

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДНОЙ РОЛИКОВОЙ ЦЕПИ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПАЛЛЕТ

*Алексеев В.И., Носко А.Л., Сафронов Е.В., Хлопков В.П.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

**Ключевые слова:** измерительный прибор, роликовая однорядная цепь, приводная цепь, цепная передача, тензометрический метод, экспериментальное исследование цепи, нагружение цепи.

**Аннотация.** В статье представлены описание и результаты испытаний разработанного прибора для измерения нагрузок, возникающих в роликовой однорядной цепи ПР-15,875-23. Для проведения испытания разработана методика проведения эксперимента, позволяющая выявлять зависимость статических деформаций, возникающих в пластинах цепи, от нагрузки цепи. Получены результаты экспериментального исследования нагружения цепи и дана оценка работоспособности измерительного прибора. Испытания цепи проведены на лабораторном стенде – испытательной машине Galdabini Quasar 50. В качестве аналого-цифрового преобразователя и усилителя выходного сигнала использована плата HX711. Обработка цифрового сигнала осуществлялась в микропроцессорном блоке Arduino Pro mini. Программный код реализован в программном комплексе Arduino IDE. Полученные в ходе испытания результаты предполагается использовать для проведения динамических испытаний нагруженности приводных роликовых цепей конвейеров для паллет.

## TEST RESULTS OF THE DEVICE FOR MEASURING THE LOADING OF THE DRIVE ROLLER CHAIN OF PALLET CONVEYORS

*Alekseev V.I., Nosko A.L., Safronov E.V., Khlopkov V.P.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

**Keywords:** measuring device, roller single-row chain, drive chain, chain transmission, strain gauge method, experimental study of the chain, chain loading.

**Abstract.** The paper presents the description and test results of the developed device for measuring the loads arising in the roller single-row chain PR-15,875-23. The methodology of the experiment is developed for testing, which allows to reveal the dependence of static deformations arising in the plates of the chain on the chain load. The results of the experimental study of chain loading are obtained and the performance of the measuring device is evaluated. The circuit tests were carried out on a laboratory bench – testing machine Galdabini Quasar 50. The HX711 board was used as an analog-to-digital converter and output signal amplifier. Processing of the digital signal is carried out in the microprocessor unit Arduino Pro mini. The program code is implemented in the Arduino IDE software package. The results obtained during the test are supposed to be used for dynamic load testing of drive roller chains of pallet conveyors.

### Введение

В настоящее время роликовые однорядные цепи (рис. 1) [1] широко применяются в машиностроении: в подъёмно-транспортных и дорожных машинах, станках, буровых установках, сельскохозяйственной технике. Благодаря их надёжности, долговечности, способности воспринимать высокие нагрузки, цепные передачи получили применение в приводах паллетных конвейеров, используемых как средство механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных и складских работ в различных отраслях РФ [2, 3].

В приводных цепях при различных режимах работы в условиях эксплуатации возникает сложный колебательный процесс, зависящий от параметров и характеристик цепей, звёздочек, скорости движения, вида рабочей машины и других факторов [4, 5]. Особенности использования конвейеров для паллет – частые пуски, остановки и реверсы конвейеров, вызванные особенностями технологических процессов требуют изменения подходов к методам расчета таких конвейеров. Прежде всего, это относится к тяговому расчету приводных роликовых конвейеров с цепными передачами, для корректировки которого важно проведение работ по исследованию приводных цепей, а именно определение статических и динамических нагрузок, возникающих в процессе их эксплуатации.

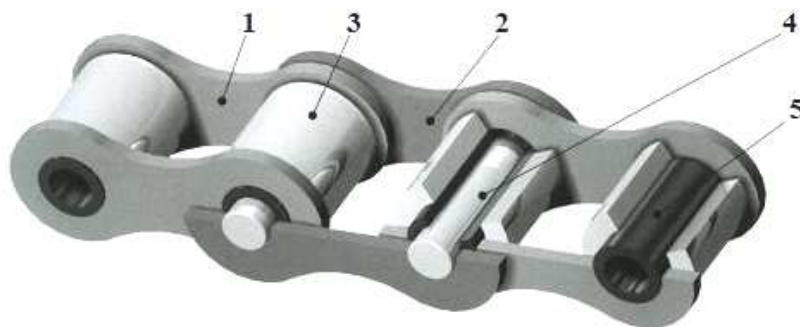


Рис. 1. Роликовая однорядная цепь: 1 – внутренняя пластина; 2 – наружная пластина; 3 – ролик; 4 – валик; 5 – втулка

Поэтому для проведения экспериментальных исследований нагруженности приводной роликовой цепи в паллетных конвейерах необходимо разработать и испытать измерительный прибор на лабораторном стенде.

Цель работы – разработка прибора для измерения нагрузок, возникающих в приводной роликовой цепи, определение его основных характеристик и принципа работы, разработка методики проведения экспериментального исследования статической нагруженности приводной роликовой однорядной цепи конвейеров для паллет.

### Экспериментальное исследование

Прибор для измерения нагрузок, возникающих в цепной передаче, состоит из микроконтроллера Arduino Pro mini [6], аналого-цифрового преобразователя HX711 [7], компенсационных тензорезисторов и тензометрических датчиков с номинальным сопротивлением 350 Ом [8], размещённых на пластинах роликовой цепи типа ПР-15,785-23 [1], USB программатора UART CP2102 [9] и соединительных проводов. Состав, измерительная схема и принцип размещения тензометрических датчиков на роликовой цепи типа ПР-15,875-23 рассмотрены в работах [10, 11]. Схема измерительного прибора представлена на рисунке 2.

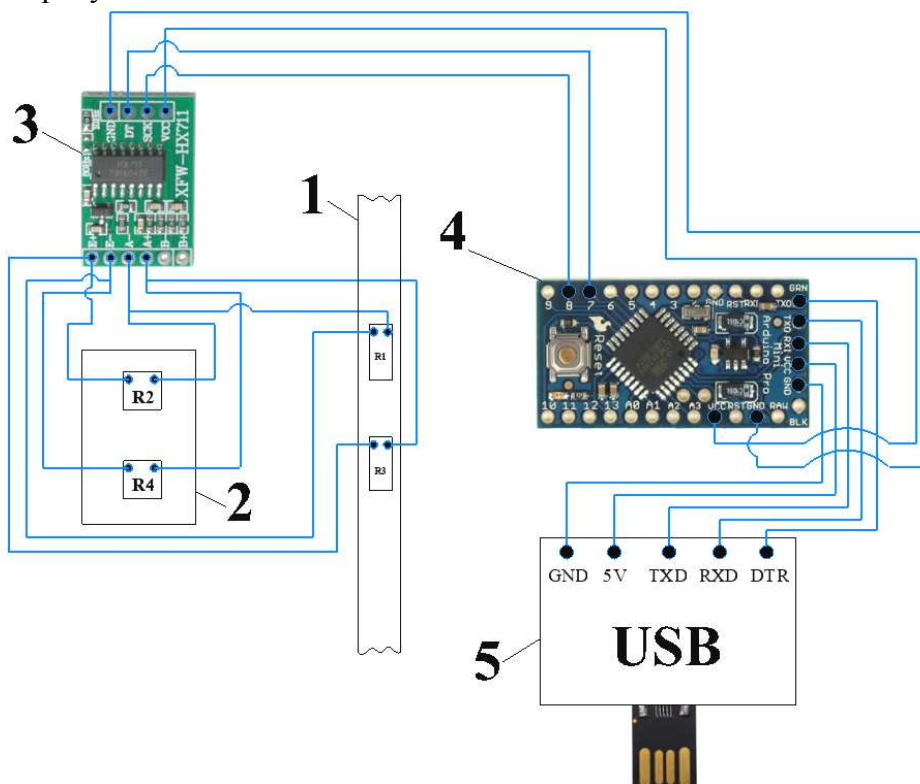


Рис. 2. Схема передатчика измерительного прибора: 1 – цепь с наклеенными измерительными тензорезисторами R1 и R3; 2 – пластина цепи с компенсационными тензорезисторами R2 и R4; 3 – АЦП HX711; 4 – Arduino Pro mini; 5 – USB программатор

Наиболее важным в работе прибора является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий входной аналоговый сигнал (напряжение) в цифровой сигнал (двоичный цифровой код). Основные характеристики выбранного АЦП НХ711 представлены в таблице 1. Рассмотрим наиболее важные из них, оказывающие непосредственное влияние на измерение.

Табл. 1. Основные характеристики АЦП НХ711

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	24 бит
Коэффициент усиления	128/64/32
Частота измерений	10/80 Гц
Напряжение питания	5 В
Потребляемый ток	до 10 мА
Размеры	34 мм × 21 мм

Одним из определяющих параметров измерения является разрядность АЦП. Разрядность АЦП характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе. В двоичных АЦП разрядность измеряется в битах. Разрядностью АЦП определяется и его разрешение – минимальное изменение величины входного аналогового сигнала, которое может быть зафиксировано данным АЦП. АЦП преобразовывает сигнал (напряжение) находящийся в диапазоне измеряемых сигналов. Нижняя и верхняя граница этого диапазона определяются напряжениями, поданными на соответствующие выводы. При диапазоне входных напряжений от 0 до 5 В и использовании 24-битного АЦП мы имеем следующее разрешение АЦП  $\Delta$  (рис. 3).

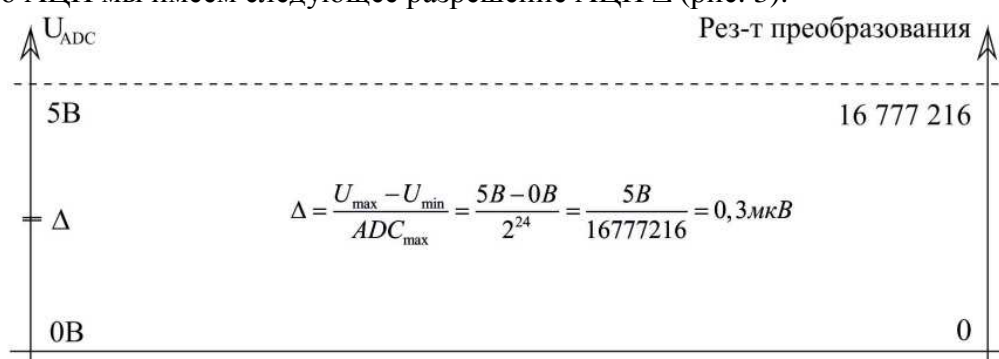


Рис. 3. Разрешение 24-битного АЦП

Разрядность АЦП определяет теоретически возможную точность АЦП. Однако, на практике разрешение АЦП ограничено отношением сигнал/шум входного сигнала. Существует методика [12], описывающая реально достижимое разрешение, однако подтверждается оно только в ходе эксперимента.

Важным параметром АЦП является так же частота измерений АЦП. В зависимости от динамики процесса цепной передачи [13] определяется необходимая для данного динамического процесса частота измерений АЦП. Проведение эксперимента подразумевает исследование статического нагружения цепи (нахождение цепи в каждом положении нагружения более 10 секунд), исходя из чего, выбранная частота измерения АЦП в 10 Гц является достаточной для регистрации выходного сигнала и усреднения полученных значений.

Для измерения возникающих статических нагрузок в цепи использовался лабораторный стенд – испытательная машина Galdabini Quasar 50 [14] (рис. 4). Объектом исследования является приводная роликовая однорядная цепь типа ПР-15,875-23. Схема размещения тензометрических датчиков на цепи представлена в работе [10]. Стенд состоит из цепи 1, закреплённых на испытательной машине 3 с помощью крепежей 4. Рядом с основной цепью подвешена цепь 2, на пластинах которой наклеены компенсационные тензорезисторы, использующиеся для мостовой схемы в качестве номинальных резисторов. Процесс закрепления цепи на испытательной машине описан в работе [15].

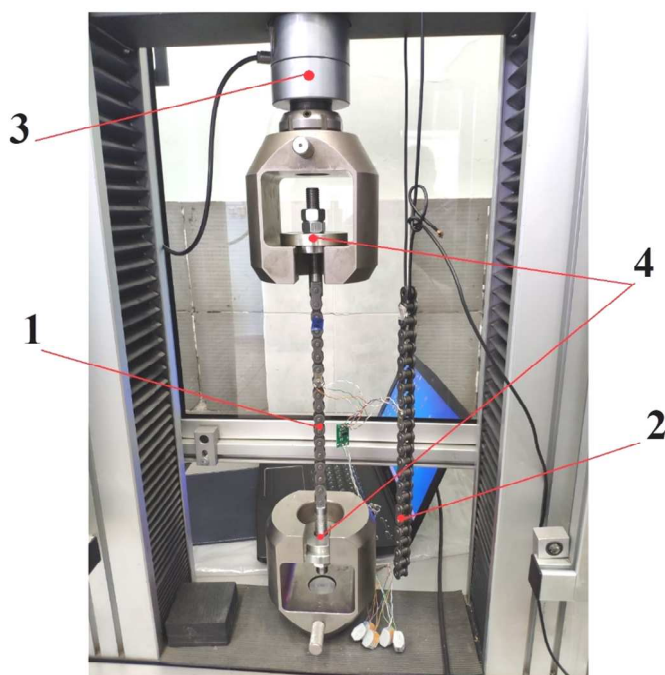


Рис. 4. Общий вид лабораторного стенда для измерения деформаций цепи: 1 – нагружаемая цепь с измерительными тензорезисторами; 2 – цепь с компенсационными тензорезисторами; 3 – испытательная машина Galdabini Quasar 50; 4 – оснастка для крепления цепи

Методика проведения экспериментального исследования заключается в проведении 3-х экспериментов, позволяющих произвести тарировку собранного измерительного прибора для его последующего использования в целях измерения воздействующих на цепь статических нагрузок в Ньютонах, а также оценить погрешность измерения нагрузки в цепи прибором в сравнении с результатами измерения испытательной машиной Galdabini Quasar 50.

Поскольку изначально значение получаемого цифрового сигнала прибора не отображает реального значения задаваемой нагрузки на цепь в Ньютонах, необходимо проведение тарировки прибора.

Для этого в ходе *первого* эксперимента цепь, закреплённая на испытательной машине, последовательно нагружается от 1000 Н до 3000 Н с шагом 500 Н. Значения нагружения в Ньютонах выставляются на испытательной машине, затем фиксируются показания измерительного прибора. В целях минимизации случайной погрешности результаты измерений усредняются. Результатом тарировки измерительного прибора является получение аппроксимирующей функции, описывающей зависимость рассматриваемого диапазона нагрузок в Ньютонах от цифрового сигнала измерительного прибора.

*Второй* эксперимент проводится для оценки погрешности измерения нагрузки в цепи прибором в сравнении с испытательной машиной Galdabini Quasar 50. Для этого цепь, закреплённая на испытательной машине, нагружается от 0 до 3000 Н с постоянной скоростью нагружения. Измерительный прибор одновременно с испытательной машиной регистрирует значений с заданной частотой. С помощью встроенных функций испытательной машины Galdabini Quasar 50 получается зависимость нагрузки в Ньютонах от перемещения траверсы испытательной машины (удлинения цепи). Заданная постоянная скорость перемещения траверсы и частота регистрации значений прибора позволяют получить зависимость цифрового сигнала прибора от перемещения траверсы испытательной машины. Для преобразования цифрового сигнала в действующую на цепь нагрузку в Ньютонах используется полученная в ходе первого эксперимента аппроксимирующая функция. Результатом эксперимента является проведённая оценка расхождения графиков зависимости нагрузки на цепь в Ньютонах от перемещения траверсы испытательной машины, одновременно полученных для испытательной машины и измерительного прибора. Данное расхождение определяет погрешность измерительного прибора в сравнении с испытательной машиной Galdabini Quasar 50.

Третий эксперимент проводится для оценки работоспособности измерительного прибора и проверки полученной погрешности. Для этого цепь, закреплённая на испытательной машине, последовательно нагружается от 1000 Н до 3000 Н с шагом 500 Н. Прибор, при помощи полученной в ходе первого эксперимента аппроксимирующей функции, находит на каждом шаге нагружения действующую на цепь нагрузку в Ньютонах. В целях минимизации случайной погрешности результаты измерений усредняются. Полученные в ходе эксперимента результаты не должны превышать оценённую во втором эксперименте погрешность прибора.

### Результаты

Программный код для обработки сигнала с АЦП написан в программной среде Arduino IDE. Результатом работы кода является вывод на экран ПК значения цифрового сигнала, посчитанного как среднее значение 10 измерений, произведённых АЦП с частотой 10 Гц. То есть итоговые (усреднённые) показания измерительного прибора представляются с частотой 1 Гц.

В ходе первого эксперимента было проведено 10 последовательных нагружений. Для каждого шага нагрузки были получены 10 показаний измерительного прибора. Усреднённые результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Табл. 2. Показания цифрового сигнала измерительного прибора первого эксперимента

№ нагружения	Задаваемая нагрузка, Н				
	1000	1500	2000	2500	3000
1	32667,61	62160,29	99529,70	141393,68	187964,63
2	28839,03	59786,40	101351,72	143566,84	175084,15
3	28607,71	62642,25	102384,64	145441,18	188300,22
4	26813,95	67899,25	108863,79	152265,22	195702,97
5	32829,47	68293,26	106496,28	150342,24	195014,89
6	31623,19	69210,70	106765,81	152736,67	198504,17
7	33944,25	69664,44	107417,14	150766,86	197364,36
8	31852,00	66800,93	109503,53	152706,16	199085,17
9	33891,52	70740,11	110246,25	153516,37	199236,25
10	34141,24	71059,81	109547,85	153203,96	199522,51
Среднее значение	31521,00	66825,74	106210,67	149593,92	193577,93

В результате обработки данных проведённого испытания цепи получена аппроксимирующая функция  $f(x)$  зависимости нагрузок в Ньютонах от цифрового сигнала  $x$  измерительного прибора:

$$f(x) = 1,112 \cdot 10^{-6} + 0,037 \cdot x - 2,31 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 6,365 \cdot 10^{-13} \cdot x^3. \quad (1)$$

Графики зависимости нагрузок в Ньютонах от цифрового сигнала измерительного прибора для проведённого эксперимента и полученной аппроксимирующей функции представлены на рисунке 5.

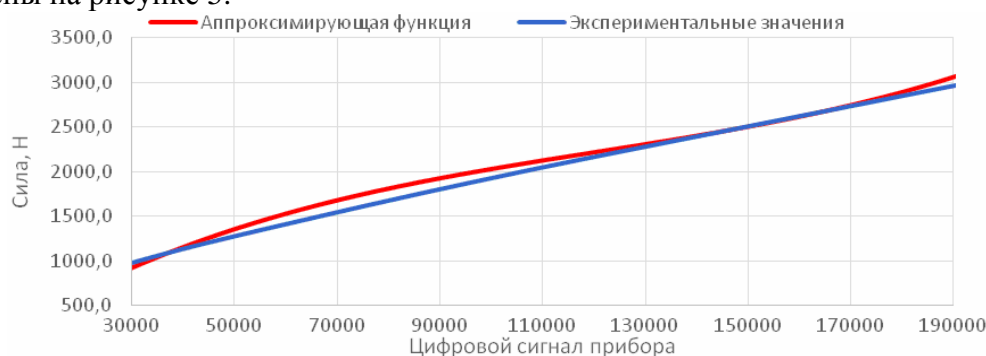


Рис. 5. График зависимости нагрузок в Ньютонах от цифрового сигнала измерительного прибора для экспериментальных значений и аппроксимирующей функции

В ходе *второго* эксперимента было проведено одно нагружение цепи с постоянной скоростью нагружения  $v = 1$  мм/мин, при одновременном регистрации показаний испытательной машины Galdabini Quasar 50 и измерительным прибором. С помощью испытательной машины Galdabini Quasar 50 была получена зависимость нагрузки в Ньютонах от перемещения траверсы испытательной машины (удлинения цепи), представленная на рисунке 6.

Полученные в эксперименте показания измерительного прибора преобразованы в зависимость цифрового сигнала прибора от перемещения траверсы испытательной машины, учитывая частоту показаний 1 Гц и известную скорость нагружения. Полученная зависимость представлена в таблице 3.

Табл. 3. Зависимость цифрового сигнала измерительного прибора от перемещения траверсы испытательной машины

Перемещение траверсы, мм	Показания измерительного прибора
0,00	9,37
0,12	4158,00
0,24	13738,12
0,36	30750,63
0,48	52682,50
0,60	81385,13
0,72	114768,75
0,84	152020,37
0,90	174622,87

Используя полученную в первом эксперименте аппроксимирующую функцию, было проведено преобразование значений цифрового сигнала в значения нагрузки в Ньютонах и получена зависимость нагрузки цепи в Ньютонах от перемещения траверсы испытательной машины для измерительного прибора, представленная на рисунке 6.

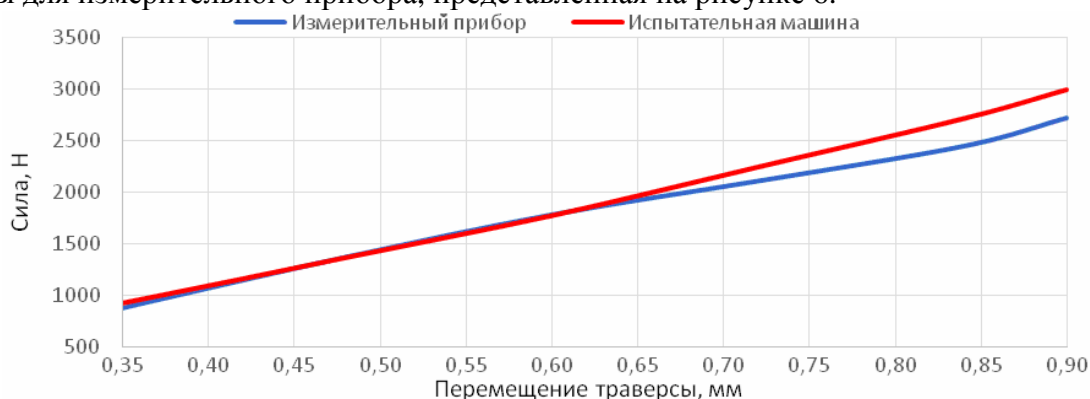


Рис. 6. График зависимости нагрузок в Ньютонах от перемещения траверсы испытательной машины для измерительного прибора и испытательной машины Galdabini Quasar 50

В ходе анализа полученных результатов, максимальное расхождение значений измерительного прибора в сравнении с испытательной машиной Galdabini Quasar 50 составило 9,94% для нагрузки в диапазоне от 1000 Н до 3000 Н.

В ходе *третьего* эксперимента для оценки работоспособности и погрешности измерительного прибора было проведено 10 последовательных нагружений. Для каждого шага нагрузки были учтены 10 показаний измерительного прибора. При этом в программный код микропроцессора была добавлена полученная, в ходе первого эксперимента, аппроксимирующая функция, т.е. конечным показанием прибора является действующая на цепь нагрузка в Ньютонах. Усреднённые результаты 10 последовательных нагружений со значениями погрешности в сравнении с выставляемой нагрузкой на испытательной машине представлены в таблице 4.

Табл. 4. Показания измерительного прибора в Ньютонах для третьего эксперимента

№ нагружения	Задаваемая нагрузка, Н				
	1000	1500	2000	2500	3000
1	1043,03	1668,12	2112,94	2534,22	3243,43
2	980,35	1689,89	2116,65	2536,99	3258,04
3	1060,98	1703,67	2121,96	2558,01	3246,62
4	1084,57	1680,47	1963,88	2515,06	3308,47
5	1027,14	1603,84	2122,21	2543,76	3287,65
6	1049,74	1333,25	2048,76	2559,22	3296,17
7	1094,78	1700,98	2146,46	2580,08	3338,06
8	989,00	1681,92	2129,15	2537,30	3234,04
9	1077,42	1515,86	2075,07	2570,85	3352,32
10	1057,35	1698,15	2138,16	2279,70	2558,83
Среднее значение	1046,44	1627,62	2097,52	2521,52	3212,36
Погрешность, %	4,64	8,51	4,88	0,86	7,08

### Заключение

1. Разработаны прибор для измерения нагрузок, возникающих в приводной роликовой цепи конвейеров для паллет, и методика проведения экспериментальных исследований статической нагруженности приводной роликовой однорядной цепи типа ПР-15,875-23 на лабораторном стенде – испытательной машине Galdabini Quasar 50.

2. Установлены основные характеристики измерительного прибора, оказывающие влияние на результаты измерений.

3. Выбран и описан лабораторный стенд для проведения испытаний.

4. Выбрана и обоснована тензометрическая схема измерения датчика измерительного прибора.

5. Проведена тарировка измерительного прибора, в результате которой получена аппроксимирующая функция, выражающая зависимость нагрузки в Ньютонах от цифрового сигнала измерительного прибора.

6. Определена погрешность измерительного прибора в сравнении с испытательной машиной Galdabini Quasar 50, которая составила 9,94% при нагрузках от 1000 Н. до 3000 Н.

7. Проведена проверка работоспособности измерительного прибора для измерения действующий на цепь нагрузки в Ньютонах. Максимально полученная в ходе эксперимента погрешность 8,51% не превышает погрешности измерительного прибора.

8. Прибор и полученные в ходе испытания результаты предполагается использовать для проведения *динамических* испытаний нагруженности приводных роликовых цепей конвейеров для паллет.

### Список литературы

- ГОСТ 13568-97 (ИСО 606-94). Цепи приводные роликовые и втулочные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 22 с.
- Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. Система паллетных модулей для складской интралогистики // Вестник машиностроения. – 2016. – № 8. – С. 10-12.
- Носко А.Л., Сафронов Е.В. Преимущества использования типовых паллетных интралогистических решений при проектировании и эксплуатации складов // Логистика. – 2016. – № 5(114). – С. 16-21.
- Мевша Н.В., Пунтус А.В. Оборудование для исследования динамики цепных передач // Приводы и компоненты машин. – 2019. – № 1-2. – С. 17-19.
- Мевша Н.В. Методы исследования и оценки технического состояния цепных передач: Дисс. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2005. – 213 с.
- Arduino Pro Mini 5V 16MHz: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iarduino.ru/shop/boards/arduino-pro-mini.html>.
- Аналогово-цифровой преобразователь НХ711 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iarduino.ru/shop/Expansion-payments/analogovo-cifrovoy-preobrazovatel-hx711.html>.
- Тензорезисторы фольговые константановые одиночные компании Сибтензоприбор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sibtenzo.com>.

9. USB Программатор UART CP2102 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iarduino.ru/shop/programmers/usb-programmator-uart-cp2102-podhodit-dlya-arduino-pro-mini.html>.
10. Алексеев В.И., Хлопков В.П. Экспериментальное исследование статической нагруженности приводной роликовой цепи конвейеров для паллет // Фундаментальные основы механики. – 2023. – №11. – С. 49-55.
11. Тензометрический метод измерения деформаций: учебное пособие / Под ред. В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
12. IEEE 1057-2017. Standard for Digitizing Waveform Recorders. – IEEE, 2017.
13. Проектирование деталей и узлов приводов и редукторов: учебное пособие / Под ред. В.Ф. Константинов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 144 с.
14. Испытательная машина Galdabini Quasar 50 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.galdabini.eu/datasheets/quasar-50>.
15. Гараджаев М.Б., Степанченко К.А. Экспериментальное исследование роликовых цепей на универсальной разрывной машине // Сборник докладов 27-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ – МГСУ. – Москва, 2023. – С. 25-29.

### References

1. State Standard 13568-97 (ISO 606-94) Driving roller and bush chains. General specifications. – М.: Standards publ. house, 2000. – 22 p.
2. Nosko A.L., Safronov E.V., Potapov V.A. System of pallet modules for warehouse intralogistics // Bulletin of Mechanical Engineering. 2016, no. 8, pp.10-12.
3. Nosko A.L., Safronov E.V. Advantages of using standard pallet intralogistic solutions while designing and exploiting the warehouses // Logistics. 2016, no. 5(114), pp. 16-21.
4. Mevsha N.V., Puntus A.V. Equipment for studying the dynamics of chain gears // Drives and machines components. 2019, no. 1-2, pp. 17-19.
5. Mevsha N.V. Methods of research and evaluation of the technical condition of chain drives: Diss. ... cand. of tech. sc. – Krasnodar. 2005. – 213 p.
6. Arduino Pro Mini 5V 16MHz [Electronic resource]. – Access mode: <https://iarduino.ru/shop/boards/arduino-pro-mini.html>.
7. Analog-to-digital converter HX711 [Electronic resource]. – Access mode: <https://iarduino.ru/shop/Expansion-payments/analogovo-cifrovoy-preobrazovatel-hx711.html>.
8. Foil constantan single strain gauges from the Sibtenzopribor company. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sibtenzo.com>.
9. USB Programmer UART CP2102. [Electronic resource]. – Access mode: <https://iarduino.ru/shop/programmers/usb-programmator-uart-cp2102-podhodit-dlya-arduino-pro-mini.html>.
10. Alekseev V.I., Khlopkov V.P. Experimental study of static loading of the drive roller chain of pallet conveyors // Fundamental principles of mechanics. – 2023, no. 11, pp. 49-55.
11. Strain gauge method for measuring deformations: textbook / Edited by V.A. Mekheda. – Samara: Samara publ. house of state aerospace university, 2011. – 56 p.
12. IEEE 1057-2017 Standard for Digitizing Waveform Recorders. – IEEE, 2017.
13. Design of parts and assemblies of drives and gearboxes: textbook / Edited by V.F. Konstantinov. – Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2023. – 144 p.
14. Galdabini Quasar 50 testing machine [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.galdabini.eu/datasheets/quasar-50>.
15. Garadzhaev M.B., Stepanchenko K.A. Experimental study of roller chains on a universal tensile testing machine // Collection of reports of the 27th Moscow international interuniversity scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists, dedicated to the 95th anniversary of the training of mechanical engineers MISS-MGSU. – Moscow, 2023. – P. 25-29.

### Сведения об авторах:

### Information about authors:

<b>Алексеев Вадим Игоревич</b> – магистрант	<b>Alekseev Vadim Igorevich</b> – master's degree student
<b>Носко Андрей Леонидович</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Подъемно-транспортные системы»	<b>Nosko Andrey Leonidovich</b> – doctor of technical sciences, professor of the department "Lifting and transport systems"
<b>Сафронов Евгений Викторович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы»	<b>Safronov Evgeniy Viktorovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the department "Lifting and transport systems"
<b>Хлопков Владимир Петрович</b> – аспирант	<b>Khlopkov Vladimir Petrovich</b> – postgraduate student
nosko@bmsu.ru	

Получена 15.01.2024