

УДК 621.833.01

DOI 10.18698/0536-1044-2018-2-68-74

Моделирование контактных нагрузок в среде ANSYS для неэвольвентных зацеплений

С.И. Каратушин, Д.А. Храмова, П.Н. Бокучава

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1

Simulation of Contact Loads in the ANSYS Environment for Non-Involute Meshing

S.I. Karatushin, D.A. Khramova, P.N. Bokuchava

Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1



e-mail: karatsi@bk.ru, khdoria@mail.ru, Bokuchava.PN@Astronomikon.ru



Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния контактов с неэвольвентным зацеплением в среде ANSYS для циклоидного, эксцентриково-циклоидального и червячных редукторов. Для каждого из этих редукторов рассмотрены действующие напряжения и их распределение, пятно и статус контакта. Минимальная площадь контакта реализуется в циклоидном редукторе, максимальная — в эксцентриково-циклоидальном зацеплении, где эксцентрик работает в условиях трехосного напряженного состояния. В соответствии с анализом напряженно-деформированного состояния наибольший коэффициент полезного действия следует ожидать в циклоидном редукторе, а наименьший — в эксцентриково-циклоидальном. Результаты проведенного исследования показали, что эксцентриково-циклоидальное зацепление не имеет никаких преимуществ перед другими конструкциями. Установлено, что среди рассмотренных на основе анализа напряженно-деформированного состояния зацеплений наилучшими техническими характеристиками обладает циклоидный редуктор.

Ключевые слова: контактные напряжения, напряженно-деформированное состояние, циклоидный редуктор, эксцентриково-циклоидальное зацепление, червячные редукторы, ANSYS



This work analyzes the stress-strain state of contacts with non-involute meshing for cycloid, eccentric and worm gearboxes using ANSYS software. For each of the listed gearboxes, the acting stresses and their distribution, the contact patch and the status of the contacts are examined. The minimum contact area is realized in the cycloid gearbox and the maximum contact area in the eccentric-cycloidal gearing where the eccentric operates in the triaxial stress state. In accordance with the stress-strain state analysis, the highest efficiency should be expected in the cycloid gearbox and the lowest in the eccentric-cycloidal gearboxes. The results obtained has shown that the eccentric-cycloidal gearing has no advantages over the other types of gearing. It has been established that the cycloid gearbox has the best technical characteristics among the types of gearing examined through the stress-state analysis.

Keywords: contact stresses, stress-strain state, cycloid gearbox, eccentric-cycloid gearing, worm gearbox, ANSYS

Напряженно-деформированное состояние (НДС) контактного зацепления в значительной степени определяет такой важный показатель редуктора, как коэффициент полезного действия (КПД). Аналитический расчет контактных нагрузок всегда представляет значительные трудности как для эвольвентного, так и для других зацеплений с большой площадью контакта и долей передаваемого момента при трении скольжением. Появление компьютерных программ позволило моделировать НДС контакта, объяснить физическую сущность эффективности зацепления и использовать полученные результаты для проверочных расчетов. Сравнительный анализ трех типов редукторов, в которых использованы неэвольвентные зацепления, — циклоидного (ЦР), эксцентриково-циклоидального (ЭЦР) и червячного — основан на общем параметре — большом передаточном отношении одной ступени.

Цель работы — анализ НДС зацепления ЦР.

В качестве элементов сравнения рассмотрены червячные (цилиндрические и глобоидные) редукторы с большой площадью контакта, где крутящий момент передается за счет трения скольжения, и недавно появившееся эксцентриково-циклоидальное зацепление. В последнем, называемом его разработчиками редуктором, передача крутящего момента происходит обкатыванием эксцентрика.

Циклоидный редуктор. Этот механизм принято называть планетарным редуктором с эпициклоидным цевочным зацеплением. Кинематика ЦР достаточно подробно описана в работах [1–5]. Расчет действующих нагрузок и контактных напряжений преимущественно для циклоидального диска выполняется аналитическими методами [2, 6, 7]. Компьютерные программы позволяют детально исследовать ЦР и сравнить с другими редукторами.

Для анализа НДС контактов выбрана 3D-модель немецкого мотор-редуктора с бесколлекторным электродвигателем мощностью 0,7 кВт и частотой вращения $3\,000\text{ с}^{-1}$ (рис. 1).

Расчеты НДС контактов проведены с использованием программного комплекса ANSYS Workbench. При разработке 3D-модели принят ряд упрощений для сокращения времени вычислений. В модели — один вращающийся диск (циклоидальный диск), в мотор-редукторе — два. Входной эксцентриковый вал (быстроходный) в мотор-редукторе — подшипник каче-

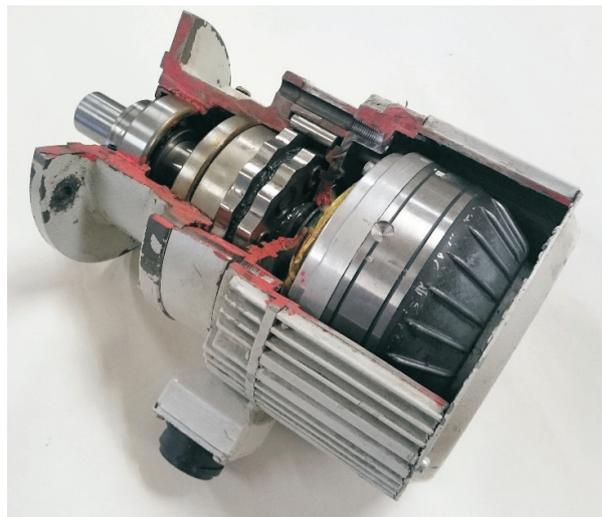


Рис. 1. Внешний вид мотор-редуктора

ния, в модели — подшипник скольжения с коэффициентом трения 0,01. Цевки (цевочное колесо) в корпусе мотор-редуктора могут поворачиваться вокруг своей оси, в модели они неподвижны, с коэффициентом трения 0,01. Указанные допущения несущественно влияют на точность расчета, тем более что он носит сравнительный характер. Геометрические размеры основных деталей мотор-редуктора и модели идентичны.

Из всех деталей ЦР наиболее нагруженной является циклоидальный диск. На рис. 2 приведены результаты анализа НДС деталей ЦР.

Оценка НДС проведена по нормальным напряжениям по оси Y (Normal Stress Y) и наибольшим растягивающим напряжениям (Maximum Principal Stress — MPS). В зоне контакта колеса с цевкой напряжение сжатия составляет 460 МПа, на цевке наибольшее растягивающее напряжение (рис. 2, а) — 725 МПа, давление в контакте циклоидального диска и цевки — 513 МПа (рис. 2, в), статус контакта — скольжение. В остальных местах растягивающее напряжение не превосходит 110 МПа. На циклоидальный диск не действуют изгибающие нагрузки. Распределение нормальных напряжений по оси Y представлено на рис. 2, б, это сжимающие напряжения с наибольшим значением $\sigma_y = -411\text{ МПа}$.

Тихоходной ступенью редуктора служит диск с пальцами (рис. 2, г). Последние подвергаются изгибающему моменту, и наибольшие растягивающие напряжения (150 МПа) возникают в галтелях. Это циклические отнулевые напряжения, значения которых сравнительно

небольшие. В контакте с циклоидальным диском MPS составляет 115 МПа.

Анализ НДС контактов ЦР позволил сделать вывод: нагрузкой, лимитирующей работоспособность деталей редуктора, является давление в контакте циклоидального диска и цевки, равное 513 МПа. Это давление не является критическим при использовании шарикоподшипниковых сталей. Только при многократных циклических нагрузках такое давление может создать очаги разрушения в виде питтинга. В циклоидальном диске (самой нагруженной детали ЦР) нет концентраторов напряжений. Это позволяет изготавливать диск и цевки из шарикоподшипниковой стали с объемной закалкой на максимальную твердость. В циклоидном мотор-редукторе твердость диска и цевки равна

или превышает 62 HRC, что обеспечивает большие значения допускаемых напряжений.

Реализуемое в ЦР НДС контактов объясняет возможность работы такого вида редукторов с большими перегрузками без опасения разрушения в отличие от зубчатых планетарных механизмов. По габаритным размерам рассматриваемый ЦР не имеет преимуществ со сравнимым по передаточному отношению и моменту планетарным редуктором. Большая площадь контакта и высокое удельное давление являются причиной более низкого КПД циклоидного редуктора по сравнению с планетарным вследствие существенных потерь на трение.

Эксцентриково-циклоидальное зацепление. Этот вид зацепления, предложенный В.В. Ста-

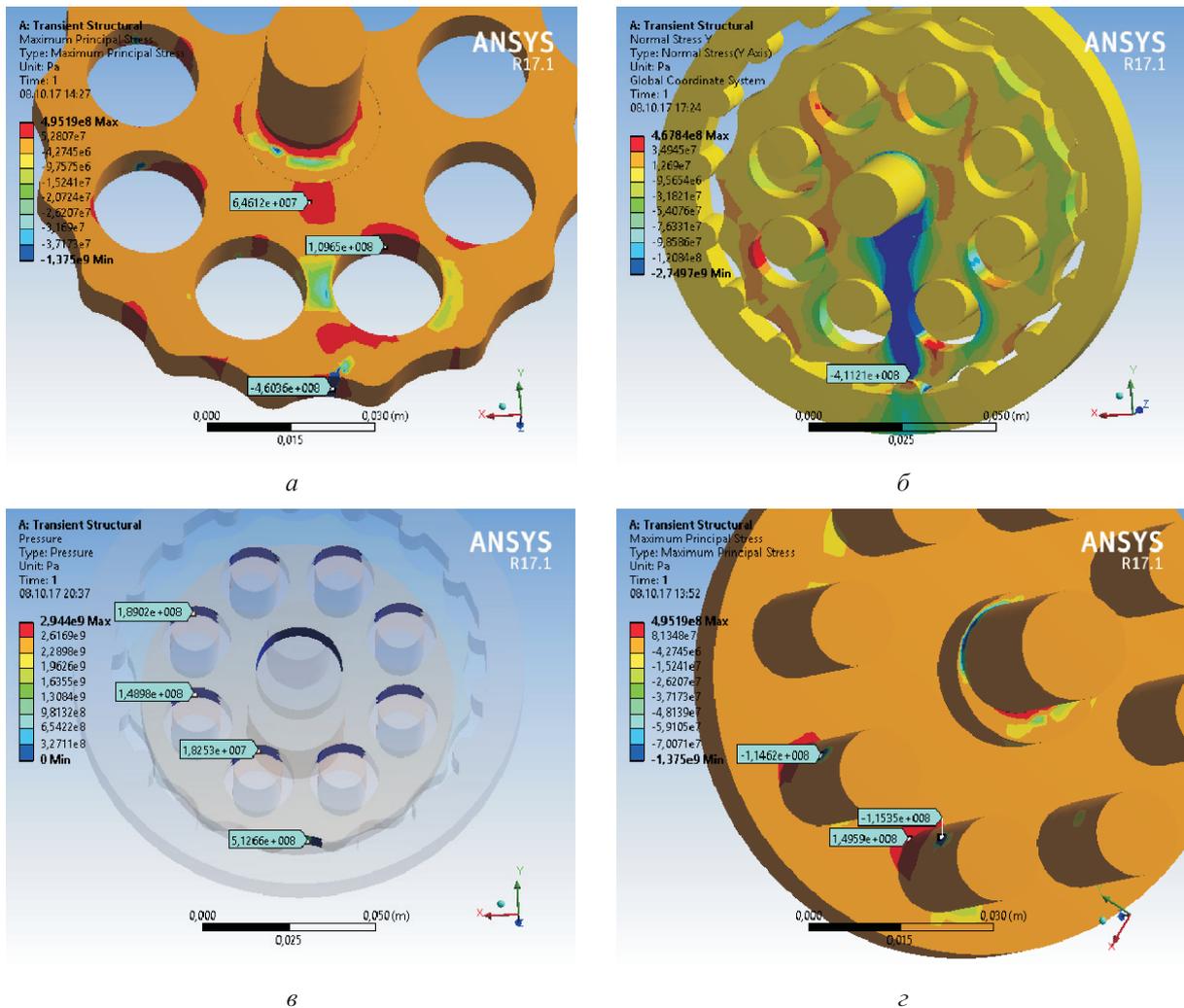


Рис. 2. Результаты анализа НДС деталей ЦР:

- а — распределение наибольших растягивающих напряжений в циклоидальном диске;
- б — распределение нормальных напряжений по оси Y в сборке;
- в — распределение контактного давления в циклоидальном диске, Па;
- г — распределение наибольших растягивающих напряжений в тихоходном диске

новским, С.М. Казакиявичюсом и другими российскими инженерами [8], представляется в виде одноступенчатого редуктора с передаточным отношением, равным 9. Результаты анализа НДС ЭЦР приведены на рис. 3.

Конструкция ступени такова, что геометрические размеры эксцентрика определяет геометрия колеса. Беглое знакомство с таким редуктором указывает на его слабое звено — эксцентрик и его размеры, не позволяющие передавать большие крутящие моменты. По габаритным размерам некорректно сравнивать ЭЦР с одноступенчатым цилиндрическим редуктором, так как последний с передаточным отношением, равным 8 и более, скорее является исключением. При сопоставлении ЭЦР с одноступенчатой планетарной передачей выигрыш будет по всем параметрам на стороне эвольвентного механизма. По габаритным размерам, передаточному отношению и крутящему моменту ЭЦР можно объективно сравнивать с ЦР. При крутящем моменте 150 Н·м в ЭЦР, т. е. в 2 раза меньшем, чем в ЦР, получены следующие результаты. Максимальное давление в контакте ЭЦР — 4 400 МПа, т. е. в 8,5 раза больше, чем в ЦР, и, соответственно, больше площадь контакта. Наибольшее растягивающее напряжение на колесе ЭЦР — 3 842 МПа, т. е. в 8,4 раза больше, чем в ЦР, а на эксцентрике ЭЦР — 714 МПа.

В ЭЦР возникают значительные осевые нагрузки, что требует соответствующей конструкции подшипниковых узлов. Эти нагрузки приводят к большим контактным давлениям и существенным потерям на трение и, соответственно, к низкому КПД. НДС эксцентрика требует применения для него поверхностного упрочнения типа цементации или стали ШХ15 с объемным упрочнением. Сложная конфигурация эксцентрика создает трехосное напряженное состояние, которое совместно с цикличностью действия снижает его ресурс. В целом можно отметить, что ЦР, несмотря на более сложную конструкцию по сравнению с ЭЦР, обладает значительно лучшими техническими характеристиками.

Червячные редукторы. Передача крутящего момента полностью за счет сил трения реализована в червячных редукторах — цилиндрическом и глобоидном. В их зацеплениях необходима определенная конфигурация контакта [9–11]. Статус контакта и распределение давлений наглядно смоделированы в среде ANSYS (рис. 4).

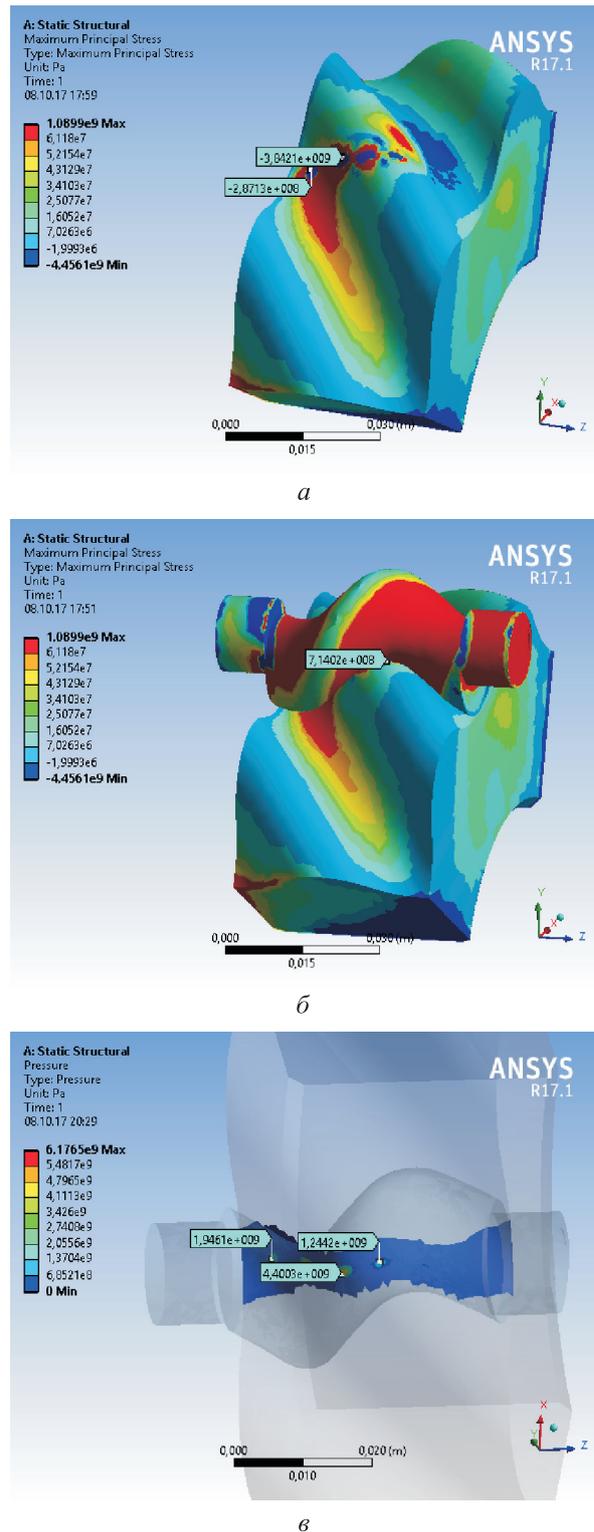


Рис. 3. Результаты анализа НДС ЭЦР:
 а и б — распределение наибольших растягивающих напряжений в сборке и циклоидальном диске, Па;
 в — распределение давления в контакте, Па

Оптимальная форма и размеры пятна контакта, определяемые геометрией зацепления, снижают в нем потери на трение и изгибающие

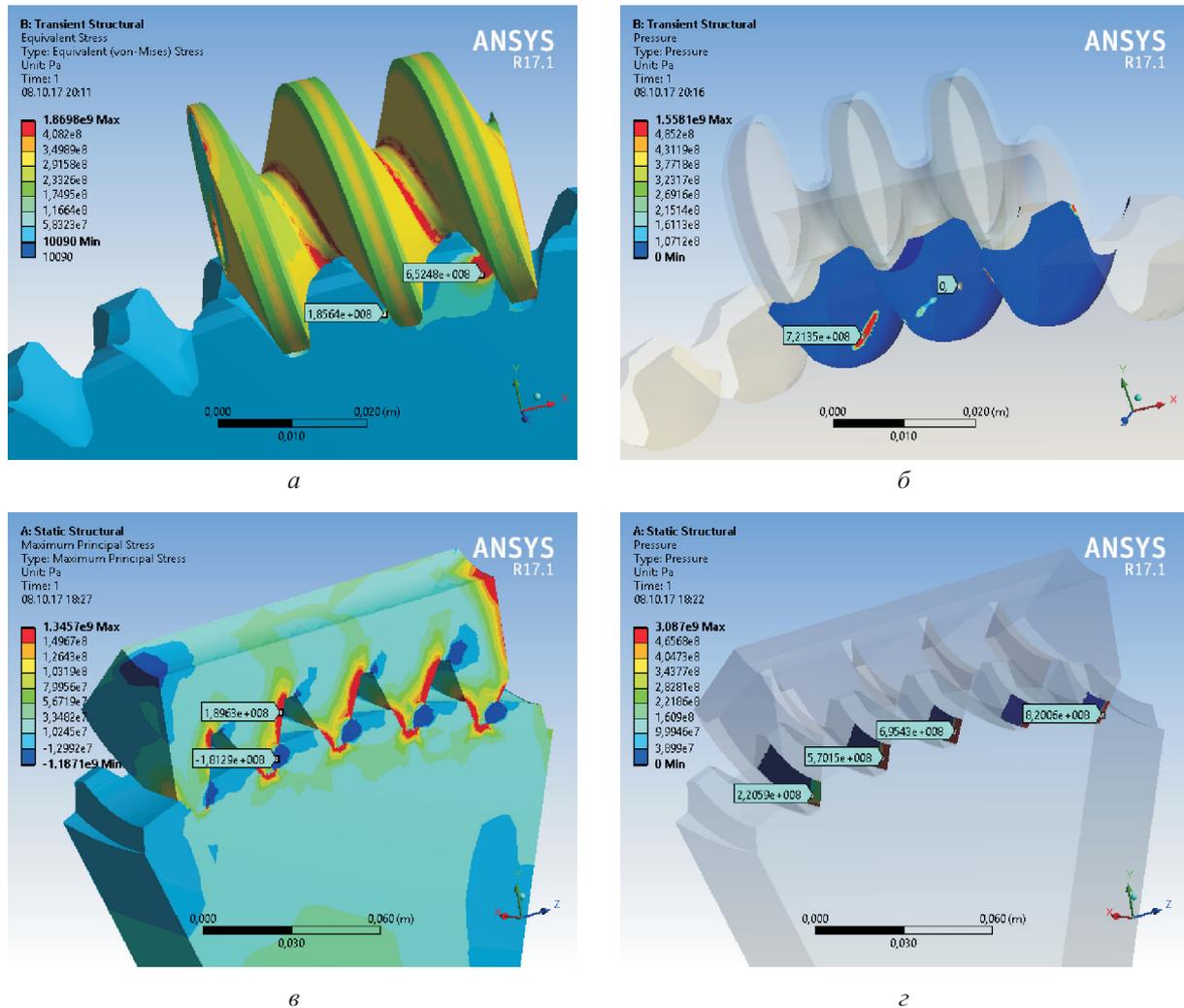


Рис. 4. Результаты анализа НДС червячных редукторов:

a и *б* — распределение эквивалентных напряжений и контактного давления в цилиндрическом редукторе, Па;
в и *г* — распределение наибольших растягивающих напряжений и контактного давления в глобoidном редукторе, Па

нагрузки. Внося изменения в геометрию зацепления червяка и колеса, можно моделировать в ANSYS пятно контакта, его статус и давление. Полученные при моделировании напряжения в зубьях позволят определить допустимые значения напряжений.

Выводы

1. Среди рассмотренных редукторов ЦР обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками: возможностью получения больших передаточных отношений, не критичностью

к перегрузкам, компактностью и достаточно высоким КПД. В отличие от червячного редуктора ЦР лишен эффекта самоторможения, но в ряде случаев может его заменить.

2. ЭЦР в представленном авторами виде в силу больших недостатков вряд ли может представлять практический интерес.

3. По сравнению с аналитическими расчетами компьютерное моделирование контактных нагрузок имеет несомненное преимущество и дает объективную численную информацию об НДС контактных зацеплений редуктора, отвечающих за их основные характеристики.

Литература

- [1] Blagojevic M., Marjanovic N., Djordjevic Z., Stojanovic B., Disic A. A new design of a two-stage cycloidal speed reducer. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2011, vol. 133(8), pp. 085001.

- [2] Upadhyay Chintan, Parameswaran M.A., Venkataram Nithin. Numerical Modeling and Simulation of Cycloidal Speed Reducer for Contact Forces in Robotic Joints. *MSRUAS-SASTech Journal*, 2016, vol. 15, is. 1, pp. 1–4.
- [3] Borislavov B., Borisov I., Panchev V. *Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer Cycloid Stage, Geometry, Element Analyses*. Mechanical Engineering Linnaeus University, Växjö, Sweden, 2012. 90 p.
- [4] Blagojevic M., Kocic M., Marjanovic N., Stojanovic B., Dordevic Z., Ivanovic L., Marjanovic V. Influence of the friction on the cycloidal speed reducer efficiency. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 217–227.
- [5] Blagojevic M., Marjanovic N., Djordjevic Z., Stojanovic B., Marjanovic V., Vujanac R., Disic A. Numerical and Experimental Analysis of the Cycloid Disc Stress State. *Technical Gazette*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 377–382.
- [6] Петровский А.Н., Воронков С.В. К задаче оптимизации внецентроидного циклоидального зацепления. *Труды Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексева*, 2015, № 4(111), с. 198–210.
- [7] Чиркин А.В., Иванов А.С., Ермолаев М.М. Планетарно-цевочные передачи на основе эпициклоидного и гипоциклоидного зацепления. *Современное машиностроение. Наука и образование. Мат. 4 науч.-практ. конф.*, Санкт-Петербург, 19–20 июня 2014 г., Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2014, с. 462–471.
- [8] Леонтьев М.Ю., Раевский В.А., Смоловик А.Е. Обзор достоинств и недостатков эксцентриково-циклоидального зацепления. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*, 2016, № 7–5, с. 54–57.
- [9] Левитан Ю.Ф., Обморнов В.П., Васильев В.И. *Червячные редукторы. Справочник*. Ленинград, Машиностроение, 1985. 168 с.
- [10] Анфимов М.И. *Редукторы, конструкции и расчеты*. Москва, Машиностроение, 1993. 463 с.
- [11] Петров М.С. *Расчет червячной глобоидной передачи*. Москва, МГТУ МАМИ, 1999. 8 с.

References

- [1] Blagojevic M., Marjanovic N., Djordjevic Z., Stojanovic B., Disic A. A new design of a two-stage cycloidal speed reducer. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2011, vol. 133(8), pp. 085001.
- [2] Upadhyay Chintan, Parameswaran M.A., Venkataram Nithin. Numerical Modeling and Simulation of Cycloidal Speed Reducer for Contact Forces in Robotic Joints. *MSRUAS-SASTech Journal*, 2016, vol. 15, is. 1, pp. 1–4.
- [3] Borislavov B., Borisov I., Panchev V. *Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer Cycloid Stage, Geometry, Element Analyses*. Mechanical Engineering Linnaeus University, Växjö, Sweden, 2012. 90 p.
- [4] Blagojevic M., Kocic M., Marjanovic N., Stojanovic B., Dordevic Z., Ivanovic L., Marjanovic V. Influence of the friction on the cycloidal speed reducer efficiency. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 217–227.
- [5] Blagojevic M., Marjanovic N., Djordjevic Z., Stojanovic B., Marjanovic V., Vujanac R., Disic A. Numerical and Experimental Analysis of the Cycloid Disc Stress State. *Technical Gazette*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 377–382.
- [6] Petrovskii A.N., Voronkov S.V. K zadache optimizatsii vnetsentroidnogo tsikloidal'nogo zatsepleniia [To the problem of the cycloid gearing optimization]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev]. 2015, no. 4(111), pp. 198–210.
- [7] Chirkin A.V., Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Planetarno-tsevochnye peredachi na osnove epitsikloidnogo i gipotsikloidnogo zatsepleniia [Planetary cycloid transmission on the basis of epicycloidal and hypocycloidal gear]. *Sovremennoe ma-shinostroenie. Nauka i obrazovanie. Mat. 4 nauch.-prakt. konf.* [Modern mechanical engineering. Science and education. Materials 4 scientific-practical conference]. Sankt-Petersburg, 19–20 June 2014, Sankt-Petersburg, Politekhn. un-t publ., 2014, pp. 462–471.

- [8] Leont'ev M. Iu., Raevskii V.A., Smolovik A.E. Obzor dostoinstv i nedostatkov ekstsentrikovo-tsikloidal'nogo zatsepleniia [An overview of the advantages and disadvantages of eccentric-cycloidal gearing]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of humanitarian and natural sciences]. 2016, no. 7–5, pp. 54–57.
- [9] Levitan Iu.F., Obmornov V.P., Vasil'ev V.I. *Cherviachnye reduktory. Spravochnik* [Worm gearboxes. Reference]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1985. 168 p.
- [10] Anfimov M.I. *Reduktory, konstruksii i raschety* [Reducers, designs and calculations]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1993. 463 p.
- [11] Petrov M.S. *Raschet cherviachnoi globoidnoi peredachi* [Calculation of worm globoid transmission]. Moscow, MGTU MAMI publ., 1999. 8 p.

Статья поступила в редакцию 30.11.2017

Информация об авторах

КАРАТУШИН Станислав Иванович (Санкт-Петербург) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

ХРАМОВА Дария Алексеевна (Санкт-Петербург) — ассистент кафедры «Механика деформируемого твердого тела». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: khdoria@mail.ru).

БОКУЧАВА Петр Нугзарович (Санкт-Петербург) — инженер кафедры «Космические аппараты и двигатели». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 1-я Красноармейская ул., д. 1, e-mail: Bokuchava.PN@Astronomikon.ru).

Information about the authors

KARATUSHIN Stanislav Ivanovich (Saint-Petersburg) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: karatsi@bk.ru).

KHARAMOVA Daria Alekseevna (Saint-Petersburg) — Teaching Assistant, Department of Deformable Solid Body Mechanics. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: khdoria@mail.ru).

BOKUCHAVA Petr Nugzarovich (Saint-Petersburg) — Engineer, Department of Aerospace Vehicles and Engines. Baltic State Technical University VOENMEKH named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1, e-mail: Bokuchava.PN@Astronomikon.ru).