефектами. В даній роботі, зокрема, представлені дослідження вібрацій насоса, що має дефекти у підшипниковому вузлі. При цьому, моделювали два окремих випадки: частковий дефект, що проявляється у послабленні посадки вала у внутрішньому кільці підшипника та повну руйнацію підшипника. Відповідні АЧХ віброприскорень наведені на рисунку 3. Результати вказують, що пошкодження підшипника здатне збільшити амплітуди перших трьох гармонік вібрацій в осьовому та вертикальному напрямках майже у 3 рази, а у горизонтальному напрямі – більш ніж на 50%.

Схожі дослідження проведені і з моделюванням засмічення робочого колеса, яке проводилось шляхом додаванням зосередженої маси до лопаті

колеса. Для такої оновленої моделі було проведено дослідження гармонійних коливань за алгоритмом, що збігається із аналізом вимушених коливань насоса із пошкодженням підшипником. Відповідні результати наведені

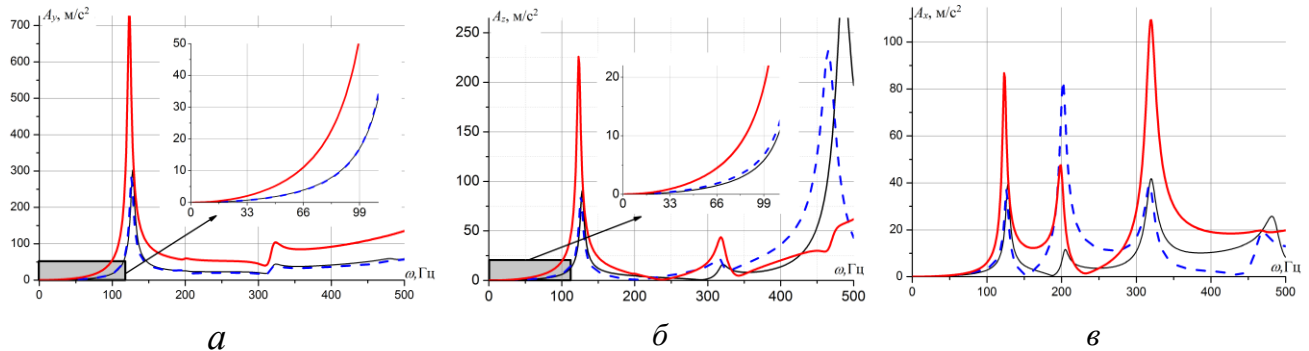


Рисунок 3 – АЧХ віброприскорень насоса, який має послаблення посадки вала в підшипниках (пунктир) та повністю зношений підшипник (суцільна лінія): *а* – вертикальний напрям (*Y*), *б* – осьовий напрям (*Z*), *в* – горизонтальний напрям (*X*)

на рисунку 4. Визначено, що засмічення робочого колеса лише збільшує дисбаланс, що відбивається у рівномірному підвищенні старших гармонік у межах 25%.

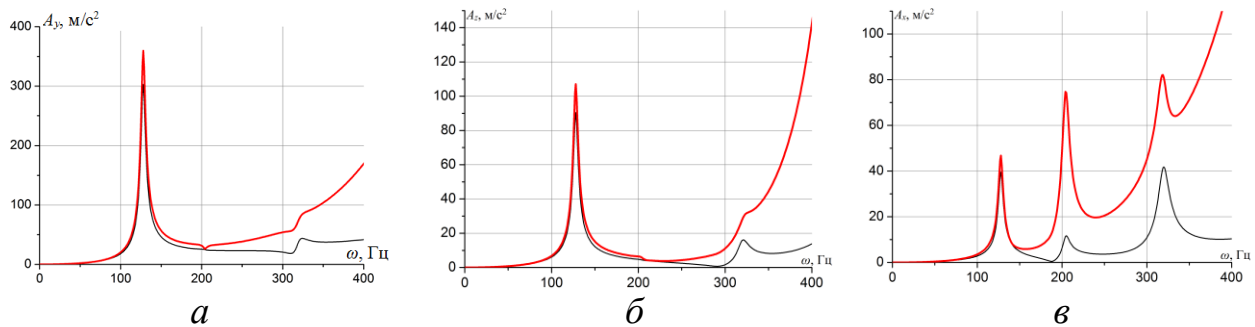


Рисунок 4 – Амплітудно-частотні характеристики віброприскорень насоса, який має засмічення робочого колеса: *а* – вертикальний напрям (*Y*), *б* – осьовий напрям (*Z*), *в* – горизонтальний напрям (*X*)

Отримані залежності можна привести до більш умовних комплексних характеристик, що відображають рівень вібрацій залежно від технічного стану насоса. Для цього в роботі оцінювали рівень вібрацій за модулем сумарного вектора нормованих середньоквадратичних значень (с.к.з.) вібрацій у різних напрямках

$$\psi_0 = \sqrt{\psi_x^2 + \psi_y^2 + \psi_z^2}, \quad (6)$$

де  $\psi_x$ ,  $\psi_y$ ,  $\psi_z$  – с.к.з. вібрацій у різних напрямках.

Використання відносних величин дає змогу отримати більш узагальнені закономірності. Показник  $\psi_0$  може бути легко визначений для вібрацій насоса із різним технічним станом, який моделюється на комп'ютері. Так, було проведено серію розрахунків із різними ступенями дефекту підшипників, що відповідали поступовому їх зносу та «формальному усуненню» з моделі, як зв'язку, тобто моделювався випадок руйнування. Вважаючи, що кожен із станів зношеності підшипника відповідає певному рівню технічного стану насоса,

було побудовано залежність між рівнем вібрацій та технічним станом насоса (рисунок 5). Використовуючи зазначену залежність можна за даними реєстрації рівнів вібрацій ідентифікувати технічний стан ВПН, та оцінити вплив цього стану на ефективність застосування насоса під час оперативних дій з ліквідації пожеж.

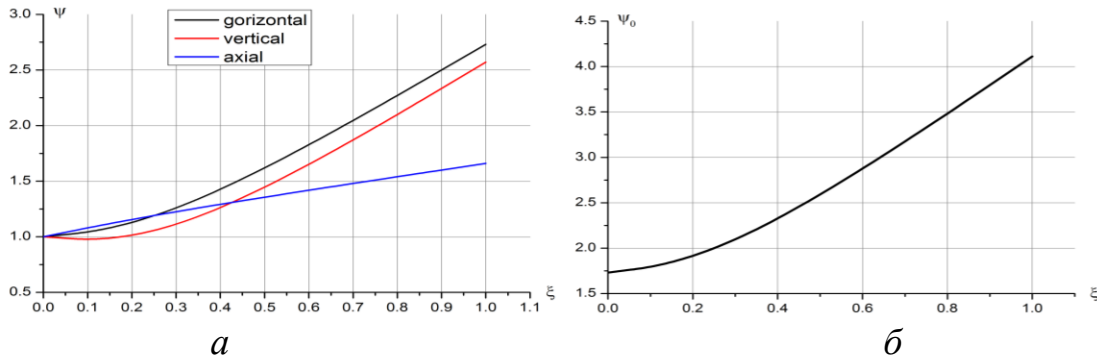


Рисунок 5 – Залежності відносного с.к.з у різних напрямках вібрацій: *а* – відносного сумарного с.к.з; *б* – від ступеня зносу підшипника (рівня технічного стану пожежного насоса)

Для зручності використання визначеної закономірності в роботі було запропоновано її апроксимацію

$$\xi = k_1 + \sqrt{k_1^2 + k_2(\psi - 1)}, \quad (7)$$

де  $\psi$  – нормований показник  $\psi_0$ .

**Третій розділ** присвячений експериментальним дослідженням вібраційних процесів (рисунок б), які відбуваються під час роботи відцентрового пожежного насоса ПН-40УВ. Під час випробувань вібрацій насоса на пожежному автомобілі вимірювання проводилось в трьох напрямках: осьовому (*Z*), вертикальному (*Y*) та горизонтальному (*X*), датчик встановлювався на всмоктувальному патрубку.

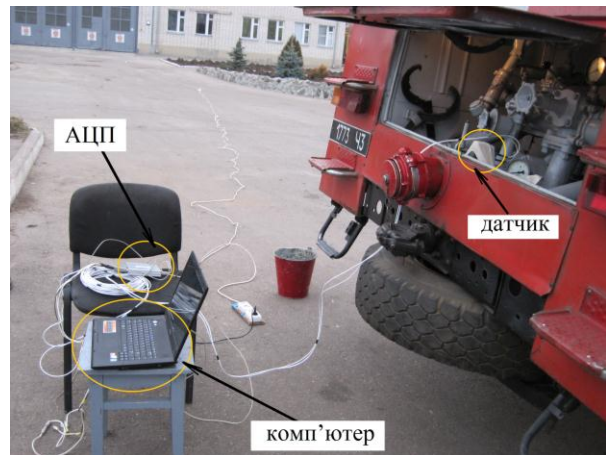


Рисунок 6 – Вимірювальний комплекс «Ультра-В-І» під час експериментальних досліджень

На рисунку 7 *а* представлено зареєстрований сигнал віброприскорень у вертикальному напрямі під час вимірювання. Зображення сигналу свідчить про наявність певної випадкової складової та його полігармонічний характер. Разом із тим часовий сигнал не має періодичних імпульсів чи інших виражених змін форми сигналу, що підтверджує відсутність дефектів та якісну збірку компонентів насоса. Спектр отриманого сигналу, що отриманий швидким перетворенням Фур'є, представлений на рисунку 7 *б*.

Аналіз спектра вказує на сильне домінування однієї гармоніки, що збігається по частоті із середньою частотою обертання ротора 37,73 Гц. Крім неї у спектрі із малою часткою присутня друга гармоніка середньої частоти

обертання ротора, а також досить широкий із майже однаковою інтенсивністю скачок амплітуд із діапазону частот від 100 до 260 Гц, а потім схожий починаючи від 350 Гц. При цьому на зазначеному скачку можна побачити прояв 4, 5, 6 та 7 гармонік із приблизно рівними амплітудами, що становлять 25% від амплітуди основної гармоніки.

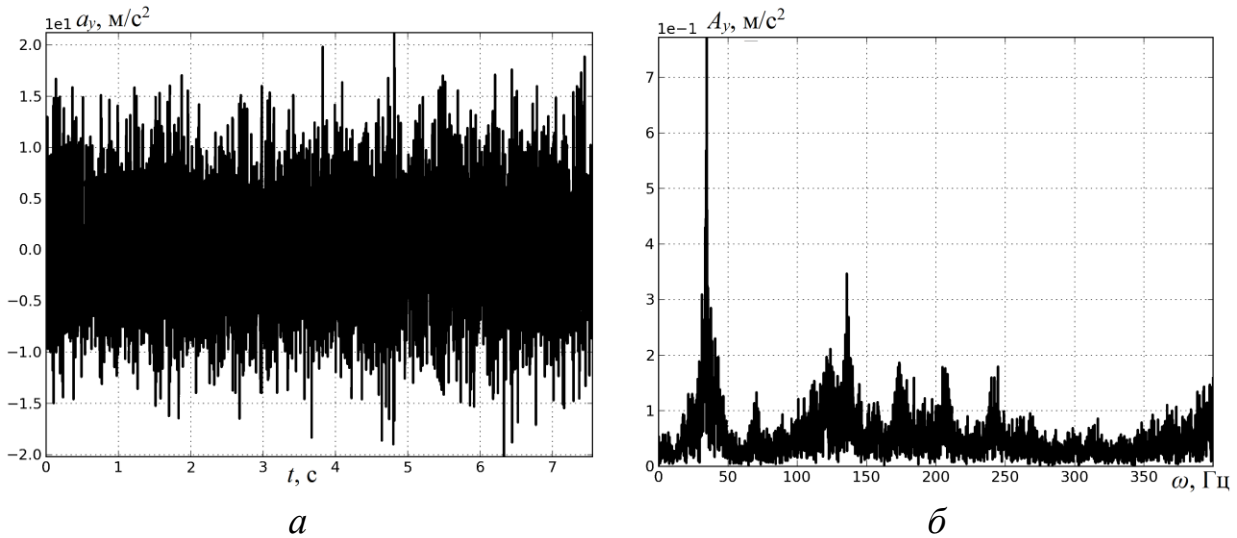


Рисунок 7 – Вібрації у вертикальному напрямі (Y):

*a* – зареєстрований сигнал віброприскорень, *b* – спектр сигналу

Порівняння кількісних показників вібрацій – с.к.з. віброприскорень у різних напрямках вказує на те, що найбільші вібрації спостерігаються у вертикальному напрямі, а у горизонтальному – найменші. Залежності с.к.з. віброприскорень від частоти обертання ротора представлені на рисунку 8.

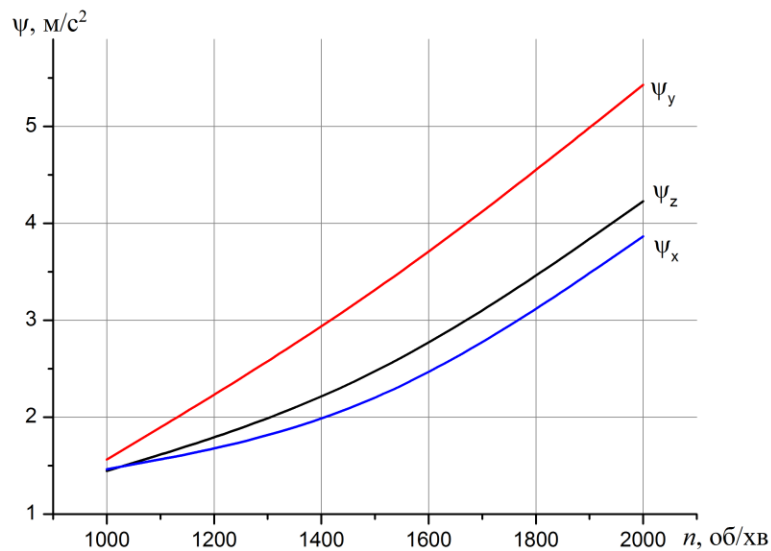


Рисунок 8 – Залежності середньоквадратичного значення вібрацій насоса у різних напрямках від частоти обертання ротора

Залежності с.к.з. віброприскорень від частоти обертання ротора представлені на рисунку 9. На графіку для наочності пунктирними лініями нанесено залежності с.к.з. віброприскорень під час роботи насоса на режимі без

води, а суцільними лініями середньоквадратичне значення віброприскорень під час роботи насоса на режимі із водою, але без її подачі (режим «нагріву»).

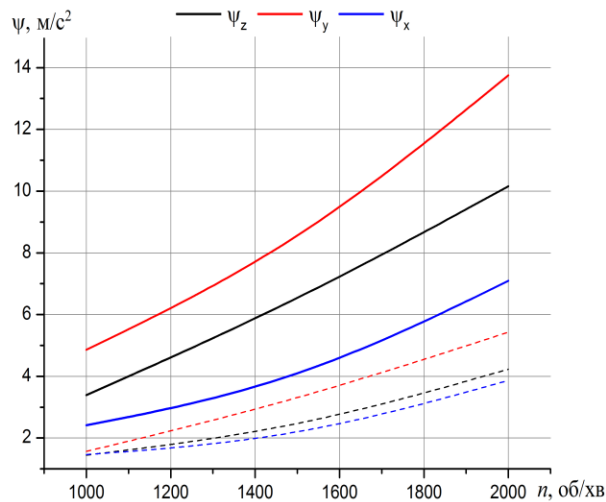


Рисунок 9 – Залежності середньоквадратичного значення вібрацій у різних напрямках від частоти обертання ротора для режиму роботи насоса із водою (суцільна лінія) та без води (пунктир)

У четвертому розділі розглянуто експериментальні дослідження з виявлення впливу дефектів та пошкоджень відцентрового пожежного насоса ПН – 40УВ на вібраційні параметри під час його роботи. Наведено аналіз формування вібраційного стану ВПН, який не має дефектів (новий, справний насос). Проведені дослідження визначають характерні особливості параметрів вібрацій насоса, що є еталонними.

Випробування проводились на робочому аварійно-рятувальному автомобілі з встановленим на ньому відцентровим пожежним насосом ПН – 40 УВ (рисунок 6). Використовувався вимірювальний комплекс «Ультра-В-І», розроблений на кафедрі динаміки і міцності машин в НТУ «ХПІ» (м. Харків). Під час випробувань вібрацій насоса на пожежному автомобілі вимірювання проводилось в трьох напрямках: осьовому (Z), вертикальному (Y) та горизонтальному (X), датчик встановлювався на всмоктувальному патрубку.

Для аналізу впливу різних чинників в дисертації аналізувалась вібрація, яка наявна під час роботи насоса на трьох окремих режимах: робота насоса, що заповнений водою проте не реалізує подачі рідини – це є режим «нагріву»; робота насоса без вогнегасної рідини всередині; режим нормальної роботи, коли насос подає рідину із автоцистерни через рукав на об'єкт пожежогасіння. Усі отримані вібраційні сигнали підлягали спектральному аналізу з використанням алгоритму дискретного перетворення Фур'є.

Отриманий спектр (рисунок 10) для вібрацій в осьовому напрямі має майже рівні за амплітудами 1, 3, 4, 5 та 6 гармоніки основної частоти та дещо меншу амплітуду 2 гармоніки. Відношення амплітуд гармонік до загального рівня середньоквадратичного значення віброприскорень у осьовому напрямі становить для першої та п'ятої гармонік 7 % для 3 та 4 – 5,3%, для 6 – 4,7%, а

для 2 гармоніки 3,3%. На частоті обертання 2000 об/хв середньоквадратичне значення віброприскорень в осьовому напрямі становить  $\psi_z = 4,2 \text{ м/с}^2$ .

Порівняння кількісних показників вібрацій – с.к.з. віброприскорень у різних напрямках вказує на те, що найбільші вібрації спостерігаються у вертикальному напрямі, а у горизонтальному – найменші. Різنا спрямованість вібрацій пояснюється нерівномірністю жорсткості кріплення насоса та направленістю вимушеної дії.

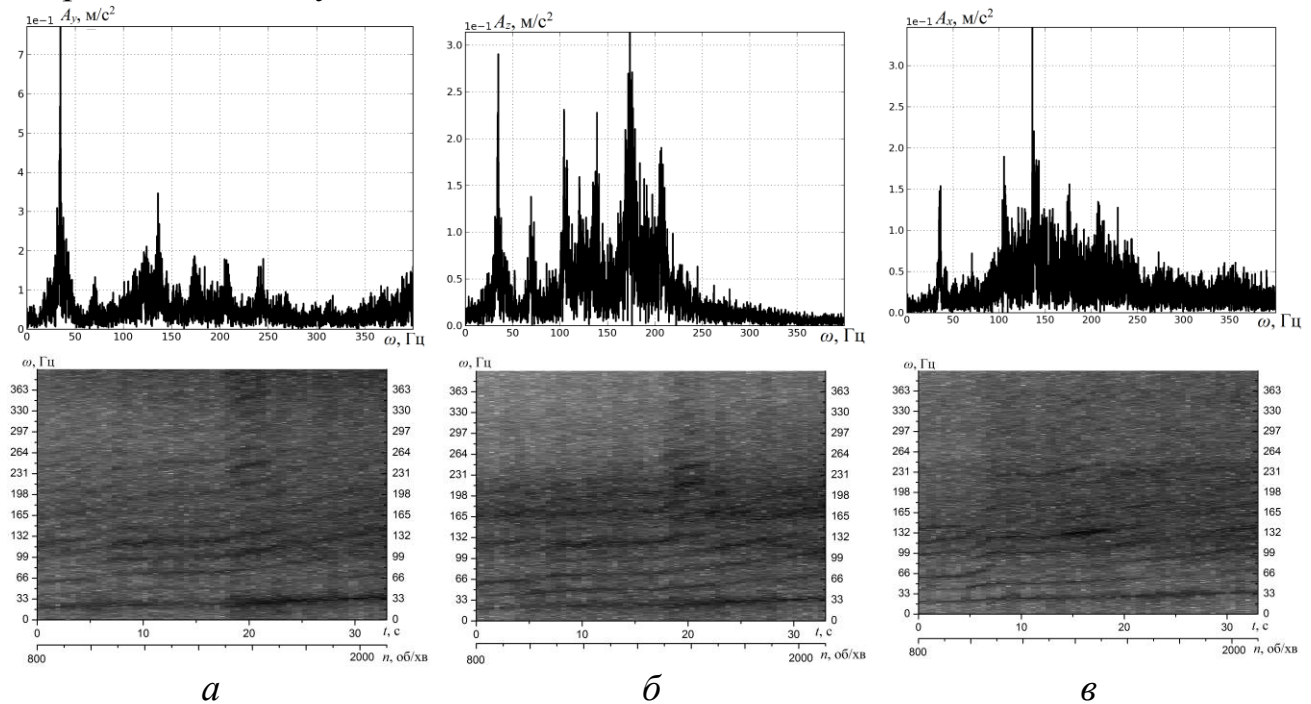


Рисунок 10 – Спектри та спектрограми сигналу віброприскорень справного насоса, що працює без рідини: *а* – вертикальний напрям (*Y*), *б* – осьовий напрям (*Z*), *в* – горизонтальний напрям (*X*)

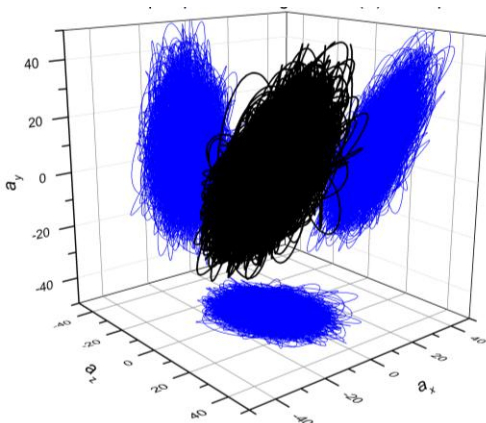


Рисунок 11 – Просторова траєкторія вектору віброприскорення при вібрації

Для більш детального аналізу спрямованості вібрацій насоса в роботі аналізувались просторові траєкторії вібрацій (траєкторію, яку описує вектор прискорення у заданій точці). Відповідні результати графічно наведені на рисунку 11. Усі проєкції траєкторії утворюють еліптичні фігури. Цікавим результатом є ефект нахилу найбільшої осі еліпса у проєкції траєкторії вектора віброприскорень на площину *YZ*. Кут нахилу до осьового напрямку становить  $55^\circ$ . Аналогічно були дослідженні вібрації насоса на інших режимах. Окремо слід відмітити

режим роботи насоса із водою, але без її подачі. Це режим «нагріву», який є найбільш динамічно навантаженим. Серед характерних відмінностей у спектрів та спектрограм слід відмітити домінуючий прояв 7 гармоніки вібрації та

загальний збільшений рівень. Домінування 7 гармоніки обумовлене кількістю лопатей (7 шт.) у робочого колеса, які створюють турбулентні кромкові сліди.

**П'ятий розділ** роботи присвячений розробленню методики і впровадженню результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Запропоновано методику проведення технічної діагностики ВПН, як узагальнення проведених досліджень. Ідея цієї діагностики полягає у аналізі динаміки зміни характеристик вібрацій насоса починаючи з його введення в експлуатацію і до моменту списання. Такий моніторинг дозволить відстежувати поточний технічний стан ВПН та динаміку його зношення. З метою організації моніторингу пропонується вести книгу обліку поточного технічного стану ВПН. Перший запис робиться в момент першого пуску насоса усі наступні слід проводити під час планових ТО.

Методика передбачає проведення випробувань насоса, який встановлено на аварійно-рятувальному автомобілі без його розбирання. На першому етапі проводяться випробування насоса без води. Визначаються вібрації по різних напрямках та загальний вібраційний рівень. На основі порівняння отриманих результатів з попередніми записами проводяться розрахунки відносних значень вібрацій, що дає змогу оцінити залишковий технічний рівень ВПН. На основі отриманих даних формується технічний припис, тобто корегуються можливості цього насоса виконувати поставлені бойові задачі.



Рисунок 12 – Схема методики проведення вібраційної діагностики технічного стану відцентрових пожежних насосів

На другому етапі виконуються експериментальні випробування у режимі роботи насоса «нагрів», що є більш навантаженим. Отримані сигнали аналізують додатково на спектральний склад вібрацій, що може надати уточнюючу інформацію про наявність прихованих дефектів. Схема проведення методики, а також вібраційні ознаки прихованих дефектів різних типів, що були визначені у цій роботі, представлена на рисунку 12.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, в якій розв'язано актуальну наукову задачу – розкриття взаємозв'язку вібраційних коливань відцентрового пожежного насоса на його працездатність та ефективність застосування обладнаного ним пожежного автомобіля під час гасіння пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт, пов'язаних з ними. Одержано такі основні наукові та практичні результати:

1. За результатами аналізу статистики пожеж та сучасного стану з питань застосування пожежних автомобілів з відцентровими пожежними насосами несправності за останніх 5 років становлять до 39 % в практиці пожежогасіння, тому висунуто ідею, що одним із шляхів підвищення ефективності гасіння пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт, пов'язаних з ними, є застосування вібраційної діагностики таких насосів в системі їх технічного обслуговування.

2. Розроблено математичні моделі роботи відцентрових пожежних насосів та з їх застосуванням проведено моделювання динамічних характеристик, у тому числі за наявності внутрішніх дефектів (вихід з ладу підшипників, пошкодження робочого колеса, збільшення допустимих зазорів у корпусі, перекис вала тощо);

3. Розроблено методику та проведені експериментальні дослідження з виявлення взаємозв'язку виду несправностей (вихід з ладу підшипників, пошкодження робочого колеса, збільшення допустимих зазорів у корпусі, перекис вала тощо) відцентрового пожежного насоса пожежного автомобіля із параметрами його амплітудно-частотних характеристик. Встановлено, що пошкодження підшипника здатне збільшити амплітуди перших трьох гармонік вібрацій в осьовому та вертикальному напрямках майже у 3 рази, а у горизонтальному напрямі – більш ніж на 50 %;

4. Здійснено перевірку адекватності розроблених математичних моделей з експериментальними даними і встановлено, що розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями не перевищує значення 10 %;

5. З урахуванням отриманих результатів теоретичних та експериментальних досліджень із застосуванням алгоритму дискретного перетворення Фур'є та сучасних програмних комплексів розроблено критерії ідентифікування несправностей і технічного стану відцентрових пожежних насосів пожежних автомобілів за спектральними характеристиками вібраційних сигналів, де загальні рівні вібрацій знаходяться в межах від 10 % до понад



30 %;

6. Розроблено методику визначення технічного стану відцентрового пожежного насоса за вібраційними показниками та порядок її застосування в системі технічного обслуговування пожежних автомобілів;

7. Результати теоретичних та експериментальних досліджень з виявлення взаємозв'язку параметрів вібраційних коливань відцентрових пожежних насосів з їх технічним станом та технічними характеристиками покладено в основу застосування вібраційного діагностування та технічного обслуговування, передбаченого розробленою здобувачем «Методикою визначення технічного стану пожежного насоса в експлуатації за вібраційними показниками».

8. Розроблено тривимірні моделі, які описують роботу відцентрових пожежних насосів та використовуються для уявлення про особливості роботи окремих конструктивних деталей, визначення їх впливу на експлуатаційні параметри та надійність роботи. Отримані результати створюють передумови для удосконалення технічної документації та формування рекомендацій щодо підвищення довговічності, ресурсу та надійності експлуатації відцентрових пожежних насосів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Експериментальні дослідження вібрацій відцентрового пожежного насоса зі зношеними підшипниками / І. Л. Ущипівський, Я. Б. Кирилів, О. О. Водка, О. О. Ларін // Пожежна безпека : зб. наук. пр. – Л. : ЛДУБЖД, 2013. – № 23. – С. 158-165.

2. Ущипівський І. Л. Комп'ютерне моделювання вібрацій відцентрового пожежного насоса / І. Л. Ущипівський, Я. Б. Кирилів, О. О. Ларін // Вісник ЛДУБЖД : зб. наук. пр. – Л. : ЛДУБЖД, 2013. – № 8. – С. 42-48.

3. Кирилів Я. Б. Аналіз технічного стану пожежних насосів, що мають засмічення робочого колеса шляхом вібродіагностики / Я. Б. Кирилів, І. Л. Ущипівський // Науковий вісник УкрНДІПБ : наук. журн. – К. : УкрНДІПБ, 2013. – № 2(28). – С. 74-81.

4. Вібрації пожежних насосів на різних режимах роботи: експериментальні дослідження / А. Я. Калиновський, Я. Б. Кирилів, І. Л. Ущипівський, О. О. Ларін // Вібрації в техніці та технологіях : всеукр. наук.-техн. журн. – Вінниця : ВНАУ, 2014. – № 1(73). – С. 70-76.

5. Кирилів Я. Б. Визначення технічного стану відцентрових пожежних насосів за допомогою вібраційної діагностики / Я. Б. Кирилів, І. Л. Ущипівський // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. пр. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2014. – № 16. – С. 36-42.

6. Ларін О. О. Контроль технічного стану пожежних відцентрових насосів в експлуатації за допомогою своєчасної вібродіагностики / О. О. Ларін, І. Л. Ущипівський // Наукові нотатки : міжвуз. зб. наук. пр. – Луцьк : ЛНТУ, 2014. – Вип. 46 (травень-червень). – С. 346-353.

7. Ushapivsky I. L. Experimental studies of vibrations centrifugal fire pump with defective bearings / I. L. Ushapivsky // *Science and Education a New Dimension : Natural and Technical Sciences*. – Budapest, 2013. – Vol. I(2), Issue 15. – Pp. 105-107.
8. Экспериментальные исследования вибраций центробежного пожарного насоса с прослабленной посадкой вала в подшипниках / А. Н. Ларин, А. А. Ларин, А. А. Водка, И. Л. Ущапивский // *Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб.* – Минск : БНТУ, 2014. – Вып. 29. – С. 166-172.
9. Larin A. N. Experimental investigations of vibrations of centrifugal fire pump with the defect (unfasten shaft in a bearing seat) / A. N. Larin, A. A. Larin, I. L. Ushapivsky // *Safety and Fire Technique: ВіТР.* – Józefów: CNBOP-PIB, 2014. – Vol. 34, Issue 2. – Pp. 133-141.
10. Компьютерное моделирование вибраций центробежных пожарных насосов с дисбалансом / А. Н. Ларин, И. Л. Ущапивский, Я. Б. Кырылив, А. А. Ларин // *Чрезвычайные ситуации: образование и наука : междунар. науч.-техн. журн.* – Гомель : ГИИ МЧС Республики Беларусь, 2014. – Т. 9, №1. – С. 55-61.
11. Ущапівський І. Л. Вібраційна діагностика внутрішніх пошкоджень пожежного насосу ПН-40УВ / І. Л. Ущапівський // *Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика) : зб. мат. всеукр. наук.-практ. конф.* – Х. : НЦЗУ, 2014. – Ч. 1. – С. 166-168.
12. Ларин А. А. Вибрационная диагностика пожарного центробежного насоса / А. А. Ларин, И. Л. Ущапивский // *Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні: тези доп. п'ятої Міжнар. наук.-техн. конф.* – К. : Ін-т проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 2014. – С. 147-148.
13. Кирилів Я. Б. Діагностування технічного стану відцентрових пожежних pomp за допомогою вібраційного обладнання / Я. Б. Кирилів, І. Л. Ущапівський // *Матеріали 16 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників.* – К. : ІДУЦЗ, 2014. – С. 132-134.
14. Ущапівський І. Л. Вплив надійності роботи пожежних насосів на ефективність роботи підрозділів ДСНС / І. Л. Ущапівський // *Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXII Міжнар. наук.-практ. конф.* – Х. : НТУ«ХП», 2014. – Ч. I. – С. 79.

## АНОТАЦІЯ

**Ущапівський І.Л. Підвищення ефективності гасіння пожеж пожежними автомобілями з відцентровими пожежними насосами.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2015.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням, що спрямовані на визначення технічного стану відцентрових пожежних насосів та обґрунтування методів оцінки впливу їх поточного стану на тактико-технічні характеристики й ефективність застосування при виконанні бойових завдань.

В роботі досліджено вплив технічного стану відцентрових пожежних насосів на ефективність діяльності аварійно-рятувальних підрозділів під час ліквідації надзвичайних ситуацій (пожеж). З цією метою введено комплексний показник рівня технічного стану насоса та отримані залежності оцінок його тактико-технічних характеристик залежно від введеного параметра.

Теоретичним шляхом виявлено взаємозв'язок між погіршенням технічного стану та збільшенням вібраційного стану насоса. При цьому запропоновано апроксимацію, що дає змогу оцінити поточний технічний стан відцентрових пожежних насосів за значеннями відносної зміни вібраційного рівня. Зазначені дослідження проведені на основі скінчено-елементного моделювання динамічних характеристик насоса із використанням сучасних комп'ютерних засобів чисельного моделювання.

Проведено експериментальні дослідження вібрацій відцентрових пожежних насосів на різних режимах його роботи. Випробування проводились на діючому насосі, що встановлений на аварійно-рятувальному автомобілі у справному стані та для насосів із заздалегідь відомими дефектами. На основі цих досліджень визначено кількісні та якісні вібраційні ознаки дефектів різного типу.

На основі усього комплексу проведених досліджень розроблено методику проведення вібраційної діагностики технічного стану відцентрових пожежних насосів.

**Ключові слова:** відцентровий пожежний насос, ефективність застосування, математичні моделі, технічний стан, вібраційне діагностування, методика.

## АННОТАЦИЯ

**Ущипивский И.Л. Повышение эффективности тушения пожаров пожарными автомобилями с центробежными пожарными насосами. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. – Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, Львов, 2015.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, направленным на определение технического состояния центробежных пожарных насосов и обоснование методов оценки влияния их текущего состояния на тактико-технические характеристики и эффективность применения при выполнении боевых задач.

В работе проведено исследование влияния технического состояния центробежного пожарного насоса на эффективность деятельности аварийно-спасательных подразделений при ликвидации пожаров. С этой целью введено комплексный показатель уровня технического состояния насоса и получены зависимости оценок его тактико-технических характеристик в зависимости от введенного параметра. Теоретическим путем выявлена взаимосвязь между ухудшением технического состояния и увеличением вибрационного состояния насоса. При этом предложено аппроксимацию, которая позволяет проводить

оценку уровня текущего технического состояния центробежного пожарного насоса по значениям относительного изменения вибрационного уровня. Указанные исследования проведены на основе конечно-элементного моделирования с использованием современных компьютерных средств численного моделирования. Одной из основных задач теоретического компьютерного моделирования является нанесение расчетной конечно-элементной сетки. Ее построение является важной частью моделирования поскольку от качества сетки существенно зависит достоверность полученных результатов. Проверка адекватности сетки проведена путем нескольких одинаковых тестовых расчетов с разной плотностью сетки конечных элементов. При этом полученная близость результатов свидетельствует о качестве построенной модели.

Разработаны универсальные математические модели центробежных пожарных насосов на основе метода конечных элементов, которые позволяют проводить анализ динамических характеристик насоса в том числе с наличием дефектов. Проведенная проверка адекватности созданных моделей, показала хорошую согласованность собственных частот колебаний отдельных деталей насоса полученных на основе модели и в рамках экспериментальной проверки. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 10%. Определена зависимость изменения показателей эффективности использования центробежного пожарного насоса от уровня технического состояния, которая задается относительными показателями повышения вибраций насоса в эксплуатации.

Проведены экспериментальные исследования вибраций центробежного пожарного насоса на различных режимах. Испытания проводились на насосе в исправном состоянии и для насосов с заранее известными дефектами. В рамках анализа вибраций в каждой точке проанализированы спектры вибраций на различных скоростях вращения ротора насоса, определены уровни вибраций. Построенные пространственные траектории вектора виброускорений, позволяющие анализировать направленность вибраций в различных точках конструкции. Получены закономерности формирования вибраций пожарного центробежного насоса, который имеет характерные для эксплуатации и заранее заданные во время испытаний дефекты: прослабление посадки вала, ослабление болтовых креплений, общее изнашивание элементов шарнирных креплений. На основе этих исследований определены количественные и качественные вибрационные признаки дефектов различного типа.

На основе всего комплекса проведенных исследований разработана методика проведения вибрационной диагностики технического состояния центробежных пожарных насосов.

**Ключевые слова:** центробежный пожарный насос, эффективность использования, математические модели, техническое состояние, вибрационное диагностирование, методика.

## ANNOTATION

**Uschapivsky I.L. Improved firefighting fire truck with centrifugal fire pumps.** – The manuscript.

Thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Science in a speciality 21.06.02 – fire safety. – Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2015.

The thesis deals with the theoretical and experimental investigations on determining of the technical state of centrifugal fire pumps and justification of methods of assessing the influence of current technical states on the pump characteristics and efficiency of usage.

The paper studied the influence of the technical state of the centrifugal fire pump on the effectiveness of rescue units in the liquidation of fire. In the aim of this, a complex indicator of the technical condition of the pump is introduced and the dependence of estimated values of the pump's tactical and technical characteristics on this parameter.

A relationship between the decreasing of the technical state and a magnification of the vibrations of the pump is theoretically defined. Herein, an approximation is proposed that allows to estimate the level of the current technical state of the centrifugal fire pump from the values of the relative change in the level of vibrations. These studies were carried out based on finite element modelling using modern computer tools for numerical simulation.

Experimental study of vibrations of centrifugal fire pump in the different operational regimes has been carried out. The tests have done with the pump in good technical state (a new one) and for the pumps with known defects. Quantitative and qualitative evidences of different types of defects are found based on these investigations.

Summarizing the whole complex of the researches a practical procedure is proposed in the Theses for the vibration diagnostics of technical state of centrifugal fire pumps in operation.

**Key words:** centrifugal fire pump, efficiency, mathematical models, technical condition, vibration diagnostics, methods.



---

Підписано до друку 11.09.2015 р.  
Друк ризограф.  
Наклад 100 прим.

Формат 60x80/16  
Ум. друк. арк. 1,0  
Зам. № 09/2015

---

ЛДУ БЖД, 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35