

Л.А. Плетнев, А.Д. Бреки
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, l-pletnev@mail.ru

ОБЗОР СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПРИВОДНЫХ РОЛИКОВЫХ ЦЕПЕЙ

Аннотация

В данном обзоре рассматриваются современные методы и оборудование для испытания и изучения цепных передач, включая специализированные стенды для велосипедных трансмиссий. Анализируются их преимущества, ограничения и перспективные направления развития, такие как применение датчиков нового поколения, автоматизация испытательных процессов. Особое внимание уделяется вопросам стандартизации испытаний и адаптации промышленных методик к специфике велоиндустрии.

Ключевые слова: цепь, цепной привод, испытательный стенд, эффективность цепного привода, износ цепи.

Введение

В современных механических системах цепные приводы являются одним из ключевых элементов, позволяя эффективно передавать мощность и крутящий момент на большие расстояния с высоким КПД и надежностью. Они нашли широкое применение в промышленности, транспортном машиностроении, сельском хозяйстве, робототехнике – везде, где требуются высокая нагрузочная способность, устойчивость к переменным режимам работы, надежность [1].

Особое место цепные передачи заняли в конструкции велосипедов. Цепная трансмиссия стала практически безальтернативной конструкцией, которая позволила эффективно, надежно трансформировать мускульную энергию в движение транспортного средства.

В отличие от промышленных вариантов исполнения, к велосипедным цепям предъявляются особые требования к их износостойкости и эффективности в силу работы в тяжелых условиях – переменные скорости, перекосы, удары, воздействие агрессивной внешней среды [2, 3].

Несмотря на крайне широкое распространение велосипедного транспорта, на удивление, было опубликовано крайне мало литературы, посвященной износу и эффективности цепей велосипедов. Основное внимание направлено в сторону сельхоз техники и подъемно-транспортных машин [4-6]

В контексте велосипедной индустрии такие исследования приобретают особую значимость: рост популярности спортивных, городских и электрических велосипедов требует оптимизации трансмиссий для снижения энергопотерь, повышения плавности переключения и увеличения срока службы цепи.

Одним из немаловажных этапов создания и исследования приводных цепей являются испытания, которые позволяют оценить их эксплуатационные характеристики, например износостойкость, КПД, устойчивость к экстремальным нагрузкам, а также выявить закономерности и принципы износа в тех или иных

условиях работы. Для этих целей создаются лабораторные стенды различного назначения [7-9]

Целью данной работы является изучение существующих стендов, а также анализ их конструкций для дальнейшего проектирования испытательной машины и проведения исследований.

Назначение стендов для испытания цепей

В этой работе сделан акцент на износные испытания и изучение эффективности цепных приводов, как на наиболее интересные направления - они позволяют оценить износостойкость цепи с течением времени, характер изнашивания и прочие характеристики.

Виды испытаний цепей приводных роликовых цепей:

- Измерение длины цепи
- Испытание на разрыв
- Испытание на усталость
- Испытание на износ
- Изучение эффективности цепного привода
- Испытания солевым туманом
- Испытание на силу выпрессовки [10, 11]

В настоящее время ни один стандарт не предъявляет требований к испытаниям на износ приводных цепей. Однако Ассоциация цепей Японии (JCAS) в стандарте JCAS-1 установила руководящие принципы испытаний для мотоциклетных цепей [11, 12].

Хотя цепные передачи очень распространены в машиностроении, стенды для их испытаний не получили широкого распространения, в отличие от стендов для изучения и испытаний зубчатых передач [13-22] по ряду причин:

Простота конструкции.

1. Цепные передачи не имеют строгих требования к точности изготовления по сравнению с зубчатыми. Их работоспособность в большинстве случаев можно оценить с помощью стандартных методов тестирования без необходимости сложных экспериментальных исследований.

2. Основные параметры цепей (разрывная прочность и усталостная долговечность) проверяются производителями на универсальных разрывных машинах и циклических стендах. Для большинства применений этих данных достаточно, что снижает потребность в специализированных испытательных комплексах.

3. Ограниченный спрос со стороны промышленности. Большинство производственных предприятий не нуждаются в глубоком анализе работы цепных передач, поскольку их эксплуатационные характеристики хорошо изучены. В отличие от редукторов или подшипников, где точность и КПД критичны, цепи чаще заменяют, чем оптимизируют.

4. Достаточность компьютерного моделирования Современные CAE-системы (ANSYS, ABAQUS и др.) позволяют с достаточной точностью моделировать нагрузки, износ и динамику цепных передач, уменьшая потребность в физических испытаниях. [23, 24]

Несмотря на небольшое распространение исследований в области износа и эффективности цепных приводов, известны различные конструкции стендов отечественных и зарубежных авторов.

Любой стенд включается в себя – электродвигатель, выполняющий функции привода, ведущую и ведомую звезду, испытываемую цепь, а также устройство нагружения. Для контроля различных параметров в конструкцию дополняют датчиками момента ведущих и ведомых валов, датчиками скоростей вращения, регуляторами оборотов и прочими измерительными приборами

Чаще всего, устройством нагружения является электродвигатель-генератор. Обычно это машины переменного или постоянного тока, синхронные и асинхронные. Преимущества асинхронных тормозных устройств – простота конструкции, автоматический переход из двигательного режима в тормозной. К недостаткам можно отнести – узкий диапазон регулировки частоты вращения в обоих режимах. Это приводит к необходимости применять редукторы в паре с асинхронными машинами. Синхронные машины имеют вдвое больший диапазон регулирования оборотов, но также вдвое меньшим тормозным моментом [25]. Электрические машины постоянного тока имеют большой диапазон регулирования, имеют высокую плавность хода, но отличаются малым ресурсом и высокой стоимостью. Эти машины находят широкое применение для исследовательских целей [26].

Обзор конструкций

Известны различные лабораторные стенды для испытания цепных передач. Так, в патенте RU 147 242 U1 "СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ» авторами которого являются Бережной С.Б., Пунтус А.В., Мевша Н.В., Война А.А., Курапов Г.В. [27] разработан стенд, который стал решением задачи по упрощению конструкции и расширению функциональных возможностей уже существующих испытательных машин.

Действительно, стенд имеет крайне простую конструкцию, с возможностью проводить испытания в двух режимах.

Первый режим - натяжение ветвей цепи 3 осуществляется под действием силы G создаваемой двигателем 1, расположенным на качающейся платформе 6.

Второй режим – платформа 6 фиксируется, к установке подключается генератор 2, который создает реальные условия работы привода.

Недостатком этой конструкции является отсутствие каких-либо приборов измерения, регистрирующих изменения показателей в процессе испытаний. Схема стенда изображена на рисунке 1.

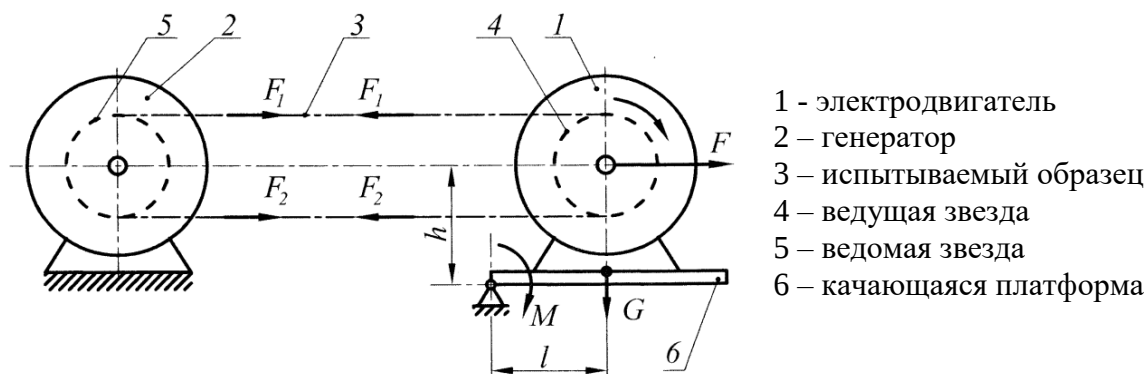


Рисунок 1 – Схема стенда

В работе Егорова А. В. и Козлова К. Э. [28] представлен стенд и методика испытаний, позволяющие исследовать качество смазочных материалов и их влияние

на эффективность цепных передач инерционным методом. Схема стенда представлена на рисунке 2.

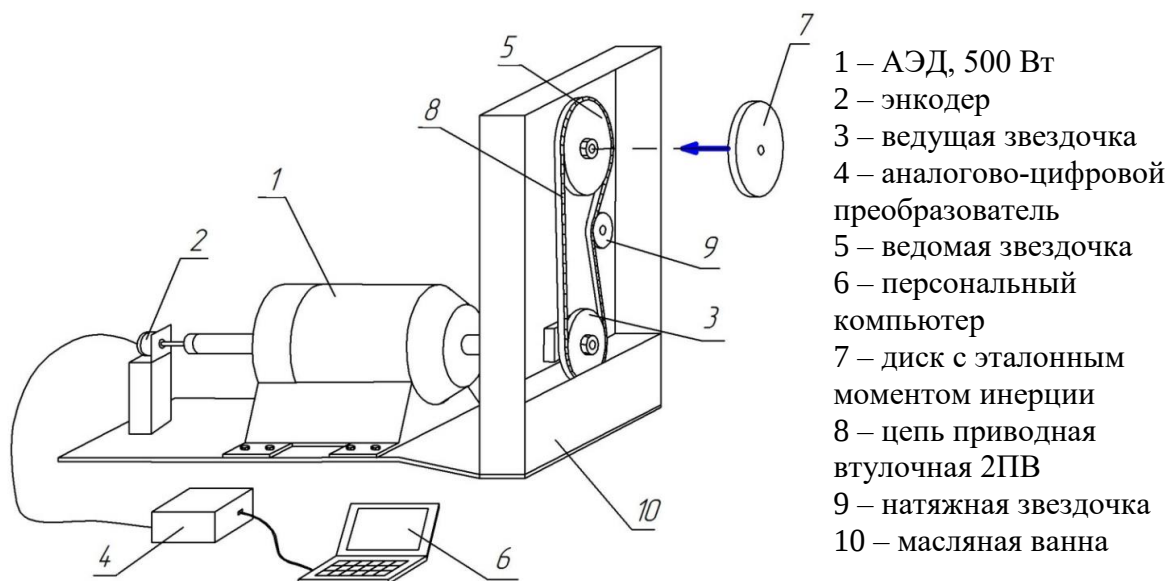


Рисунок 2 – Стенд для определения энергетической эффективности цепных передач.

Наибольший интерес из представленных конструкций вызывает стенд, описанный в работе «A Novel Model for Bicycle Drivetrain Efficiency» авторов Teal Dowd, Patrick Cavanaugh, Jan-Anders Mansson [29]. Стенд спроектирован для исследования велосипедных цепных передач, имеет входной и выходной датчики момента, позволяет регулировать входную мощность, скорость вращения ведущего звёзды, величину нагрузки.

Стенд позволяет полностью имитировать работу трансмиссии велосипеда, включая перекус цепи на разных передачах. Диапазон входной мощности – 200-800 Вт, скорость вращения ведущей звезды 76-360 об/мин, что совпадает с условиями нормальной работы данного цепного привода.

К недостаткам можно отнести отсутствие контроля удлинения цепи в реальном времени, а также возможности изменения силы натяжения цепи для форсирования испытаний. Схема стенда представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Трехмерная модель испытательного стенда и его компонентов

Также, известны стенды, созданные коммерческими компаниями – производителями велосипедных смазок, цепей и компонентов. Лидером в этой

области считается датская компания CeramicSpeed. Основной целью их работы является снижение потерь в движущихся частях велосипеда – подшипники, цепи.

CeramicSpeed разработали собственный стенд позволяющий оценить эффективность различных смазок [30] Опубликованные данные только косвенно позволяют оценить конструктив и возможности этого стенда. На рис. 4 мы можем видеть электродвигатель, цепной привод, а также шкивы с ремнем, закрепленные на выходном валу, а диаграмма [30] отображает потери, полученные при испытании различных смазок. Таким образом можно сделать вывод о том, что данный стенд является типовой конструкцией, описанной ранее – привод с датчиком входящей мощности, испытуемым приводом, системой нагружения с датчиком выходной мощности, система обработки полученных результатов.



Рисунок 4 – Испытательный стенд компании CeramicSpeed

Особенно можно выделить стенд от группы исследователей Friction Facts (выкуплен CeramicSpeed в 2016 году [31]) имеющий схожие с патентом RU 147 242 U1 режимы натяжения и испытания цепей:

1. «Full Load Test Method» – Метод полного нагружения – используется двигатель с переменной скоростью вращения, цепной привод полностью имитирует трансмиссию велосипеда, к выходному валу прикладывается нагрузка соразмерная нагрузке при езде. На входном и выходном валу установлены датчики момента регистрирующие потери в приводе. Расстояние между осями ведущей и ведомой звезд постоянно. Недостатком этого теста является точность. Датчики регистрируют не только потери в цепи, но и в подшипниках стенда [32].

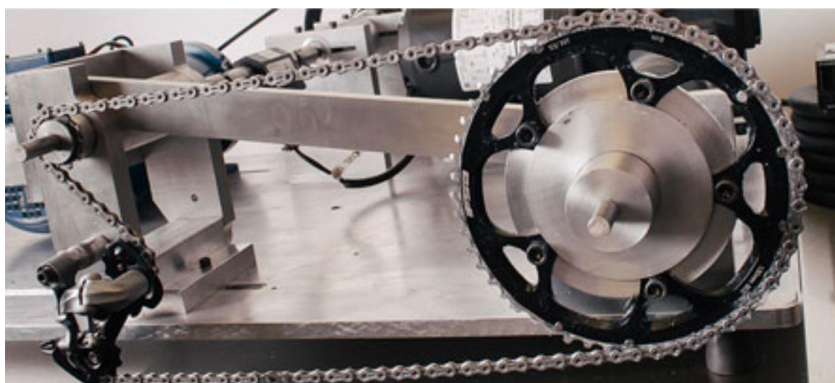


Рисунок 5 – Испытательный стенд Frictionfacts в режиме «Full Load Test Method»

2. «Full Tension Test Method» – Метод полного натяжения – Позволяет более точно определить эффективность цепи. Тут, ось ведомой звезды расположена на качающемся маятнике с закрепленным на нем грузом выполняющим функцию натяжителя. Также, как и в предыдущем методе, двигатель приводит в движение ведущую звезду, но к ведомой не подключено сопротивление. Усилие, необходимое

для поворота ведущего вала, обусловлено исключительно силами трения, возникающими в цепи при вращении натянутой цепи. На ведущем валу установлен единственный датчик крутящего момента, с помощью которого измеряется крутящий момент, а затем рассчитывается мощность в ваттах [33].

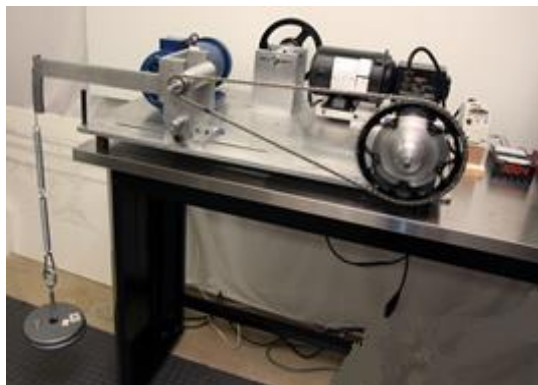


Рисунок 6 – Испытательный стенд Frictionfacts в режиме «Full Tension Test Method»

Схожую схему имеют стенды независимого испытательного центра ZeroFrictionCycling из Австралии [34]. В качестве системы нагружения применяется специализированный смарт-тренажер позволяющий регулировать имитирующую нагрузку, привод представляет собой трансмиссию, работающую в нормальных условиях [35].



Рисунок 7 – Испытательный стенд ZeroFrictionCycling.

Однако испытания и исследования цепей не ограничиваются изучением цепи в сборе. Так, был создан трибометр цепного шарнира, являющийся промежуточным звеном между общими трибологическими исследованиями [36-37] и изучением приводных цепей как трибологических систем.

Данная машина позволяет проводить исследования износа и трения внутри очного сочленения звеньев, состоящего из пальца, втулки, ролика, внешних и внутренних звеньев. Способна моделировать контактные напряжения и относительное движение, соответствующие реальной цепной передаче [7].

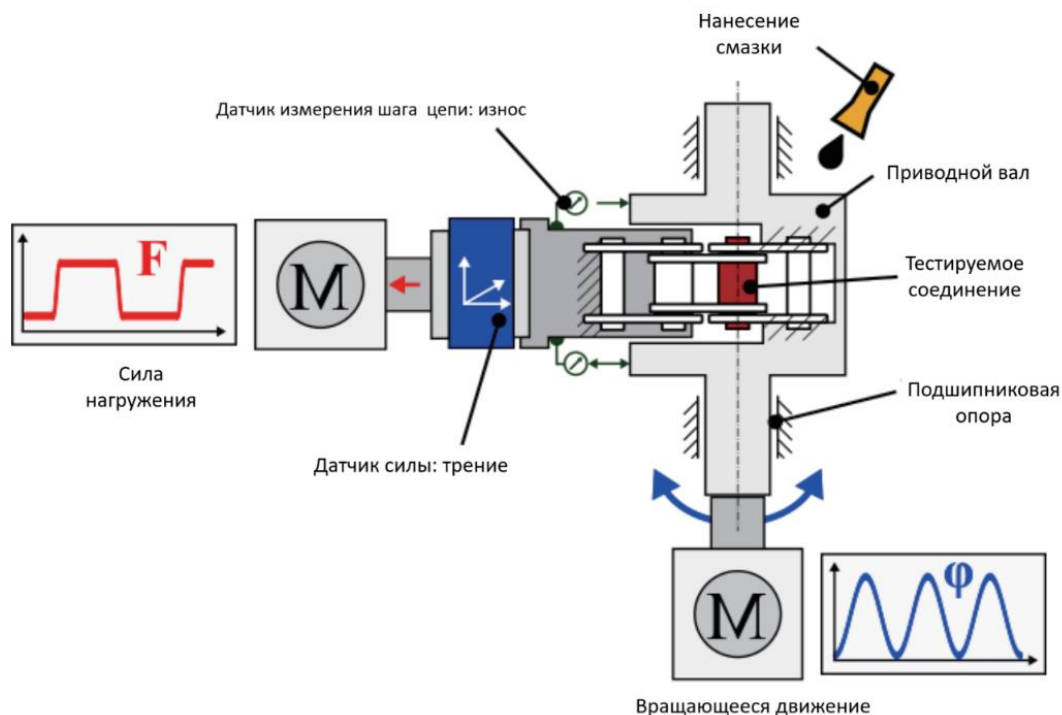


Рисунок 8 – Схема устройства трибометра цепного шарнира.

Заключение

В результате проведенного обзора можно сказать, что стенды для испытания и изучения цепных передач остаются узкоспециализированным оборудованием, востребованным, преимущественно, в научных исследованиях. В большинстве случаев промышленность обходится стандартными расчетными методами и универсальными испытательными машинами, что объясняет ограниченное распространение таких стендов.

В данной работе были рассмотрены различные конструкции испытательных стендов, направленных на изучение износа и эффективности цепных передач, из которых можно сделать вывод о недостатке имеющихся знаний в данной области отечественной науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хамзаев А.А., Нишонов Х.Х., Абдуллаев З.Д. Современные цепные передачи и их использование в сельскохозяйственных машинах // Механика и технология. 2023. №1 (4) Спецвыпуск.
2. Liew, Y.W.; Matthews, O.; Dao, D.V.; Li, H. Power Transmission Mechanism and Tribological Performance of Modern Bicycle Drivetrains—A Review. *Machines* 2025, 13, 66. <https://doi.org/10.3390/machines13010066>
3. J.B. Spicer, C.J.K. Richardson, M.J. Ehrlich, J.R. Bernstein, M. Fukuda, M. Terada (2001), Effects of Frictional Loss on Bicycle Chain Drive Efficiency. *Journal of Mechanical Design* 123(4), 598–605. <https://doi.org/10.1115/1.1412848>.
4. Осиков А. А. Методика экспериментальных исследований цепной передачи с открытым шарниром // Агроинженерия. 2012. №1 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-eksperimentalnyh-issledovaniy-tsepnoy-peredachi-s-otkrytym-sharnirom> (дата обращения: 07.05.2025).
5. Стрижков Игорь Григорьевич, Хорьков Евгений Евгеньевич Моделирование электрооборудования стенда испытания роликовых цепей // Научный журнал КубГАУ. 2014. №96.

6. Усов А.С., Повышение долговечности приводных цепей зерноуборочных комбайнов Текст. / А. С. Усова. // дис. канд. техн. наук. — Зерноград, 2017. 199 с.
7. Dominik Meffert, Manuel Oehler, Bernd Sauer, Precise Friction Measurement in Drive Chains Using a Chain Joint Tribometer, Tribology Online, 2021, Volume 16, Issue 3, Pages 151-158, Released on J-STAGE July 31, 2021, Online ISSN 1881-2198, <https://doi.org/10.2474/trol.16.151>.
8. Ryoichi Saito, Nao-Aki Noda, Yoshikazu Sano, Newly Developed Wear Testing Machine Having Sufficient Reproducibility Useful for Investigating Roller Chains, ISIJ International, 2020, Volume 60, Issue 10, Pages 2255-2265, Released on J-STAGE October 20, 2020, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-086>.
9. Becker, A., Meffert, D. & Sauer, B. Friction and wear investigations on single chain joints. Forsch Ingenieurwes 83, 53–63 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00297-x>
10. What's the Important Chain Testing?: [Электронный ресурс] URL:<https://www.universalchain.net/blogs/roller-chain/chain-testing/>
11. What are important tests for chains?: [Электронный ресурс]. URL:<https://blog.mccchains.com/en/2022/12/22/important-tests-for-chain>
12. U.S. Tsubaki, Inc, The Complete Guide to Chain, (1997) <https://www.ustsubaki.com/wp-content/uploads/the-complete-guide-1.pdf>
13. Arun, A. P., Giriraj, B., & Rahaman, A. F. (2014). Gear test rig-A review. International Journal of Mechanical, 16-26.
14. Herzog, C., & Drummer, D. (2023). Test Rig for the In Situ Measurement of the Elastic Tooth Deflection of Plastic Gears. Polymers, 15(7), 1732. <https://doi.org/10.3390/polym15071732>
15. Åkerblom, M. (1999). Gear Test Rig for Noise and Vibration Testing of Cylindrical Gears.
16. Westphal, C., Brimmers, J. & Brecher, C. Influence of axis misalignments in stepped planetary gear stages on the excitation behavior—test rig development and simulative analysis. Forsch Ingenieurwes 87, 1103–1116 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10010-023-00709-z>
17. Авторское свидетельство № 1516826 А1 СССР, МПК G01M 13/02. Стенд для испытания зубчатых передач : № 4336970 : заявл. 30.11.1987 : опубл. 23.10.1989 / Л. Е. Пелевин, Ю. А. Ройко, А. З. Фридман, Е. Б. Бородянский ; заявитель предприятие п/я в-2085, киевский инженерно-строительный институт. – EDN VTYAUL.
18. Авторское свидетельство № 1516826 А1 СССР, МПК G01M 13/02. Стенд для испытания зубчатых передач : № 4336970 : заявл. 30.11.1987 : опубл. 23.10.1989 / Л. Е. Пелевин, Ю. А. Ройко, А. З. Фридман, Е. Б. Бородянский ; заявитель предприятие п/я в-2085, киевский инженерно-строительный институт. – EDN VTYAUL.
19. Авторское свидетельство № 291122 А1 СССР, МПК G01M 13/02. Стенд с замкнутым электрическим контуром для испытания зубчатых передач : № 1335636/25-28 : заявл. 12.05.1969 : опубл. 06.01.1971 / А. П. Варакса. – EDN HJLJUD.
20. Авторское свидетельство № 1567914 А1 СССР, МПК G01M 13/02. Стенд для приработки и испытаний зубчатых передач : № 4485285 : заявл. 26.07.1988 : опубл. 30.05.1990 / А. И. Беляев, Г. И. Михайлов, А. И. Сирицын ; заявитель всесоюзный научно-исследовательский тепловозный институт. – EDN TNHMEU.
21. Авторское свидетельство № 1518694 А1 СССР, МПК G01M 13/02. Стенд для испытания зубчатых передач : № 4418519 : заявл. 21.03.1988 : опубл. 30.10.1989 / Л. Е. Пелевин, Ю. А. Ройко, И. А. Клишко [и др.] ; заявитель киевский инженерно-строительный институт. – EDN XOAAGL.
22. Авторское свидетельство № 1820271 А1 СССР, МПК G01M 13/02. Стенд для испытания зубчатых передач : № 4934121 : заявл. 06.05.1991 : опубл. 07.06.1993 / П. М.

Бирюков, М. П. Бирюков, А. В. Короткевич, К. Т. Беляк ; заявитель институт проблем надежности и долговечности машин АН БССР. – EDN RRELIU.

23. Плетнев, Л. А. Моделирование деформации звеньев безвтулочной роликовой цепи методом конечных элементов / Л. А. Плетнев, М. Аль-Наджар, А. Д. Бреки // Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024 : Материалы 1-й Международной научно-практической конференции, Санкт - Петербург, Россия, 21–22 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 258-263. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-255. – EDN QXWDIY.

24. Ross, J. and Meyer, J., "Simulating the Dynamic Behaviour of Chain Drive Systems by Advanced CAE Programs," SAE Technical Paper 960298, 1996, <https://doi.org/10.4271/960298>.

25. Горожанкин, С.А. Применения асинхронной электрической машины в качестве тормозного устройства при определении показателей автомобильного ДВС на неустановившихся режимах работы [Текст] / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, В.Г. Скрипкар // Автотранспортное предприятие. 2016. № 9. С.49-62..

26. Обзор конструкций современных динамометрических стендов для испытаний колесных транспортных средств / К. Е. Бяков, В. В. Иваненков, В. Б. Холоденко, О. И. Чудаков // Транспортные системы. – 2021. – № 4(22). – С. 4-15. – DOI 10.46960/62045_2021_4_4. – EDN FFCOUE.

27. Патент на полезную модель № 147242 U1 Российская Федерация, МПК G01M 13/02. Стенд для испытания цепных передач : № 2014134006/28 : заявл. 19.08.2014 : опубл. 27.10.2014 / С. Б. Бережной, А. В. Пунтус, Н. В. Мевша [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный технологический университет" (ФГБОУ ВПО "КубГТУ"). – EDN VARWZX.

28. Егоров А. В., Козлов К. Э. Инерционный метод оценки влияния качества смазочных материалов на энергетическую эффективность цепных передач // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. №06.

29. Dowd, Teal & Mansson, Jan-Anders. (2024). Novel Model for Bicycle Drivetrain Efficiency. <https://doi.org/10.31224/3901>

30. CeramicSpeed, Chain Efficiency Testing: [Электронный ресурс]. URL: <https://ceramicspeed.com/en-eu/pages/chain-efficiency-testing>].

31. Josh Patterson, CeramicSpeed acquires Friction Facts: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bikeradar.com/news/ceramicspeed-acquires-friction-facts>

32. Full load test method: [Электронный ресурс] // Friction Facts. URL: <https://web.archive.org/web/20180421124005/http://www.friction-facts.com/equipment/chain-full-load>

33. Full tension test method: [Электронный ресурс] // Friction Facts. URL: <https://web.archive.org/web/20180421123810/http://www.friction-facts.com/equipment/full-tension-test-method>

34. ZeroFrictionCycling: [Электронный ресурс]. URL: <https://zerofrictioncycling.com.au/>

35. Chain Longevity Testing – Full Test Brief: [Электронный ресурс] // ZeroFrictionCycling. URL: <https://zerofrictioncycling.com.au/wp-content/uploads/2018/04/Chain-Longevity-Testing-Full-test-brief.pdf> .

36. Доценко А.И., Буяновский И.А. / Основы триботехники. Учебник. - М.: Инфра-М, 2014.

37. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов. Справочник. – под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. – М.: Машиностроение, 2008.

Pletnev L.A., Breki A.D.

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF MOUNTING ANGLE SENSORS ON ELECTRIC MOTORS

Abstract

This review examines modern methods and equipment for testing and studying chain gears, including specialized stands for bicycle transmissions. Their advantages, limitations and promising areas of development are analyzed, such as the use of new-generation sensors, automation of test processes. Special attention is paid to the issues of standardization of testing and adaptation of industrial methods to the specifics of the cycling industry.

Keywords: Chain, chain drive, test rig, chain drive efficiency, chain wear.