

Бесконтактный мониторинг удлинения ремней ременных передач

Д.И. Ильинский^a, В.С. Безкорвайный^b, А.Э. Воронов^c, Ю.В. Ливцов^d

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», кв. Молодежный 20А, Луганск, Россия

^a Sultanus.Ilinskiy@yandex.ru, ^b bezkorvs@mail.ru, ^c ocooler@ya.ru, ^d liwtsoff@yandex.com

^a <https://orcid.org/0009-0006-9215-3582>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8337-7318>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-2177-0306>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8747-7132>

Статья поступила 29.09.2025, принята 21.11.2025

В статье рассматриваются проблемы, связанные с удлинением ремней в ременных передачах. Предлагается новый метод мониторинга их состояния на основе ферромодуляционных чувствительных сенсоров. Проведён анализ факторов, влияющих на изменение длины ремня в процессе эксплуатации, включая механическое изнашивание, усталостные деформации и изменение физико-механических характеристик материала. Уделено внимание недостаткам существующих методов контроля длины ремней ременных передач, таким как необходимость остановки оборудования для проведения измерений, низкая устойчивость к запылённости и ограниченная информативность традиционных диагностических систем. Предложена принципиально новая методика непрерывного мониторинга, основанная на использовании системы из двух ферромодуляционных чувствительных сенсоров, установленных с фиксированным базовым расстоянием вдоль ремня ременной передачи, и специальной магнитной метки, закреплённой на ремне. Разработана математическая модель, позволяющая по временным интервалам прохождения магнитной метки мимо датчиков определять текущую скорость движения ремня и вычислять его абсолютное удлинение с высокой точностью. Приведено описание аппаратной реализации системы, включая конструктивные особенности сенсорных узлов и схему обработки аналоговых сигналов. Особенностью предложенного решения является возможность бесконтактного и непрерывного мониторинга удлинения ремня ременной передачи, работа в условиях сильных электромагнитных наводок и переменных механических нагрузок. Проведены экспериментальные исследования на специально разработанном испытательном стенде, в ходе которых подтверждена работоспособность системы в различных режимах работы ременной передачи. Полученные результаты демонстрируют высокую точность измерений и стабильность работы системы при длительной эксплуатации. Отмечены основные преимущества предложенного решения по сравнению с существующими аналогами, такие как простота реализации, высокая надёжность, температурная стабильность, высокая защищённость к электромагнитным помехам, запылённости и низкая стоимость эксплуатации.

Ключевые слова: феррозонд; деформация; относительное удлинение; бесконтактный мониторинг; ременная передача.

Noncontact monitoring of belt drive extension

D.I. Ilinsky^a, V.S. Bezkorvainy^b, A.E. Voronov^c, Yu.V. Livtsov^d

Lugansk State University named after V. Dahl; 20A, Molodezhny Quarter, Lugansk, Russia

^a Sultanus.Ilinskiy@yandex.ru, ^b bezkorvs@mail.ru, ^c ocooler@ya.ru, ^d liwtsoff@yandex.com

^a <https://orcid.org/0009-0006-9215-3582>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8337-7318>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-2177-0306>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8747-7132>

Received 29.09.2025, accepted 21.11.2025

The article discusses the problems associated with belt extension in belt drives and suggests a new method for monitoring their condition based on ferromodulation sensors. The analysis of the factors influencing the change in belt length during operation, including mechanical wear, fatigue deformations and changes in the physical and mechanical characteristics of the material, is carried out. Attention is paid to the disadvantages of existing methods for monitoring the length of belt drives, such as the need to stop equipment for measurements, low resistance to dust and limited information content of traditional diagnostic systems. A fundamentally new method of continuous monitoring is proposed, based on the use of a system of two ferromodulation sensitive sensors installed with a fixed base distance along the belt drive belt and a special magnetic tag attached to the belt. A mathematical model has been developed that makes it possible to determine the current belt speed and calculate its absolute elongation with high accuracy based on the time intervals of the magnetic tag passing by the sensors. The hardware implementation of the system is described, including the design features of the sensor nodes and the analog signal processing circuit. A special feature of the proposed solution is the possibility of non-contact and continuous monitoring of belt extension, operation in conditions of strong electromagnetic interference and variable mechanical loads. Experimental studies is carried out on a specially developed test bench, during which the operability of the system in various modes of operation of the belt drive has been confirmed. The results obtained demonstrate high measurement accuracy and the stability of the system during long-term operation. The main advantages of the proposed solution in comparison with existing analogues are noted, such as simplicity of implementation, high reliability, temperature stability, high protection against electromagnetic interference, dust and low cost of operation.

Keywords: ferroprobe; deformation; relative elongation; contactless monitoring; belt drive.

Введение. Ременные передачи являются одним из наиболее распространённых механизмов передачи мощности в промышленности, транспорте и бытовой технике. Их популярность обусловлена рядом преимуществ, таких как простота конструкции, низкий уровень шума, способность демпфировать вибрации и относительно невысокая стоимость. Однако, несмотря на эти достоинства, ременные передачи подвержены износу и удлинению (рис. 1), что приводит к снижению их эффективности и увеличению риска аварийных ситуаций [1–4].

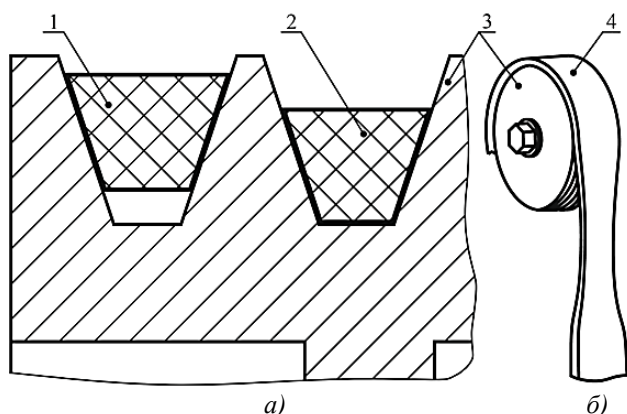


Рис. 1. Износ (а) и местное удлинение (б) ремня: 1 – ремень в изначальном состоянии; 2 – изношенный ремень; 3 – шкив; 4 – ремень с местным удлинением

Удлинение ремней – это естественный процесс, вызванный постоянными нагрузками, температурными перепадами и старением материала. Не вовремя выявленное критическое удлинение ремня может привести к проскальзыванию, увеличению вибраций, снижению КПД передачи и, в конечном итоге, к обрыву ремня. Вибрации не только увеличивают уровень шума, но и ускоряют износ подшипников, валов и других компонентов системы [5–8]. В долгосрочной перспективе это может привести к выходу из строя всего оборудования. В промышленных условиях обрыв ремня может вызвать остановку производства, что влечёт за собой значительные финансовые потери.

Ремни подвергаются как упругой, так и пластической деформации. Упругая деформация (до 2–3 % для большинства материалов) обратима, но при многократных циклах нагрузки она переходит в пластическую, которая является необратимой. Пластическая деформация приводит к изменению геометрии ремня и снижению его прочности [9, 10].

По данным исследований [11], потеря натяжения на 5 % может снизить КПД передачи на 2–5 %. Это особенно критично в высоконагруженных системах, таких как конвейеры или промышленные вентиляторы. Внеплановая (аварийная) остановка оборудования для замены ремня может вызвать простои производства, что особенно критично в непрерывных производственных процессах.

В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных методов мониторинга состояния ременных передач, которые позволят своевременно выявлять признаки износа и предотвращать аварии.

Существующие методы контроля. Существующие методы контроля состояния ременных передач можно разделить на несколько категорий:

- механические методы измеряют удлинение ремня контактным способом. Они просты в использовании, но требуют остановки оборудования для проведения измерений, что делает их непригодными для непрерывного мониторинга [12, 13];

- оптические датчики позволяют измерять длину ремня без контакта с его поверхностью. Они обладают высокой точностью, но чувствительны к загрязнениям и вибрациям ремня, что ограничивает их применение в промышленных условиях [14].

Предлагаемый метод контроля. Предлагаемый метод основан на использовании магнитной метки и двух ферромодуляционных чувствительных сенсоров (ФМЧС). Магнитная метка устанавливается на ремень, а ФМЧС располагаются на фиксированном расстоянии друг от друга вдоль траектории движения ремня (рис. 2).

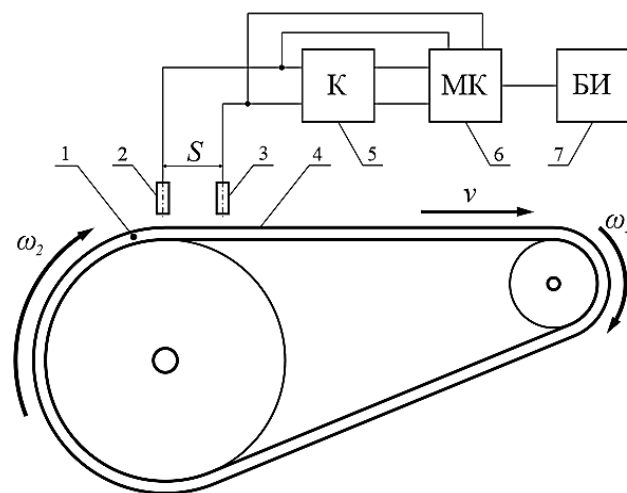


Рис. 2. Схема системы мониторинга: магнитная метка (1), ферромодуляционные чувствительные сенсоры (2, 3), ремень (4), компаратор (5), микроконтроллер (6), блок индикации (7)

S – расстояние между магниточувствительными сенсорами; ω_1, ω_2 – угловая скорость шкивов; v – линейная скорость ремня

Ферромодуляционный чувствительный сенсор – это электронное устройство, предназначенное для измерения изменения магнитного поля. Его работа основана на свойствах ферромагнитных материалов изменять свою магнитную проницаемость под воздействием внешних магнитных полей или механических деформаций. Такие магниточувствительные сенсоры широко применяются в системах неразрушающего контроля, датчиках положения, скорости и деформации благодаря высокой чувствительности и надёжности [15–18]. Основными компонентами ФМЧС являются ферромагнитный сердечник с высокой магнитной проницаемостью, измерительная и возбуждающая обмотки [19–22].

В табл. 1 представлены ключевые характеристики предлагаемого метода в сравнении с альтернативными подходами.

Таблица 1. Сравнение с альтернативными технологиями мониторинга

Параметр	Предлагаемый метод	Оптические датчики	Тензометры
Точность	$\pm 0,1 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,3 \%$
Устойчивость к запыленности	Высокая	Низкая	Средняя
Стоимость	Средняя	Высокая	Низкая
Температурная стабильность	Высокая	Средняя	Низкая
Временная стабильность	Высокая	Средняя	Низкая
Устойчивость к электромагнитным помехам	Высокая	Высокая	Средняя
Непрерывный мониторинг	Да	Да	Нет

Алгоритм обработки сигналов. ФМЧС обнаруживают магнитную метку не как мгновенное событие, а как сигнал сложной формы, имеющий конечную длительность. Это связано с тремя основными факторами: физической протяжённостью самой магнитной метки, механическими вибрациями ремня в процессе эксплуатации, а также нелинейной характеристикой чувствительности ФМЧС. В результате выходной сигнал ФМЧС представляет собой не идеальный импульс, а волнообразную кривую с плавным нарастанием и спадом амплитуды.

Для реализации этого метода в аппаратной части используется двухканальный компаратор, преобразующий аналоговый сигнал ФМЧС в чёткий цифровой импульс. Такой подход компенсирует возможные искажения формы сигнала и обеспечивает стабильность измерений при высоких скоростях и наличии вибраций ремня ременной передачи.

Микроконтроллер, работающий в режиме внешних прерываний, фиксирует фронты цифрового сигнала с компаратора. Полученные временные метки проходят цифровую фильтрацию, что позволяет устранить выбросы, вызванные кратковременными помехами, сохраняя при этом высокую точность определения наличия магнитной метки.

При прохождении магнитной метки относительно каждого ФМЧС фиксируется длительность сигналов t_1 и t_2 , измеряемая в микросекундах:

$$t_1 = t_{K1} - t_{H1}, \quad (1)$$

здесь t_{H1} , t_{K1} – начало и конец времени обнаружения магнитной метки с помощью ФМЧС, мкс.

Для точного определения момента прохождения метки используется алгоритм вычисления середины сигнала t_{C1} и t_{C2} , который принимается за момент прохождения центра метки мимо ФМЧС:

$$t_{C1} = t_{H1} + (t_1 / 2). \quad (2)$$

Далее рассчитывается время прохождения магнитной метки между двумя ФМЧС:

$$\Delta t = t_{C2} - t_{C1}. \quad (3)$$

В результате длина ремня рассчитывается следующим образом:

$$L = \frac{T \cdot S}{\Delta t}, \quad (4)$$

где T – время полного оборота, мкс.

Для наглядности на рис. 3 и 4 представлены осциллограммы, демонстрирующие работу системы.

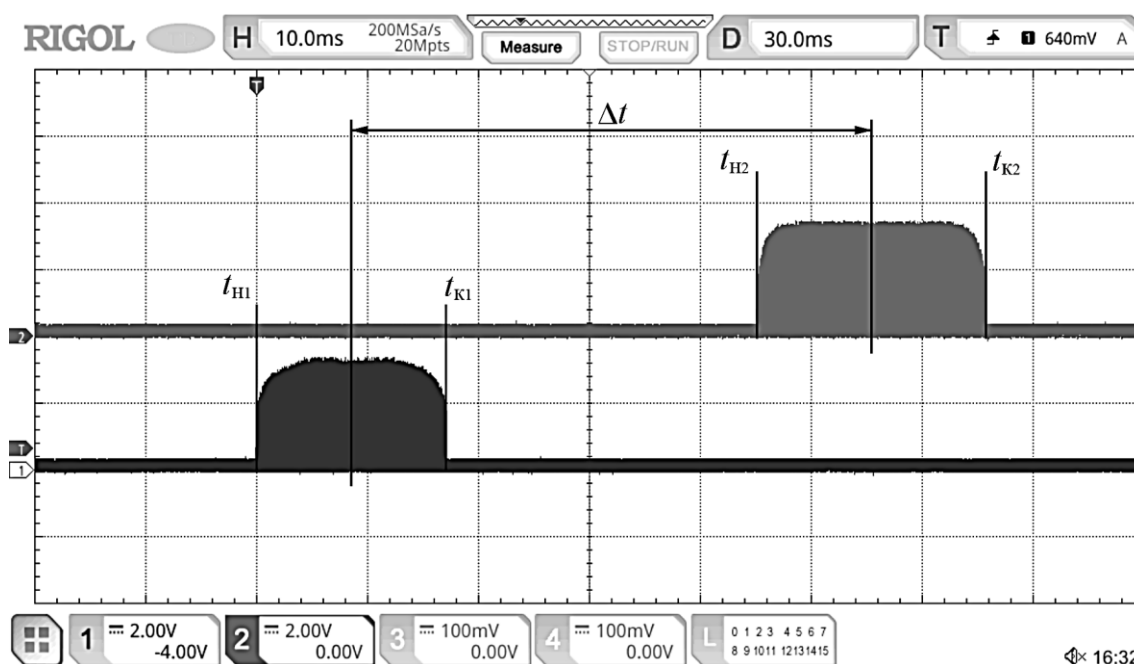


Рис. 3. Осциллограмма прохождения магнитной метки относительно двух ферро модуляционных чувствительных сенсоров

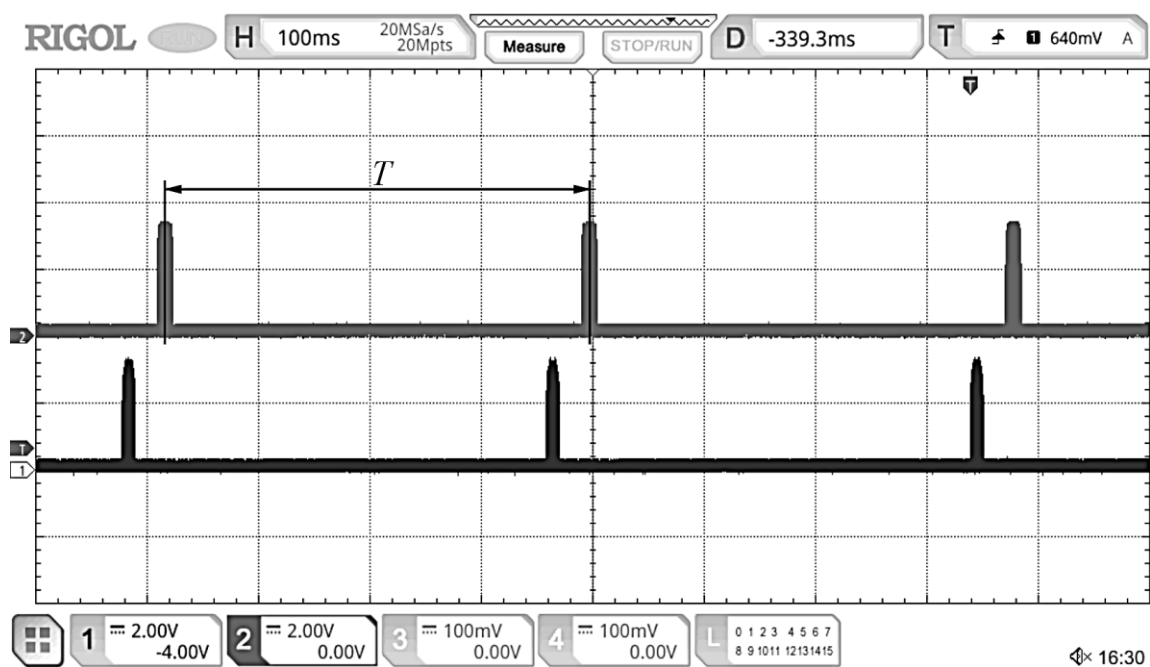


Рис. 4. Осциллограмма прохождения метки за полный круг. Период сигнала равен времени T

После монтажа ремня ременной передачи датчик, состоящий из двух ферромодуляционных чувствительных сенсоров, устанавливается вдоль траектории движения ремня. Для крепления используются виброизолирующие прокладки, уменьшающие влияние механических колебаний на точность измерений.

Калибровка системы. На этапе калибровки система фиксирует исходные параметры работы ременной передачи. Процедура включает:

- определение начальной длины ремня путём многократного (5–7 циклов) измерения времени прохождения магнитной метки между датчиками при номинальной скорости;
- анализ амплитуды выходных сигналов ФМЧС и корректировка опорного напряжения, тем самым регулируя порог срабатывания компаратора;
- установку пороговых значений для критического удлинения с учётом типа ремня ременной передачи (клиновой, поликлиновой, зубчатый) и его характеристик.

Полученные данные сохраняются в энергонезависимой памяти микроконтроллера и используются как эталонные для последующего мониторинга.

В дальнейшем в процессе эксплуатации устройство непрерывно отслеживает текущую длину ремня по уравнениям (1–4), сравнивая её с первоначальным значением (рис. 5), что позволяет выявлять как постепенное удлинение ремня ременной передачи вследствие пластической деформации, так и резкие изменения, вызванные, например, проскальзыванием, повреждением или изменением нагрузок.

При достижении критического уровня удлинения, заданного для конкретного типа ремня, система автоматически активирует предупреждающие сигналы (световые, звуковые или цифровые уведомления), что позволяет своевременно принять меры для предотвращения аварийных ситуаций.

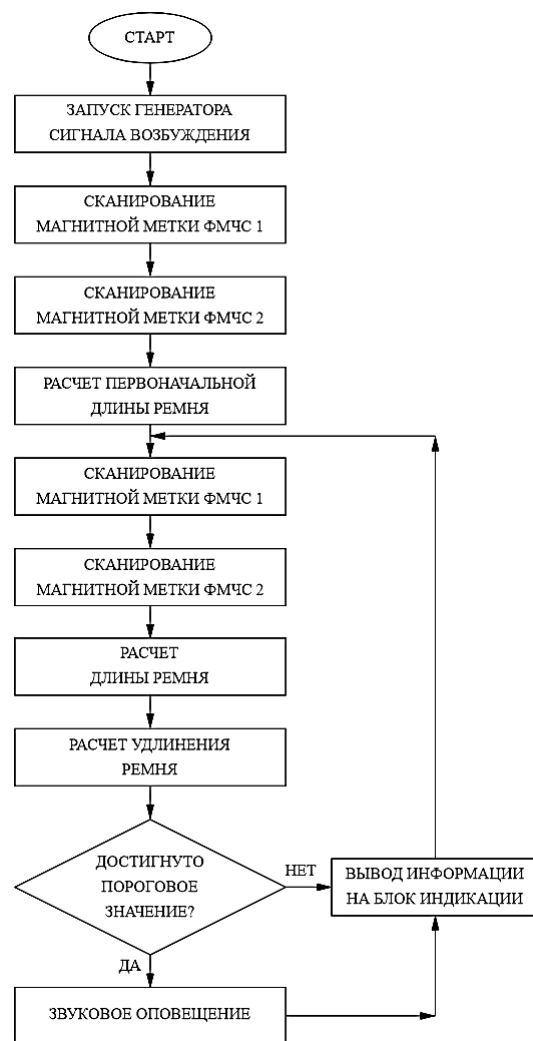


Рис. 5. Блок-схема работы устройства мониторинга удлинения ремня ременной передачи

Для проведения тестовых испытаний был использован электромеханический стенд, имитирующий рабочие режимы ременной передачи: пуск, торможение, пиковые нагрузки (диапазон скоростей 1–15 м/с) и систему мониторинга на базе микроконтроллера ESP32. Устрой-

ство (рис. 6) оснащено двумя высокоточными ФМЧС, установленными на текстолитовой подложке с фиксированным межосевым расстоянием $110 \pm 0,1$ мм, и магнитной меткой из сплава NdFeB, интегрированной в ремень с помощью вулканизации.

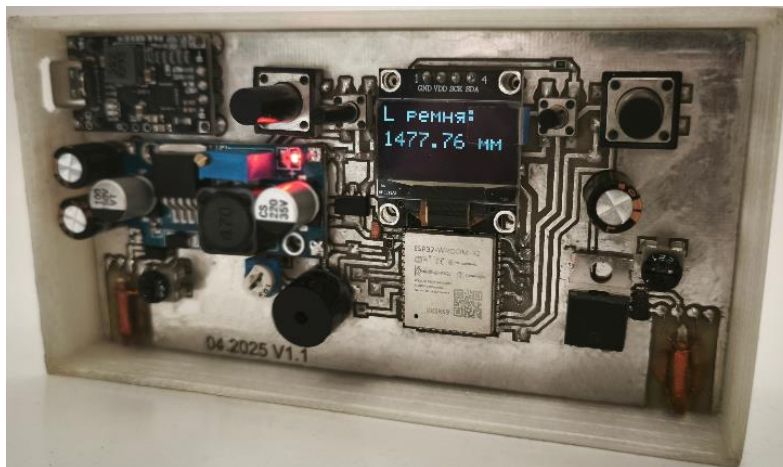


Рис. 6. Фото устройства для бесконтактного мониторинга удлинения ремней ременных передач

Устройство продемонстрировало точность измерения удлинения ремня ременной передачи 1 мм/м (0,1 % от длины ремня) за счёт комбинации медианного фильтра и модифицированного алгоритма Калмана, устраняющих влияние вибраций и электромагнитных помех.

Заключение. Предложенный метод мониторинга удлинения ремней ременных передач на основе ферроимпульсионного чувствительного сенсора позволяет своевременно выявлять критические деформации и предотвращать аварийные ситуации. Внедрение данной системы в промышленных условиях позволит не только снизить затраты на обслуживание, но и повысить безопасность и надёжность работы оборудования.

Метод обладает рядом преимуществ, такими как высокая точность и возможность непрерывного, а также бесконтактного мониторинга. Использование ферроимпульсионного чувствительного сенсора обеспечивает надёжную регистрацию магнитной метки даже при высокой скорости ремня и высоких уровнях электромагнитных помех, а математическая обработка сигналов позволяет точно определить время прохождения магнитной метки и вычислить длину, скорость, направление и удлинение ремня ременной передачи.

Дальнейшее развитие системы мониторинга требует решения ряда научно-технических задач. В первую оче-

редь, необходимо совершенствование алгоритмов цифровой обработки сигналов для повышения точности измерений в условиях переменных нагрузок и внешних помех. Особый интерес представляет разработка методов прогнозирования аналитики, позволяющих оценивать остаточный ресурс ремня ременной передачи на основе анализа динамики его удлинения с использованием регрессионных моделей и машинного обучения.

Важным направлением является оптимизация конструкции ферроимпульсионных чувствительных сенсоров. Необходимо уменьшение их габаритных размеров при сохранении высокой чувствительности, а также снижение энергопотребления для возможности автономной работы. Это особенно актуально для систем мониторинга, установленных на подвижном оборудовании или в труднодоступных местах.

Реализация указанных направлений позволит создать интеллектуальную систему диагностики, способную не только фиксировать текущее состояние ременной передачи, но и прогнозировать оптимальные сроки технического обслуживания. Это обеспечит переход от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, что значительно повысит экономическую эффективность эксплуатации оборудования за счёт сокращения незапланированных простоев и рационального использования ресурсов.

Литература

1. Никитина И.Н., Ефанов С.А. Ременные передачи // XLVIII Огарёвские чтения : мат-лы науч. конф. Саранск, 06–13 дек. 2019 г. В 3 ч. Ч. 1. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. С. 515–518.
2. Заббаров А.Н., Камалов И.Ф., Рукавишников В.А. Актуальность и перспективы развития ременных передач // Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ : мат-лы IX Нац. науч.-практ. конф. Казань : КГЭУ, 2024. С. 496–498.
3. Игнатович Д.А., Герасимов А.А. Совершенствование методики испытаний ременных передач // Инновационные технологии в науке и образовании : сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д : ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2023. С. 176–179.
4. Szczypiński-Sala W., Dobaj K., Kot A. Frictional problems in continuously variable transmission belt drives // Tribologia. 2017. № 5. P. 93–100.

5. Мудров А.Г., Золотцев Ю.К. Исследование клиноременной передачи // Техника и технология транспорта. 2019. № 3(14). С. 4.
6. Abrate S. Vibrations of belts and belt drives // Mechanism and Machine Theory. 1992. Vol. 27. № 6. P. 645–659.
7. Сабанчиев Х.Х. Шум и вибрация в зубчато-ременных передачах // Известия СКНЦ ВШ. Серия: Технические науки. 1981. № 2. С. 56–59.
8. Feng X., Shangguan W.-B., Deng J. et al. Modelling of the rotational vibrations of the engine front-end accessory drive system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2017. Vol. 231. № 13. P. 1780–1795.
9. Галаджев Р.С. Исследование особенностей деформаций клиновых ремней // Передаточные механизмы. М.: Машиностроение, 1966. С. 24–27.
10. Мартынов В.К. Разработка теории, методов расчета и проектирования современных передач трением гибкой связью : дис. ... д-ра техн. наук. Тула, 2004. 293 с.
11. Куликов И.М., Синявский И.М. Повышение КПД ременных передач // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 137–138.
12. Патент РФ № 2014146408/28, 10.08.2015. Стручков А.В., Климов А.А., Ереско Т.Т., Грошева И.А. Устройство для контроля натяжения приводных ремней // Патент России № 153921. 2014.
13. Галаджев Р.С., Игнатенко Ю.А. Применение электротензометрических методов при экспериментальных исследованиях клиноременных передач и вариаторов // Передаточные механизмы. М.: Машиностроение, 1971. С. 81–88.
14. Патент РФ № 99118848/28, 10.07.2001. Марти А.Н., Водяник Г.М. Ременная передача с датчиками информационно-энергетического состояния // Патент России № 99118848. 1999.
15. Wei, S.; Liao, X.; Zhang, H.; Pang, J.; Zhou, Y. Recent Progress of Fluxgate Magnetic Sensors: Basic Research and Application. Sensors 2021, 21, 1500.
16. Wang, H.; Chen, S.; Zhang, S.; Yuan, Z.; Zhang, H.; Fang, D.; Zhu, J. A high-performance portable transient electro-magnetic sensor for unexploded ordnance detection. Sensors 2017, 17, 2651.
17. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. 4-е изд. М.: Едиториал УРСС, 2020. 400 с.
18. Безкоровайный В.С., Ливцов Ю.В., Яковенко В.В., Шатова Н.А. Разработка математической модели образования выходного сигнала феррозонда при однополярном импульсном возбуждении // Вестник РГРТУ. 2019. № 70. С. 190–197.
19. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 186 с.
20. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Аморфные и нанокристаллические сплавы для измерительных преобразователей // Компоненты и технологии. 2008. № 1. С. 45–49.
21. Yamamoto S., Matsushita F. Optimization of core geometry in fluxgate sensors for improved sensitivity // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58. № 2. Art. 4000205.
22. Lee J., Kim T.-H. Advanced winding techniques for fluxgate sensors with nanocrystalline cores // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2023. Vol. 18. № 1. P. 543–550.
- IX National Scientific and Practical Conference : KGEU, 2024. P. 496–498.
3. Ignatovich D.A., Gerasimov A.A. Improving the methods of belt transmission testing // Innovative technologies in science and education: collection of scientific papers of the XI International Scientific and Practical Conference. Rostov n/A: DSTU-PRINT LLC, 2023. P. 176–179.
4. Szczypiński-Sala W., Dobaj K., Kot A. Frictional problems in continuously variable transmission belt drives // Tribologia. 2017. № 5. P. 93–100.
5. Mudrov A.G., Zolottsev Yu.K. Research of V-belt transmission // Engineering and technology of transport. 2019. No. 3(14). P. 4.
6. Abrate S. Vibrations of belts and belt drives // Mechanism and Machine Theory. 1992. Vol. 27. No. 6. P. 645–659.
7. Sabanchiev H.H. Noise and vibration in gear-belt transmissions // Izvestiya SKSC HSE. Series: Technical Sciences. 1981. No. 2. P. 56–59.
8. Feng X., Shangguan W.-B., Deng J. et al. Modelling of the rotational vibrations of the engine front-end accessory drive system // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2017. Vol. 231. № 13. P. 1780–1795.
9. Galadzhiev R.S. Investigation of the deformation features of V-belts // Transmission mechanisms. M.: Mashinostroenie, 1966. P. 24–27.
10. Martynov V.K. Development of theory, calculation methods and design of modern friction gears with flexible coupling: dis. ... Doctor of Technical Sciences. Tula, 2004. 293 p.
11. Kulikov I.M., Sinyavsky I.M. Increasing the efficiency of belt transmissions // Successes of modern natural science. 2011. No. 7. P. 137–138.
12. Patent of the Russian Federation № 2014146408/28, 08.10.2015. Struchkov A.V., Klimov A.A., Yeresko T.T., Grosheva I.A. Device for tension control of drive belts // Russian Patent № 153921. 2014.
13. Galadzhiev R.S., Ignatenko Yu.A. Application of electrotenometric methods in experimental studies of V-belt gears and variators // Transmission mechanisms. M.: Mashinostroenie, 1971. P. 81–88.
14. Patent of the Russian Federation № 99118848/28, 07.10.2001. Marti A.N., Vodyanik G.M. Belt drive with sensors for information and energy status // Russian Patent № 99118848. 1999.
15. Wei, S.; Liao, X.; Zhang, H.; Pang, J.; Zhou, Y. Recent Progress of Fluxgate Magnetic Sensors: Basic Research and Automation. Sensors 2021, 21, 1500.
16. Wang, H.; Chen, S.; Zhang, S.; Yuan, Z.; Zhang, H.; Fang, D.; Zhu, J. A high-performance portable transient electro-magnetic sensor for unexploded ordnance detection. Sensors 2017, 17, 2651.
17. Nikolsky V.V. Theory of the electromagnetic field. 4th ed. Moscow: Unified URSS, 2020. 400 p.
18. Bezkorovainy V.S., Livtsov Yu.V., Yakovenko V.V., Shatova N.A. Development of a mathematical model for the formation of a ferrosone output signal under unipolar pulse excitation // Bulletin of the Russian State Technical University. 2019. No. 70. P. 190–197.
19. Afanasyev Yu.V. Ferrosone devices. L.: Energoatom-mizdat, 1986. 186 p.
20. Starodubtsev Yu.N., Belozеров V.Ya. Amorphous and nanocrystalline alloys for measuring transducers // Components and technologies. 2008. No. 1. P. 45–49.
21. Yamamoto S., Matsushita F. Optimization of core geometry in fluxgate sensors for improved sensitivity // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58. № 2. Art. 4000205.
22. Lee J., Kim T.-H. Advanced winding techniques for fluxgate sensors with nanocrystalline cores // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2023. Vol. 18. № 1. P. 543–550. // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2023. Vol. 18. № 1. P. 543–550.

References