

**Информация об авторах****Authors**

Черепанов Анатолий Петрович – д. т. н., профессор кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: boning89@mail.ru.

Ляпустин Павел Константинович – к. т. н., заведующий кафедрой управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: lpk62@mail.ru.

Anatolii Petrovich Cherepanov – Angarsk State Technical University (ASTU), Professor of the Subdepartment of Management of Road Transport, Doctor of Engineering Science, Angarsk, e-mail: boning89@mail.ru.

Pavel Konstantinovich Lyapustin – Angarsk State Technical University (ASTU), head of the Subdepartment of Management of Road Transport, Ph.D. in Engineering Science, Angarsk, e-mail: lpk62@mail.ru.

Для цитирования**For citation**

Черепанов А. П. Повышение качества контроля и диагностики при подготовке к декларированию и сертификации единичных и уникальных машин / А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 44–51. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).44-51.

Cherepanov A. P., Lyapustin P. K. Povysheniye kachestva kontrolya i diagnostiki pri podgotovke k deklarirovaniyu i sertifikatsii yedinichnykh i unikal'nykh mashin [Improving the quality of control and diagnostics in preparation for the declaration and certification of single and unique machines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 64, No. 4. Pp. 44–51. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).44-51.

УДК 621.833

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).51–57

В. Н. Анферов, А. П. Ткачук, И. В. Шишлова

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская федерация
 Дата поступления: 25 октября 2019 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ ДЛЯ СПИРОИДНЫХ РЕДУКТОРОВ

Аннотация. В статье приведены основные виды спироидных передач. Описаны преимущества при выборе передач червячного класса и расчет коэффициента полезного действия для них. Потери мощности в зацеплении составляют значительную долю потерь в червячных передачах. Доказано, что коэффициент полезного действия передачи уменьшается при увеличении передаточного числа в червячной паре. С ростом скорости скольжения коэффициент трения скольжения уменьшается. Выбор смазочных материалов для спироидных редукторов является актуальной задачей, несмотря на их преимущества перед червячными по нагрузочной способности и коэффициенту полезного действия. Описана полномасштабная программа испытаний, выполненная при разработке новых масел и присадок к ним для зубчатых передач. В работе проводится оценка антифрикционных свойств трансмиссионных масел для спироидных редукторов. Испытания были проведены на специальном стенде, выполненном по разомкнутому контуру, схема которого приведена в статье. Испытания проходили в три этапа (каждый описан). Были проведены исследования для трех сортов трансмиссионных масел (ТМ-5-18 «ТАД-17», ТМ-4-18 «U-tech Forward», ТМ-4-12 «LUXOIL»), получивших широкое распространение в механизмах путевых, подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин, лучшим из которых по антифрикционным свойствам является масло ТМ-4-18 «U-tech Forward». Приведены экспериментальные зависимости коэффициента полезного действия спироидных редукторов РС31,5-11 и РС31,5-81 в зависимости от момента T_2 , испытанных с маслом ТМ-4-18 «U-tech Forward».

Ключевые слова: спироидная передача, редуктор, вращающий момент, коэффициент полезного действия, трансмиссионное масло, стенд, натурные испытания.

V. N. Anferov, A. P. Tkachuk, I. V. Shishlova

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation
 Received: October 25, 2019

THE RESEARCH RESULTS OF OPERATIONAL PROPERTIES OF TRANSMISSION OILS FOR SPIROID GEARBOX

Abstract. The article presents main types of spiroid transmissions. It describes the advantages when choosing transmissions of a worm-gear class and calculates the efficiency for them. Power losses in gearing account for a considerable share of losses in worm-gear transmissions. It is proved that the efficiency of transmission decreases at increase in transfer number in a worm gear pair. With the sliding speed growth, the coefficient of a sliding friction decreases. The choice of lubricants for spiroid gearboxes is a relevant problem, despite their advantages before worm ones with respect to load ability and efficiency. The authors describe a full-scale program of tests

executed when developing new oils and additives to them for toothed gears. This work deals with the assessment of antifrictional properties of gearbox oils for spiroid gearboxes. The tests were carried out on a special stand, made as an open circuit, the diagram of which is provided in the article. The tests were performed in three steps (the paper describes each of them). Studies have been conducted for three grades of gear oils (TM-5-18 "TAD-17", TM-4-18 "U-tech Forward", TM-4-12 "LUXOIL"), the best of which, with respect to anti-friction properties, is oil TM-4-18 "U-tech Forward". The efficiency dependencies of PC31.5-11 and PC31.5-81 spiroid gearboxes are presented depending on the moment T_2 tested with the TM-4-18 "U-tech Forward" oil.

Keywords: spiroid transmission, gearbox, rotation moment, efficiency, gear oil, stand, field tests.

Введение

В государственном стандарте «Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения» [1] приводится классификация спироидных передач с углом скрещивания осей червяка и колеса, равным 90° и постоянным передаточным отношением. Далее представлены основные виды спироидных передач (рис. 1) [2–5].

Технология изготовления спироидных передач сходна с технологией изготовления червячных передач, поэтому они относятся к передачам червячного класса.

С конструктивной точки зрения эти передачи могут реализовывать ряд преимуществ, а именно – упростить схему привода и передать движение с изменением положения осей валов.

Преимущества передач червячного класса, также как возможность осуществления самоторможения, кинематическая точность, плавность движения, низкий уровень шума способствуют их широкому использованию в приводах машин [6–7]. Спироидные передачи не только имеют указанные преимущества, но и обладают превосходством по нагрузочной способности и КПД [8].

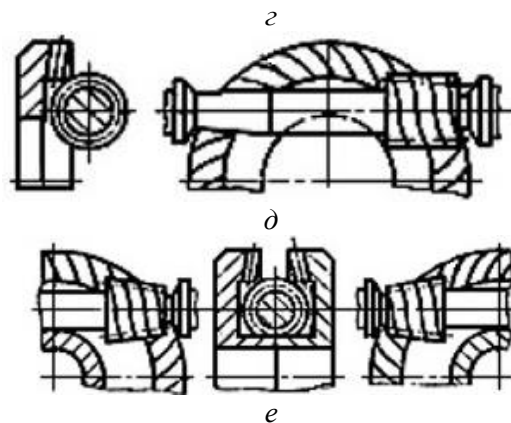
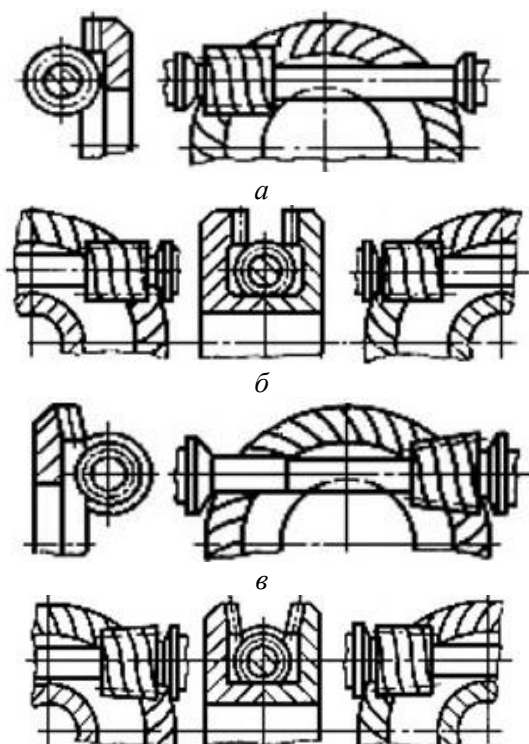


Рис. 1. Основные виды спироидных передач:

a – цилиндрическая; *б* – цилиндрическая двухвенцовая; *в* – коническая; *г* – коническая двухвенцовая; *д* – обратноконическая; *е* – обратноконическая двухвенцовая

КПД для передач червячного класса выражается формулой:

$$\eta = 1 - (\psi_3 + \psi_n + \psi_r + \psi_E), \quad (1)$$

где ψ_3 – потери на трение в зацеплении; ψ_n – потери на трение в подшипниках; ψ_r – потери от перемещения смазки; ψ_E – потери на вращение вентилятора (при его наличии) [9]. Коэффициент ψ_n может учитывать потери в уплотнениях контактного типа.

Потери мощности в зацеплении составляют значительную долю потерь в червячных передачах.

Коэффициент ψ_3 определяют по формуле:

$$\psi_3 = 1 - \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg}(\lambda + \rho)}, \quad (2)$$

где λ – угол подъема витка червяка; ρ – угол трения, величина которого определяется в зависимости от коэффициента трения в контакте витков червяка и зубьев колеса; f – коэффициент трения скольжения в зацеплении.

КПД передачи уменьшается при увеличении передаточного числа в червячной паре. С ростом скорости скольжения коэффициент трения скольжения f уменьшается.

Из-за возможности хрупкого разрушения зубьев чугуны не применяются для ответственных и нагруженных червячных передач. Ниже даны значения коэффициентов трения f и приведенного угла трения ρ (табл. 1). Из таблицы следует, что от материала венца червячного колеса, скорости скольжения $v_{ск}$, твердости и шероховатости рабо-



чих поверхностей витков червяка существенно зависит коэффициент трения.

Резкое (скачкообразное) увеличение коэффициента трения происходит при $\sigma_n \geq \sigma_{зд}$. Начальная форма заедания развивается в задиры и потерю работоспособности [9]. Требования к качеству смазочного материала возрастают при применении заменителей высокооловянистых бронз.

В предлагаемой статье отражены результаты натуральных испытаний спироидных редукторов с различными сортами трансмиссионных масел.

Несмотря на преимущества спироидных редукторов перед червячными по нагрузочной способности и КПД, задача выбора смазочных материалов для них является актуальной.

Полномасштабная программа испытаний, предложена Ю. А. Розенбергом, выполненная при

разработке новых масел и присадок к ним [15]. В нее включены четыре этапа [15, 16]. Каждый из них отличается степенью приближения условий проведения экспериментов к реальным условиям эксплуатации.

Выбор способа испытаний зависит от поставленной задачи: предварительная оценка либо завершающий этап испытаний.

Для ответственных узлов либо в процессе подготовки крупносерийного или массового производства проводят полномасштабные испытания. В ряде случаев ограничиваются проведением какого-либо одного этапа [15].

Экспериментальные исследования по оценке трех сортов масел (табл. 2) проведены с целью выбора лучшего из трех.

Таблица 1

Значение коэффициента трения f и приведенного угла трения ρ

| Твердость поверхности витков червяка HRC | Группа материалов венца колеса | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|--------|------------------|--------|-------|--------|-------|--------|------------------|--------|
| | I и II | | | | III | | IV | | | |
| | > 45 | | Остальные случаи | | > 45 | | > 45 | | Остальные случаи | |
| $v_{ск}, \text{ м/с}$ | f | ρ | f | ρ | f | ρ | f | ρ | f | ρ |
| 0,01 | 0,110 | 6°17' | 0,120 | 6°51' | 0,180 | 10°12' | 0,180 | 10°12' | 0,190 | 10°45' |
| 0,05 | 0,090 | 5°09' | 0,001 | 5°43' | 0,140 | 7°58' | 0,140 | 7°58' | 0,160 | 9°05' |
| 0,10 | 0,080 | 4°34' | 0,090 | 5°09' | 0,130 | 7°24' | 0,130 | 7°24' | 0,140 | 7°58' |
| 0,25 | 0,065 | 3°43' | 0,075 | 4°17' | 0,100 | 5°43' | 0,100 | 5°43' | 0,120 | 6°51' |
| 0,50 | 0,055 | 3°09' | 0,065 | 3°43' | 0,090 | 5°09' | 0,090 | 5°09' | 0,100 | 5°43' |
| 1,0 | 0,045 | 2°35' | 0,055 | 3°09' | 0,070 | 4°00' | 0,070 | 4°00' | 0,090 | 5°09' |
| 1,5 | 0,040 | 2°17' | 0,050 | 2°52' | 0,065 | 3°43' | 0,065 | 3°43' | 0,080 | 4°34' |
| 2,0 | 0,035 | 2°00' | 0,045 | 2°35' | 0,055 | 3°09' | 0,055 | 3°09' | 0,070 | 4°00' |
| 2,5 | 0,030 | 1°43' | 0,040 | 2°17' | 0,050 | 2°52' | – | – | – | – |
| 3,0 | 0,028 | 1°36' | 0,035 | 2°00' | 0,045 | 2°35' | – | – | – | – |
| 4 | 0,024 | 1°22' | 0,031 | 1°47' | 0,040 | 2°17' | – | – | – | – |
| 5 | 0,022 | 1°16' | 0,029 | 1°40' | 0,035 | 2°00' | – | – | – | – |
| 8 | 0,018 | 1°02' | 0,026 | 1°29' | 0,030 | 1°43' | – | – | – | – |
| 10 | 0,016 | 0°55' | 0,024 | 1°22' | – | – | – | – | – | – |
| 15 | 0,014 | 0°48' | 0,020 | 1°09' | – | – | – | – | – | – |
| 24 | 0,013 | 0°45' | – | – | – | – | – | – | – | – |

Таблица 2

Характеристики исследуемых трансмиссионных масел

| Показатели | ТМ-4-12 «LUXOIL» | ТМ-4-18 «U Tech Forward» | ТМ-5-18 «ТАД-17» |
|---|------------------|--------------------------|------------------|
| | 2 | 3 | 4 |
| 1 | | | |
| Кинематическая вязкость, мм ² /с, при $t_m=100$ °С | 16,5 | 13,5 | 17,5 |
| Температура вспышки в открытом тигле, °С | 190 | 180 | 200 |
| Температура застывания, °С | –25 | –30 | –25 |
| Индекс задиры, Н | 553 | 549 | 568 |
| Нагрузка сваривания, Н | 3 720 | 3 479 | 3 687 |
| Плотность при 20 °С, кг/м ³ | 904 | 900 | 907 |

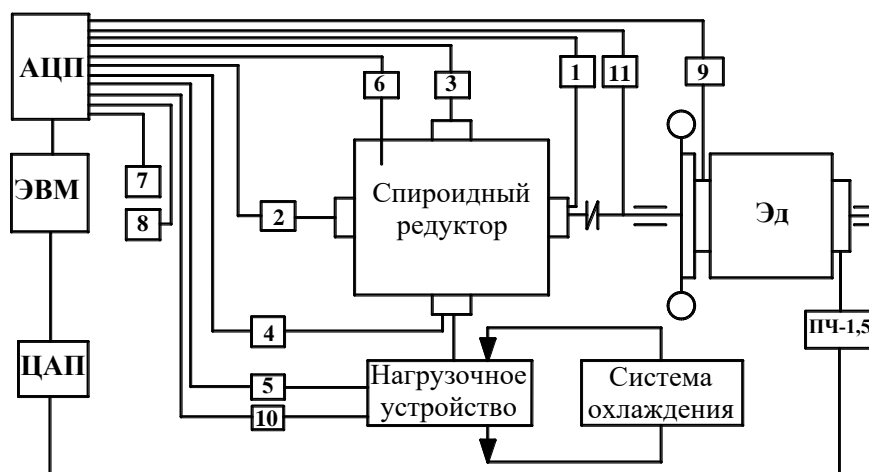


Рис. 2. Схема испытательного стенда

Таблица 3

Основные параметры исследованных спироидных передач в соответствии с ГОСТ 22850-77

| Параметры передач | Передача 1 | Передача 2 |
|--|--|--------------------------|
| Межосевое расстояние a_w , мм | 31,5 | |
| Передаточное число u_{12} | 11 | 81 |
| Материал червяка | Сталь 45, $HR = 48-53$ | Сталь 40X, $HRC = 48-53$ |
| Обработка поверхности витков червяка | Шлифовка и полировка до шероховатости не более $R_a 0,63$ | |
| Материал венца колеса | Бронза БрА9Ж4 ГОСТ 1628-78 | |
| Параметры червяка: | | |
| – модуль m , мм | 1,75 | 0,8 |
| – число заходов z_1 | 4 | 1 |
| – делительный угол подъема линии витков γ | $19^\circ 44' 49''$ | $2^\circ 02' 30''$ |
| – вид червяка | SZK1 | |
| – направление линии витков | Правое | |
| – делительный осевой угол профиля витков | Для правой стороны $\alpha_{xR} = 8^\circ$ Для левой стороны $\alpha_{xL} = 32^\circ$ | |

Испытания проведены на стенде, выполненном по разомкнутому контуру (рис. 2).

Разомкнутый метод нагружения обеспечивает измерение (задание) вращающих моментов на валах редуктора с необходимой точностью ($\pm 1\%$). Далее приведены основные параметры спироидных передач двух редукторов с передаточными числами 11 и 81, которые испытывались с тремя сортами масел (рис. 3). Корпуса редукторов изготовлены литыми из алюминиевого сплава АЛ2. Охлаждение редукторов осуществлялось рассеиванием тепла в окружающую среду (без вентилятора).

Перед испытаниями редукторы проходили обкатку в режиме холостого хода при частоте вращения червяка $n_1 = 1400$ об./мин. с целью проверки качества сборки.

Испытания редукторов проводилось в три этапа. На первом, предварительном этапе испытаний передачи редуктора прирабатывались. Нагрузку увеличивали ступенчато после стабилизации температуры в масляной ванне редуктора. Качество приработки зацепления оценивали путем замера пятна контакта на зубьях колеса. Обкатку считали законченной, если размеры и расположение полученного пятна контакта соответствовали минимально допустимым значениям по 7-ой степени точности ГОСТ 3675-81. Обкатка для получения, регламентированного ГОСТом пятна контакта, продолжалась от 10 до 15 ч.

На втором, основном этапе испытаний, определяли температурный режим работы редуктора с тремя сортами масел. Зависимость температуры масла от времени работы редукторов в непрерывном режиме представлена (рис. 3, 4).

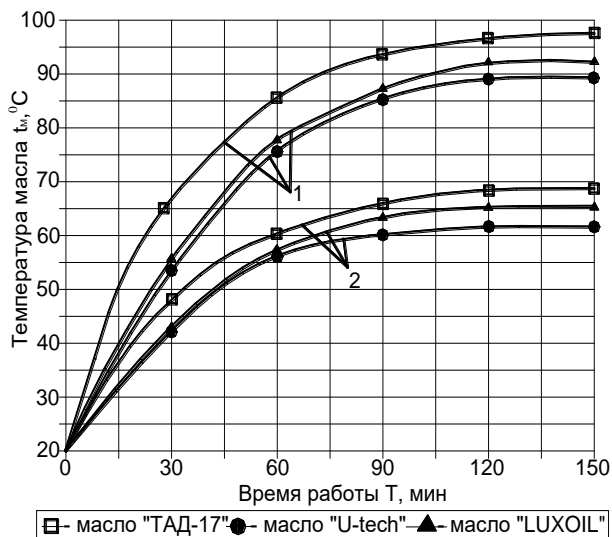


Рис. 3. Графики зависимостей температуры масла t_m от времени работы редукторов РС31,5-81 (1) и РС31,5-11 (2) при $T_2 = 28\text{Н}\cdot\text{м}$

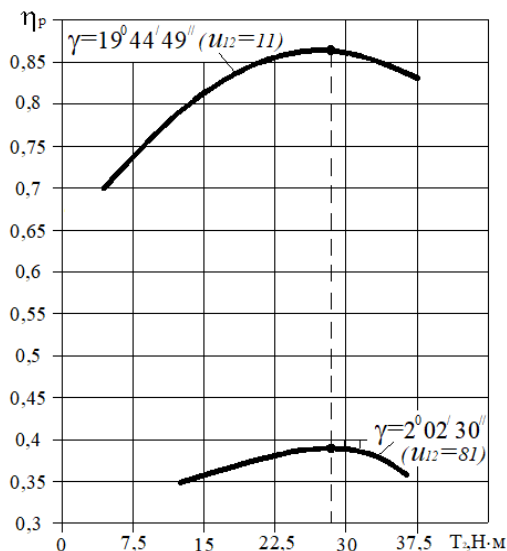


Рис. 4. Зависимости среднего значения коэффициента полезного действия спироидных редукторов РС31,5 от вращающего момента T_2

Из приведенных графиков видно, что в процессе работы рост температуры масла ТМ-5-18 «ТАД-17» выше, чем у других масел. Для масла ТМ-4-18 «U-tech Forward» наблюдался

обратный эффект – в процессе нагрева до постоянной температуры оно имело наименьший рост температуры. Потери на трение как при нагреве, так и в процессе установившейся температуры были наименьшими.

Масло ТМ-4-12 «LUXOIL» занимает промежуточное положение по температурному режиму.

Следует отметить, что различие по нагреву масел увеличивается с возрастанием передаточного числа редуктора с 11 до 81. Отсюда следует, что эффект от применения масел с лучшими антифрикционными свойствами достигается с увеличением передаточных чисел (возрастанием скорости скольжения в зацеплении) [16, 17].

На третьем этапе определяем КПД редукторов. В качестве смазки было выбрано масло ТМ-4-18 «U-tech Forward».

КПД редуктора η_p оценивается в интервале изменения нагрузочного момента 7,5–37,5 Н·м по формуле

$$\eta_p = \frac{T_2}{u_{12}T_1},$$

где T_1 , T_2 – вращающиеся моменты на валах редуктора; u_{12} – передаточное число исследованных редукторов.

После обработки экспериментальных данных построены графики зависимостей КПД от вращающих моментов T_2 .

Выводы

1. Натурные сравнительные испытания спироидных редукторов с тремя сортами трансмиссионных масел позволили установить их антифрикционные свойства по нагреву. По этому показателю из трех проверенных масел лучшим является масло ТМ-4-18 «U-tech Forward» Новокуйбышевского завода масел и присадок.

2. Получены зависимости КПД спироидных редукторов РС31,5-11 и РС31,5-81 от момента T_2 на выходном валу. Эти данные позволяют обоснованно осуществлять выбор мощности двигателя для механизмов машин на основе спироидных передач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 22850-77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения. Введ. 1979-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1979. 65 с.
- Saari O.E. Speed-Reduction Gearing, Patent USA №2696125, 1954.
- Pat. 2954704 USA. Skew-axis gearing / O.E. Saari. published on 04-10-1960.
- А.с. 208396 (СССР). Зубчатая передача с перекрещивающимися осями./ А.К. Георгиев, В.И. Гольдфарб. Заявл. 19.07.1966 ; опубл. 07.12.1982. Бюл. № 45.
- Сергеева И.В. Моделирование зацепления при проектировании приводов машин на основе спироидных передач : дис. ...канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 176 с.



6. Гольдфарб В.И. Разработка, исследование и производство спироидных передач – основное научное направление Института механики ИжГТУ // Современные информационные технологии. Проблемы исследования проектирования и производства зубчатых передач : сб. докл. междунар. науч. семинара. Ижевск, 2001. С. 13–21.
7. Трубачев Е.С. Основы анализа и синтеза зацепления реальных спироидных передач : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск, 2004. 38 с.
8. Трубачев Е.С. К выбору параметров спироидной передачи с увеличенным коэффициентом перекрытия при произвольном расположении осей // Автоматизированное проектирование в технологической подготовке производства : сб. науч. тр. Ижевск, 1996. С. 10–20.
9. Часовников Л.Д. Передачи зацеплением. М., Машиностроение, 1969. 468 с.
10. Анферов В.Н. Создание приводов подъемно-транспортных машин на основе спироидных передач : дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 2002. 251 с.
11. Nelson W.D. Spiroid gearing // *Machine desing*. 1961. № 3. P. 136-144.
12. Георгиев А.К., Гольдфарб В.И., Кунивер А.С. Определение продольных линий и заострения зубьев колеса ортогональной спироидной передачи с цилиндрическим червяком выпукло-вогнутого профиля // Механические передачи. Ижевск, 1975. С. 3–7.
13. О результатах сравнительных лабораторно-дорожных испытаний спироидных и гипоидных главных передач приводных мостов автомобилей на противозадирную стойкость / В.А. Умняшкин и др. // Перспективы развития и использования спироидных передач и редукторов. Ижевск, 1979. С. 80–84.
14. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. М. : Машиностроение, 1970. 312 с.
15. Решиков В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач. М. : Машиностроение, 1975. 232 с.
16. Анферов В.Н. Ковальков А.А., Ткачук А.П. Исследование эксплуатационных показателей спироидного редуктора РС31.5-11 с различными сортами трансмиссионных масел // Теория и практика зубчатых передач : сб. науч. тр. Ижевск, 2004. С. 214–218.
17. Сравнительная оценка антифрикционных свойств трансмиссионных масел для спироидных передач / Анферов В.Н. и др. // Изв. Самар. науч. центра Рос. академии наук. 2011. Т. 13, № 4 (3). С. 671–675.

REFERENCES

1. GOST 22850-77. Peredachi spiroidnye. Terminy, opredeleniya i oznacheniya []. Intr. 1979-01-01 [GOST 22850-77. Spiroid transmissions. Terms, definitions and notation]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1979. 65 p.
2. Saari O.E. *Speed-Reduction Gearing*. Patent USA No.2696125, 1954
3. Saari O.E. *Skew-axis gearing*. Pat. 2954704 USA. Published on 04-Oct-1960
4. Georgiev A.K., Gol'dfarb V.I. Author's certificate 208396 (USSR). *Zubchataya peredacha s perekreshchivayushchimisya osyami [Gearing with overlapping axes]*. Publ. in B.I., 1968, No.3.
5. Sergeeva I.V. Modelirovanie zatsepleniya pri proektirovanii privodov mashin na osnove spiroidnykh peredach. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Simulation of gearing when designing drives for machines based on spiroid gears. Ph.D. (Engineering) diss.]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2012. 176 p.
6. Gol'dfarb V.I. Razrabotka, issledovanie i proizvodstvo spiroidnykh peredach – osnovnoe nauchnoe napravlenie Instituta mekhaniki IzhGTU [Development, research and production of spiroid gears is the main scientific direction of the Institute of Mechanics of ISTU]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii. Problemy issledovaniya proektirovaniya i proizvodstva zubchatykh peredach. Sbornik dokladov mezhdunarodnogo nauchnogo seminar [Modern information technologies. Problems of research design and production of gears. Collection of reports of the international scientific seminar]*. Izhevsk, 2001, pp. 13-21.
7. Trubachev E.S. Osnovy analiza i sinteza zatsepleniya real'nykh spiroidnykh peredach. Avtoreferat dis. ... dokt.tekhn.nauk [Fundamentals of analysis and synthesis of engagement of real spiroid gears. Author's abstract of D. Sc. (Engineering) diss.]. Izhevsk, 2004. 38 p.
8. Trubachev E.S. K vyboru parametrov spiroidnoi peredachi s uvelichennym koefitsientom perekrytiya pri proizvol'nom raspolozhenii osej [On the selection of spiroid transmission parameters with an increased overlap coefficient for an arbitrary arrangement of axes]. *Avtomatizirovanoe proektirovanie v tekhnologicheskoi podgotovke proizvodstva: Sb. nauchnykh trudov [Computer-aided design in the technological preparation of production: Coll. of scientific works]*. Izhevsk, 1996, pp.10-20.
9. Chasovnikov L.D. Peredachi zatsepleniem. Izd. 2-e pererabotannoe i dopolnennoe [Toothed gearings. 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 468 p.
10. Anferov V.N. Sozdanie privodov pod'emno-transportnykh mashin na osnove spiroidnykh peredach. Dis. ... dokt. tekhn. nauk [Creation of drives of hoisting-and-transport machines based on spiroid gears. D. Sc. (Engineering) diss.]. Novosibirsk, 2002. 251 p.
11. Nelson W.D. Spiroid gearing. *Machine design*, 1961, No.3, p. 136-144.
12. Georgiev A.K., Gol'dfarb V.I., Kuniver A.S. Opredelenie prodol'nykh linii i zaostreniya zub'ev kola ortogonal'noi spiroidnoi peredachi s tsilindricheskim chervyakom vypuklo-vognutogo profilya [Determination of longitudinal lines and sharpening of the teeth of the wheel of an orthogonal spiroid gear with a cylindrical worm convex-concave profile]. *Mekhanicheskie peredachi [Mechanical Transmissions]*, Izhevsk, 1975, pp. 3-7.
13. Umnyashkin V.A., Kolmakov V.I., Ivaikin V.A., Goryanskii G.N. O rezul'tatakh sravnitel'nykh laboratorno-dorozhnykh ispytaniy spiroidnykh i gipoidnykh glavnykh peredach privodnykh mostov avtomobilei na protivozadimuyu stoikost' [On the results of comparative laboratory and road tests of spiroid and hypoid main gears of drive axles of automobiles for extreme pressure resistance]. *Perspektivy razvitiya i ispol'zovaniya spiroidnykh peredach i reduktorov [Prospects for the development and use of spiroid gears and gearboxes]*. Izhevsk, 1979, pp. 80-84.
14. Rozenberg Yu.A. Vliyanie smazochnykh masel na nadezhnost' i dolgovechnost' mashin [The influence of lubricating oils on the reliability and durability of machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 312 p.
15. Reshchikov V.F. Trenie i iznos tyazhelonagruzhenykh peredach [Friction and wear of heavily loaded gears]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 232 p.
16. Anferov V.N., Koval'kov A.A., Tkachuk A.P. Issledovanie ekspluatatsionnykh pokazatelei spiroidnogo reduktora RS31.5-11 s razlichnymi sortami transmisionnykh masel [The study of operational performance of the spiroid gearbox PC31.5-11 with various grades of gear oils]. *Teoriya i praktika zubchatykh peredach : sb. nauch. tr. [Theory and practice of toothed gearings: the collection of scientific papers]*. Izhevsk, 2004, pp. 214 – 218.
17. Anferov V.N., Tkachuk A.P., Sergeeva I.V., Kuz'min A.V. Sravnitel'naya otsenka antifriktsionnykh svoystv transmisionnykh masel dlya spiroidnykh peredach [Comparative evaluation of antifricition properties of gear oils for spiroid gears]. *Mezhdunarodnaya nauchno-*



tekhnicheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy tribologii», Samara, 22-24 noyabrya 2011 [International scientific and technical conference "Actual problems of tribology", Samara, November 22-24, 2011]. Izvestiya Samar'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk [The Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], Vol. 13, No.4 (3), 2011, pp. 671-675.

Информация об авторах

Анферов Валерий Николаевич – д. т. н., профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: avn43@mail.ru

Ткачук Александр Павлович – к. т. н., доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: tkachukap@mail.ru

Шишлова Ирина Владиславовна – к. т. н., доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск e-mail: shishlovaiv@mail.ru

Authors

Valerii Nikolaevich Anferov – Doctor of Engineering Science, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: avn43@mail.ru

Alexandr Pavlovich Tkachuk – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: tkachukap@mail.ru

Irina Vladislavovna Shishlova – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, e-mail: shishlovaiv@mail.ru

Для цитирования

Анферов В. Н. Результаты исследований эксплуатационных свойств трансмиссионных масел для спироидных редукторов / В. Н. Анферов, А. П. Ткачук, И. В. Шишлова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 51–57. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).51-57.

For citation

Anferov V. N., Tkachuk A. P., Shishlova I. V. Rezul'taty issledovaniy ekspluatatsionnykh svoystv transmis-sionnykh masel dlya spiroidnykh reduktorov [The research results of operational properties of transmission oils for spiroid gears]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 64, No. 4. Pp. 51–57. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).51-57.

УДК 531.36

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).57–64

М. А. Новиков

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская федерация

Дата поступления: 10 октября 2019 г.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ ДВИЖЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ СУЩЕСТВОВАНИИ ЧАСТНОГО ИНТЕГРАЛА

Аннотация. Изучение многих механических объектов на транспорте можно моделировать тяжелыми твердыми телами. Для их описания удобнее использовать системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассматривая исследуемые объекты покоящимися на платформе, в вагоне или иных движущихся транспортных средствах, изолированными от влияния диссипативных сил, можно считать систему консервативной. При изучении динамических свойств модельных систем можно опираться на свойства известных консервативных систем, предпочтительно автономных. В таких системах существуют первые интегралы уравнений движения. Среди консервативных систем наиболее популярна задача о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки. В самом общем виде для нее известны первые интегралы: полной энергии, момента количества движения, интеграл Пуассона. Для трех хорошо изученных случаев существования четвертого общего интеграла известны основные динамические свойства систем: записаны аналитические решения в форме эллиптических или гиперэллиптических функций, найдены асимптотики решений, выделены стационарные движения, проведены исследования их устойчивости в каждом случае. В настоящее время интерес к исследованию привлекают автономные консервативные системы с частным интегралом. Хотя систем с такими интегралами довольно много, прежде всего, изучению подлежит частный интеграл Гесса. В предложенной статье проведено исследование устойчивости стационарных движений твердого тела вокруг неподвижной точки в случае существования частного интеграла Гесса. Одним из стационарных движений рассматривается состояние покоя. Оно является наиболее распространенным на транспорте. При расположении центра масс выше начала координат (осями координат выбраны главные оси тела) показана неустойчивость состояния покоя. Это свойство установлено из существования корней характеристического уравнения возмущенного движения с положительной вещественной частью. Достаточные условия устойчивости устанавливаются вторым методом Ляпунова – построением знакоопределенных функций Ляпунова. В случае центра масс ниже оси координат получено совпадение достаточных условий устойчивости с необходимыми. В этом случае достаточные условия устойчивости устанавливаются линейными слагаемыми дифференциальных уравнений движения. Для перманентного вращения проведено исследование необходимых условий устойчивости в случаях вырождений характеристического уравнения, составленного по матрице линейной части дифференциальных уравнений возмущенного движения. Показано, что вырождения возникают при выполнении равенства Аппельрота, когда существует дополнительный частный интеграл Гесса; без дополнительного интеграла при существовании некоторого соответствия между статическими и динамическими параметрами системы; при одновременном выполнении первых двух случаев. Во всех изученных случаях не накладывается каких-либо дополнительных ограничений на параметры системы, кроме требования к моментам инерции твердого тела. При обработке символьной информации применяется система аналитических вычислений на