

Разработка устройства регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях сборных конструкций

О.Л. Маломыжев✉, Д.О. Маломыжев, А.А. Пыхалов, И.Н. Лебедев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉olm@bk.ru

Резюме

Движение подвижного состава основывается на его безопасности и надежности, что напрямую связано с усталостной прочностью механической части, представляющей собой сборную конструкцию деталей, которые работают в условиях воздействия друг на друга. В данных обстоятельствах анализ усталостной прочности детали при натурных испытаниях в эксплуатации не дает полной оценки ее работоспособности, он также связан с существенными стоимостными и временными затратами. Для компенсации этих проблем в настоящей работе предлагается выполнять натурные испытания образцов деталей в лабораторных условиях. Такие испытания проводятся на специализированных стендах, позволяющих создать необходимое напряженно-деформированное состояние. Однако для осуществления полноценных лабораторных испытаний возникает необходимость в разработке не только механической части специализированных стендов, но и системы управления ими, а также системы контроля и регистрации получаемых данных (параметров). В статье предложена система контроля и регистрации параметров, получаемых при работе стенда для циклических испытаний деталей для сборных конструкций. Ее преимуществом является универсальность как важнейшее требование к таким системам, что обеспечивает возможность применения в различных конструкциях стендов анализа усталостной прочности. Особенность предлагаемой системы заключается в том, что контроль и регистрация параметров от циклической нагрузки реализованы с использованием микроконтроллера, который получает информацию с датчиков, определяющих величину текущего нагружения сборной конструкции с дальнейшей записью на носитель цифровой информации числа циклов и максимальной силы нагружения за каждый цикл. Также предусмотрена возможность продолжения усталостного испытания при нештатном отключении стенда или требуемого его останова, связанного со снижением силы воздействия на образец.

Ключевые слова

надежность, усталостная прочность, сборная конструкция, циклические испытания, микроконтроллер, регистрация параметров

Для цитирования

Разработка устройства регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях сборных конструкций / О.Л. Маломыжев, Д.О. Маломыжев, А.А. Пыхалов, И.Н. Лебедев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 22–31. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).22-31.

Информация о статье

поступила в редакцию: 14.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 15.03.2023 г.; принята к публикации: 16.03.2023 г.

Development of a registration and parameter control device for cyclic tests of prefabricated structures

O.L. Malomyzhev✉, D.O. Malomyzhev, A.A. Pykhalov, I.N. Lebedev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olm@bk.ru

Abstract

The movement of rolling stock is based on its safety and reliability, which is directly related to the fatigue strength of the mechanical component which is a prefabricated structure whose parts work under conditions of impact on each other. Under the circumstances, the analysis of the fatigue strength of a part during full-scale tests under operation does not provide a complete assessment of its performance, it is also associated with significant cost and time losses. To compensate for these problems, it is proposed to perform full-scale tests of samples of parts in laboratory conditions. However, for the implementation of full-fledged laboratory tests, it becomes necessary to both develop a stand with control system, and a system for monitoring and registering the experimental results obtained. Such tests are carried out on specialized stands that allow to create the necessary stress-strain state. In the current work, a system for monitoring and recording parameters obtained during the operation of the stand performing the prefabricated structures cyclic tests has been developed. Its advantage is a universality as the most important requirement allowing the system to be used in stands for the fatigue strength tests. The control and regulation of parameters from the cyclic load is implemented on a microcontroller, which receives information from the sensor of the stand position and the current loading force of the prefabricated structure, with further recording of cycles and the maximum loading force for each cycle. It is also

possible to continue the fatigue test in case of an abnormal shutdown of the stand or its required shutdown associated with a given criterion for reducing the force of impact on the sample in the microcontroller program.

Keywords

reliability, fatigue strength, prefabricated construction, cyclic testing, microcontroller, registration of parameters

For citation

Malomyzhev O.L., Malomyzhev D.O., Pykhalov A.A., Lebedev I.N. Razrabotka ustroystva registratsii i kontrolya parametrov pri tsiklicheskih ispytaniyakh sbornykh konstruksii [Development of a registration and parameter control device for cyclic tests of prefabricated structures]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023. no. 1 (77), pp. 22–31. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).22-31.

Article info

Received: December 14, 2022; Revised: March 15, 2023; Accepted: March 16, 2023.

Введение

Оценка усталостной прочности узлов подвижного состава является значимой для их безопасности и надежности. При проектировании или внедрении новых конструкций [1–10] ее необходимо проводить посредством испытаний в лабораторных условиях. Эти испытания позволяют выполнить анализ деталей на образцах под нагрузкой, имитирующей воздействие других деталей в сборной конструкции, которая может быть задана из условий эксплуатации. При этом допускается некое упрощение по прилагаемой нагрузке, т.е. не обязательно полностью эмулировать реально эксплуатируемый аналог [11–15].

Многолетний опыт показал, что достаточно воспроизвести один вид нагружения для достоверной оценки усталостной прочности детали. По данной причине существуют частные виды нагружений, реализуемые специализированными стендами. Например, для оценки болтовых соединений или посадок с натягом была поставлена цель проектирования стенда для оценки усталостной прочности сборных конструкций при циклическом нагружении [16]. Данный стенд позволяет получить информацию о циклах и максимальной силе нагружения за цикл исходя из полученных данных. Также строится кривая Веллера, показывающая тенденцию разрушения деталей [17].

Проблемой реализации полноценных лабораторных испытаний является необходимость в разработке не только механической части специализированных стендов, но и систем контроля и регистрации получаемых данных (параметров).

Целью представленной работы является создание системы контроля и регистрации параметров от циклической нагрузки с использованием микроконтроллера, который получает ин-

формацию с датчиков, определяющих величину текущего нагружения сборной конструкции с дальнейшей записью данных на носитель цифровой информации в виде числа циклов и максимальной силы нагружения за каждый цикл.

Описание конструкции

Внешний вид стенда представлен на рис. 1, а его схема на рис. 2.



Рис. 1. Стенд циклических испытаний сборных конструкций

Fig. 1. Stand for cyclic testing of prefabricated structures

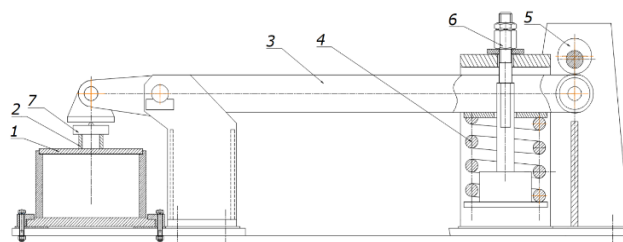


Рис. 2. Схема стенда циклических испытаний сборных конструкций

Fig. 2. Scheme of the stand for cyclic testing of prefabricated structures

Испытуемый образец 1, опирается на закрепленный на раме стенда полый цилиндр. Циклически изменяющаяся сила прикладывается к образцу толкателем 2, имеющим форму

полого цилиндра. Сила, воздействующая на образец, создается предварительно сжатой пружиной 4, через двуплечий рычаг 3, имеющий соотношение плечей 5/1, она может изменяться в диапазоне 0–100 кН. Сила предварительного сжатия пружины осуществляется винтовым регулировочным устройством 6. Значение силы измеряется тензометрическим датчиком 7. Снижение силы осуществляется эксцентриком 5, воздействующим на край рычага 3. Эксцентрик приводится во вращение червячным мотор-редуктором, обеспечивающим частоту вращения 0,83 Гц.

При разработке системы регистрации и контроля параметров при циклических испытаниях были поставлены основные требования, которым должен соответствовать стенд:

1. Схема системы регистрации и контроля параметров должна обеспечивать наибольшую простоту и надежность.

2. Датчик силы должен позволять формировать величину нагружения образца и обладать достаточной частотой формирования сигнала.

3. Микроконтроллер должен выполнять функцию регистрации и контроля параметров, поступающих с тензометрического преобразователя, с дальнейшей записью и хранением на флэш-накопителе.

4. Программа микроконтроллера должна обеспечивать сохранение и возврат к выполнению регистрации параметров при обесточивании или нештатном отключении стенда.

Регистрация и контроль параметров стенда для испытания усталостной прочности сборных конструкций реализованы на программируемом микроконтроллере, который регистрирует и контролирует входные параметры при проведении усталостных испытаний. Сигнал с входными данными поступает на микроконтроллер с блока преобразователя, к которому в свою очередь подключен силоизмерительный тензометрический датчик. Регистрация параметров происходит на съемный носитель.

Данное устройство регистрации и контроля параметров также связано с системой управления стенда для контроля начала и окончания испытания и с записью циклов нагружения, которые регистрируются микроконтроллером и объединяются в один файл с параметрами, регистрируемыми с тензометрического датчика. Данная информация также записывается на съемный носитель. На рис. 3 представлена блок

схема подключения устройств:

– «датчик Холла [18]» формирует импульс в момент максимального нагружения;

– «тензодатчик» формирует сигнал уровня нагружения;

– «тензопреобразователь» преобразует сигнал тензодатчика в цифровой вид и позволяет выполнить калибровку тензодатчика;

– «интерфейс передачи данных RS485» выполняет связь между тензопреобразователем и микроконтроллером «ардуино»;

– «6P индикатор» отображает число циклов нагружения;

– «4P индикатор» дублирует показания нагружения с тензопреобразователя;

– «часы реального времени» регистрируют время испытания;

– «сигнал останов» – автоматическая остановка стенда, если значение силы нагружения падает на заданный процент от исходной величины;

– «ардуино» выполняет обработку, регистрацию и сохранение параметров испытания, а также вывод информации с датчиков на индикаторы;

– «USB-интерфейс» выполняет связь между «ардуино» и флэш-накопителем для сохранения результатов испытания.

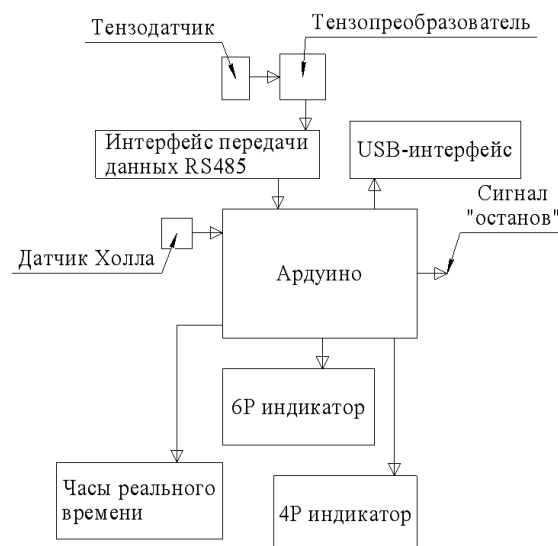


Рис. 3. Блок-схема подключения устройств
Fig. 3. Block-diagram for device connection

Снятие параметров нагружений реализовано тензометрическим датчиком LPA-10t шайбового типа (рис. 4). Диапазон измерения составляет до 100 кН.



Рис. 4. Датчик тензометрический
Fig. 4. Strain gauge

Основные технические характеристики тензометрического датчика измерения силы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики тензометрического датчика
Table 1. Strain gauge specifications

Максимальная измеряемая сила, кН Maximum measured force, kN	100
Класс относительной погрешности, % Relative error class, %	C1
Допустимый диапазон изменения температуры, °К Permissible range of temperature changes °K	243–343
Максимальная нагрузка, кН Maximum load, kN	150
Нагрузка при разрушении, кН Breaking load, kN	200
Напряжение питания, В Supply voltage, V	5–12
Класс защиты Protection class	IP68
Предельное напряжение питания, В Ultimate supply voltage, V	Не более 15 Under 15
Упругий деформируемый элемент, материал Elastic deformable element, material	Легированная сталь Alloy steel

Выбранный датчик удовлетворяет всем предъявляемым требованиям.

Для снятия информации с силового тензометрического датчика использован промышленный весовой тензопреобразователь модели DT-50-A (рис. 5).



Рис. 5. Тензопреобразователь модели DT-50-A
Fig. 5. Strain gauge, model DT-50-A

Преобразователь позволяет формировать выходной сигнал в стандартах RS-232 и RS-485. Частота дискретизации аналогового сигнала составляет 1,2 кГц, что позволяет получить информацию об изменении воздействующей на образец силы за каждый оборот эксцентрика с дискретностью 0,5°. Основные технические характеристики тензопреобразователя модели DT-50-A приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики тензопреобразователя DT-50-A
Table 2. Technical characteristics of strain gauge DT-50-A

Внешний интерфейс Front end	RS-232, RS485
Визуальная информация Visual information	OLED дисплей
Напряжение питания, В Supply voltage, V	24
Питание силоизмерительного датчика, В Power supply Sensor, V	5
Разрядность аналого-цифрового преобразователя, бит Analog-to-digital converter bit depth, bit	24
Диапазон входного сигнала, мВ Input signal range, mV	-39–39
Нелинейная погрешность, % Nonlinear error, %	0,001
Частота преобразования аналогового сигнала, кГц Analog signal conversion frequency, kHz	1,2
Разрядность OLED дисплея, бит Bit depth of the OLED display, bit	8
Тип крепления Mount type	DIN35
Диапазон рабочих температур, °К Operating temperature range, °K	243–343

Функционально OLED дисплей позволяет выполнять подстройку преобразователя без дополнительных устройств.

Датчик Холла двухполярный модели А3144 применяется в роли считывателя циклов нагружения сборной конструкции, а также в роли датчика позиционирования вала эксцентрика. Данный датчик показал себя как наиболее простой и безошибочно срабатывающий считыватель оборотов. Датчики Холла крепятся на кронштейн (рис. 6).



Рис. 6. Кронштейн для датчиков Холла
Fig. 6. Bracket for Hall sensors

Характеристики датчиков А3144 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Датчик Холла А3144

Table 3. Hall sensor А3144

Напряжение питания, В Supply voltage, V	4,5 – 24
Плотность магнитного потока Magnetic flow density	нет ограничения no limitation
Потребляемый ток, мА Consumed current, mA	25
Диапазон рабочих температур, °С Range of operation temperatures, °C	-40 °С – 150 °С
Габаритные размеры, мм Overall dimensions, mm	4,17 × 1,57 × 19,36
Выходной сигнал Output signal	Логический 0 или 1 Logical 0 or 1

Для хранения полученной информации с датчиков применено энергонезависимое устройство хранения информации – флеш-накопитель формата SD-card (рис. 7).



Рис. 7. Устройство хранения полученной информации
Fig. 7. Received information storage device

Полученные в результате проведения испытаний данные могут быть обработаны с применением стандартных приложений – Matlab, Microsoft Excel и пр. Величина дискретности записи данных вводится в программу перед началом испытаний.

Количество циклов нагружения испытуемого изделия определяется в результате обработки результатов расчета, также предусмотрена возможность записи и счета количества циклов с использованием датчика Холла и вывода на цифровой индикатор (рис. 8).

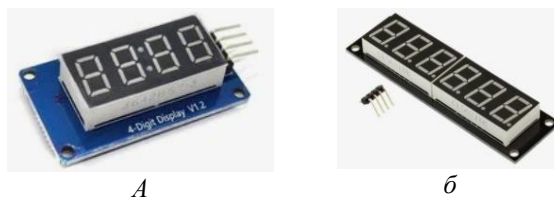


Рис. 8. Индикатор усилия (а) и числа циклов (б)
Fig. 8. Force (a) and number of cycles (b) indicator

Дополнительно для продолжения испытания при его прерывании из-за отсутствия электропитания применены энергонезависимые часы, которые позволяют записывать время каждого цикла нагружения (рис. 9).



Рис. 9. Энергонезависимые часы
Fig. 9. Energy independent clock

Все ранее перечисленные компоненты подключаются к программируемому микроконтроллеру для управления ими (рис. 10).



Рис. 10. Микроконтроллер
Fig. 10. Microcontroller

Схема системы контроля и регистрации (рис. 11) включает в себя ранее перечисленные компоненты, а также внешний блок питания на 12 В и два герконовых выключателя.

Для начала измерительных работ на стенде требуется задать максимальную нагрузку на образец. Для того чтобы данная информация поступила в микроконтроллер, необходимо включить магнитом «герконовый выключатель 2». В результате сигнал с силоизмерительного датчика поступит на тензопреобразователь, откуда через порт RS585 – в микроконтроллер Arduino UNO и в итоге запишется в

постоянную память SD-card. Следующим шагом выполняется сброс числа циклов на нулевое значение «герконовым выключателем 1», также данная информация формируется в постоянную память в одну строку со значением силы. Информация о величине нагружения отображается на индикаторе силы, а сведения о числе циклов нагружения на индикаторе числа циклов. Система регистрации и контроля параметров готова к работе.

При работе стенда информация с силоизмерительного датчика записывается в память только в момент срабатывания датчика Холла,

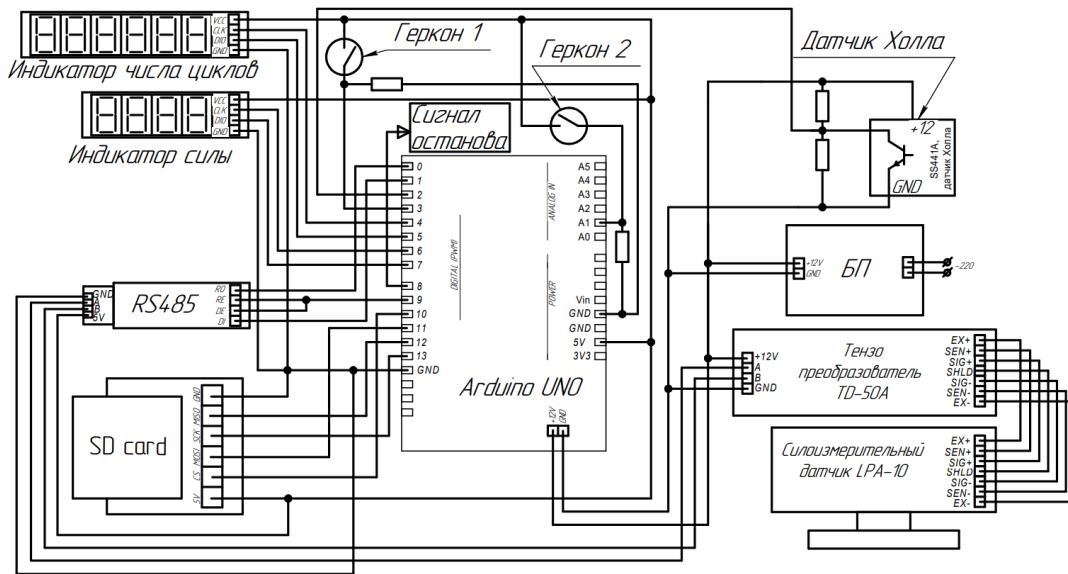


Рис. 11. Схема подключения компонентов к микроконтроллеру
 Fig. 11. Scheme of connecting components to the microcontroller

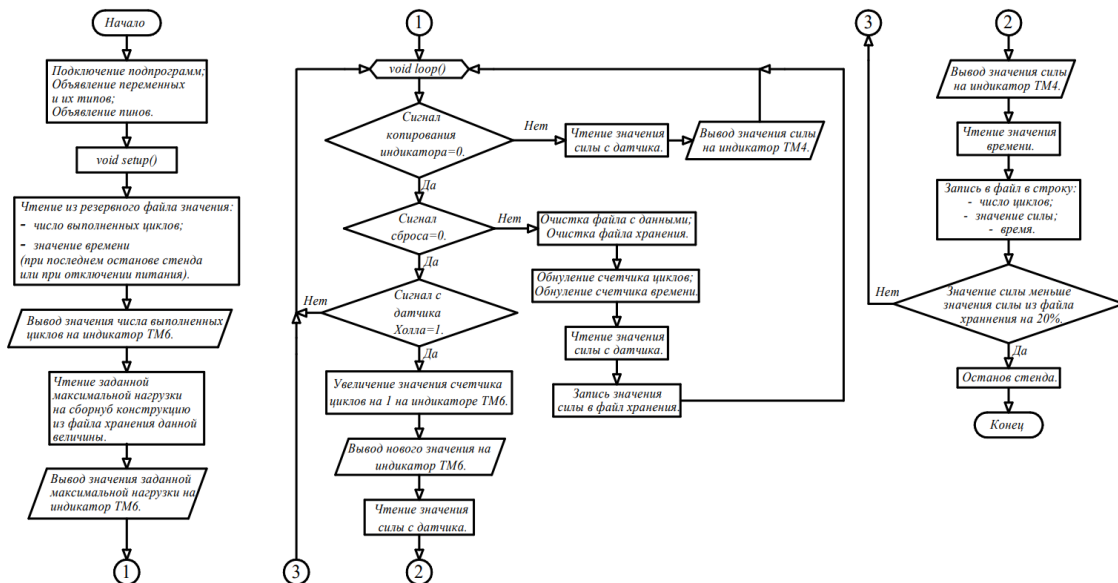


Рис. 12. Блок-схема алгоритма работы программы микроконтроллера
 Fig. 12. Block diagram of the microcontroller program operation algorithm

информирующего о том, что образец нагружен максимальной силой. Таким образом происходит регистрация и контроль параметров нагружения.

На рис. 12 представлена блок-схема программы микроконтроллера.

В начале работы программа инициализирует все подключенные устройства к микроконтроллеру. Следующим шагом программы является чтение из резервного файла хранения: число циклов; значение времени проведения испытания. При первом запуске значение числа циклов и времени – ноль. Данный файл необходим для резервирования информации о последнем числе циклов и времени нагружения, включая величину нагружения в случаях, когда установка была обесточена или была необходимость временно остановить испытания. Значения числа циклов выводятся на индикатор числа циклов. Далее задается величина нагружения образца, записывается в файл хранения и выводится на индикатор силы. Начиная с продолжения блок-схемы 1 (см. рис. 12) программа запускает циклическую работу. Если логическое значение копирования индикатора силы 0, то выполняется чтение величины нагружения с датчика силы и вывод его показания на индикатор;

если 1, то выполняется проверка на наличие сигнала сброса хранимой информации в файле хранения. При наличии логического 1 происходит сброс значений файла хранения, обнуление индикаторов и чтение новой исходной величины нагружения образца с ее регистрацией в файл хранения. При наличии логического 0 происходит переход к регистрации сигнала с датчика Холла. Если сигнал с датчика Холла логический 0, то программа выполняет заново все логические операции начиная с продолжения блок-схемы 1 (см. рис. 12). В ином случае, когда датчик Холла выдает логическую единицу, происходит приращение числа циклов на единицу с выводом обновленной информации на индикатор числа циклов. Далее происходит чтение значения нагружения с датчика силы, ее величина выводится на индикатор силы. Вместе с этим выполняется чтение текущего времени выполнения цикла. Вся полученная информация записывается в файл хранения в строку: число циклов, значение силы, время. Если снятая величина силы меньше на 20 % величины прошлого измерения в файле хранения, то происходит остановка стенда, в ином случае работа программы переходит к последующей

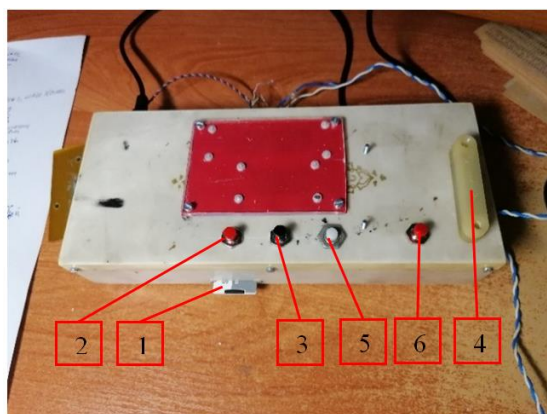


Рис. 13. Блок регистрации в сборе:

- 1 – SD-карта; 2 – кнопка установки приводного вала стенда в положении установки/замены образца;
- 3 – кнопка установки приводного вала стенда в положении максимальной нагрузки на образец;
- 4 – кнопка запуска двигателя установки; 5 – модуль RS-485; 6 – кнопка выключения двигателя установки

Fig. 13. Complete registration unit:

- 1 – SD card; 2 – the drive shaft installing button of the stand in the position of installing / replacing the sample;
- 3 – the drive shaft installing button of the stand in the position of maximum load on the sample;
- 4 – button to start the installation engine; 5 – RS-485 module; 6 – button for turning off the installation engine

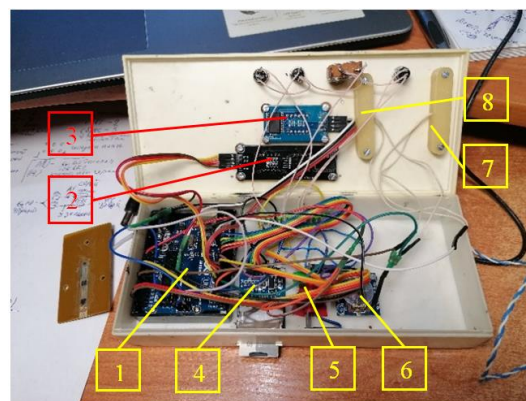


Рис. 14. Расположение модулей в корпусе:

- 1 – Arduino UNO; 2 – индикатор числа циклов;
- 3 – индикатор силы; 4 – модуль SD-карты; 5 – модуль RS-485; 6 – модуль часов реального времени;
- 7 – геркон включения режима создания заданной силы; 8 – геркон сброса

Fig. 14. Location of modules in the case:

- 1 – Arduino UNO; 2 – indicator of the number of cycles; 3 – strength indicator; 4 – SD card module; 5 – module RS-485; 6 – real time clock module;
- 7 – reed switch for enabling the mode of creating a given strength; 8 – reset reed switch

регистрации и контролю параметров начиная с продолжения блок-схемы 1 (см. рис. 12).

Все модули блока регистрации данных собраны в единый пластмассовый корпус (рис. 13, 14).

Расположенные на корпусе кнопки используются для управления приводным электродвигателем установки и не имеют непосредственной связи с блоком регистрации.

Использование системы регистрации при проведении испытаний осуществляется следующим образом.

Перед началом испытаний на SD-карте 1 (см. рис. 13) должны быть созданы два пустых файла текстового формата – «sila.txt» для хранения значения максимальной силы, воздействующей на образец по условиям испытаний, и «fr.txt» для хранения промежуточных значений силы, номера цикла и времени снятия показаний.

После включения питания установки необходимо нажать на кнопку 2 (см. рис. 13), при этом приводной вал установки повернется в положение установки/замены образца и остановится в данном положении. Необходимо установить в стенд испытуемый образец. Затем нужно нажать кнопку 3 (см. рис. 13), приводной вал повернется и остановится в положении максимальной нагрузки на образец. В данном положении требуется установить магнит 4 в положение, указанное на рис. 15. В данном положении на индикаторе силы (рис. 15) будет отображаться значение силы, воздействующей на образец. С помощью устройства нагружения необходимо создать нужную по условиям испытаний силу, далее – установить магнит 4 в поло-

жение, указанное на рис. 16, при этом значение заданной на образец силы будет записано в файл «sila.txt», а значения счетчика числа циклов и времени начала испытаний будут обнулены и записаны в файл «fr.txt». Установка готова к испытаниям. Для их проведения нажимается кнопка 5 (см. рис. 13) включения электродвигателя установки.

В процессе работы установки, после выполнения каждого цикла нагружения образца, на индикатор числа циклов (см. рис. 14) будет выведено значение номера цикла, а на индикатор силы (см. рис. 14) значение воздействующей максимальной силы на образец при текущем цикле. Значения номера цикла испытания, силы, воздействующей на образец при текущем цикле, и времени ее возникновения также будут записаны в файл «fr.txt» и в файл хранения полной информации о проведении испытаний.

Если возникает необходимость прервать испытания, следует нажать на кнопку 6 (см. рис. 13), при этом произойдет отключение приводного двигателя, затем можно полностью отключить питание установки. Для возобновления испытаний нужно включить электропитание установки и нажать кнопку 5 (см. рис. 13). При этом данные для продолжения испытаний будут считаны из файла «fr.txt».

В случае аварийного отключения питания данные сохраняются на SD-карте.

Заключение

1. При заключительном анализе системы измерения нагрузки, прикладываемой на испытуемый образец, были получены результаты, позволяющие оценивать ее величину по време-



Рис. 15. Задание силы
Fig. 15. Force assignment



Рис. 16. Обнуление числа циклов
Fig. 16. Resetting the number of cycles

ни (за каждый цикл нагружения), а также производить остановки испытаний при снижении прочности образца на заданную величину.

2. Система обеспечивает позиционирование эксцентрика вала, что позволяет задать максимальную нагрузку на образец и производить замену образца после завершения испытаний.

3. Полученная система регистрации и измерения нагружения образца обеспечивает высо-

кую точность измерения с дальнейшим сохранением данного значения на флеш-память, также достоинством является удобство измерения начальной максимальной силы нагружения при настройке стенда перед проведением испытаний.

4. Обеспечена возможность зрительного контроля информации о числе циклов и величине нагружения посредством цифровых индикаторов.

Список литературы

1. ГОСТ 33211–2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Введ. 2016–07–01 М. : Стандартинформ, 2020. 56 с.
2. ГОСТ 33200–2014 Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. Введ. 2015–11–01. М. : Стандартинформ, 2015. 46 с.
3. ГОСТ 10791–2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия. Введ. 2012–01–01. М. : Стандартинформ, 2011. 49 с.
4. ГОСТ 25.502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Введ. 1981–01–01. М. : Стандартинформ, 2005. 25 с.
5. ГОСТ 25.507–85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования. Введ. 1986–07–01. М. : Стандартинформ, 2005. 19 с.
6. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. Введ. 1984–07–01. М. : Стандартинформ, 2005. 34 с.
7. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. 1986–01–01. М. : Стандартинформ, 2005. 106 с.
8. ГОСТ 1497–84(ИСО 6892–84). Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986–01–01. М. : Стандартинформ, 2008. 24 с.
9. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. М. : Машиностроение, 1993. 354 с.
10. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М. : Интернет инжиниринг, 2002. 288 с.
11. Голуб В.П. К решению задач усталости при двухосном комбинированном нагружении на основе классических критериев разрушения // Вестник двигателестроения. 2014. № 2. С. 139–146.
12. Вансович К.А., Ядров В.И. Двухосные испытания металлических образцов на испытательных машинах с одной осью нагружения // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 10–16.
13. Аистов И.П., Вансович К.А., Крючков А.Н. Исследование скорости роста усталостных трещин в алюминиевом сплаве АК6 в зависимости от характеристик напряженного состояния в области их распространения // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2013. № 2 (40). С. 68–76.
14. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Пыхалов А.А. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок // Вестник ИргТУ. 2011. №7. С. 64–69.
15. Ужик Г.В. Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. М. : Изд. Академии наук СССР. 1948. 263 с.
16. Пат. 2717571 Рос. Федерация. Устройство для испытания пластинчатого образца на усталостную прочность // Г.И. Федюкович, Л.Б. Цвик, В.Н. Железняк и др. № 2019123504 ; заявл. 19.07.2019 ; опубл. 24.03.2020, Бюл. №9. 9 с.
17. Пат. 2360227 Рос. Федерация. Образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии // Л.Б. Цвик, А.П. Черепанов, А.А. Пыхалов и др. № 2007127572/28 ; заявл. 18.07.2007 ; опубл. 27.06.2009, Бюл. №18. 12 с.
18. Богомолов В.Н. Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления. М. : Госэнергоиздат, 1961. 168 с.

References

1. GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamiceskim kachestvam [State Standard 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 56 p.
2. GOST 33200–2014. Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 33200–2014. Axles of wheelsets of railway rolling stock. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 46 p.
3. GOST 10791–2011. Kolesa tsel'`nokatanye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 10791–2011. All-rolled wheels. Specifications]. Moscow: Standartinform, 2011. 49 p.
4. GOST 25.502–79 Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost' [State Standard 25.502–79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 25 p.
5. GOST 25.507–85. Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody ispytaniy na ustalost' pri ekspluatatsionnykh rezhimakh nagruzheniya. Obshchie trebovaniya [State Standard 25.507–85. Strength calculation and testing in machine building. Methods of fatigue testing under service loading. General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 19 p.
6. GOST 25.101–83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchainykh protsessov nagruzheniya

elementov mashin i konstruktсии i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov [State Standard 25.101–83. Strength calculation and testing. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 34 p.

7. GOST 25.506–85. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhenii [State Standard 25.506–85. Design, calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics under the static loading]. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 106 p.

8. GOST 1497–84 (ISO 6892–84). Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie [State Standard 1497–84 (ISO 6892–84). Metals. Methods of tension test]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 24 p.

9. Kogaev V.P. Raschet na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Calculation of strength at stresses, variable in time]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 354 p.

10. Terent'ev V.F. Ustalostnaya prochnost' metallov i splavov [Fatigue strength of metals and alloys]. Moscow: Internet inzhiniring Publ., 2002. 288 p.

11. Golub V.P. K resheniyu zadach ustalosti pri dvukhosnom kombinirovannom nagruzhenii na osnove klassicheskikh kriteriev razrusheniya [To solve fatigue problems under biaxial combined loading based on classical fracture criteria]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of engine building], 2014, no. 2, pp. 139–146.

12. Vansovich K.A., Yadrov V.I. Dvukhosnye ispytaniya metallicheskikh obraztsov na ispytatel'nykh mashinakh s odnoi os'yu nagruzheniya [Biaxial testing of metal samples on testing machines with one loading axis]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 5 (173), pp. 10–16.

13. Aistov I.P., Vansovich K.A., Kryuchkov A.N. Issledovanie skorosti rosta ustalostnykh treshchin v alyuminievom splave ak6 v zavisimosti ot kharakteristik napryazhyonnogo sostoyaniya v oblasti ikh rasprostraneniya [Investigation of the growth rate of fatigue cracks in aluminum alloy amg6 depending on the characteristics of the stress state in the area of their propagation]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State Aerospace University], 2013, no. 2 (40), pp. 68–76.

14. Zen'kov E.V., Tsvik L.B., Pykhalov A.A. Diskretnoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ploskotsilindricheskikh obraztsov s kontsentratormi napryazhenii v vide kanavok [Discrete modeling of the stress-strain state of plane-cylindrical samples with stress concentrators in the form of grooves]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2011, no. 7, pp. 64–69.

15. Uzhik G.V. Metody ispytaniy metallov i detalei mashin na vynoslivost' [Methods of testing metals and machine parts for endurance]. Moscow: Akademiya nauk SSSR Publ., 1948. 263 p.

16. Fedyukovich G.I., Tsvik L.B., Zheleznyak V.N., Ereemeev V.K., Bocharov I.S. Patent RU 2717571 C1, 24.03.2020.

17. Tsvik L.B., Cherepanov A.P., Pykhalov A.A., Khramenok M.A., Kuznetsov K.A., Shapova M.V. Patent RU 2360227 C2, 27.06.2009.

18. Bogomolov V.N. Ustroistva s datchikami Holla i datchikami magnitosoprotivleniya [Devices with Hall's sensors and magnetoresistance sensors]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1961. 168 p.

Информация об авторах

Маломыжев Олег Львович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olm@bk.ru.

Маломыжев Дмитрий Олегович, аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kbprf13@gmail.com.

Пыхалов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: rukhalov_aa@mail.ru.

Лебедев Иван Николаевич, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lebedev@mail.ru.

Information about the authors

Oleg L. Malomyzhev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olm@bk.ru.

Dmitrii O. Malomyzhev, Ph.D. Student of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kbprf13@gmail.com.

Anatoliï A. Pykhalov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: pykhalov_aa@mail.ru.

Ivan N. Lebedev, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lebedev@mail.ru.