

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.424.3:621.436:004.58

Б. Є. БОДНАР<sup>1</sup>, О. Б. ОЧКАСОВ<sup>1</sup>, Д. В. ЧЕРНЯЄВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (067) 757 42 07, ел. пошта augen3@yandex.ru

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДУ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛУ НЕРІВНОМІРНОСТІ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЯ

**Мета.** Визначення методики обробки сигналу нерівномірності кутової швидкості колінчастого валу тепловозного дизеля для вивільнення корисного сигналу від шумів. **Методика.** Однією з реалізацій стратегії розробки та впровадження систем нерозбірного діагностування тепловозних двигунів у процесі експлуатації є метод нерозбірного діагностування та контролю технічного стану тепловозного дизеля за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу. Проаналізовано недоліки методу усереднення даних і запропоновано методику оцінки невідтворності робочих циклів дизеля. **Результати.** Отримання сигналу нерівномірності частоти обертання виконується за допомогою датчика кутової швидкості, в якості якого використовується інкрементальний енкодер. Наведено структурну схему пристрою та параметри отриманого сигналу. Наведено типові графічні інтерпретації сигналу кутової швидкості. Запропоновано використання КІХ-фільтру та визначено його параметри. Виконано аналіз спектрограм сигналів на обох режимах вимірювання сигналу частоти обертання та обрано частоти зрізу фільтра. Наведено рішення проблеми фазового зсуву результату фільтрації. **Наукова новизна.** Обґрунтовано важливість виконання цифрової фільтрації. Розроблено підхід, що дозволяє використовувати показник невідтворності циклів як додатковий показник сталої роботи дизеля. **Практична значимість.** Вирішення задачі обробки сигналу дозволяє отримати корисний сигнал без врахування шумового впливу, що спотворює відображення дійсної картини фізичного процесу.

*Ключові слова:* нерівномірність частоти обертання; нерозбірне діагностування дизеля; цифрова фільтрація сигналу; спектральний аналіз; фазовий зсув

### Вступ

У теперішній час є гостра потреба автоматизації процесів технічного обслуговування тягового рухомого складу, що дозволить зменшити час перебування локомотивів у ремонті, а у перспективі – перейти від планово-попереджувальної системи обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом. Оптимальним варіантом автоматизації технічного обслуговування є нерозбірне діагностування під час експлуатації.

Останніми роками у діагностуванні тягового рухомого складу все більш актуальною стає стратегія розробки та впровадження систем нерозбірного діагностування тепловозних двигунів у процесі експлуатації. Однією з реалізацій цієї стратегії є метод нерозбірного діагностування та контролю технічного стану тепловозного дизеля за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу. Відомо, що кутова швидкість колінчастого валу дизеля в межах робочого циклу не постійна, на її коливання мають вплив абсолютне значення та форма обертового моменту від кожного циліндра [1, 2, 7-9]. Суть

цього методу полягає в вимірюванні кутової швидкості колінчастого валу дизеля з великою роздільною здатністю та визначенні характерних показників, що свідчать про якість робочого процесу у циліндрах та технічний стан дизеля в цілому.

### Мета роботи

Необхідно визначити методику обробки сигналу нерівномірності кутової швидкості колінчастого валу тепловозного дизеля для виділення корисного сигналу від шумів та зробити його зручним для розрахунку прискорення кутової швидкості та визначення значень діагностичних показників. А також розглянути додаткові можливості обробки сигналу.

### Отримання сигналу нерівномірності кутової швидкості валу дизеля

Сигнал нерівномірності кутової швидкості отримується за допомогою пристрою реєстрування (рис. 1), що складається з датчика (ін-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

крементальний оптичний енкодер) та пристрою перетворення сигналу, який реалізовано на базі мікропроцесорного таймера-лічильника. Датчик встановлено на торцевій частині колінчастого валу дизеля Д 50 з боку генератора або приводу масляного насоса.

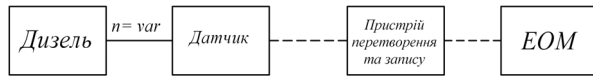


Рис. 1. Структура пристрою реєстрування

На ЕОМ сигнал поступає у вигляді матриці-вектора  $[1 \times 1250]$  значень частоти обертання валу дизеля за два оберти через кутові інтервали  $0,576^\circ$ . Внаслідок неабсолютної жорсткості механічної системи дизеля, а також зв'язку валу з датчиком, сигнал має високочастотний шумовий вплив, що заважає точному визначенню характерних точок (екстремумів) графіку.

Експериментальні дослідження передбачається виконувати у наступних режимах:

- провертання колінчастого валу без подачі палива  $n \approx 130$  об/хв (рис. 2);
- режим холостого ходу дизеля  $n \approx 350$  об/хв (рис. 3).

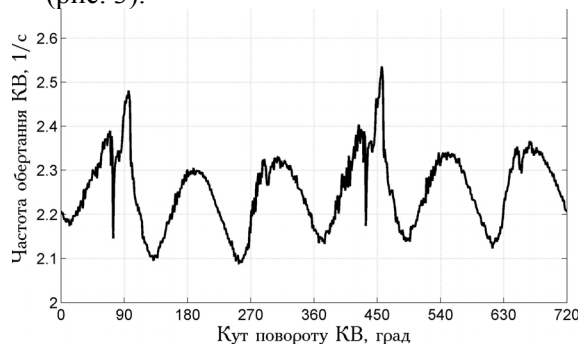


Рис. 2. Сигнал кутової швидкості колінчастого валу дизеля у режимі провертання

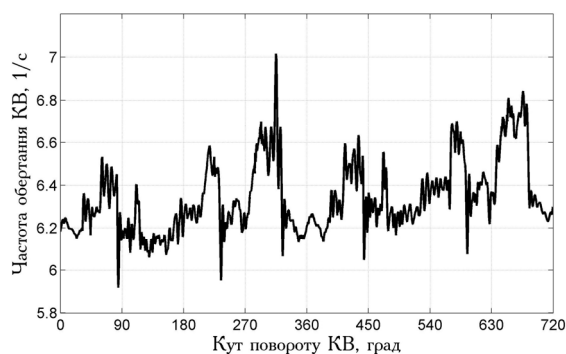


Рис. 3. Сигнал кутової швидкості колінчастого валу дизеля Д 50 у режимі холостого ходу

### Визначення частоти зрізу цифрової фільтрації сигналу

Оскільки сигнал нерівномірності має жорсткий фазовий зв'язок з процесами, що протікають у дизелі і відображаються на амплітуді сигналу, то для його фільтрації необхідно застосувати такий фільтр, що не створює фазового зсуву в обробленому сигналі. Крім того, потреби отримання за даними кутової швидкості значень кутового прискорення валу та визначення характерних несправностей КШМ висувають суперечні вимоги щодо ступеня фільтрації. Так, для розрахунку кутового прискорення необхідно мати сигнал кутової швидкості з мінімальною складовою високо- та середньочастотних шумів. Задоволення цієї вимоги зводиться до задачі конструювання цифрового фільтру високого порядку з вузькою полосою пропускання. Полоса пропускання, або частота зрізу визначається за результатами аналізу спектральної щільності сигналу кутової швидкості (рис. 4). Розрахунок спектрограм виконувався у програмному пакеті MATLAB 7.12.0 (R2011a) за методом Томсона, який ґрунтується на використанні витягнутих сфероїдальних функцій. Ці функції кінцевої довжини забезпечують максимальну концентрацію енергії в заданій полосі частот [4, 6]. Аналіз отриманої спектрограми сигналу нерівномірності у режимі холостого ходу (див. рис. 4) показав, що максимальне значення щільності амплітуд сигналу спостерігається у діапазоні  $0 \dots 0,018$  значень нормалізованої частоти. Отже приймаємо значення частоти зрізу  $0,018$ .

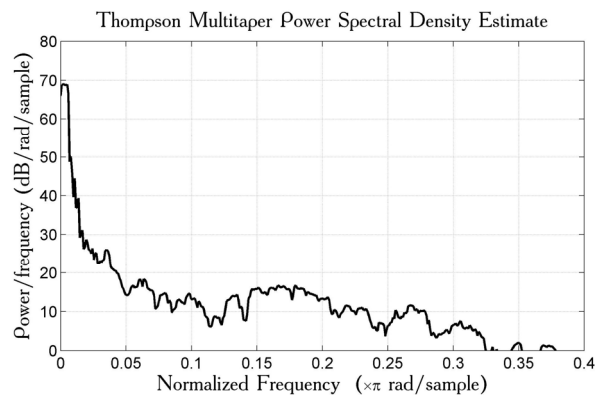


Рис. 4. Спектрограма сигналу кутової швидкості дизеля Д50 у режимі холостого ходу

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Аналіз спектрограми сигналу нерівномірності у режимі провороту (рис. 5) показав, що максимальне значення щільності амплітуд сигналу спостерігається у діапазоні 0...0,02 значень нормалізованої частоти.

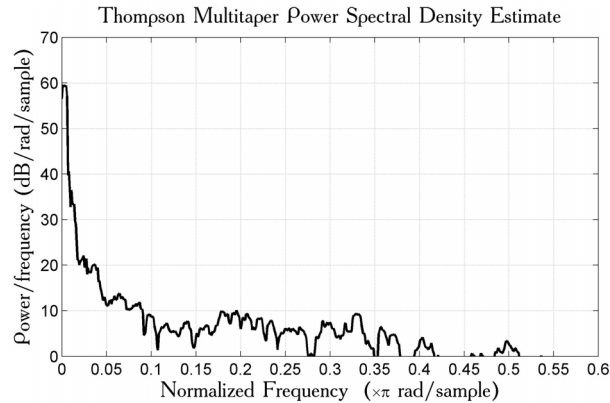


Рис. 5. Спектрограма сигналу кутової швидкості дизеля Д 50 у режимі проворотання

Але у діапазоні 0,02...0,05 значення щільності залишається досить великим. Це відображає коливання графіка кутової швидкості, викликані інерційною несталістю КШМ.

### Розробка цифрового фільтру

Як видно зі спектрограм (рис. 2, 3) щільність амплітуди корисного сигналу знаходиться суто у зоні низьких частот, тому для відокремлення його від шумів пропонується використати фільтр високих частот. Фільтрацію даних реалізовано у пакеті MATLAB 7.12.0 (R2011a) за допомогою фільтру високих частот з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтр), який складається з 90 ланок (рис. 6). Математично робота фільтра виглядає наступним чином:

$$y(x) = b_0 + b_1x^{-1} + \dots + b_mx^{-m}, \quad (3.1)$$

де  $x$  – значення ряду даних, що підлягають фільтруванню;

$y(x)$  – значення ряду відфільтрованих даних;

$b$  – коефіцієнти фільтру;

$m$  – ступінь фільтрації.

Оскільки сигнал має кінцеву довжину, то при його обробці з'являються кінцеві ефекти, що спотворюють сигнал на початку кутового діапазону та наприкінці. Тому фільтрування

виконується з використанням вікна Кайзера зі значенням  $\beta = 0,8$ .

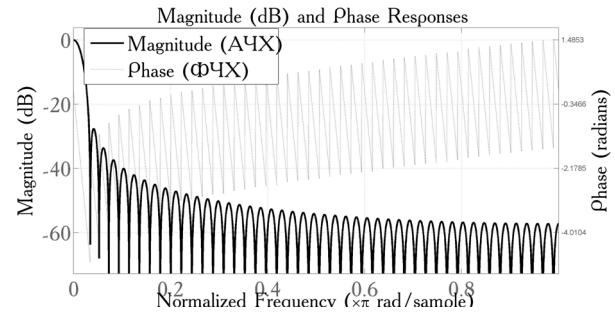


Рис. 6. АЧХ та ФЧХ КІХ-фільтру

При використанні КІХ-фільтрів такого високого порядку спостерігається значний фазовий зсув (рис. 7), що ускладнює подальшу обробку сигналу.

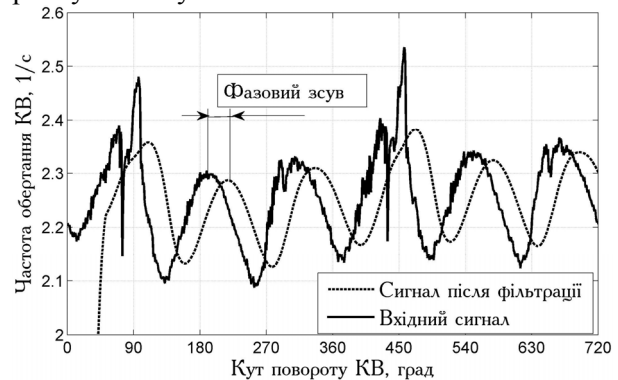


Рис. 7. Результат виконання фільтрації сигналу з отриманням фазового зсуву

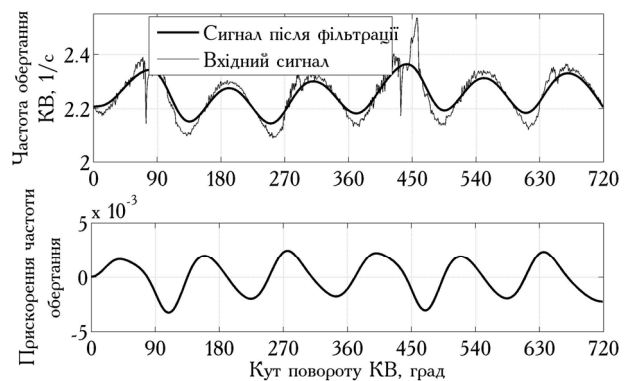


Рис. 8. Результат виконання фільтрації сигналу частоти обертання  $\omega$  з компенсацією фазового зсуву та побудова графіку прискорення частоти обертання

Для усунення цього ефекту фільтрація виконувалась двічі: спочатку у прямому напрямку, а потім – у зворотному. Це дозволило абсолютно компенсувати зсув (рис. 8), а якісна фільтрація

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

шумового впливу дозволила шляхом диференціювання побудувати адекватну графічну залежність прискорення частоти обертання.

### Огляд можливості додаткової обробки сигналу

В якості додаткового методу обробки сигналу в роботах [3, 5], де вирішувалася подібна задача, для збільшення достовірності даних та зменшення шумового впливу пропонувалось використовувати усереднення сигналів послідовних циклів у кількості від 30 до 100.

Зважаючи на те, що при різних значеннях частоти обертання валу необхідний час для вимірювання 30 робочих циклів також буде змінюватись (рис. 9).

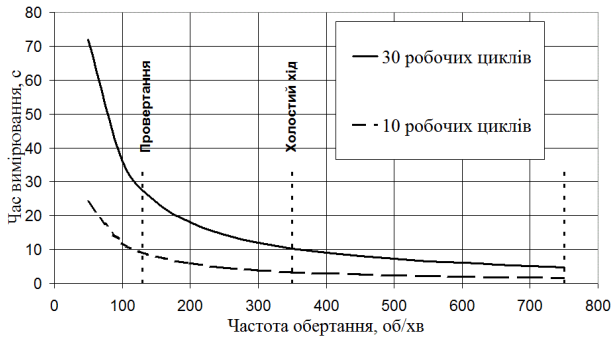


Рис. 9. Графічна залежність часу вимірювання частоти обертання 10 та 30 послідовних робочих циклів від швидкісного режиму для дизеля Д 50

Графічна залежність, побудована для робочих обертів дизеля Д 50 показує, що при виконанні діагностування на режимі, близькому до номінального, час вимірювання 30 робочих циклів не перевищує 5 секунд. На середніх обертах від 5 до 10 секунд. А на режимі холостого ходу цей час складає 10 секунд. При вимірюванні у режимі провороту від штатного пускового пристрою частота обертання досягає 130 обор./хв., а час вимірювання – 24 секунди. З точки зору зменшення навантаження на акумуляторній батареї при повертанні вала дизеля слід розглянути можливість зменшення часу вимірювання у цьому режимі.

Зрозуміло, що результатом процедури усереднення є деякий середній робочий цикл, що відповідає реальним циклам з деяким ступенем імовірності. Тому пропонується розглядати не усереднений цикл, а окремі робочі цикли, що дає можливість спостерігати ступень ідентич-

ності циклів. Такий підхід дозволяє запропонувати використання показника невідтворності циклів, що характеризує ступень різниці між послідовними робочими циклами у окремому циліндрі та дозволяє оцінити насамперед стабільність роботи паливної апаратури.

### Висновки

Задача обробки сигналу має велике значення, оскільки дозволяє отримати корисний сигнал без врахування шумового впливу, що спотворює відображення дійсної картини фізичного процесу.

За результатами даної роботи проаналізовано частотний спектр сигналу нерівномірності частоти обертання вала дизеля, визначено тип фільтру та розроблено його параметри. Отриманий фільтрований сигнал цілком підходить для визначення значень характерних точок графіку нерівномірності частоти обертання та побудови графіку прискорення. Також розроблено підхід, що дозволяє використовувати показник невідтворності циклів як додатковий показник сталої роботи дизеля.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар, Б. Є. Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв, О. Я. Децюра // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 41. – С. 63–67.
2. Боднар, Б. Є. Моделювання нерівномірності обертання колінчатого вала дизеля / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв, О. Я. Децюра // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ., 2010. – Вип. 31. – С. 18–25.
3. Борщенко, Я. А. Разработка метода диагностирования автомобильных дизелей по неравномерности вращения коленчатого вала : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.10 / Борщенко Ярослав Анатольевич ; Курганский гос. ун-т. – Тюмень, 2003. – 189 с.
4. Лазарев, Ю. Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB : учебный курс / Ю. Ф. Лазарев. – СПб. : Питер ; Киев : Изд. группа ВПВ, 2005. – 512 с.
5. Марченко, Б. Г. Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическая реализация на дизель-

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- электрических генераторах. Часть 4. Экспериментальная проверка методики диагностики цилиндрично-поршневой группы дизель-электрического генератора / Б. Г. Марченко, М. В. Мыслович // Техническая электродинамика. – 1999. – № 4. – С. 40–45.
6. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2007. – С. 751.
7. Challen, B. Diesel Engine Reference Book, 2nd edition / B. Challen, R. Baranescu. – Butterworth-Heinemann, 1999. – 682 с.
8. Gawande, S. H. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation / S. H. Gawande, L. G. Navale, M. R. Nandgaonkar, D. S. Butala., S. Kunamalla, // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – V. 2(3). – P. 433–441.
9. Gawande, S. H. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance / S. H. Gawande, L. G. Navale, M. R. Nandgaonkar, D. S. Butala // International Review of Mechanical Engineering, (I.R.E.M.E.). – 2009. – V. 3. – № 6. – P. 782–787.

Б. Е. БОДНАРЬ<sup>1</sup>, А. Б. ОЧКАСОВ<sup>1</sup>, Д. В. ЧЕРНЯЕВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Локомотиви», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (067)757 42 07, эл. почта augen3@yandex.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДА ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЯ

**Цель.** Определение методики обработки сигнала неравномерности угловой скорости коленчатого вала тепловозного дизеля для отделения полезного сигнала от шумов. **Методика.** Одной из реализаций стратегии разработки и внедрения систем неразборного диагностирования тепловозных двигателей в процессе эксплуатации является метод неразборного диагностирования и контроля технического состояния тепловозного дизеля по неравномерности частоты вращения коленчатого вала. Проанализированы недостатки метода усреднения данных и предложена методика оценки невоспроизводимости рабочих циклов дизеля. **Результаты.** Получение сигнала неравномерности частоты вращения осуществляется с помощью датчика угловой скорости, в качестве которого используется инкрементальный энкодер. Приведена структурная схема устройства и параметры полученного сигнала. Приведены типовые графические интерпретации сигнала угловой скорости. Предложено использование КИХ-фильтра и определены его параметры. **Научная новизна.** Выполнен анализ спектрограмм сигналов на обоих режимах измерения сигнала частоты вращения и выбраны частоты среза фильтра. Приведено решение проблемы фазового сдвига результатов фильтрации. **Практическая значимость.** Обоснована важность выполнения цифровой фильтрации. Разработан подход, который позволяет использовать показатель невоспроизводимости циклов как дополнительный показатель работы дизеля.

**Ключевые слова:** неравномерность частоты вращения; неразборное диагностирование дизеля; цифровая фильтрация сигнала; спектральный анализ; фазовое смещение

В. Ye. BODNAR<sup>1</sup>, O. B. OCHKASOV<sup>1</sup>, D. Ch. CHERNYAYEV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Department of “Lokomotives”, The Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (067) 757 42 07, e-mail augen3@yandex.ru

## DEFINITION OF METHOD SIGNAL FILTERING IRREGULARITY CRANKSHAFT SPEED OF DIESEL

**Purpose.** Determination of signal processing techniques uneven angular velocity of the crankshaft of diesel locomotive for the release of the signal from the noise. **Methodology.** One of the implementations of strategy development and implementation of folding diagnosing diesel engines in service is a method of folding diagnostics and

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

condition monitoring of diesel locomotive for uneven speed of the crankshaft. The disadvantages of the method of averaging the data and the technique of non-repeatable evaluation cycles diesel are analyzed. **Findings.** Signal receiving of uneven speed is achieved by using angular velocity sensor, which is used as an incremental encoder. The block diagram of the device and the parameters of the received signal have been shown. Typical graphic interpretations of the angular velocity signal are presented. Using of FIR filter was proposed and its parameters were dimensioned. **Originality.** The analysis of the spectrograms of the signals in both measurement modes speed signal was carried out and the filter cut-off frequency was selected. The solution of the problem of the phase shift filtering results is presented. **Practical value.** The importance of the digital filter is substantiated. The approach, which allows the use of non-repeatable indicator cycles as an additional indicator of the diesel engine is developed.

*Keywords:* uneven speed; folding diesel diagnostics; digital filtration signal spectral analysis; phase shift

## REFERENCES

1. Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B., Chernyayev D.V., Detsiura O.Ya. *Metody nerozbirnoho diagnostuvannya dyzeliv pry ekspluatatsii rukhomoho skladu* [Methods of molded diagnosis of diesel engines in the operation of rolling stock]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 63-67.
2. Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B., Chernyayev D.V., Detsiura O.Ya. *Modeliuvannya nerivnomirnosti obertannia kolinchatoho valu dyzelia* [Modeling irregularity of the crankshaft of diesel]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 31, pp. 18-25.
3. Borshchenko Ya. A. *Razrabotka metoda diagnostirovaniya avtomobilnykh dizeley po neravnomernosti vrashcheniya kolenchatogo vala*. Kand. Diss. [Development of a diagnosis automobile diesels method on the uneven rotation of the crankshaft. Cand. Diss.]. Tumen, 2003. 189 p.
4. Lazarev Yu.F. *Modelirovaniye protsessov i sistem v MATLAB* [Modeling of processes and systems in MATLAB]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2005. 512 p.
5. Marchenko B.G., Myslovich M.V. *Teoriya diagnostiki energoagregatov po deviatsii vrashchayushchikhsya uzlov i yeye prakticheskaya realizatsiya na dizel-elektricheskikh generatorakh. Chast 4. Eksperimentalnaya proverka metodiki diagnostiki tsilindro-porshnevoy gruppy dizel-elektricheskogo generatora* [The theory of power units to diagnose deviations rotating parts and the practical implementation of the diesel and electric generators. Part 4. Experimental verification of the diagnostic techniques of cylinder and piston group of diesel and an electric generator]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika – Technical electrodynamics*, 1999, no. 4, pp. 40-45.
6. Sergiyenko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2007. 751 p.
7. Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*, 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1999. 682 p.
8. Gawande S.H., Navale L.G., Nandgaonkar M.R., Butala D.S., Kunamalla S. *Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation*. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2 (3), pp. 433-441.
9. Gawande S.H., Navale L.G., Nandgaonkar M.R., Butala D.S. *Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance*. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, 2009, vol. 3, no. 6, pp. 782-787.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Е. Д. Тартаковським (Україна); д.т.н., проф. М. І. Каницею (Україна)*

Поступила в редколегію 07.11.2012

Принята к печати 21.02.2013