

УДК (УДК) 62-791.2 / 62-97

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ
ПРИВОДНОЙ РОЛИКОВОЙ ЦЕПИ КОНВЕЙЕРА ДЛЯ ПАЛЛЕТASSAY RESULTS OF THE DEVICE FOR MEASURING THE LOAD OF THE DRIVE
ROLLER CHAIN OF THE PALLET CONVEYORФомин Н.А., Хлопков В.П., Носко А.Л., Сафронов Е.В.
Fomin N.A., Khlopkov V.P., Nosko A.L., Safronov E.V.Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В статье обоснована необходимость проведения экспериментального исследования статических и динамических нагрузок в приводной роликовой однорядной цепи роликовых конвейеров для паллет. Разработан беспроводной малогабаритный прибор на основе тензометрического датчика и плат Arduino, сконструированного по принципу полного моста, для измерения усилий во внешних пластинах приводной роликовой цепи конвейера для паллет, позволяющего получать данные с различной частотой. Проведены в реверсивном режиме испытания на натурном стенде приводного роликового конвейера для паллет с цепной передачей. Получены результаты экспериментальных исследований, состоящих из предварительной тарировки, статических и динамических испытаний. Для фильтрации полученных результатов от высокочастотных шумов была произведена обработка полученных результатов с использованием быстрого преобразования Фурье в программе Excel. Проведено сравнение исходных, усредненных и отфильтрованных результатов на 25 повторениях эксперимента с использованием различных частот съема данных. Проанализированы полученные результаты измерения усилий в приводной роликовой цепи. Приведены выводы и даны рекомендации по использованию прибора с частотами 12,5 Гц и 16,7 Гц для съема данных.

Ключевые слова: паллетные роликовые конвейеры, роликовая цепь, тензометрия, прибор для измерения деформаций, колебания цепи.

Дата получения статьи: 10.03.2025
Дата принятия к публикации: 16.06.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Фомин Никита Алексеевич – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); e-mail: 89032721182@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0201-0912>

Abstract. The article substantiates the need for an experimental study of static and dynamic loads in a single-row roller chain of roller conveyors for pallets. A small-sized wireless device based on a strain gauge and Arduino boards, designed on the principle of a full bridge, has been developed to measure forces in the outer plates of the drive roller chain of a pallet conveyor, which allows data to be received at different frequencies. The tests on a full-scale stand of a drive roller conveyor for pallets with a chain transfer, carried out in a reversible mode of operation, are described. The results of a series of experimental studies consisting of preliminary calibration, static and dynamic parts are presented. To filter the obtained results from high-frequency noise, the obtained results were processed using the fast Fourier transform in Excel. We also compared the initial, averaged, and filtered results on 25 repetitions of the experiment using different data acquisition frequencies. The obtained results of measuring forces in a drive roller chain are analyzed and conclusions and recommendations for further use of the device are the most appropriate data acquisition frequencies of 12.5 Hz and 16.7 Hz are presented.

Keywords: pallet roller conveyors, roller chain; strain gauge; strain gauge; chain vibration.

Date of manuscript reception: 10.03.2025
Date of acceptance for publication: 16.06.2025
Date of publication: 25.09.2025

Authors' information:

Nikita A. Fomin - post-graduate of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University;
e-mail: 89032721182@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0201-0912>

Хлопков Владимир Петрович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); *e-mail: v.p.khlopkov@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0047-9637>

Носко Андрей Леонидович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); *e-mail: dr.nosko@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1382-4095>

Сафронов Евгений Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); *e-mail: gen-s@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4250-7147>

Vladimir P. Khlopkov – post-graduate of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University;

e-mail: v.p.khlopkov@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0047-9637>

Andrey L. Nosko - Doctor of Science (Eng.), Professor, Deputy head of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University; *e-mail: dr.nosko@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1382-4095>

Evgeniy V. Safronov - Candidate of Science, Associate Professor of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University; *e-mail: gen-s@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4250-7147>

1. Введение

Цепные передачи широко применяются в приводных роликовых конвейерах для паллет [1, 2], в которых в качестве приводных цепей используются роликовые однорядные цепи (рис. 1) [3] по причине их надежности, долговечности и способности воспринимать большие статические и динамические нагрузки.

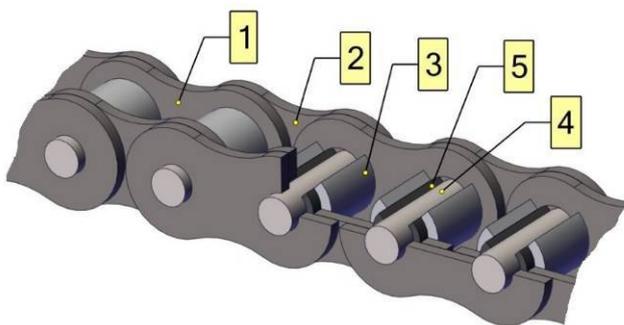


Рис. 1. Роликовая однорядная цепь:

1 – внутренняя пластина; 2 – наружная пластина; 3 – ролик; 4 – валик; 5 – втулка

Особенностями работы приводных роликовых конвейеров для паллет являются частые пуски и остановки, реверсивный режим работы, наличие большого количества обводных звездочек и т.п., которые характеризуются ударным динамическим воздействи-

ем на цепь и связанных с ней деталей и узлов конвейера [4, 5].

Существующие методики расчета приводных роликовых конвейеров [6 – 14] не учитывают этих особенностей. Поэтому требуется корректировка подходов к методам расчета таких конвейеров, и, прежде всего, к их тяговому расчету, а также проведение экспериментальных исследований статических и динамических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации цепных передач приводных роликовых конвейеров для паллет.

Анализ методов определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [15 – 18] показал, что для измерения усилий в пластинах роликовой однорядной цепи приводных роликовых конвейеров для паллет наиболее целесообразно использовать метод, основанный на тензометрическом измерении усилий.

Цель работы — создание беспроводного малогабаритного прибора для измерения усилий, возникающих в пластинах приводной роликовой однорядной цепи и проверка его работоспособности.

2. Эксперимент и оборудование

2.1. Прибор

На кафедре подъемно-транспортных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана создан беспроводной малогабаритный прибор для измерения усилий в пластинах роликовой однорядной цепи в процессе ее работы.

Прибор разработан на базе плат Arduino Nano. Схемы подключения плат представлены на рис. 2 и рис. 3. Платы и тензодатчик, представленные на рис. 2, расположены на цепи при помощи корпусов (рис. 4), напечатанных на 3D-принтере. Платы, представленные на рис. 3, расположены в корпусах, размещенных на металлоконструкции конвейера (рис. 5).

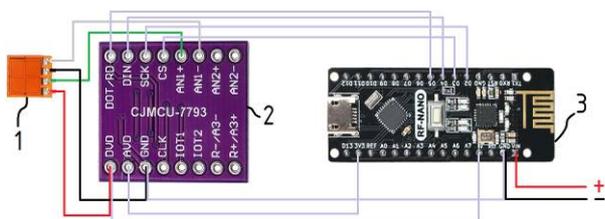


Рис. 2. Схема подключения плат передатчика:
 1 – тензодатчик с полным мостом;
 2 – AD793BRU 24 бит ADC; 3 – RF-Nano
 Arduino Nano V3.0

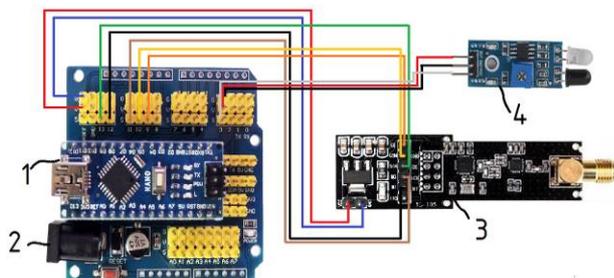


Рис. 3. Схема подключения плат приемника:
 1 – Arduino Nano V3.0; 2 – плата расширение
 для Arduino Nano; 3 – беспроводной модуль
 с переходником; 4 – инфракрасный датчик
 приближения

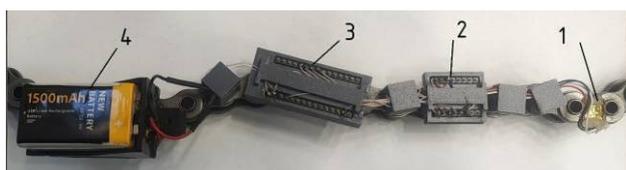


Рис. 4. Расположение корпусов плат на цепи:
 1 – тензодатчик с полным мостом;
 2 – AD793BRU 24 бит ADC; 3 – RF-Nano
 Arduino Nano V3.0. 4 – батарейка

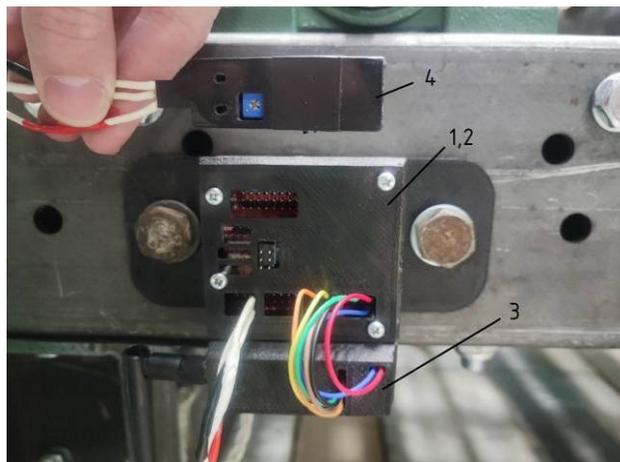


Рис. 5. Расположение корпусов плат на металлоконструкции конвейера: 1 – Arduino Nano V3.0; 2 – плата расширение для Arduino Nano; 3 – беспроводной модуль с переходником; 4 – инфракрасный датчик приближения

Тензометрический датчик наклеен с внешней стороны наружной пластины приводной роликовой однорядной цепи 10В-1 с полый осью (рис. 6) при помощи эпоксидного клея, контакты зафиксированы термоклем для защиты от перегиба и влияния датчика на съем данных. Тензометрический датчик работает по принципу полного моста, который подробно описан в работе [16].

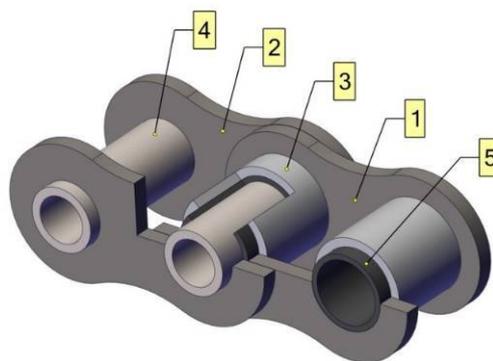


Рис. 6. Роликовая однорядная цепь с полыми втулками: 1 – внутренняя пластина; 2 – наружная пластина; 3 – ролик; 4 – полый ось; 5 – втулка

2.2. Стенд

Исследования цепи проводились на стенде кафедры РК4 «Подъемно-транспортные

системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, который предназначен для проведения натурных испытаний приводных роликовых конвейеров для паллет с цепной передачей в реверсивном режиме работы. Общий вид стенда представлен на рис. 7.

В качестве привода стенда используется мотор-редуктор со следующими характеристиками:

- тип привода — асинхронный NMRV-50-60-46,7-74-V5;
- напряжение питания 220В;
- частота питающей сети 50 Гц;
- мощность 0,55 кВт.

Управление направлением вращения двигателя стенда осуществляется по релейной схеме.



Рис. 7. Общий вид стенда (без цепи) для проведения натурных испытаний приводных роликовых конвейеров для паллет с цепной передачей: 1 – приводной ролик; 2 – ведомые ролики; 3 – натяжная звездочка; 4 – обводные звездочки

2.3. Режим испытаний

Основными задачами эксперимента являются – проверка работоспособности прибора и определение значений рабочих частот прибора для проведения натурных испытаний приводных роликовых конвейеров для паллет с цепной передачей в режимах эксплуатации.

Эксперимент проводился в статическом и динамическом режимах.

В статическом режиме осуществлялась тарировка прибора. В динамическом режиме проводился эксперимент.

2.4. Методика проведения эксперимента

Методика проведения эксперимента состояла из тарировки прибора и динамических испытаний. Для определения рабочей частоты съема данных была проведена экспериментальная проверка на нормальность их распределения с частотами, представленными в табл. 1.

2.5. Тарировка

Наличие в системе прибора большого количества электронных компонентов создает высокочастотный шум различных колебаний (>1 Гц). Для решения проблемы было использовано быстрое преобразование Фурье в программе Excel.

Тарировка проводилась непосредственно перед экспериментом и осуществлялась следующим образом:

- нахождение «условного нуля» (показания прибора без нагрузки);
- нагружение прибора грузом с шагом 10 кг (рис. 8).

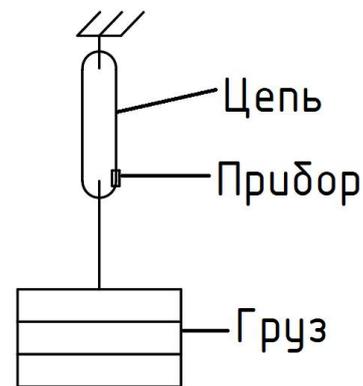


Рис. 8. Схема статического нагружения цепи

2.6. Эксперимент

Эксперимент проводился в установившемся динамическом режиме (без ускорений/торможений) без груза при скорости перемещения цепи 0,17 м/с. Частота съема данных изменялась ступенчато (табл. 1). Перед каждым экспериментом проводилась тарировка прибора. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

На первом этапе эксперимента осуществлялась проверка адекватности статических

Таблица 1

Время замера							
Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
Частота, Гц	10,0	12,5	16,7	19,6	33,3	39,2	62,5
Время замеров, с	105	85	65	55	35	55	35

данных, получаемых с прибора (проверка на нормальность распределения) [19].

Общее количество экспериментов — 7 (табл. 1).

По результатам замеров (тарировки) были получены гистограммы распределения данных и графики квантиль-квантиль, из которых можно сделать вывод, что частоты 10,0 и 62,5 Гц периодически выдают данные, не укладывающиеся в нормальный ряд. Вместе с этим, на частотах 16,7 и 62,5 Гц больше всего показателей, не выходящих за пределы 10% от среднего. Однако, на частоте 62,5 Гц есть показатели, выходящие за границы критических значений. По предварительной оценке можно сделать вывод, что частота 16,7 Гц является наиболее предпочтительной.

Вторым этапом эксперимента было получение и анализ динамических данных.

Обрабатывались результаты 25 оборотов по часовой стрелке и 25 оборотов против часовой стрелки. В случае получения некор-

ректных данных на одном обороте, он исключается, так как имеет пренебрежительно малое влияние.

Для оценки адекватности полученных динамических данных необходимо создание фильтра на основе быстрого преобразования Фурье. Целью применения фильтра является уменьшение влияния высокочастотных колебаний системы, например, высокочастотных колебаний элементов плат Arduino, или компенсации неравномерного движения цепи по звездочке, которая обусловлена кинематикой цепной передачи [6]. Частота колебаний ускорения/торможения цепи будет рассчитана далее.

Проверка работоспособности быстрого преобразования Фурье проводилась на статических данных (тарировке). Данное преобразование в программе Excel требует кратное степени двойки количество значений. Примером полученного результата является график (рис. 9).

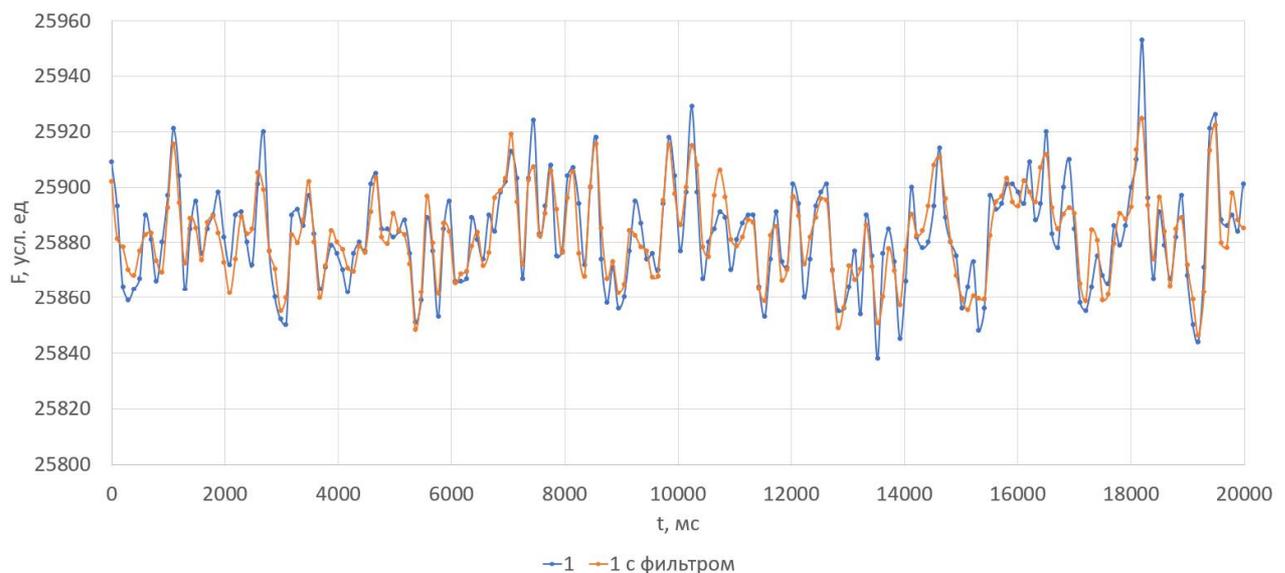


Рис. 9. Результаты быстрого преобразования Фурье. Эксперимент 1. Тарировка. Статические данные цепи (синий – исходные данные; оранжевый – отфильтрованные данные): по горизонтали – время, мс; по вертикали – условные единицы нагрузки (исходные данные тензорезистора)

Построение графика осуществлялось следующим образом. Исходные данные подвергались прямому быстрому преобразованию Фурье, в результате которого получается столбец комплексных данных. Далее из этого столбца выделяются гармоники их амплитуды. Затем часть гармоник зануляется. Остаются только гармоники, частота которых ниже пороговой частоты или амплитуда выше пороговой амплитуды. Для статических данных порог частоты был назначен 0 Гц, а порог амплитуды – 35% от максимального значения. Полученные гармоники и амплитуды комбинируются в новый столбец комплексных данных. Данный столбец подвергается обратному быстрому преобразованию Фурье.

Как видно из графика, на статических данных фильтр практически не оказывает влияния на полученные результаты и его можно не использовать.

Схема точек съема динамических данных для частоты 10 Гц при движении цепи по часовой стрелке представлена на рис. 10, а против часовой стрелки — на рис. 11.

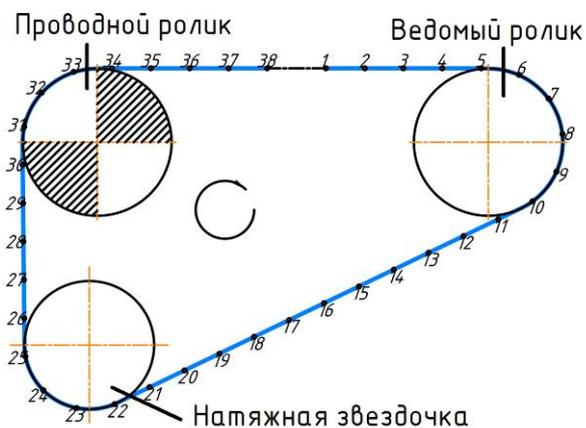


Рис. 10. Типовое расположение точек съема данных с частотой 10 Гц для первого оборота цепи по часовой стрелке

Частота ускорений/торможений цепи (продольные колебания цепи) вычислялась следующим образом:

- определялась круговая частота вращения приводной и неприводной звездочек;
- определялась частота оборотов звездочек;
- полученная частота умножалась на количество зубьев звездочек.

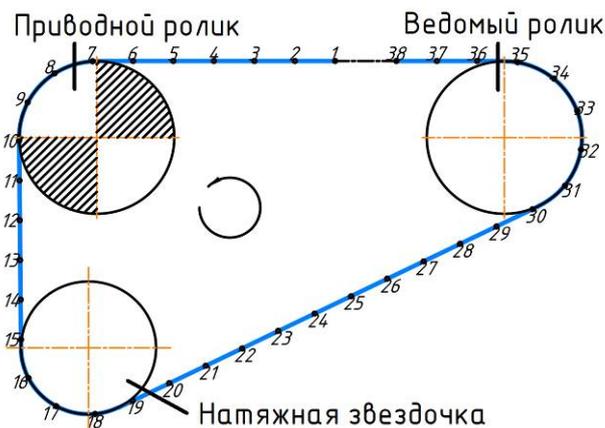


Рис. 11. Типовое расположение точек съема данных с частотой 10 Гц для первого оборота цепи против часовой стрелки

Полученная величина, измеряемая в Гц, является частотой динамического процесса зацепления цепи и зубьев звездочки. В формулах это выглядит следующим образом:

$$\omega = \frac{v}{R}; n = \frac{\omega}{2\pi}; N_2 = 10,74,$$

где ω - круговая частота вращения звездочки, рад/с; v - линейная скорость перемещения груза/цепи м/с; R - радиус ролика/делительной окружности звездочки, м; n - частота оборотов звездочек, Гц; N - частота динамического процесса нахождения цепи на зуб звездочки, Гц; Z - количество зубьев звездочки, шт.

Учтем следующие данные: $v_{cp} = 0,2$ м/с — скорость перемещения паллеты по роликовому полотну; $R_p = 44,5$ мм - радиус ролика; $R_1 = 33,22$ мм - радиус звездочки 1 (рис. 10, натяжная звездочка); $R_2 = 38,23$ мм - радиус звездочки 2 (рис. 10, приводной/ведомый ролик); $Z_1 = 13$ шт - число зубьев звездочки 1; $Z_2 = 15$ шт - число зубьев звездочки 2.

Звездочка 1 находится на ролике, поэтому их круговые скорости равны, а линейные находятся в пропорциональной зависимости от радиуса.

Подставляя исходные данные в формулы, получаем, что круговая частота вращения звездочки 2 равна $\omega_2 = 4,494$ рад/с, а круго-

вая частота вращения звездочки 1 - $\omega_1 = 5,178$ рад/с.

Далее получаем, что частота оборотов звездочки 1 равна $n_1 = 0,825$ Гц, а звездочки 2 - $n_2 = 0,716$ Гц.

С учетом количества зубьев на звездочках, получаем $N_1 = 10,73$ Гц, $N_2 = 10,74$ Гц.

Сравнивая между собой исходные данные, отфильтрованные (рис. 12) и схему движения датчика (рис. 10), можно отметить, что на некоторых участках натяжение цепи не согласуется с общепринятыми теориями расчета [6 - 14]. Например, на участке 11...22 (1100...2200 мс) должна наблюдаться убывающая прямая, а не пик данных в точке 18 (1800 мс). Вместе с этим, если проанализировать 25 оборотов (рис. 13) и выделить среднее (рис. 14), то эти данные будут примерно соответствовать принятым теориям. Однако, если сравнить со средним отфильтрованных данных (рис. 14), видно значительное искажение отфильтрованных данных на том же участке 11...22 (1100...2200 мс).

Тенденция повторяется и на графиках 25-ти оборотов против часовой стрелки. Для подтверждения данных было проведено

сравнение для всех использовавшихся в эксперименте частот.

3. Заключение

На основании анализа результатов испытаний прибора для измерения нагруженности приводной роликовой цепи конвейера для паллет установлено, что:

- созданный беспроводной малогабаритный прибор для измерения усилий в пластинах приводной роликовой однорядной цепи конвейеров для паллет показал свою работоспособность;
- полученные с помощью прибора результаты укладываются в нормальное распределение при уровне значимости 0,01;
- 99,5% полученных с помощью прибора данных укладываются в диапазон 3σ ;
- основной причиной возникновения в процессе экспериментальных исследований паразитных шумов являются поперечные колебания цепи при ее неравномерном движении;
- продольные колебания, вызванные заходом цепи на звездочку, существенного влияния на показания прибора не оказывают.

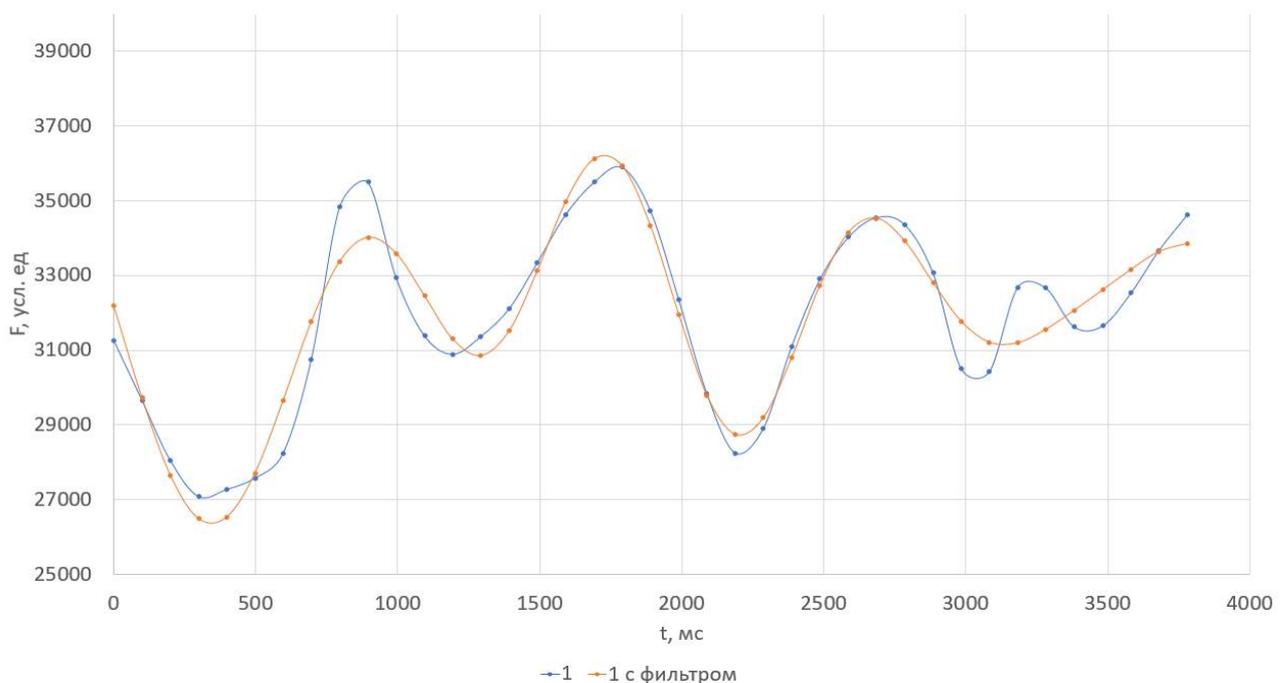


Рис. 12. Исходные и отфильтрованные данные 1-го оборота по часовой стрелке на частоте съема данных 10 Гц (синий – исходные данные; оранжевый – отфильтрованные данные)

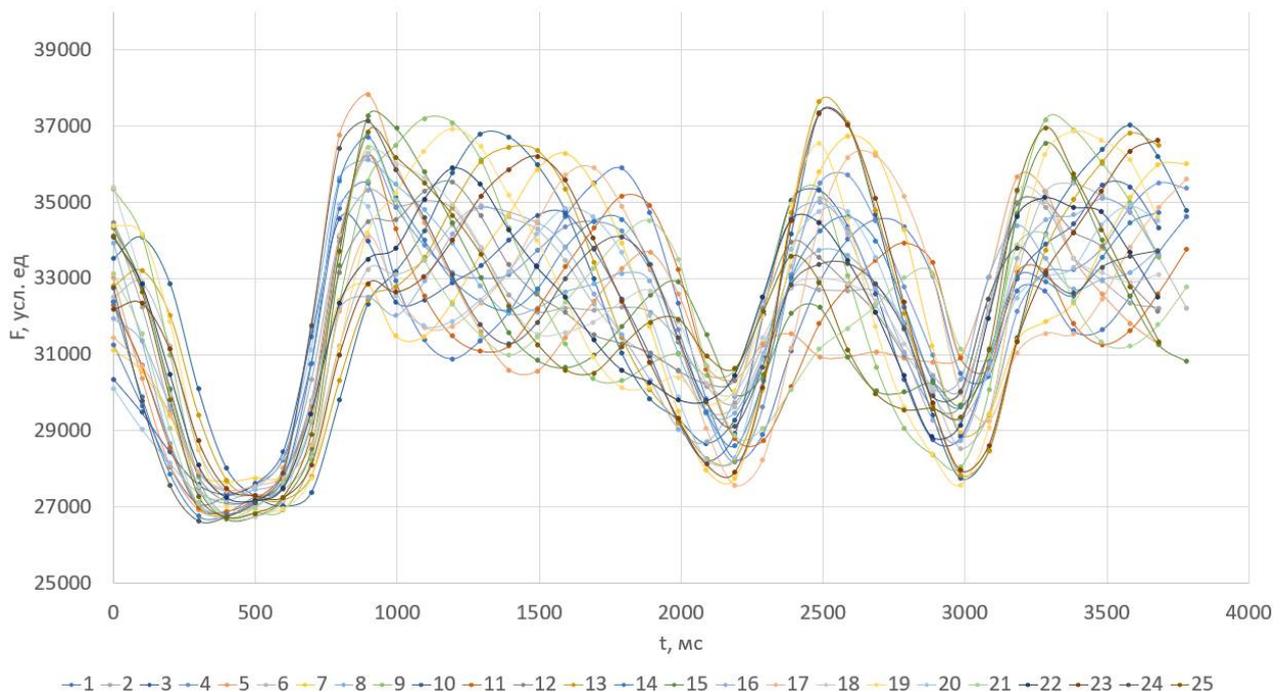


Рис. 13. Исходные данные 25-ти оборотов по часовой стрелке с частотой съема данных 10 Гц

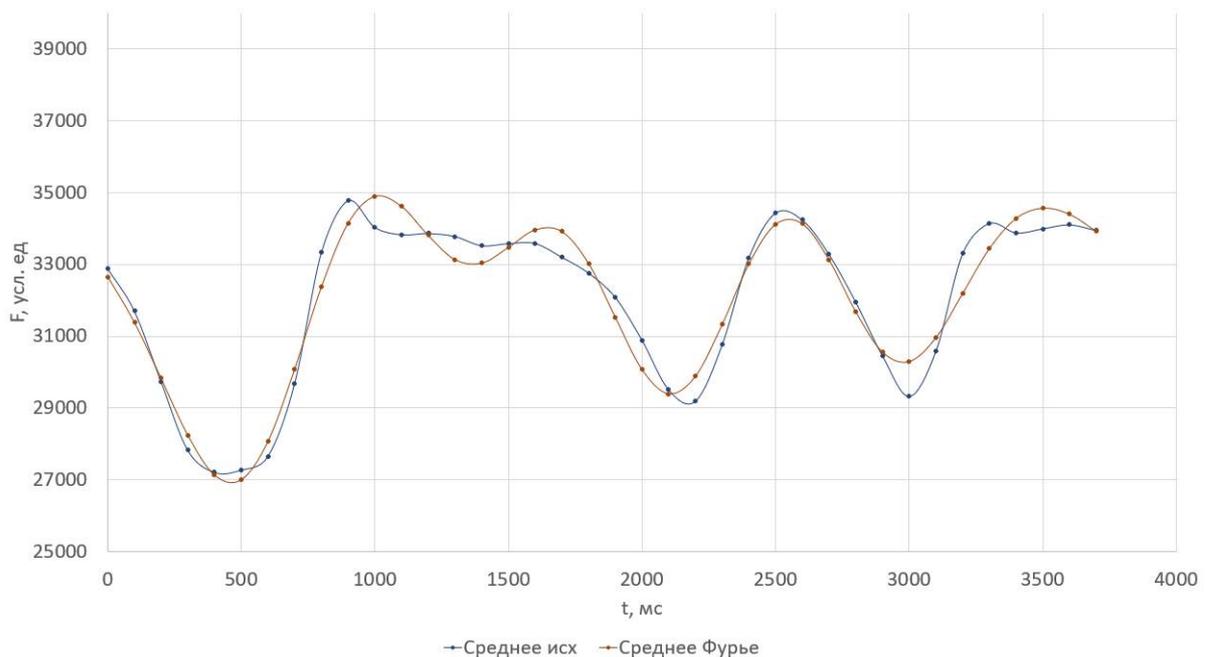


Рис. 14. Среднее исходных данных и отфильтрованных данных 25-ти оборотов по часовой стрелке с частотой съема данных 10 Гц

- для дальнейших экспериментальных исследований усилий, возникающих в пластинах приводной роликовой однорядной цепи конвейеров для паллет рекомендуется использовать частоты 12,5 Гц и 16,7 Гц;
- для анализа серии замеров усилий, возникающих в пластинах приводной роликовой

цепи конвейеров для паллет с частотой съема данных 12,5 Гц или 16,7 Гц рекомендуется использовать фильтр на участках зацепления цепи и звездочек, а на участках движения цепи между звездочками рекомендуется использовать усредненные исходные данные.

Список литературы

1. Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. Система паллетных модулей для складской интралогистики // Вестник машиностроения. 2016. № 8. С. 10-12.
2. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Преимущества использования типовых паллетных интралогистических решений при проектировании и эксплуатации складов // Логистика. 2016. № 5(114). С. 16-21.
3. Цепи приводные роликовые и втулочные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2000. 22 с.
4. Мевша Н.В., Пунтус А.В. Оборудование для исследования динамики цепных передач // Приводы и компоненты машин. 2019. № 1-2. С. 17-19.
5. Мевша Н.В. Методы исследования и оценки технического состояния цепных передач: Дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2005. 213 с.
6. Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглин А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
7. Иванченко Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев: Вища школа, 1978. 576 с.
8. Кузьмин А.В., Марон Ф.Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск: Вышэйшая школа, 1983. 350 с.
9. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.
10. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. М.: Машиностроение, 1987. 432 с.
11. Ерохин М.Н., Карп А.В. Проектирование и расчет подъемно-транспортных машин сельскохозяйственного назначения. М.: Колос, 1999. 228 с.
12. Ромакин Н.Е. Машины непрерывного транспорта. М.: Издательский центр "Академия", 2008. 432 с.
13. Мерданов Ш.М., Смолин Н.И., Иванов А.А., Шефер В.В. Машины непрерывного транспорта. Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. 208 с.
14. Матвеев В.И., Смоляр А.П. Ма-

References

1. Nosko A.L., Safronov E.V., Potapov V.A. Pallet module system for warehouse logistics. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, No. 8, pp. 10-12. (In Russian)
2. Nosko A.L., Safronov E.V. Advantages of using standard flight intralogistic solutions in the design and operation of warehouses. *Logistika*, 2016, No. 5(114), pp. 16-21. (In Russian)
3. Roller and roller drive chains. General technical conditions. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2000. 22 p.
4. Mevsha N.V., Puntus A.V. Equipment for studying the dynamics of chain gears. *Privody i komponenty mashin*, 2019, No. 1-2, pp. 17-19. (In Russian)
5. Mevsha N.V. Metody issledovaniya i ochenki texniche-skogo sostoyaniya tsepnykh peredach. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Krasnodar. 2005. 213 p. (In Russian)
6. Ivanovskiy K.E., Rakovshchik A.N., Tsoglin A.N. Roller and disc controllers and devices. Moscow, Mashinostroenie, 1973. 216 p. (In Russian)
7. Ivanchenko F.K. Calculations of cargo-carrying and transporting machines. Kiev, Vishha shkola, 1978. 576 p. (In Russian)
8. Kuzmin A.V., Maron F.L. Handbook on calculations of lifting and transport machinery. Minsk, Vishha shkola, 1983. 350 p. (In Russian)
9. Spivakovskiy A.O., Dyachkov V.K. Transporting machines. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 487 p. (In Russian)
10. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. Continuous transport machines. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 432 p. (In Russian)
11. Erokhin M.N., Karp A.V. Design and calculation of agricultural lifting and transporting machines. Moscow, Kolos, 1999. 228 p. (In Russian)
12. Romakin N.E. Continuous transport machines. Moscow: Izdatelskiy tsentr "Akademiya", 2008. 432 p. (In Russian)
13. Merdanov Sh.M., Smolin N.I., Ivanov A.A., Schafer V.V. Continuous transport machines. Tyumen, TyumGNGU, 2010. 208 p. (In Russian)
14. Matveenko V.I., Smolyar A.P. Con-

