

10.31653/smf49.2024.20-26

Веретеннік О. М., Кардашев Д. Л., Абоleshкін С. Є.

Національний університет «Одеська морська академія»

## РЕЗУЛЬТАТИ УДОСКНАЛЕННЯ КОМПЛЕКСУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАНЬ КОЛІНЧАТОГО ВАЛА ДВИГУНА

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Боротьба із резонансними явищами виникаючими у валопроводах внаслідок розвитку крутильних коливань є досі актуальною проблемою морського судноплавства. На рис. 1 показана світлина, доброзичливо надана співробітником нашого університету Щербініним В.А., де продемонстрована томурічна аварійна ситуація пов'язана із поломкою ділянки колінчатого вала суднового двигуна. За його коментарем ця ситуація виникла внаслідок виходу з ладу демпфера крутильних коливань. Надійне діагностування працездатності демпферів можливо тільки при регулярному моніторингу коливальної системи валопроводу під наглядом Регістру.



Рис.1 Аварійний випадок пов'язаний із поломкою ділянки колінчатого вала суднового двигуна.

Загальна методика викладена в міжнародному стандарті ISO 3046-5 [1]. Ці випробування поділяються на дві частини: розрахункову, що дає можливість отримати відносні амплітуди крутильних коливань інертних мас, та натурні вимірювання, що дозволяє отримати фактичну амплітуду коливань інертної маси на який встановлено

вимірювальний прилад. Для нових суден розрахункову частину, як правило, виконують суднобудівні компанії, а другу частину на ходових випробуваннях. Для суден, які знаходяться в експлуатації, підлягають випробуванням на крутильні коливання валопроводи та ротори генераторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі способи і створені на їх основі сучасні пристрої та системи базуються на вимірюванні однієї з характеристик: кута повороту, кутової швидкості або кутового прискорення із перетворенням вимірюваної величини в електричний аналоговий чи цифровий інформаційний сигнал [2, 3]. Наведені приклади об'єднує те, що в них датчики або випромінювачі знаходяться на валу, що обертається. Але це ускладнює отримання та передачу в реальному часі первинного сигналу для подальшої обробки [4, 5], що приводить до спотворення або загублення певної долі первинної інформації. Недоліком приладу [6] є значний рівень шуму в радіоканалі внаслідок різних процесів електромагнітного характеру із оточуючого середовища. Для подолання цього був розроблений та запатентований пристрій [7] для отримання та запису в реальному часі корисних сигналів безпосередньо на валу, що обертається.

**Постановка завдання.** В процесі експериментальних випробувань приладу [7] в лабораторії кафедри СЕУ (навчальний стенд на базі двотактного двигуна ЯАЗ 204) виникла необхідність його доробки та удосконалення методики вимірювань з наступних причин:

оскільки рівень сигналу по радіальному напрямку набагато перевищує рівень потрібного для аналізу сигналу в дотичному напрямку активна частина акселерометра по радіальному напрямку при певних оборотах колінчатого вала входить в зону "насиченості", що створює чутливість датчиків по іншим координатам;

вплив вібрації корпусу двигуна є суттєвим;

запис аналогового сигналу датчиків на SD носій здійснюється в бінарному коді.

Подолання цих недоліків складає основне завдання даної роботи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В основі створення приладу [7] (рис.2) автономного комплексу експрес-вимірювання і запису миттєвих значень прискорень при крутильних коливаннях валопроводу лежить підконтрольне Регістру дотичне напруження або пружній момент, виникаючі в ділянках валопроводу

$$\tau = \frac{M_{i,i+1}}{W} = \frac{J_{i+1} \cdot \varepsilon_{i+1}}{W} \quad (1)$$

де  $\tau$  - дотичне напруження скручування ділянки  $i, i+1$ ;  $W$ - полярний момент опору поперечного перетину ділянки;  $M_{i,i+1}$  - момент, що скручує;  $k_{i,i+1}$  - жорсткість ділянки,  $\varphi_{i+1}$ ,  $\varphi_i$  – кути закручування зосереджених мас, що обмежують ділянку;  $J_{i+1}$  - момент інерції зосередженої маси;  $\varepsilon_{i+1}$  - кутове прискорення відповідної зосередженої маси.

У запропонованій методиці [8, 9] використовується останнє співвідношення виразу (1), засноване на безпосередньому вимірі в реальному часі дотичного прискорення, а, отже, і кутового прискорення однієї з мас. При цьому момент інерції маси визначається розрахунковим шляхом по технічним характеристикам двигуна або виміром.

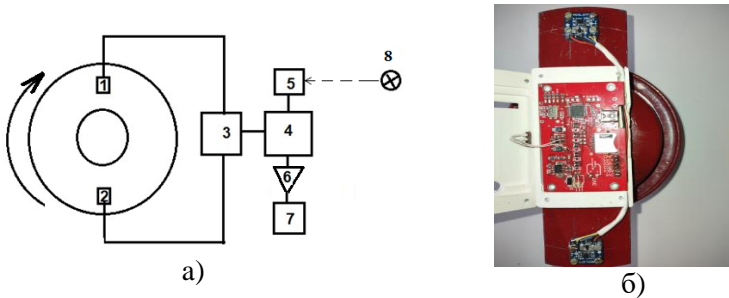


Рис. 2. Блок-схема (а) та зовнішній вигляд вимірювального пристрою (б): 1,2 – трьохосьові акселерометри; 3- трьохканальний суматор; 4- дато-логгер; 5- фотодатчик; 6-одноканальний підсилювач сигналу; 7 – SD-носій; 8 – джерело світла

На рис.2 а) показана блок-схема удосконаленого вимірювального комплексу, а на рис.2 б) зовнішній вигляд вимірювального приладу.

При цьому, джерело живлення, трьохосьові датчики-акселерометри, суматор, дато-логгер (регістратор), одноканальний підсилювач сигналу; SD-носій для запису даних в реальному часі, фотодатчик можуть бути закріплені на бандажі та розміщуватись безпосередньо на валу, що обертається.

Розроблений реєструючий пристрій має наступні основні характеристики:

- 1) динамічний діапазон прискорень: 1 250g (g – прискорення вільного падіння);
- 2) фільтрація постійної складової сигналу;

- 3) лінійна АЧХ в діапазоні 0 1600 Гц;
- 4) нечутливість до поміх від інших працюючих механізмів і пристроїв;
- 5) можливість безпосереднього запису результатів вимірів на змінному носіїві відразу по п'яти каналам для подальшої програмної обробки;
- б) конструкція датчика і алгоритм функціонування даталогера забезпечують синхронізацію із будь-якою кількістю додаткових даталогерів. Це дозволяє розвинути систему до вимірювального комплексу.

Проте на етапі розробки використання даталогера має недолік – відсутність можливості оперативного, в реальному часі, контролю запису даних. Але, вмикання та вимикання запису здійснюється оператором дистанційно за допомогою джерела світла. Експериментальні дослідження крутильних коливань проводилися на лабораторній установці на базі дизеля ЯАЗ 204: 4-х- циліндрового, двохактного, потужністю 127 к.с. в діапазоні 400 1500 об/хв.

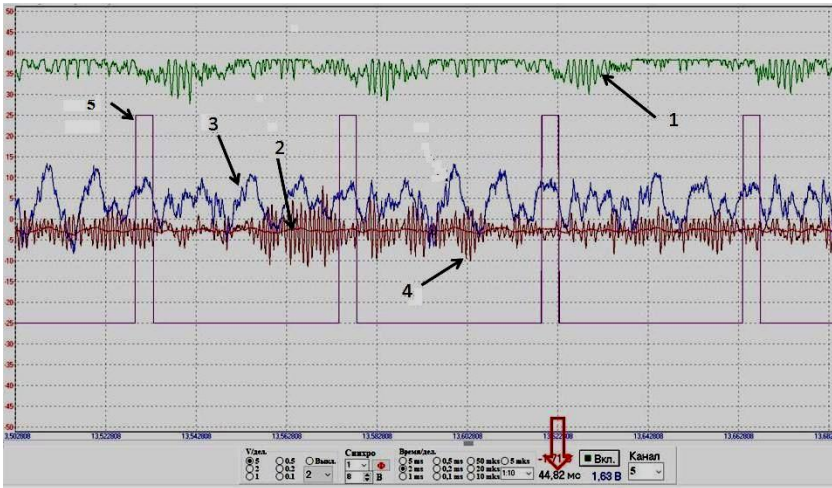


Рис. 3. Експериментальні акселерограми при частоті колінчатого вала обертання 1340 об/хв: 1 - радіальна складова; 2 - дотична складова; 3 - підсилена дотична; 4 - аксіальна складова; 5 - строб (лічильник обертів)

Крива – 2 (червона) безпосередній запис дотичного прискорення. Сигнал дотичної складової набагато менший ніж радіальної. В такому вигляді крива візуально малоінформативна, тому було вирішено додати до приладу одноканальний підсилювач (рис. 2.а.) з

коефіцієнтом підсилення 10:1. В результаті отримали криву - 3 (сinya), яка більш деталізована.

Сигнал 4 (коричнева) стосується аксіального напрямку. Раніше цей напрямок вважався нецікавим, але тепер дійшли висновку, що його можна використовувати для юстування датчиків в площині перпендикулярній до осі обертання.

Прямокутні стовпчики 5 (фіолетові) – строб або лічильник обертів вала. Відстань між ними відповідає одному оберту. Велика червона стрілка показує тривалість одного оберту в мс. Тобто проміжок часу 44, 82 мс відповідає частоті обертання 1340 об/хв.

Важливою частиною програми-емулятора є можливість перезапису даних із бінарного кода в цифровий десятичний формат як в текстовому режимі так і в форматі придатному для користування оболонкою Excel.

Вплив вібрації корпусу на показання приладу було усунено прямою пасовою передачею з однаковими по радіусу шківками та кріпленням введеної частини (кріплення вимірювального приладу здійснено на фланці введеного шківки) на фундаменті. Вважалося, що спотворення первинного сигналу в цьому випадку менш впливове.

Крім того, проводились дослідження із датчиками різного робочого діапазону та вибору відстані їх розміщення відносно осі обертання вала. Оптимальними в лабораторних умовах визнано трьохосьові акселерометричні датчики із робочим діапазоном 0-16g в актуальній області частот обертання колінчатого вала та розміщенням їх на радіусі 0,02 м від осі обертання введеного шківки, на фланці якого закріплений вимірювальний прилад.

Для подальшого удосконалення та усунення можливих недоліків із ціллю підвищення достовірності вимірів доцільно протестувати вимірювальний комплекс на ходових натурних випробовуваннях.

Робота виконувалась в рамках держбюджетної НДР №0123U101462 "Мобільна комплексна експрес-діагностика експлуатаційного технічного стану суднового пропульсивного комплексу на основі його вібраційно – коливальних характеристик".

**Висновки.** Завдання по удосконаленню вимірювального комплексу вирішено наступним чином:

- внесено конструктивні зміни у вимірювальний прилад підключенням одноканального підсилювача актуального сигналу;

- створена програма емулятор осцилографа для візуального контролю запису сигналів;
- оптимізовано робочий діапазон трьохканальних датчиків акселерометрів та їх розміщення відносно осі обертання вала;
- вплив вібрації корпусу на корисні сигнали усунуто прямою пасовою передачею із розміщенням вимірювального приладу на нерухомому фундаменті;
- система може бути розвинута до вимірювального комплексу із синхронним врахуванням вібрації корпусу дизеля.

До недоліку методики можна віднести відсутність, на даному етапі, можливості оперативного, в реальному часі, контролю запису даних.

### Перелік використаних джерел

1. International standard ISO 3046-5: Reciprocating internal combustion engines-Performance- Part 5: Torsional vibrations. 2001. P. 1-10.
2. Lin Terry, Tan Andy, Howard Ian, Pan Jie, Crosby Peter, Mathew Joseph. Development of a diagnostic tool for condition monitoring of rotating machinery// Proceedings of the 15th Annual ICOMS Asset Management Conference 2011: Deliver Business Improvement through Asset Management. Asset Management Council Limited, Australia. P. 1-9.
3. Jin-Suk Sun, Tae-Min Han, Kang-Ki Lee, Ue-Kan Kim A Study on the Measurement and Analysis of Whirling Vibration Behavior of Marine Propulsion Shafting System using Gap-sensors // Journal of the Korean Society of Marine Engineering. 2015. Vol. 39, № 2. P. 130-135.
4. Xiaowei Xu, Zhenxing Liu, Jiangdong Wu, Jiaming Xing, Xiaoqing Wang. Misfire fault diagnosis of range extender based on harmonic analysis // International Journal of Automotive Technology. 2019. Vol. 20, № 1. P. 99–108.
5. Drewing S., Abramczyk N., Żuk D. Analysis of changes in the angular velocity of the crankshaft of the marine engine for diagnosing the wear and location the failure of the fuel injection system // Mechanics and Mechanical Engineering. 2021. Vol. 25, №1. P. 72-76.
6. Патент на корисну модель UA № 124689 «Спосіб виміру миттєвих значень кутового прискорення та кутової швидкості обертання вала». Вікулін І.М., Горбачев В.Е., Веретеннік О.М., Задирко С.І., Аболешкін С.С., Кардашев Д.Л. 25.04.18, Бюл. №8.
7. Патент на корисну модель UA № 2019 05580 G Пристрій для експрес-виміру миттєвих значень дотичного, радіального та аксіаль-

ного прискорень вала, що обертається 25.03.2020, бюл. № 6. Веретеннік О.М., Кардашев Д.Л., Аболешкін С.Є., Задирко С.І., Веретеннік О.О.

8. Веретеннік О.М., Кардашев Д. Л., Аболешкін С. Є. Методика вимірювання миттєвих значень кутового прискорення при крутильних коливаннях суднового валопроводу // Суднові енергетичні установки: наук. техн. зб. 2018. Вип. 38. Одеса : НУ «ОМА». С. 55-60.

9. Veretennik O., Kardashev D., Aboleshkin S. Design of detector of internal combustion engine's crankshaft torsional vibrations based on accelerometer method // Proceedings of the 3rd annual conference: Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions, Tallinn. 2019. P. 45-47.