

Калиновський А. Я.

Національний
університет
цивільного захисту
України

Кирилів Я. Б.

Ущапівський І. Л.

Львівський державний
університет безпеки
життєдіяльності

Ларін О. О.

Національний технічний
університет "ХПІ"

Kalinovskiy A. J.

National University of
Civil Defense of Ukraine

Kyryliv J. B.

Uschapivskyuy I. L.

Lviv State University of
Life Safety

Larin O. O.

National Technical
University "KhPI"

УДК 614.846.35:534.1

ВІБРАЦІЇ ПОЖЕЖНИХ НАСОСІВ НА РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянуто експериментальні випробування відцентрового пожежного насосу для подачі вогнегасних речовин, який встановлено на аварійно-рятувальному автомобілі. Наведено аналіз комплексного вивчення формування вібраційного стану пожежного насосу, який не має дефектів (новий, справний насос). Проведені дослідження надали змогу визначити характерні особливості параметрів вібрацій насосу, що є еталонними та дають змогу шляхом порівняння із аналогічними характеристиками вібрацій насосу із пошкодженнями та дефектами визначити діагностичні критерії та ознаки.

Ключові слова: відцентровий пожежний насос, формування вібраційного стану, параметри вібрацій насоса, діагностичні критерії та ознаки, спектр сигналу, віброприскорення, Просторова траєкторія вектору віброприскорення.

Вступ. Ефективність діяльності підрозділів Державної Служби з Надзвичайних Ситуацій (ДСНС) України під час ліквідації аварій або пожеж прямо пов'язана із надійністю технічного обладнання. Так, обробка даних по виїздам підрозділів ДСНС у західному регіоні за 1 місяць вказує, що у 20% випадків було зафіксовано події виходу з ладу пожежно-технічного обладнання різного характеру та складності. Серед них майже 75% то технічні проблеми із насосною установкою, де майже половина це проблеми безпосередньо пов'язані із відцентровим пожежним насосом. Слід відзначити, що час усунення деяких несправностей може бути реалізовано заміною та відбувається майже миттєво, а отже не істотно впливає на ефективність діяльності підрозділів під час ліквідації надзвичайної ситуації. З іншого боку усунення несправностей, що пов'язані безпосередньо із роботою насоса, складає від 2 до 5 годин і, як правило, потребує спеціального обладнання. Така ситуація здатна вкрай істотно впливати на час ліквідації надзвичайної ситуації так як потребує виклику другого ходу.

Крім того деякі дефекти здатні

проявлятися негативним чином на тактико-технічних показниках роботи насосу (наприклад зменшувати напір), що також негативно відбивається на ефективності його роботи.

Серед усіх відцентрових пожежних насосів, що використовуються під час ліквідації НС найбільш поширеними є насоси серії ПН-40УВ(А). Інші насоси є зазвичай більш спеціалізованими, проте геометрично та конструктивно є подібними до ПН-40УВ, а відрізняються розмірами, матеріалом та системою керування. Тому в даній роботі теоретичні та експериментальні дослідження проводились із відцентровим пожежним насосом ПН-40УВ, проте визначені результати якісно можуть бути використані для будь-якого відцентрового пожежного насосу.

Таким чином, планування робіт з ліквідації надзвичайних ситуацій, оцінка ефективності діяльності підрозділів та оцінка часу ліквідації пожежі повинні враховувати надійність технічного обладнання. В літературі відомі відповідні роботи [1,2]. Разом із тим у зазначених наукових працях та запропонованих підходах використовувались апріорні статистичні дані по надійності обладнання,



проте більш персоналізована оцінка надійності, що визначена за умови врахування додаткової діагностичної інформації, яка може бути отримана під час планових ТО для конкретних насосів дозволила б підвищити ефективність відповідних методик.

Окрім цього слід відмітити, що досвід експлуатації насосів вказує, що дефекти, які призводять до виходу із ладу насосів зазвичай, призводять до підвищення вібраційного рівня, що супроводжує його роботу. Отже застосування вібраційної діагностики, як інструменту визначення технічного стану відцентрових пожежних насосів є ефективності інструментарієм [3].

В даній роботі розглянуто експериментальні випробування справного відцентрового пожежного насосу на різні режимах його роботи. Відповідні дослідження дозволяють визначити характерні особливості вібрацій насосу, що є еталонними та дають змогу шляхом порівняння із аналогічними характеристиками вібрацій насосу із пошкодженнями та дефектами визначити діагностичні критерії та ознаки.

Засоби, умови та методика проведення експериментальних досліджень.

В рамках задач експериментальних досліджень було поставлено проблему визначення закономірностей формування вібраційного стану пожежного насосу. Отже під час випробувань необхідно мати доступ до різних точок на його корпусі. З цієї метою відповідні вібраційні дослідження проводились не на робочому автомобілі, а на діючому макеті аварійно-рятувального автомобіля з встановленим на ньому відцентровим насосом ПН – 40 УВ (рис. 1).



Рис. 1. Діючий макет спеціалізованого автомобіля в лабораторії кафедри пожежної та аварійно-рятувальної техніки НУЦЗУ із встановленим пожежним насосом ПН-40УВ

Даний макет представляє собою реальний аварійно-рятувальний автомобіль, який має спеціальні зміни у своєму кузові, що полегшують доступ до його внутрішніх елементів (в тому числі і до насосу). Відповідний макет встановлений в приміщенні навчально-дослідної лабораторії кафедри пожежної та аварійно-рятувальної техніки Національного університету цивільного захисту України.

Відсутність певних частини корпусу автомобіля не змінює вібраційних процесів, що відбуваються у пожежному насосі під час його роботи, проте дає змогу легкого доступу до всіх його елементів, а також додаткові можливості для проведення вимірювань у більшій частині точок на корпусі насосу.

Експериментальні дослідження проводились із використанням вимірювального комплексу «Ультра-В-1» [4,5], який розроблений на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, Україна). Вимірювальний комплекс складається із: датчика віброприскорень, що оснащений мікроелектромеханічним ємнісним сенсором; аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та портативного комп'ютера.

Вимірювання проводилось в точці на корпусі всмоктуючого патрубку. Дана точка є найбільш легко доступною для встановлення датчика вібрацій не лише на стенді але й умовах діючих аварійно рятувальних автомобілів. Вимірювання в цій точці проводилось в трьох напрямках: осьовому (Z), вертикальному (Y) та горизонтальному (X).

Для аналізу впливу різних чинників але на фіксованій швидкості обертання ротору в роботі аналізувалась вібрація, що відбувається на двох окремих режимах.

Першим режимом був режим роботи насосу без вогнегасячої рідини всередині. Даний режим є зручним з точки зору практичного проведення діагностики, бо є мало навантаженим і не супроводжується сильною дією випадкових флуктуацій.

Наступним режимом є режим роботи насосу, що заповнений водою проте не реалізує подачі рідини – це є режим «нагріву», який використовують у прохолодні пори року з метою прогрівання робочого колеса та корпусу насосу. Такий режим є зручним під час практичної діагностики оскільки не потребує заходів із відведення вогнегасячої рідини, що під великим тиском виходить із насосу. Окрім цього даний режим є високо навантаженим завдяки впливу випадкового навантаження від турбулентно-кавітаційного потоку, що



реалізується всередині корпусу насосу під час цього режиму.

Дослідження вібрацій пожежного насосу на режимі «без рідини». Найбільш навантаженим є режим роботи насосу із найбільшою частотою обертання ротора. Під час цих випробувань частота обертання ротора утримувалась біля максимального значення трохи понад 2000 об/хв. Під час даного вимірювання середня частота складала $\langle \omega \rangle = 37,73$ Гц, що відповідає 2264 об/хв. Розкид значень частоти був зафіксований у межах від 35,67 Гц до 39 Гц (2140 об/хв – 2340 об/хв) із дисперсією $\sigma_{\omega}^2 = 0,71$ Гц². На рис. 2 представлено реалізацію у часі зміни швидкості обертання ротора під час випробувань.

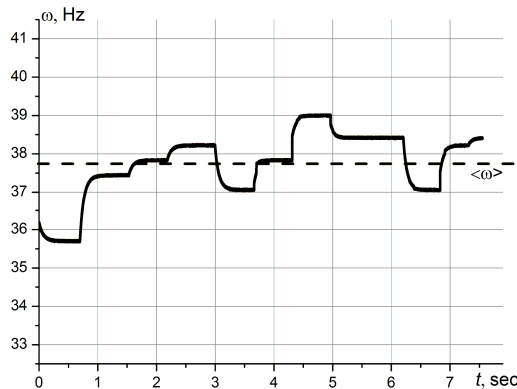


Рис. 2. Реалізації процесу нерівномірності обертання ротора (зміна частоти обертання ротора у часі)

На рис. 3 представлено зареєстрований сигнал віброприскорень у вертикальному напрямі під час вимірювання. Із наведеного сигналу можна спостерігати наявність певної випадкової складової та полігармонічного характеру. Разом із тим часовий сигнал не має періодичних імпульсів чи інших виражених змін форми сигналу, що підтверджує відсутність дефектів та добру збірку компонентів насосу.

Спектр отриманого сигналу, що отриманий швидким перетворенням Фур'є, представлений на рис. 4. Аналіз спектру вказує на сильне домінування однієї гармоніки, що співпадає 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 однакової інтенсивністю сплеск амплітуд із діапазону частот від 100 Гц до 260 Гц, а потім схожий починаючи від 350 Гц. При цьому на зазначеному сплеску можна бачити прояв 4, 5, 6 та 7 гармонік із приблизно рівними амплітудами, що складають 25% від амплітуди

основної гармоніки. Скоріш за все дані сплески є резонуванням на власних частотах корпусу насосу від дії випадкового шуму та старших гармонік із малими складовими, що супроводжує роботу агрегату.

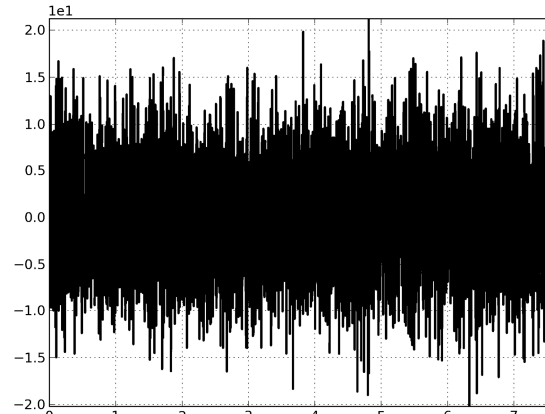


Рис. 3. Вібрації у вертикальному напрямі (зареєстрований сигнал віброприскорень)

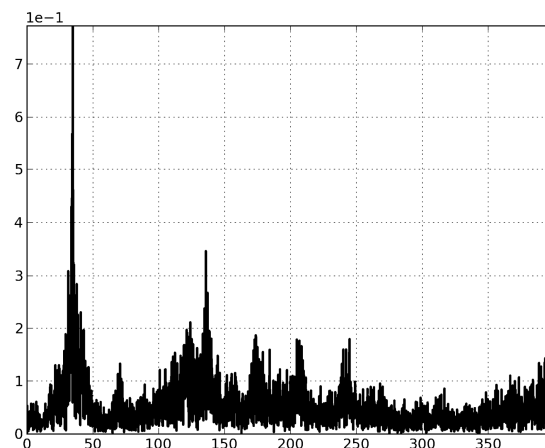
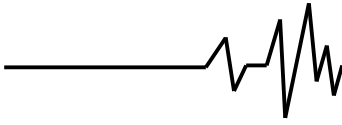


Рис. 4. Вібрації у вертикальному напрямі (спектр сигналу, що отриманий швидким перетворенням Фур'є)

З метою підтвердження зроблений припущень доречним є аналіз вібрацій на інших швидкостях обертання ротора. Зареєстровані сигнали на частоті обертання біля 1000 об/хв та 1500 об/хв якісно є подібними до результатів наведених на рис. 3 та 4. Узагальненням цих результатів є «прогонка» насосу із поступовим безперервним збільшенням частоти збурення. Отже був проведений тест під час якого швидкість обертання насосу поступово збільшувалась починаючи від 800 об/хв до 2100 об/хв. Зареєстрований сигнал, який демонструє зміну у часі частоту обертання ротора представлений на рис. 5,а а часовий сигнал із віброприскоренням на рис. 5,б. Розгін проводився на протязі 30 секунд.

Отриманий запис нестационарних вібрацій був оброблений шляхом віконного



перетворення Фур'є. Ширина вікна задавалась рівною 0,5 секунди. Таке значення з одного боку є достатнім для отримання коректних результатів із швидкого перетворення Фур'є в рамках кожного вікна (враховуючи, що найменша робоча частота сигналу відповідає 800 об/хв тобто 13,3 Гц, а це 10 періодів на найнижчій частоті у вікні). З іншого боку зазначена ширина вікна дозволяє отримати результати по понад 60 вікнам та, таким чином, побудувати неперервне поле зміни спектру вібрацій у часі із збільшенням частоти навантаження.

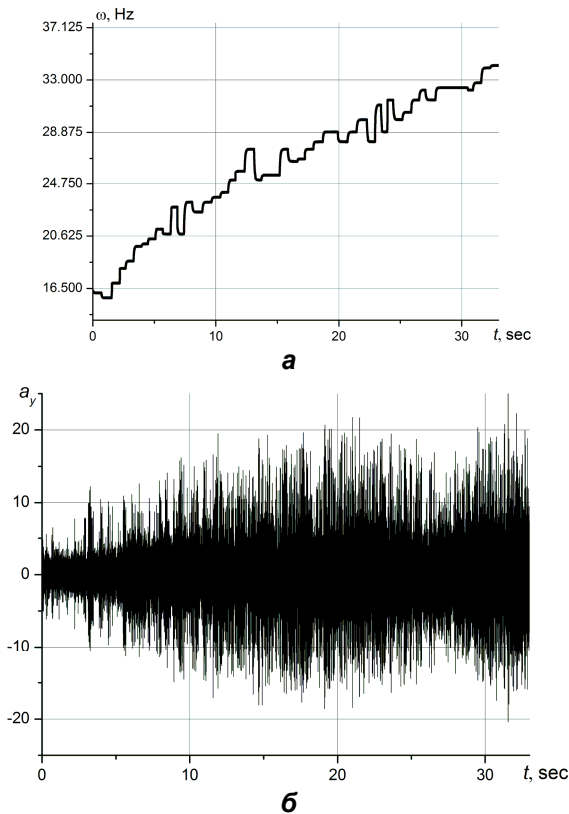


Рис. 5. Прогонка насоса:
а – зареєстрований сигнал з тахометру (частота обертання ротора у часі),
б – зареєстрований сигнал віброприскорень, що отриманий у вертикальному напрямі

Поле зміни у часі спектру вібрацій пожежного насосу ПН-40УВ у точці у вертикальному напрямі показано на рис. 6.

Аналіз результатів вказує на суттєве домінування основної гармоніки вібрацій під час зміни частоти обертання ротора. Разом із тим підтверджується гіпотеза про наявність у спектрі вібрацій резонансної зони із діапазону частот (100 – 230) Гц. Відповідна область має по всій ширині поля рівномірну сіру смугу, яка вказує на збільшення амплітуд у зазначені

області незалежно від режиму роботи ротора. Тобто у зазначеному діапазоні частот вібрацій (вісь ординат) спостерігаються збільшені амплітуди на протязі усього часу, які незалежать від частоти зовнішнього навантаження. Більше того малі, майже відсутні на початку, старші гармоніки, із ростом частоти навантаження потрапляючи до відміченої зони отримують істотне збільшення своїх амплітуд та втрачають його виходячи із цієї області. Така сама резонансна смуга спостерігається також і у області частот у понад 360 Гц.

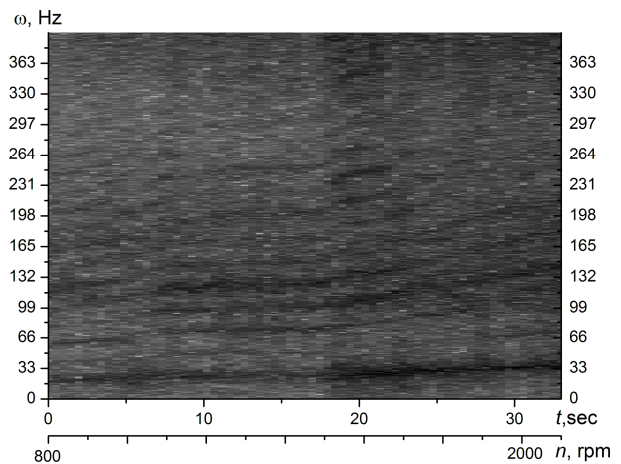


Рис. 6. Поле зміни спектру вібрацій насосу у точці у вертикальному напрямі при «прогонці» (поступовому збільшенні частоти обертання ротора)

Аналогічні дослідження вібрацій на тому самому режимі (без вогнегасячої рідини) та у тій самій точці на всмоктувальному патрубку насоса було проведено для вібрацій у осьовому та горизонтальному напрямках. Спектрограми (поля спектрів при прогонці), що отримані віконним перетворенням Фур'є для цих сигналів представлені на рис. 7, а та б.

Розподіли спектрів підтверджують висновки, що було зроблено під час аналізу вібрацій у вертикальному напрямі та якісно співпадають із тими результатами. Чітко видно смугу підвищених амплітуд у діапазоні частот (100 – 230) Гц, яка розположена горизонтально тобто не залежить від частоти обертання ротора (зовнішнього впливу), що підтверджує припущення щодо наявності у цьому діапазоні власної частоти, яка резонує на випадковий сигнал, а також на потрапляння старших гармонік частоти обертання ротора.

Аналіз порівняння кількісних показників вібрацій – скз віброприскорень у різних напрямках вказує на те, що найбільші вібрації спостерігаються у вертикальному напрямі, а у горизонтальному – найменші.

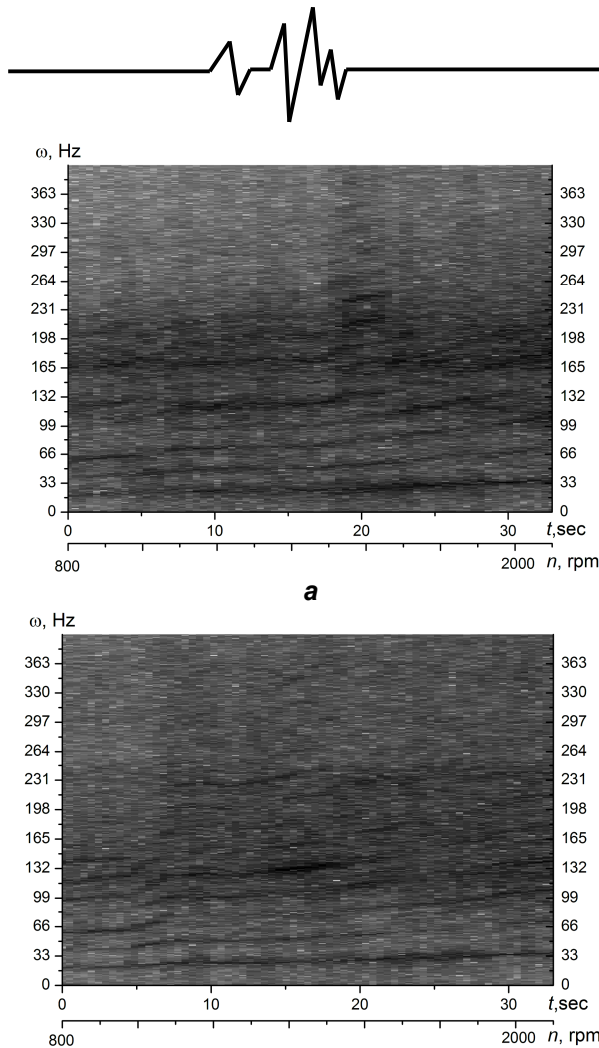


Рис. 7. Спектрограми (поле зміни спектру вібрацій насосу у заданій точці) в осьовому напрямі (а) та в горизонтальному (б) напрямках

Різноманітність вібрацій пояснюється нерівномірністю жорсткості кріплення насосу та направленістю вимушеної дії збуджуючої дії. Дійсно основні сили діють у вертикальній площині та мають збуджувати приблизно однакові вібрації у вертикальному та горизонтальному напрямках, в той же час як в осьовому напрямі силова дія є найменшою. А у ідеальному випадку взагалі повинна бути відсутня. З іншого у горизонтальному напрямі насос утримується не лише завдяки болтовим кріпленням але й додатково робочими трубами, що з'єднують насос із корпусом аварійно-рятувального автомобіля, що збільшує жорсткість конструкції у цьому напрямку.

Для більш детального аналізу направленості вібрацій у точці В насосу побудуємо просторову траєкторію вібрацій (траєкторію, яку описує вектор прискорення у заданій точці). Відповідні результати графічно наведені на рис. 8. Усі проєкції траєкторії утворюють еліптичні фігури. Цікавим результатом є ефект нахилу найбільшої осі

еліпсу у проєкції траєкторії вектору віброприскорень на площину YZ. Кут нахилу до осьового напрямку складає (55-60)°

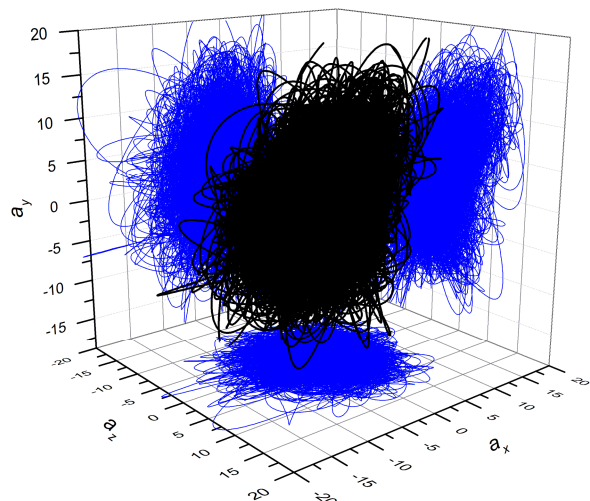


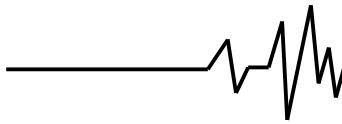
Рис. 8. Просторова траєкторія вектору віброприскорення при вібрації насосу у точці на частоті близько 2000 об/хв

Відповідно до методики експериментальних досліджень аналогічні до описаних раніше випробувань було проведено тести на вібрацію насоса на інших режимах роботи.

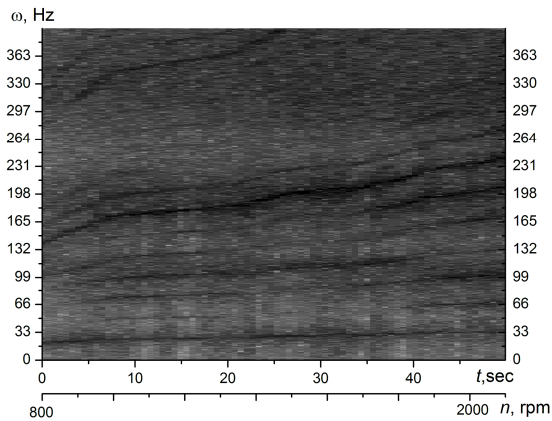
Дослідження вібрацій пожежного насосу на режимі «нагріву». Наступним режимом проаналізовано роботу насоса, який заповнений вогнегасячою рідиною але без її подачі (режим нагріву). На рис. 9 зведені спектрограми вібрацій із ростом частоти обертання ротора.

Аналізуючи наведені спектри, слід відмітити наявність суттєвих амплітуд із старшими гармоніками, що переважають основну. В-першу чергу це стосується 7 гармоніки, що добре можна бачити на полях зміни спектрів. Зазначена гармоніка переважає усі інші у спектрах на всьому діапазоні значень частоти збурення, особливо для вертикального та осьового напрямів. Прояв 7 гармоніки пов'язаний із турбулентними течіями в робочій камері насоса, які утворюють кромкові сліди навколо лопаток робочого колеса яких у даній конструкції 7. Крім цього можна бачити на спектрі і 14 гармоніку обертової частоти ротора яка є другою кратністю частоти пульсацій кромкового сліду.

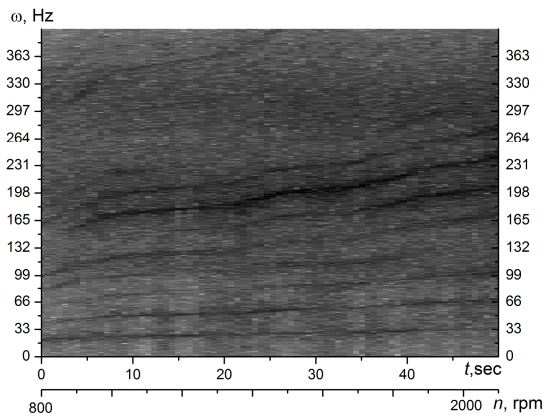
Стосовно наявності коливань навколо власних частот, то можна виділити дві резонансні зони у вертикальному напрямі це (100 -130) Гц та (170-230) Гц. У осьовому напрямі резонує лише спектр із діапазону (170-230) Гц, а у горизонтальному напрямі



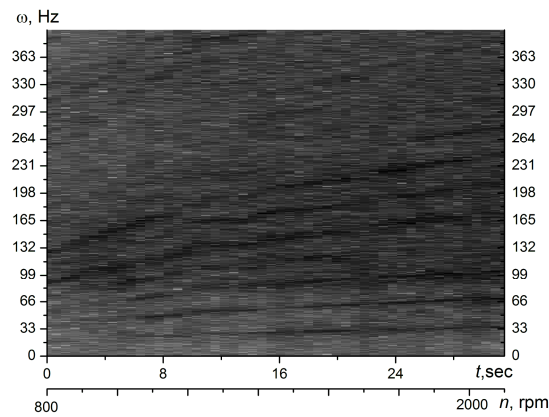
резонансна зона є широкою та охоплює частотний проміжок від 100 Гц до 230 Гц.



а



б



в

Рис. 9. Спектрограми вібрацій корпусу насосу у точці на всмоктувальному патрубку у вертикальному (а) осьовому (б) та горизонтальному (в) напрямках. Насос із водою на режимі «нагріву»

Слід відмітити, що рівень вібрацій підвищився у понад 2 рази під час роботи на зазначеному режимі в порівнянні до режиму без води.

Аналіз порівняння кількісних показників вібрацій – скз віброприскорень у різних

напрямах, вказує на те, що найбільші вібрації спостерігаються у вертикальному напрямі, а у горизонтальному – найменші.

Детальний аналіз направленості вібрацій у точці на корпусі всмоктувального патрубка насоса, який працює із водою без її подачі можна зробити по просторовій траєкторії вектору віброприскорення. Відповідні результати графічно наведені на рис. 10.

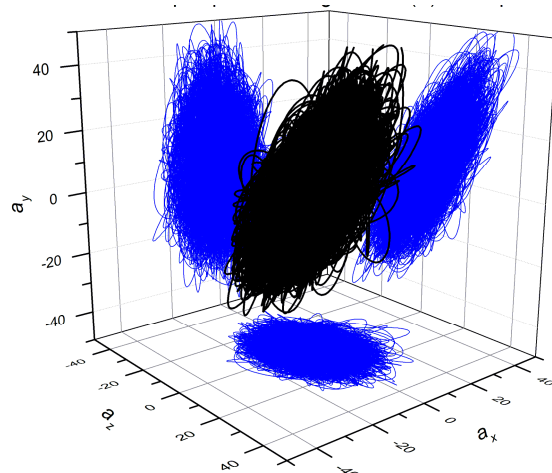


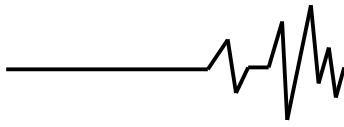
Рис. 10. Просторова траєкторія вектору віброприскорення при вібрації насосу у точці на частоті близько 2000 об/хв. (насос працює на режимі «нагріву»)

Усі проекції траєкторії, як і в попередньому випадку утворюють еліптичні фігури. Присутній ефект нахилу найбільшої осі еліпсу у проекції траєкторії вектору віброприскорень на площину YZ. Кут нахилу до осьового напрямку складає (52-55)о тобто майже той самий.

Висновки. Таким чином у даній роботі представлено методику проведення вібраційного обстеження роботи пожежного насосу ПН-40УВ та методики аналізу отриманих даних.

Проведено комплексні дослідження по вібрації насосу у контрольній точці, що є доступною для вимірювання в умовах реальної експлуатації пожежних відцентрових насосів, а отже придатна для проведення діагностичних вимірів. Вимірювання вібрацій проведено в трьох напрямках та на різних режимах роботи: насос працює без води, із водою та без її подачі.

В рамках аналізу вібрацій в кожній точці проаналізовано спектр вібрацій на різних швидкостях обертання ротора насоса, визначено рівні вібрацій. Побудовані просторові траєкторії вектору віброприскорень, що дозволяють аналізувати направленість вібрацій у різних точках конструкції.

**Список використаних джерел**

1. Гуліда Е.М. Надійність технології гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах / Гуліда Е.М., Мовчан І.О. // *Наук. вісн. УкрНДІПБ*. – Київ, 2004. – №2 (10). – С. 42–48.
2. Мовчан І.О. Reliability of technology of fire extinguishing at the machine-building enterprises / Гуліда Е.М., Мовчан І.О. // *Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. „Fire protection – 2004”*. – Чехія: Технічний університет Острава, 2004. – С. 10–14.
3. Ущепівський І.Л. Експериментальні дослідження вібрацій відцентрового пожежного насосу зі зношеними підшипниками / Ущепівський І.Л., Я.Б. Кирилів, Водка О.О., Ларін О.О. // *Збірник наукових праць «ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА»*. – ЛДУ БЖД, № 23, 2013. – С. 158–166.
4. Водка А.А. Виброизмерительный комплекс на основе микроэлектромеханического сенсора / А.А. Водка, А.И. Трубаев, Ю.Н. Ульянов // *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля*. – Луганськ, 2012. – № 9 (180). Ч.1. – С. 140–147.
5. Ульянов Ю.Н. Комплекс для измерения виброускорений на основе микроэлектромеханического сенсора / А.А. Водка, А.И. Трубаев, Ю.Н. Ульянов // *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики»*, Євпаторія, 3-8 травня 2012 року. – 2012. – С. 191.

Список джерел в транслітерації

1. Hulida E.M. Nadiynist tekhnolohiyi Hasinnya Pozhezhi na mashinobudivnikh pidpriemstvakh / Hulida E.M., Movchan I.O. // *Nauk. Visn. Ukrndipb*. – Kyiv, 2004. – № 2 (10). – С. 42–48.
2. Movchan I.O. Reliability of technology of fire extinguishing at the machine - building enterprises / Hulida E.M., Movchan I.O. // *Mater. Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Fire protection – 2004"*. – Chexhiya: Tekhnichnyy universytet Ostrava, 2004. – С. 10–14.
3. Ushchapivskiy I.L. eksperymentalni Doslidzhennya vibratsiy vidtsentrovoho Pozhezhnna nasosu Zi znoshenimi pidshipnikami / Ushchapivskiy I.L., YA.B. Kiriliv, Horilka O.O., Larin O.O. // *Zbirnyk naukovykh prats «Pozhezhnna bezpeka»*. – LDU BZHD, № 23, 2013. – С. 158–166.
4. Vodka A.A. Vibrozmeritelnyy kompleks na osnove mikroelektromekhanicheskogo sensora / A.A. Vodka, A.I. Trubayev, Yu.N. Ulyanov //

Vestnik Vostochnoukrainskogo Natsionalnogo universiteta im. V. Dalya. – Lugansk, 2012. – № 9 (180). Ч.1. – С. 140–147.

5. Ulyanov Yu.N. Kompleks dlya izmereniya vibrouskoreniy na osnove mikroelektromekhanicheskogo sensora / A.A. Vodka, A.I. Trubayev, Yu.N. Ulyanov // *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy razvitiya transportnikhsistem i logistiki»*, Yevpatoriya, 3-8 maya 2012 goda. – 2012. – С. 191.

**ВИБРАЦИИ ПОЖАРНЫХ НАСОСОВ НА
РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Аннотация. *Рассмотрены экспериментальные испытания центробежного пожарного насоса для подачи огнетушащих веществ, который установлен на аварийно-спасательном автомобиле. Приведен анализ комплексного изучения формирования вибрационного состояния пожарного насоса, который не имеет дефектов (новый, исправный насос). Проведенные исследования дали возможность определить характерные особенности параметров вибраций насоса, которые являются эталонными и позволяют путем сравнения с аналогичными характеристиками вибраций насоса с повреждениями и дефектами определить диагностические критерии и признаки.*

Ключевые слова: *центробежный пожарный насос, формирование вибрационного состояния, параметры вибраций насоса, диагностические критерии и признаки, спектр сигнала, виброускорение, пространственная траектория вектора виброускорения.*

**VIBRATIONS ON FIRE PUMPS DIFFERENT
MODES OF OPERATION: AN EXPERIMENTAL
STUDY**

Annotation. *The paper, deals with the experimental tests of a centrifugal fire pump which is installed on the emergency vehicle. An analysis of the complex investigation of the vibrations of the fire pump that has no defects (new, serviceable pump). The results give a possibility to determine the peculiarities of the fire pump vibrations on the different regimes, which could be used as standard template for a diagnostic criteria and symptoms.*

Key words: *centrifugal fire pump, the formation of vibration condition, the parameters of vibration pump, diagnostic criteria and characteristics, the signal spectrum, acceleration, spatial trajectory of the vector acceleration.*