

УДК 629.52.03:621.431:620.178.53

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.21

В. І. АНДРЕЄВ, О. І. СЛУЧАК, О. Ф. ПРИЩЕПОВ, О. В. ЩЕСЮК, С. Я. ЯЦЕНКО

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна

СИСТЕМА ВІБРОМОНІТОРИНГУ ДВЗ МАЛОМІРНИХ СУДЕН НА БАЗІ ARDUINO

Проблема поточного моніторингу стану двигуна внутрішнього згоряння є особливо актуальною для водного транспорту. Зазвичай в комплексних системах моніторингу стану циліндро-поршневої групи (ЦПГ) вантажних суден використовують ряд індикаторних показників, таких як: температура, тиск, вібрація. Для маломірних суден така складна система з інтегрованими датчиками є надлишковою. Метою даного дослідження є розробка системи вібромоніторингу стану ДВЗ маломірних суден на базі відкритої апаратної платформи Arduino Uno з передачею даних до хмарного сховища. У статті авторами розроблено схему підключення та програмне забезпечення для системи вібромоніторингу ДВЗ маломірних суден. Теоретичний базис розробленої системи заснований на методиці FFT-аналізу на базі швидкого перетворення Фур'є. Розроблена конструкція базується на мікросхемі Arduino Uno. Передача даних відбувається за допомогою Wi-Fi модуля ESP8266 для виведення в реальному часі та зберігання в Google-таблиці. Вибір такої системи обумовлено як потребою в існуванні системи поточного відображення індикаторних параметрів з встановленням характеру неполадок та сигналізації критичних режимів роботи, так і потребою в накопиченні наукових даних для досліджень режиму експлуатації двигуна, що стане корисним для науковців та проектувальників ДВЗ маломірних суден. Встановлено, що використання модульної системи Arduino дозволить в широких межах варіювати властивості системи вібромоніторингу за допомогою використання датчиків різних типів (KY-038 та LM393). Удосконалено метод передачі даних системи вібромоніторингу на програмному рівні, шляхом застосування програмних блоків з трьох open-source проектів на базі Arduino. Розроблена схема може бути розвинена для використання на автотранспорті, а також моніторингу двигунів інших типів. Це може стати базою для накопичення даних, що дозволить більш точно діагностувати відхилення в роботі ДВЗ маломірних суден на основі спільної статистики, а не виключно даних від одного двигуна, як в подібних системах для вантажних суден.

Ключові слова: суднові ДВЗ; малорозмірні судна; Ардуїно; вібромоніторинг; FFT-аналіз; автоматизація вахти.

Постановка проблеми

Розробки систем динамічного виведення інформації про режими роботи судових ДВЗ та накопичення статистичної інформації щодо ходу їх експлуатації є важливою інженерною та науково-прикладною задачею.

В випадку з вантажним флотом питання моніторингу стану ЦПГ (циліндро-поршневої групи) двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) регулюється на законодавчому рівні кодексом ПДНВ-78, з поправками та рядом стандартів CESNI [1].

Зокрема, кодексом ПДНВ-78 визначено, що на двигунах має бути встановлено діагностичне обладнання фірми виробника, або обладнання, рекомендоване виробником.

ГОСТ 10032-80 регламентує три ступені автоматизації судових ДВЗ:

I ступінь – А1 автоматична підтримка нормальної роботи, аварійна сигналізація та захист;

II ступінь – А2 автоматичне дистанційне уп-

равління з частковим обслуговуванням без постійного вахтового спостереження;

III ступінь – А3 дистанційний автоматичний контроль без обслуговування терміном понад 150 годин.

Для маломірних суден обов'язковість такого обладнання законодавчо не встановлена, але загальний напрямок розвитку морського законодавства вказує на неминучість появи такої норми.

Відповідно, розробка систем моніторингу стану ДВЗ маломірних суден є перспективною нішею для нових розробок та інвестицій.

Теоретичні основи дослідження

Модульна структура та той факт, що апаратна платформа Arduino є платформою з відкритим програмним кодом [2], дає можливість застосовувати її в безлічі проектів. Зокрема серед них і системи діагностування парових двигунів Стирлінга [3], [4].

Застосування Систем вібромоніторингу спіра-

ється на міжнародні стандарти [5], що застосовуються при стендових випробуваннях ДВЗ.

Прикладна роль технології моніторингу стану двигуна є беззаперечною. В той же час будь яка технологія потребує постійного вдосконалення, а для цього необхідно мати достатньо широкий масив даних, отриманих в ході його експлуатації.

Існуючі автоматизовані системи діагностики стану ДВЗ на великотоннажних суднах зазвичай містять: 1) датчики тиску, що вимірюють тиск в камері згоряння та вихлопу, 2) датчики температури, що вимірюють температуру корпусу, вихлопу та навколишнього повітря; 3) датчики обертання колінчастого валу; 4) осцилограф, що базується на датчиках вібрації. Часто датчики бувають інтегрованими в корпус двигуна.

В випадку з маломірними суднами така інтеграція є не рекомендованою, тому найбільш доцільним виглядає використання зовнішніх датчиків вібрації. Крім того системи діагностики судових ДВЗ часто будують індивідуальні нормограми роботи для кожного двигуна, що не дозволяє використовувати такі дані в аналізі експлуатаційних властивостей всієї серії.

За стандартом ISO 20283-4:2012 [5] основним індикаторним показником вібрації є середньоквадратичне значення ефективних гармонік Фур'є перетворення сигналу вібрації в заданій полосі частот (зазвичай 10-1000 Гц).

В частотній області [6] таке середньоквадратичне значення обчислюється за формулою

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=k1}^{k2} S_j^2}{2}}, \quad (1)$$

де $k1$ та $k2$ – індекси гармонік 10 та 1000 Гц,

S_j – амплітуда спектру сигналу.

На практиці такі вимірювання здійснюються за допомогою FFT-датчиків (Fast Fourier Transform) тобто датчиків швидкого перетворення Фур'є. Реалізація такого аналізу є можливою в випадках, коли неперервний часовий інтервал може бути перетворено в неперервний частотний з збереженням інформації про амплітуди та фази частотних компонентів.

Формування задачі

Метою даного дослідження є розробка системи вібромоніторингу стану ДВЗ маломірних суден на базі відкритої апаратної платформи Arduino Uno з передачею даних до хмарного сховища.

Об'єктом даного дослідження стала система безпеки та стабільності роботи судового ДВЗ за індикаторними показниками.

Предметом дослідження є комплексна система захисту судового дизельного двигуна на базі Arduino на основі методик вібромоніторингу деталей ЦПП з передачею даних за допомогою Wi-Fi модуля ESP8266 для виведення в реальному часі та зберігання в Google-таблиці.

В процесі дослідження поставлено ряд **завдань**.

1. Розробити математичну та апаратну базу проекту, обрати модель, на яку спиратиметься розробка як на прототип, визначити основні зміни, що необхідно внести в базову модель для приведення проекту до поставлених вимог;

2. Розробити систему діагностики стану двигуна та створити систему діагностики двигуна на базі FFT-аналізатора з датчиками KY-038 або LM393 для плати Arduino Uno та функцією передачі даних на Web-сторінку через Wi-Fi модуль ESP8266.

3. Розробити метод інтерпретації переданих даних з прямим виводом графіку вібромоніторингу в реальному часі та зберіганням даних моніторингу в Google-таблиці для більш глибоких досліджень.

Розроблена конструкція базується на проекті „Аналізатор спектру звукових частот на основі FFT та Ардуїно” [7].

Відмову від ЖК-дисплею на користь зчитування даних через Wi-Fi модуль ESP8266, запозиченого в проекті [8] „Система моніторингу забруднення повітря на основі Arduino Uno” обумовлено зручністю роботи через мережу та можливістю доступу до отриманих даних кількох користувачів.

Вибір хмарного сховища Google-таблиць обумовлено можливістю оперативного зберігання та відображення отриманих даних з тими ж апаратними ресурсами, що і в першому випадку [9]

Введення подібної конструкції дозволить налагодити ефективний збір статистичних даних з відхилень при експлуатації ДВЗ маломірних суден та вдосконалити як самі двигуни так і систему їх вібродіагностики для точного визначення характеру поломки дистанційно.

Дана схема може бути використана виключно для маломірних суден за умови відсутності норм, щодо обов'язкового використання рекомендованого виробником обладнання.

Методика дослідження

Розробка систем вібродіагностики двигунів маломірних суден з можливістю накопичення статистичних даних в Google-таблицях є досить перспек-

тивним напрямком як в науковому так і в комерційному плані.

Першим етапом даного дослідження стала розробка математичної та апаратної бази проекту.

Для цього було запропоновано застосовувати Arduino Uno, як модульну плату, яка рекомендується при перших роботах з даною платформою та має найбільшу кількість клонів.

Основою конструкції стане плата Arduino UNO (рис 1), що вважається оптимальним вибором для початківця та є найбільш поширеним пристроєм Ардуїно. В основі лежить чіп ATmega, а саме ATmega 328 в ревізії R3 або рідше ATmega168 для інших версій. Саме на дану платформу було випущено значну кількість клонів: Freeduino, Seeeduino, Zigduino (ZigBee), Boarduino, Teensyduino, FEZ Panda (NXP ARM7, use.NET), mbed (NXP ARM Cortex-M0/M3), Pinguino (PIC 18/32), Wiring (ATMega 1281-16AU), NETduino (Atmel ARM7, use.NET) та ін.



Рис. 1. Arduino Uno (клон)

Параметри плати:

- Мікроконтролер: ATmega328;
 - Робоча напруга: 5В;
 - Напруга живлення: 7-12 В;
 - Напруга живлення гранична: 6-20В;
 - Цифрові входи/виходи: 14 (з них 6 ШИМ-виходів);
 - Аналогові входи: 6;
 - Максимальний струм одного виводу: 40 мА;
 - Максимальний вихідний струм: 50 мА;
 - Flash-пам'ять: 32 КБ (ATmega328) з яких 0.5 КБ застосовує завантажувач;
 - SRAM: 2 КБ (ATmega328)
 - EEPROM: 1 КБ;
 - Тактова частота 16 МГц
- Габарити: 69x53 мм.

Передача даних відбувається за допомогою технології Wi-Fi – модуль ESP8266.

В програмній частині проекту використовуватимуться бібліотеки "fix_fft" та "U8glib.h" для FFT-аналізу, бібліотека „SoftwareSerial” для послідовного зв'язку на цифрових контактах 9 (RX) та 10 (TX).

Бібліотека „HTTPS Redirect” від electronicsguy та ідентифікатор скрипта *GScriptId на мові Google Apps Script використана для передачі даних до Google-таблиці.

Результати досліджень

Результатом досліджень стала схема (рис. 2), розроблена в рамках другого етапу дослідження.

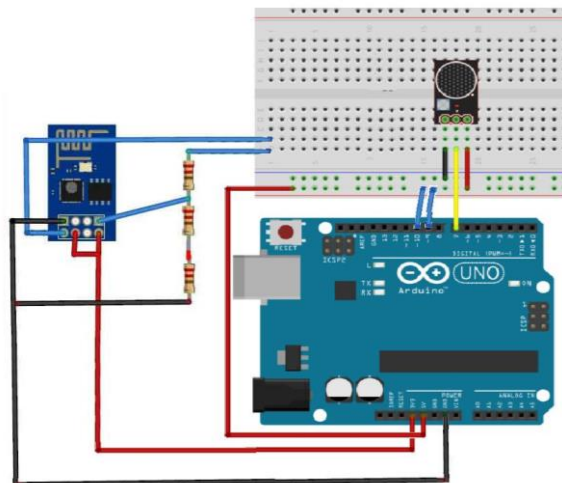


Рис.2. Схема підключення компонентів системи вібромоніторингу ДВЗ маломірних суден на базі Arduino

Схема містить такі елементи:

- Плата Arduino Uno;
- Мікрофонний датчик звуку та вібрації LM393;
- Макетна плата;
- Wi-Fi модуль ESP8266;
- 3 резистори на 1 кОм.

Спочатку здійснюється з'єднання Wi-Fi модулю ESP8266 з платою Arduino Uno. Так як модуль ESP8266 працює від напруги 3.3 V, його пряме живлення з напругою 5V від плати Arduino Uno призведе до пошкоджень. Тому необхідно з'єднати контакт VCC CH_PD модуля ESP8266 з контактом 3.3 V плати Ардуїно, а контакт з виходом 9 на 5V через ділитель напруги за допомогою послідовного з'єднання 3 резисторів. Контакт TX модуля ESP8266 приєднуємо до контакту 10 плати Arduino.

Мікрофонний датчик звуку та вібрації LM393 приєднується через макетну плату до виходів 5V, GND та 7.

Для передачі даних до форми Google-таблиці в скрипт додаються бібліотека HTTPSRedirect, параметри Wi-Fi-мережі, ідентифікатору скрипта *GScriptId та хосту.

```
#include "U8glib.h"
#include "fix_fft.h"
#include <SoftwareSerial.h>
```

```

#include <HTTPSRedirect.h>
#define DEBUG true
SoftwareSerial esp8266(9,10); // Фіксує pin 9 Arduino як pin RX та pin 10 як pin TX
int sensorPin=7; // Створює змінну на основі значень датчика, підключеного до виходу pin 7 Arduino як сенсору
#define SAMPLES 128
#define AUDIO 7 // Встановлюємо константи змінних на основі даних для аналізу, отримуваних від виходу 7
char im[SAMPLES];
char data[SAMPLES]; // Резервуємо рядки для функції
int barht[SAMPLES]; // округлюємо значення функції
const char* ssid = "SSID нашої Wi-Fi-мережі";
// SSID нашої Wi-Fi-мережі
const char* password = "Пароль вашої мережі";
// Пароль вашої мережі
const char *GScriptId = "Ваш Google-Script-ID";
// Задаємо Google-Script-ID.
const int dataPostDelay = 900000; // обираємо інтервал 15 minutes = 15 * 60 * 1000
const char* host = "script.google.com";
const char* googleRedirHost = "script.googleusercontent.com";
const int httpsPort = 443;
HTTPSRedirect client(httpsPort);
// Збираємо URL з даними
String url = String("/macros/s/") + GScriptId + "/exec?";
const char* fingerprint = "F0 5C 74 77 3F 6B 25 D7 3B 66 4D 43 2F 7E BC 5B E9 28 86 AD";

```

На етапі налаштувань задаємо інтервали, паролі, дані порту та IP-адресу.

```

void setup(){
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Connecting to wifi: ");
  Serial.println(ssid);
  Serial.flush();

  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println(" IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  Serial.print(String("Connecting to "));
  Serial.println(host);

  bool flag = false;
  for (int i=0; i<5; i++){
    int retval = client.connect(host, httpsPort);
    if (retval == 1) {
      flag = true;

```

```

      break;
    }
    else
      Serial.println("Connection failed. Retrying...");
  }

  // статус підключення, 1 = підключено, 0 – не підключено.
  Serial.println("Connection Status: " + String(client.connected()));
  Serial.flush();

  if (!flag){
    Serial.print("Could not connect to server: ");
    Serial.println(host);
    Serial.println("Exiting...");
    Serial.flush();
    return;
  }

  // Дані відправлятимуться до кінця дії сертифікату
  if (client.verify(fingerprint, host)) {
    Serial.println("Certificate match.");
  } else {
    Serial.println("Certificate mis-match");
  }
}

// дані відправляються в Google-таблиці
void postData(String tag, float value){
  if (!client.connected()){
    Serial.println("Connecting to client again...");
    client.connect(host, httpsPort);
  }
  String urlFinal = url + "tag=" + tag + "&value=" + String(value);
  client.printRedir(urlFinal, host, googleRedirHost);
}

// задається інтервал завантаження даних
pinMode(sensorPin, INPUT); // Встановлюємо режим роботи датчика на вхід
}

```

Далі беремо значення від датчика в якості змінної val та звертаємось до бібліотеки для проведення розрахунків перетворення Фур'є.

Відповідно, ми отримуємо пряму передачу даних FFT-аналізу без їх обробки.

```

void loop()
{
  static int i, j;
  int val;

```

```

// get audio data
for(i = 0; i < SAMPLES; i++)
{
    val = sensorPin; // змінна реальних показників
    сенсора
    data[i] = (char)(val/4 - 128); // store as char
    im[i] = 0; // init all as 0
}
// переходимо до FFT-бібліотеки
fix_fft(data, im, 7, 0);

// виділяємо тільки абсолютні значення змінної
// data для 64 результатів
for(i = 0; i < SAMPLES/2; i++)
{
    barht[i] = (int)sqrt(data[i] * data[i] + im[i] *
im[i]);
}
for(i = 0, j = 0; i < SAMPLES/2; i++, j += 2)
{
    barht[i] = barht[j] + barht[j + 1];
}
int data = barht[i]; // дані, що передаються при-
рівняно до вирахуваної змінної
postData("SoilMoisture", data); // надаємо дані,
які будуть відправлені на сервер
delay (dataPostDelay);
}

```

Обговорення та перспективи подальших досліджень

Дослідження в галузі вібромоніторингу носять конвергентний характер [10] та можуть в перспективі стати ефективним напрямком для збору статистичних даних для наукових досліджень в галузі вдосконалення ДВЗ та запобігання поломкам.

Вони також розглядають перспективу саме онлайн моніторингу, як основного напрямку діагностики двигунів XXI століття. Проте тут повторюється схильність до отримання максимально точних даних через вимірювання саме коливань колінного валу, що робить такий шлях малоефективним для двигунів малого розміру та потребує наявності вбудованих датчиків.

Автори [11] відмічають перспективність такої системи для наземного транспорту на прикладі потягів. Тут основну увагу зосереджено на вібрації клапана. Цей підхід вважається унікальним, але знову потребує вбудованих датчиків.

В той же час автори [12] зосереджують увагу на розробці нових типів сенсорів на основі МЕМС-акселерометрів для ДВЗ, в тому числі і сумісних з платформами з відкритим програмним кодом, такими як Ардуїно. Проте дане дослідження є саме розробкою датчиків і не розкриває питання їх подальшого використання.

В дослідженні [13] наведено критичний огляд

існуючих методів вібродіагностики ДВЗ, що дозволяє з певною ймовірністю говорити про те, що серійних систем моніторингу стану ДВЗ маломірних суден на даний момент не існує.

Перспективними в даному напрямку виглядають дослідження з вдосконалення методів аналізу спектрограм вібрації, які за досягнення достатньої роздільної здатності зможуть виділяти вібрацію кожного з означених елементів ДВЗ дистанційно.

В даному випадку найбільш простими в реалізації виглядають саме осцилографи з FFT-аналізатором на основі швидкого перетворення Фур'є.

Одним з перспективних шляхів вдосконалення розробленої системи вібромоніторингу ДВЗ маломірних суден виглядає розробка лазерних датчиків шумознімання. Крім того можна використати математичний апарат досліджень [6] та [14].

Проте, проблема одночасного виведення даних в реальному часі та їх зберігання для аналізу лишається нагальною, адже розроблена система дозволяє робити одне з двох в залежності від потреби. Це можна легко реалізувати шляхом HTML-програмування з передачею даних від Django-серверу до Google-таблиць після їх відображення, що і стане напрямком подальшої розробки.

Висновки

Таким чином було отримано два способи реалізації системи аналізу вібрації двигуна з інтерпретацією в вигляді графіку та таблиці з графіком. Спосіб з використанням скрипта Python потребує використання стороннього сервісу Django-серверу, проте краще підходить для потокового відображення даних. В той же час дана система має труднощі з довготривалим накопиченням даних вібродіагностики для моніторингу стану ДВЗ. З іншого боку метод з передачею даних до Google-таблиць дозволяє зберігати дані за тривалий період, має більш стабільну програмну основу та може обійтись без застосування проміжних сервісів. Але з поточним відображенням даних можуть виникати певні затримки.

Другий варіант становить більший інтерес для науки, адже сприяє накопиченню даних про роботу двигуна. В той же час це дозволить вдосконалити саму методику вібродіагностики за рахунок індивідуального підходу, що є оптимальним для маломірних суден.

Література

1. Європейський комітет з розробки стандартів у галузі внутрішнього судноплавства [Текст]: комісія резолюції CESNI, прийнятих на Засіданні від 08 листопада 2018 року / CESNI (18) 54 доп. 2 фінальна версія. – Режим доступу: <https://www.cesni.eu/wp->

content/uploads/2021/04/ES-QIN-2018-UA.pdf. – 12.04.2021.

2. González, Isaías. *Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/Micro-Grids*. [Text] / Isaías González, Antonio José Calderón // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2019. – Vol. 36. – Article Id: 100557. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100557.

3. Pablo Dellicompagni. *Simulation and testing of a solar reciprocating steam engine* [Текст] / Pablo Dellicompagni, Luis Saravia, Martín Altamirano, Judith Franco // *Energy*. – 2018. – Vol. 151. – P. 662-674. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.110.

4. Masoumi, A. P. *Experimental assessment of damping and heat transfer coefficients in an active free piston Stirling engine using genetic algorithm*. [Text] / A. P. Masoumi, A. R. Tavakolpour-Saleh // *Energy*. – 2020. – № 195. – Article Id: 117064. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117064.

5. ISO 20283-4:2012 "Mechanical vibration - Measurement of vibration on ships - Part 4: Measurement and evaluation of vibration of the ship propulsion machinery" [Електронний ресурс] / IDT. Режим доступу: <https://www.rts-tender.ru/poisk/gost/r-iso-20283-4-2017>. – 12.04.2021.

6. Варбанец, Р. А. *Анализ возможности вибродиагностики технического состояния судовых дизелей* [Текст] / Р. А. Варбанец, Ю. Н. Кучеренко, В. И. Кырнац // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 6. – С. 75–79.

7. *Анализатор спектра звуковых частот на основе FFT и Arduino* [Електронний ресурс] // *Мир микроконтроллеров*. – 24.09.2020. – Режим доступу: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/analizator-spektra-zvukovyh-chastot-na-osnove-fft-i-arduino/>. – 12.04.2021.

8. *Система мониторинга загрязнения воздуха на основе Arduino* [Електронний ресурс] // *Мир микроконтроллеров*. – 30.03.2020. – Режим доступу: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/sistema-monitoringa-zagryazneniya-vozduha-na-osnove-arduino/>. – 12.04.2021.

9. *Как загрузить данные с ESP8266 в Google-таблицы: пошаговое руководство* [Електронне джерело] // *Вольтик*. – 21.06.2018. – Режим доступу: <https://voltiq.ru/post-data-to-google-sheets-with-esp8266/>. – 12.04.2021.

10. *Online monitoring ICE powers based on the crankshaft angular vibration* [Text] / C. R. Hua, D. W. Dong, B Yan. & M. H. Xu // *Applied Mechanics and Materials*. – 2011. – Vol. 48-49. – P. 773-778. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.48-49.773.

11. Mohamed, E. S. *Fault diagnosis of ICE valve train for abnormal clearance and valve head crack using vibration signals* [Текст] / E. S. Mohamed // *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*. – 2015. – Vol. 11, No. 1. – P. 18-38. DOI: 10.1504/IJNVN.2015.067974.

12. Bismor, D. *System for Vehicle Sound and Vibration Monitoring using MEMS Sensors*. [Текст] // *In*

2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA). IEEE. – 2019. – P. 50-55. DOI: 10.23919/SPA.2019.8936824.

13. Delvecchio, S. *Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines: A critical review of existing techniques*. [Text] / S. Delvecchio, P. Bonfiglio, F. Pompoli // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – Vol. 99. – P. 661-683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.033>

14. Veretennik, A. M. *Monitoring of the diesel's crankshaft torsional vibrations* [Текст] / A. M. Veretennik, S. E. Aboleshkin, D. L. Kardashev // *Матеріали науково-технічної конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт»*, 22.03.2018 – 23.03.2018. – Одеса : НУ "ОМА", 2018. – С. 66-69.

References

1. *European Committee for the Development of Standards in the Field of Inland Navigation Compilation of CESNI resolutions adopted at the Meeting of 08 November 2018*. CESNI (18) 54:2 [final version]. Available at: <https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/04/ES-QIN-2018-UA.pdf> (accessed 12.04.2021).

2. González, Isaías., Calderón, Antonio José. *Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids*. *Micro-Grids. Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, vol. 36, Article Id: 100557. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100557.

3. Pablo Dellicompagni, Luis Saravia, Martín Altamirano, Judith Franco. *Simulation and testing of a solar reciprocating steam engine*. *Energy*, 2018, vol. 151, pp. 662-674. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.110.

4. Masoumi, A. P., Tavakolpour-Saleh, A. R. *Experimental assessment of damping and heat transfer coefficients in an active free piston Stirling engine using genetic algorithm*. *Energy*, 2020, vol. 195, Article Id: 117064. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117064.

5. ISO 20283-4: 2012 "Mechanical vibration - Measurement of vibration on ships - Part 4: Measurement and evaluation of vibration of the ship propulsion machinery", IDT. Available at: <https://www.rts-tender.ru/poisk/guest/r-iso-20283-4-2017>. (accessed 12.04.2021).

6. Varbanets, R. A., Kucherenko, Yu. N., Kyrnats, V. I. *Analiz vozmozhnosti vybrodyahnostyky tekhnicheskoho sostoyaniya sudovykh dyzeley* [Analysis of the possibility of vibrodiagnostics of the technical condition of marine diesels]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2014, no. 6, pp. 75-79.

7. *Анализатор спектра звуковых частот на основе FFT и Arduino* [Audio spectrum analyzer based on FFT and Arduino] *The world of microcontrollers* 24.09.20. Available at: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/analizator-spektra-zvukovyh-chastot-na-osnove-fft-i-arduino/> (accessed 12.04.2021).

8. *Sistema monitoringa zagryazneniya vozdukh na osnove Arduino* [Arduino based air pollution monitoring system] World of microcontrollers. 30.03.20. Available at: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/sistema-monitoringa-zagryazneniya-vozdukh-na-osnove-arduino/> (accessed 12.04.2021).
9. *Kak zagruzit' dannye s ESP8266 v Google-tabletsy: poshagovoe rukovodstvo* [How to Load Data from ESP8266 to Google Sheets: Step by Step Guide] Voltik. 21.06.18. Available at: <https://voltiq.ru/post-data-to-google-sheets-with-esp8266/> (accessed 12.04.2021).
10. Hua, C. R., Dong, D. W., Yan, B., & Xu, M. H. Online monitoring ICE powers based on the crankshaft angular vibration. *Applied Mechanics and Materials*, 2021, vol. 48-49, pp. 773-778. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.48-49.773.
11. Mohamed, E. S. Fault diagnosis of ICE valve train for abnormal clearance and valve head crack using vibration signals. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 18-38. DOI: 10.1504/IJNVN.2015.067974.
12. Bismor, D. System for Vehicle Sound and Vibration Monitoring using MEMS Sensors. In *2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, IEEE, 2019, pp. 50-55. DOI: 10.23919/SPA.2019.8936824.
13. Delvecchio, S., Bonfiglio, P., & Pompoli, F. Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines: A critical review of existing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 99, pp. 661-683. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.06.033.
14. Veretennik, A. M., Abolshkin, S. E., Kardashev, D. L. Monitoring of the diesel's crankshaft torsional vibrations. *Proceedings of the scientific and technical conference "River and Navy: operation and repair"*, 22.03.2018 – 23.03.2018 – Odessa, NU "OMA", 2018, pp. 66-69.

Надійшла до редакції 30.07.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

СИСТЕМА ВИБРОМОНІТОРИНГА ДВС МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ НА БАЗЕ ARDUINO

В. И. Андреев, А. И. Случак, О. Ф. Прищепов, О. В. Щесюк С. Я. Яценко

Проблема текущего мониторинга состояния двигателя внутреннего сгорания является особенно актуальной для водного транспорта. Обычно в комплексных системах мониторинга состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) грузовых судов используют ряд индикаторных показателей, таких как: температура, давление, вибрация. Для маломерных судов такая сложная система с интегрированными датчиками является избыточной. Целью данного исследования является разработка системы вибромониторинга состояния ДВС маломерных судов на базе открытой аппаратной платформы Arduino Uno с передачей данных на облачное хранилище. В статье авторами разработана схема подключения и программное обеспечение для системы вибромониторинга ДВС маломерных судов. Теоретический базис разработанной системы основан на методике FFT-анализа на базе быстрого преобразования Фурье. Разработанная конструкция базируется на микросхеме Arduino Uno. Передача данных происходит с помощью Wi-Fi модуля ESP8266 для вывода в реальном времени на Django-сервере и хранении в Google-таблицах. Выбор такой системы обусловлен как потребностью в существовании системы текущего отображения индикаторных параметров с установлением характера неполадок и сигнализации критических режимов работы, так и потребностью в накоплении научных данных для исследований режима эксплуатации двигателя. Он станет полезным для ученых и проектировщиков ДВС маломерных судов. Установлено, что использование модульной системы Arduino позволит в широких пределах варьировать свойства системы вибромониторинга посредством использования датчиков различных типов (KY-038 и LM393). Усовершенствован метод передачи данных системы вибромониторинга на программном уровне, путем применения программных блоков из трех open-source проектов на базе Arduino. Разработанная схема может быть развита для использования на автотранспорте, а также мониторинга двигателей других типов. Это может стать базой для накопления данных, что позволит более точно диагностировать отклонения в работе ДВС маломерных судов на основе общей статистики, а не только данных от одного двигателя, как в подобных системах для грузовых судов.

Ключевые слова: судовые ДВС; малоразмерные суда; Ардуино; вибромониторинг; FFT-анализ; автоматизация вахты.

VIBRATION MONITORING SYSTEM FOR ICE IN SMALL VESSELS BASED ON ARDUINO

V. Andreev, O. Sluchak, O. Pryshchepov, O. Shchesiuk, S. Yatsenko

The problem of current monitoring of the state of an internal combustion engine is especially relevant for water transport. Usually, in complex systems for monitoring the state of the cylinder-piston group (CPG) of cargo ships, many indicator indicators are used, such as temperature, pressure, vibration. For small boats, such a complex system with integrated sensors is redundant. The purpose of this study is to develop a system for vibration monitoring of the state of internal combustion engines of small vessels based on the open-source platform Arduino Uno with data transfer to cloud storage. In the article, the authors have developed a connection diagram and software for a vibra-

tion monitoring system for internal combustion engines of small vessels. The theoretical basis of the developed system is based on the FFT analysis technique based on the fast Fourier transform. The developed design is based on the Arduino Uno microcircuit. The data transfer takes place using the ESP8266 Wi-Fi module for real-time output on the Django server and storage in Google Sheets. The choice of such a system is due both to the need for the existence of a system for the current display of indicator parameters with the establishment of the nature of malfunctions and signaling of critical operating modes, and the need for the accumulation of scientific data for researching the operating mode of the engine. It will be useful for scientists and designers of ICEs of small vessels. It has been established that the use of the modular Arduino system will make it possible to vary the properties of the vibration monitoring system within a wide range by using various types of sensors (KY-038 and LM393). The method of data transmission of the vibration monitoring system at the software level has been improved by using software blocks from three open-source projects based on Arduino. The developed scheme can be developed for use in vehicles, as well as monitoring of other types of engines. This can become the basis for the accumulation of data, which will make it possible to more accurately diagnose deviations in the operation of the internal combustion engine of small vessels based on general statistics, and not only data from one engine, as in similar systems for cargo ships.

Keywords: ship internal combustion engines; small-sized ships; Arduino; vibration monitoring; FFT-analysis; watch automation.

Андрєєв В'ячеслав Іванович – канд. техн. наук, доцент каф. екології та природокористування, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Случак Олександр Ігорович – старш. наук. співроб., науково-дослідна частина, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Прищепов Олег Федорович – канд. техн. наук, каф. автоматизації комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Щесюк Олег Володимирович – канд. техн. наук, каф. автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Яценко Сергій Якович – студент кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Vyacheslav Andreev – PhD, Associate Professor Department of Ecology and Environmental Management, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: avi@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1143-8043, Google Scholar: https://scholar.google.com.ua/citations?user=kG3_O3wAAAAJ

Olexandr Sluchak – Senior Researcher, Researchpart Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: slu4ok@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5051-0648, Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=L6U5zXIAAAAJ>

Oleg Pryshchepov – PhD, Associate Professor Department of Automation and Computer-Integrated Technologies Petro Mohyla Black Sea National University Mykolayiv, Ukraine, e-mail: priof@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9608-2703.

Oleg Shchesiuk – PhD, Associate Professor, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies Petro Mohyla Black Sea National University, 68 Desantnykiv str., 10, Mykolayiv, Ukraine, 54003, e-mail: taifun.kv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1467-3751.

Serhii Yatsenko – student, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: olegreh84@gmail.com.