

DOI: 10.53078/20778481_2021_3_35

УДК 621.83.06

Е. С. Лустенкова

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ С ДВУХРЯДНЫМ САТЕЛЛИТОМ

E. S. Lustenkova

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF SPHERICAL ROLLER TRANSMISSIONS WITH A DOUBLE-ROW PINION

Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью внедрения новой редукторной техники. Проанализирована возможность замены червячной передачи сферической роликовой передачей с двухрядным сателлитом в мотор-редукторе с двигателем постоянного тока. Созданы параметрические компьютерные модели обеих передач в системе NX, изготовлен экспериментальный образец редуктора со сферической роликовой передачей. Установлено, что при сопоставимых технических характеристиках (передаваемом моменте и частотах вращения валов) и одинаковых условиях и сроках эксплуатации габариты и масса сферических роликовых передач меньше. Трудоемкость изготовления основных деталей сферических роликовых передач выше, но стоимость материалов меньше. Результаты расчетов подтверждают эффективность внедрения сферических роликовых передач в областях, где используются червячные передачи. Приведены примеры практической реализации исследуемых передач.

Ключевые слова:

редуктор, сферическая роликовая передача, червячная передача, компьютерная модель передачи, эффективность внедрения.

Для цитирования:

Лустенкова, Е. С. Оценка эффективности внедрения сферических роликовых передач с двухрядным сателлитом / Е. С. Лустенкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 3(72). – С. 35–45.

Abstract

The article discusses the issues related to the effectiveness of the introduction of a new gear technology. The possibility of replacing a worm gear with a spherical roller transmission having a double-row pinion in a gear motor equipped with a DC motor is analyzed. Parametric computer models of both transmissions have been created in the NX system, and an experimental model of a gear motor with a spherical roller transmission has been manufactured. It has been found that with comparable technical characteristics, viz. transmitted torque and shaft speeds, and the same operating conditions and service life, the dimensions and weight of spherical roller transmissions are less. The labor intensity of manufacturing the main parts of spherical roller transmissions is higher, but the cost of materials is lower. The calculation results confirm the effectiveness of introduction of spherical roller transmissions in areas where worm gears are used. Examples of practical application of the transmissions under study are given.

Keywords:

speed reducer, spherical roller transmission, worm gear, transmission computer model, roller, strength, introduction effectiveness.

For citation:

Lustenkova, E. S. Estimation of the efficiency of spherical roller transmissions with a double-row pinion / E. S. Lustenkova // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 3(72). – P. 35–45.

Введение и постановка задачи

Внедрение новой редукторной техники отечественного производства является актуальной задачей для любого предприятия, т. к. направлено на импортозамещение. Это дополнительно позволяет снизить последующие издержки на проведение технического обслуживания и ремонта, облегчить поиск комплектующих. В то же время внедрение должно сопровождаться всесторонним анализом эффективности, учитывающим ряд факторов.

Рассмотрим сегмент малогабаритных редукторов, способных обеспечить большие значения передаточных отношений (16...200). Сфера их применения включает приводы роботов, манипуляторов, технологического оборудования, бытовой техники. Сферические роликотые передачи (СРП) с двухрядным сателлитом [1, 2] являются инновационной разработкой в области машиностроения. По трудоемкости изготовления они сопоставимы с планетарными зубчатыми передачами с двухвенцовыми сателлитами, однако СРП обеспечивают большее число параллельных потоков мощности [3], что повышает коэффициент использования материала. Данные передачи также более уравновешены [4].

Проанализируем возможность внедрения СРП на конкретном примере механического редукторного узла с передаточным отношением 44 в составе мотор-редуктора с двигателем постоянного тока. Наиболее распространены в промышленности червячные передачи, которые успешно применяются в составе мотор-редукторов [5] и могут обеспечить указанное передаточное отношение.

Таким образом, целью исследований являлось проведение сравнительного анализа двух видов механических передач (традиционной и новой) по ряду критериев с обоснованием целесообразности внедрения новой передачи и оценкой эффективности этого внедрения. В качестве критериев рассмотрим

два, один из которых характеризует технический уровень, второй – себестоимость изготовления.

Параметры сравниваемых редукторов

Оба редукторных узла имеют одинаковые технические характеристики: спроектированы для передачи номинального момента 20 Н·м, частота вращения ведущего вала 1350 мин⁻¹, передаточное отношение равно 44. Степень точности изготовления деталей – седьмая. Смазочный материал – гипоидное масло ТАД-17и. Режим работы мотор-редуктора постоянный, средний равновероятный. Срок службы 3 года, 8 часов в день, 255 дней в году.

При расчете червячной передачи первоначально принимался КПД, равный 0,75. После проведения расчетов и определения скорости скольжения он был скорректирован до значения 0,73. При расчете СРП было получено значение КПД, равное 0,76, определенное с учетом углов подъема беговых дорожек и принятого значения приведенного коэффициента трения $f = 0,02$. Рассмотрим результаты расчетов геометрических параметров червячной передачи типа ЗА по стандартной методике [6], соответствующей ГОСТ 2144-93, СРП – по методике [7], разработанной в Белорусско-Российском университете [5]. Критерием прочности является контактная выносливость зубьев колеса. При расчетах обеспечена допускаемая перегрузка по контактным напряжениям 4,96 % при допускаемых напряжениях 250 МПа. Материал зубьев колеса – бронза БрА9Ж4, материал червяка – сталь 40Х (закалка до 54 HRC, витки шлифованные и полированные), материал остальных деталей – сталь 45. Корпус предполагался сварной, а не литой для сопоставимости результатов. Межосевое расстояние червячной передачи принято $a_w = 40$ мм (при числе заходов червяка, равном единице, коэффициенте диаметра червяка $q = 8$ мм,

модуле $m = 1,6$ мм из первого ряда). Максимальный диаметр вершин червячного колеса $d_{ae2} = 73,6$ мм, диаметр вершин червяка $d_{a1} = 16$ мм.

СРП, спроектированная по разработанному алгоритму, имеет следующие параметры: число периодов беговой дорожки, образованной остановленными кулачками, $Z_3 = 15$, число периодов беговой дорожки ведомого кулачка $Z_2 = 11$. Число роликов наружного ряда сателлита $n_{s3} = 16$, внутреннего ряда сателлита $n_{s2} = 12$. Материал кулачков – сталь 40Х (улучшение до твердости 230...260 НВ), роликов – сталь 40ХН (объемная закалка до твер-

дости 48...52 HRC), все остальные детали изготовлены из стали 45. Расчетные контактные напряжения составили $1,551 \cdot 10^3$ МПа. Допускаемые напряжения равны $1,54 \cdot 10^3$ МПа. Таким образом, перегрузка не превышает 0,8 %.

Оценка технического уровня сравниваемых редукторов

В системе NX [8] были созданы 3D-модели обоих редукторов. Они показаны на рис. 1. Корпусные и некоторые другие детали сделаны полупрозрачными для наглядности.

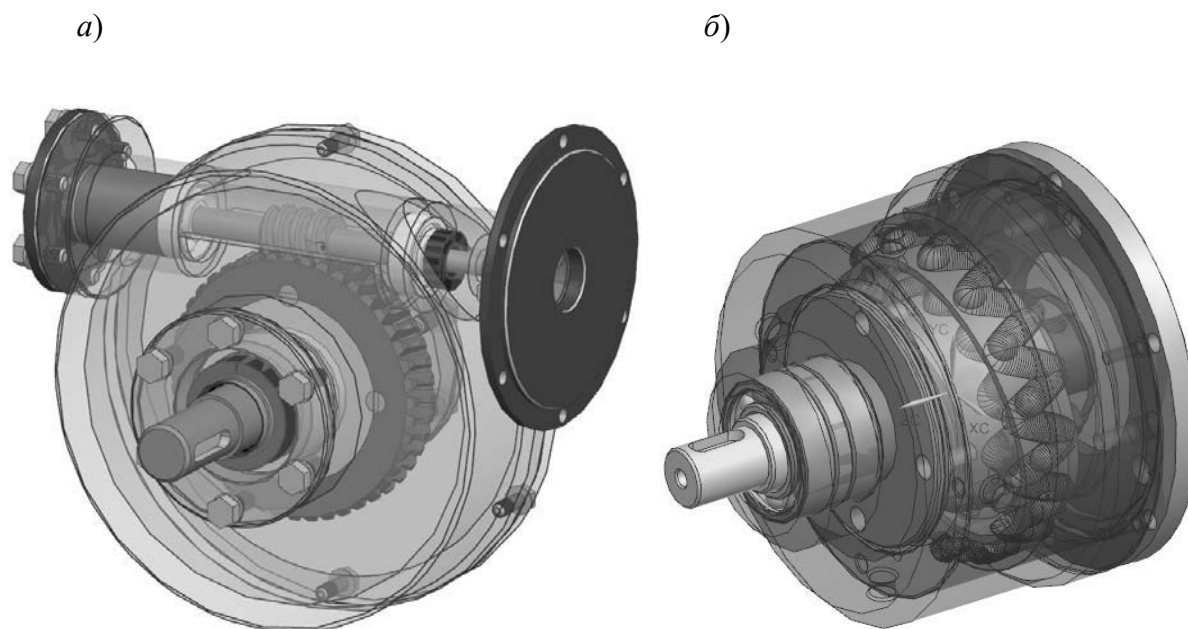


Рис. 1. Модели редукторных узлов: а – с червячной передачей; б – с СРП

В программе NX каждой детали червячного редуктора был задан соответствующий материал из библиотеки и определены массогабаритные показатели редукторов (табл. 1).

Редуктор на основе СРП был изготовлен и собран (рис. 2). В табл. 1 указана масса СРП, полученная посредством взвешивания натурального образца. Технический уровень редуктора оценивают по относительной массе $\gamma = m/T_2$,

где m – масса редуктора, кг; T_2 – номинальный момент на ведомом валу, Н·м. Редукторы высокого уровня имеют относительную массу $\gamma = 0,06...0,1$ кг/(Н·м) [9]. Червячные редукторы Ч-80–Ч-160, серийно изготавливаемые в России, имеют показатель $\gamma = 0,071...0,106$, изготавливаемые в Великобритании фирмой Challenge редукторы SMRV 030–150 имеют показатель $\gamma = 0,027...0,050$ [5]. У спроектированного червячного ре-

дуктора $\gamma = 0,188$ кг/(Н·м), что соответствует среднему уровню [9]. У редуктора с СРП $\gamma = 0,088$ кг/(Н·м), что соответствует высокому уровню. Замена червячного редуктора на СРП позволила снизить массу редукторной части мо-

тор-редуктора на 53 %. Сопоставляя максимальные габаритные размеры, можно сделать вывод о том, что указанная замена позволила уменьшить габариты редуктора на 30 %...40 %.

Табл. 1. Параметры червячной передачи и СРП

Параметры	Традиционный вариант (червячный редуктор)	Новый, предлагаемый вариант (сферический роликовый редуктор)
Масса, кг	3,752	1,762
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	146 × 156 × 118	92 × 82 × 82
Материалы для изготовления	Все детали из стали, кроме зубчатого венца из бронзы марки БрА9Ж4 (0,208 кг)	Все детали из стали



Рис. 2. Основные узлы изготовленного редуктора на основе СРП: 1 – ведущий вал с установленным на нем сателлитом; 2 – ведомый вал с ведомым кулачком; 3 – два остановленных кулачка, образующих неподвижную беговую дорожку; 4 – корпус редуктора

Оценка технологичности изготовления и стоимости материалов

Проведем сравнительный анализ материалов, технологий, оборудования и инструмента, используемых при изготовлении передач обоих типов. При

этом приняты следующие допущения.

1. Рассматривалось изготовление только основных деталей. Корпус и крышки не рассматривались, т. к. могут быть спроектированы многовариантно. Предполагалось, что материалы и степень точности изготовления этих деталей, а соответственно, трудоемкость и

затраты на их изготовление сопоставимы. Хотя следует отметить, что корпус СРП цилиндрической формы изготавливается на станках токарной группы. Корпус червячной передачи предполагает изготовление отдельно двух частей и операцию сварки. Не принимались во внимание ведущие и ведомые валы двух передач, предполагалась одинаковая трудоемкость их изготовления, при этом червяк в червячной передаче изготавливался заодно с ведущим валом и учитывался как одна деталь.

2. Не принимались во внимание стандартные изделия: подшипники, винты (кроме нестандартных), гайки, шайбы, манжеты. Несмотря на то, что их номенклатура может отличаться для двух вариантов редукторных узлов,

стоимость стандартных изделий малого размера незначительна по сравнению с другими затратами, определяющими себестоимость редукторов.

Основные детали червячной передачи показаны на рис. 3, основные детали СРП приведены на рис. 4. Общее количество деталей для червячной передачи – 7 (по номенклатуре – 4), для СРП – 36 (по номенклатуре – 7). У червячной передачи учитывались установочные винты, т. к. в конструкции они принимались нестандартными без головки с пазом под отвертку. При использовании стандартных винтов их готовки пришлось бы срезать после затяжки и раскернить торцы, что добавило бы дополнительную операцию при изготовлении.

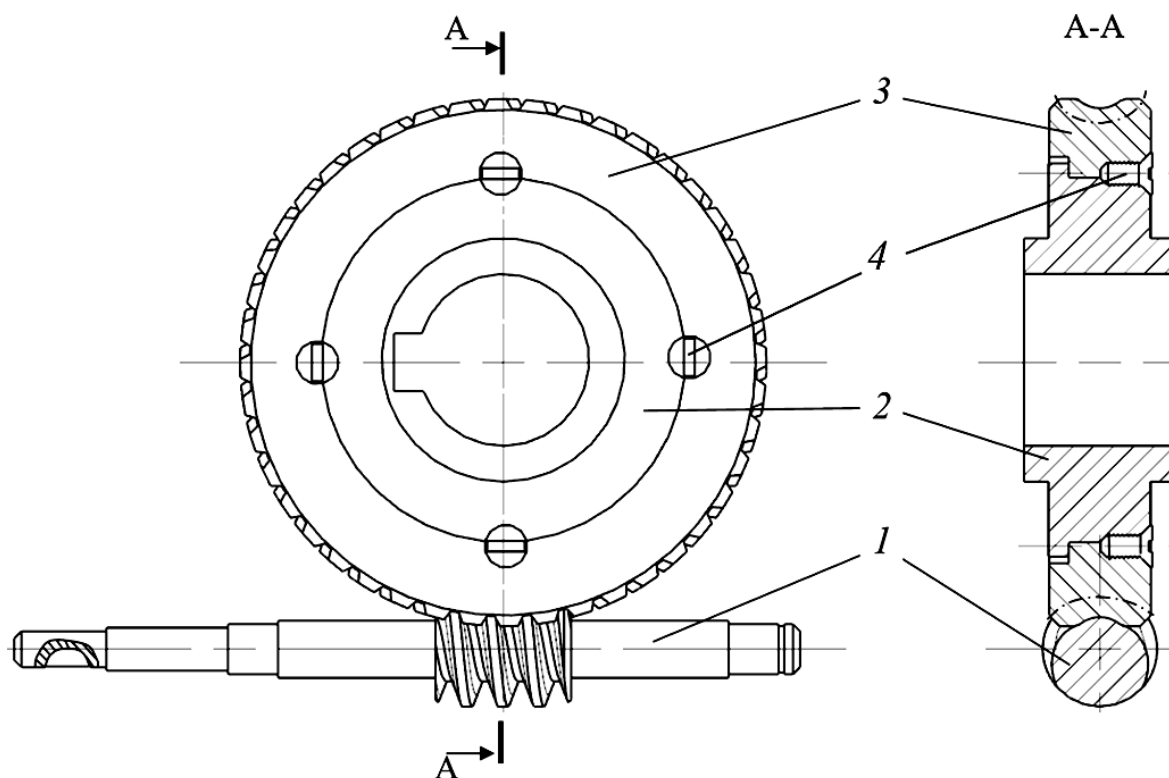


Рис. 3. Основные детали червячной передачи: 1 – червяк; 2 – зубчатый венец червячного колеса; 3 – ступица червячного колеса; 4 – установочный винт

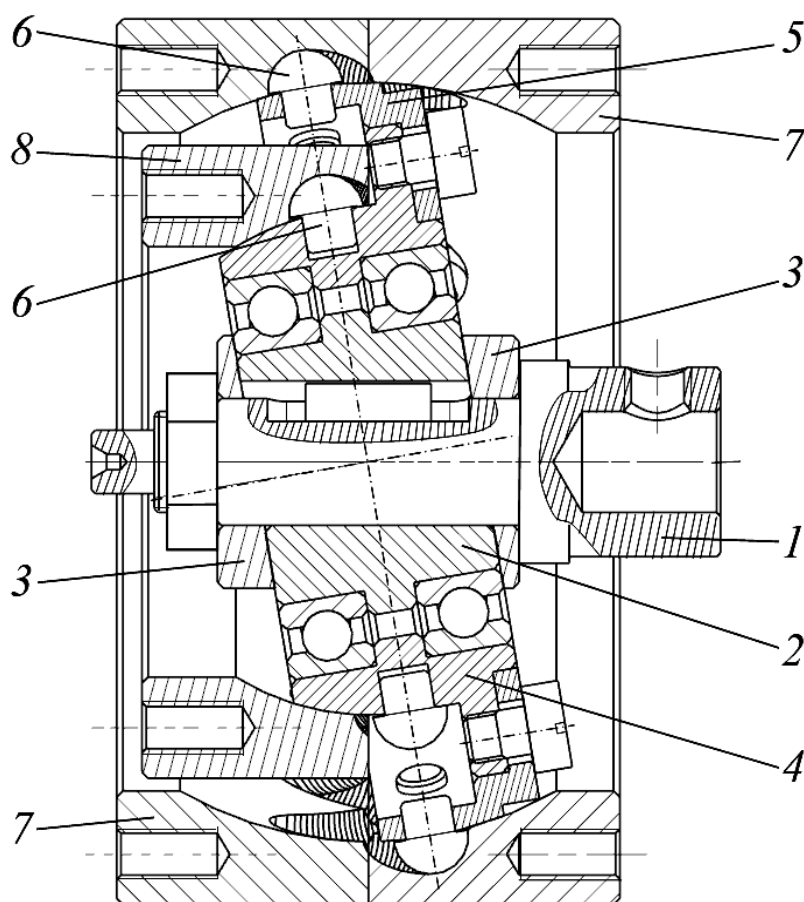


Рис. 4. Основные детали СРП: 1 – ведущий вал (не учитывался при сравнительном анализе); 2 – эксцентрик; 3 – косая шайба (2 шт.); 4 – внутренняя часть сателлита; 5 – наружная часть сателлита; 6 – ролики (28 шт.); 7 – остановленный кулачок (2 шт.); 8 – ведомый кулачок

Стоимость материалов деталей для обоих редукторов определялась согласно данным, приведенным в [10]. Принимался материал – сталь 40Х для всех основных деталей обоих редукторов, кроме материала венца червячного колеса (бронза БрАЖ-9-6) и материала установочных винтов червячного колеса (конструкционная сталь Ст3). Стоимость изготовления комплекта основных деталей червячного редуктора составила 22,05 BYN, стоимость комплекта основных деталей СРП – 4,5 BYN. С учетом объема деталей, полученных из твердотельных моделей в системе NX, стоимость червячного редуктора будет практически в 5 раз выше, чем редуктора

на основе СРП при диаметрах корпуса (80...200 мм). Отметим, что для возможности сравнения редукторов различных типоразмеров принимались эмпирически установленные пропорции диаметров венца и ступицы [6]. Для рассматриваемого примера, с учетом небольших размеров червячного колеса, целесообразно было бы делать его цельным из бронзы, что еще более увеличило бы расходы на материалы.

При оценке трудоемкости изготовления деталей передач разрабатывался технологический процесс для каждой детали, учитывались марка оборудования, машинное время обработки, разряд и заработная плата рабочего, расходуемая

электроэнергия. Использовался следующий станочный парк: ручной ленточно-пильный станок OPTsaw S181G; токарный станок с ЧПУ СК6140А; электроэрозионный станок DK7725; полуавтомат зубофрезерный GBCH-332CNC26 (для червячной передачи); широкоуниверсальный фрезерный станок JUM-1464 DRO; фрезерный обрабатывающий центр HAAS Super Mini Mill (для изготовления беговых дорожек на кулачках и для изготовления червяка); круглошлифовальный станок 3A151 (для

шлифования витков червяка). Тарифы на электроэнергию принимались по [12]: 0,287 кВт/ч, минимальная заработная плата для расчета часовой заработной платы принималась 400 BYN.

По результатам анализа установлено, что затраты на изготовление червячного редуктора составят 6,65 BYN, затраты на изготовление основных деталей СРП – 28,19 BYN. Таким образом, в изготовлении СРП дороже в 4,2 раза.

Отдельно рассчитывались расходы на инструмент (табл. 2).

Табл. 2. Расчет затрат на инструмент для изготовления деталей

Наименование инструмента	Применимость*	Стоимость комплекта, BYN
Полотно биметаллическое 2362 × 19 × 0,9 мм	1, 2	62,03
Резец канавочный ADKT-K-R-2525-2-T15	1, 2	216,94
Резец контурный SVHBR 2525 M16	1, 2	162,63
Резец проходной PCLNR 2525 M12C	1, 2	147,75
Резец расточной S12K STUCR 11	1, 2	92,11
Сверло HSS 8902 10	1, 2	13,43
Сверло 2301-0069 ГОСТ 10903–77	1, 2	77,69
Проволока молибденовая 0,2 мм	1, 2	30,00
Круг шлифовальный 1 250 × 32 × 76 25 A 40 K 6 V 50	1	254,88
Сверло 2317-0017 ГОСТ 14952–75	1	4,70
Фреза для паза червяка	1	45,00
Резец профильный	1	200,00
Фреза червячная специальная	1	300,00
Метчик 2620-1089 ГОСТ 3266–81	2	4,07
Развертка 2363-0072 H7 ГОСТ 1672–80	2	180,00
Резец канавочный ADKT-ZCC2-R-2525-3-T22	2	211,02
Сверло HSS 8902 3,3	2	2,96
Сверло HSS 8902 4	2	2,78
Сверло HSS 8902 5	2	3,32
Сверло 2301-0106 ГОСТ 10903–77	2	77,53
Сверло HSS 8902 9,8	2	16,75
Сверло 2317-0004 ГОСТ 14952–75	2	1,79
Фреза радиусная R4 z = 4 удл. 100/20	2	100,80
<i>Примечание – * – 1 – для изготовления червячного редуктора; 2 – для изготовления редуктора с СРП</i>		

Стоимость одного комплекта инструмента для СРП – 1403,60 BYN, для червячной передачи – 1607,16 BYN.

Общая стоимость одного комплекта основных деталей составила 1436,29 BYN, стоимость комплекта деталей червячного редуктора – 1635,86 BYN. Таким образом, внедрение СРП позволяет получить экономический эффект 199,57 BYN.

Автор статьи выражает благодарность заведующему кафедрой «Технология машиностроения» В. М. Шеменкову и ведущему инженеру этой кафедры Е. Ю. Демиденко за помощь в оценке затрат на производство.

Примеры практической реализации СРП

Как показали испытания экспериментальных образцов редукторов, при работе сферической роликовой передачи (СРП) с двухрядным сателлитом с радиальным расположением рядов ро-

ликов в процессе контакта внутреннего ряда с ведомым кулачком может возникнуть ситуация выпадения роликов и заклинивания передачи, т. к. геометрическое замыкание высших кинематических пар является односторонним. При этом ролики, выходя из зацепления с беговой дорожкой, под действием сил инерции могут двигаться в радиальном направлении. Следует учитывать то, что в связи с ограниченностью радиальных размеров передачи и необходимостью размещения двух рядов роликов применение таких способов, как установка стопорных колец, использование резьбовых соединений, не представляется возможным. Также невозможно применение сборной конструкции ролика, который подвергается значительным нагрузкам при малых размерах: диаметр сферической части 10 мм, диаметр стержня 8 мм. В связи с этим была разработана новая конструкция сателлита (рис. 5), позволяющая зафиксировать ролики в радиальном направлении.

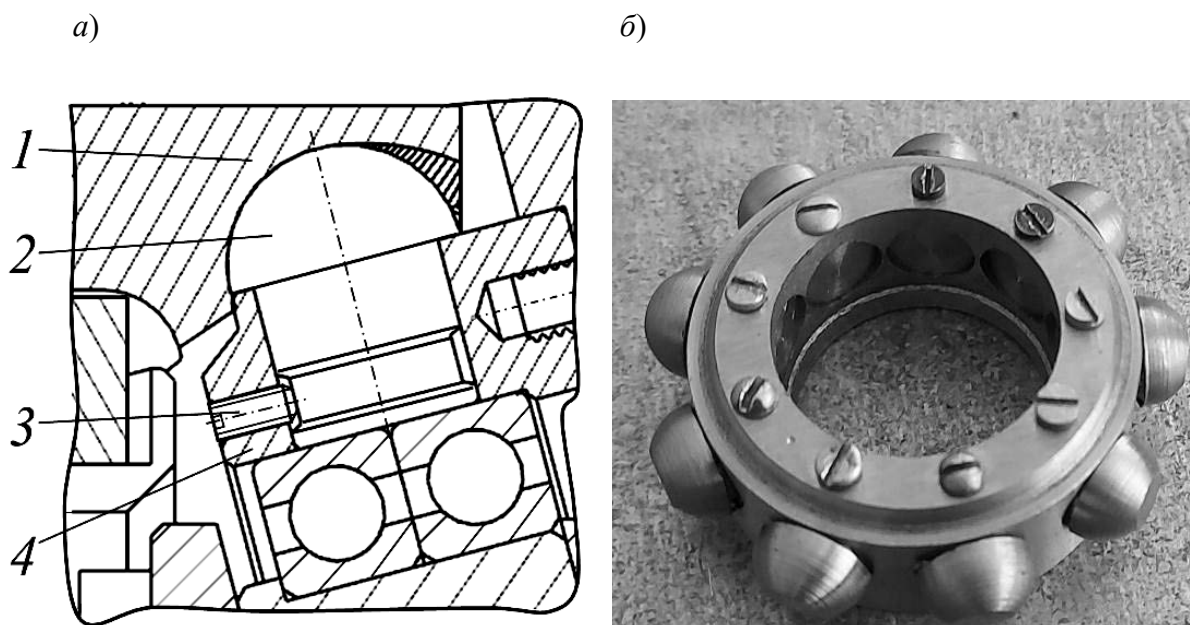


Рис. 5. Механизм фиксации ролика: *а* – конструктивная схема; *б* – изготовленный образец внутренней части сателлита

Регулировочный винт 3, устанавливаемый в сателлит 4, не касается поверхности расточенного пояска ролика 2, взаимодействующего с беговой дорожкой ведомого кулачка 1. При выходе из зацепления выступающая часть винта будет препятствовать перемещению ролика в радиальном направлении. Установлено, что при частоте вращения ведущего вала $n_1 = 1000 \dots 3000 \text{ мин}^{-1}$ для передачи с наружным диаметром 80 мм сила инерции, действующая на один ролик, составит $5 \dots 44 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$.

Это позволяет использовать винты любого диаметра без расчета их прочности.

Был разработан редукторный узел мотор-редуктора (рис. 6) для передачи номинального момента 50 Н·м. Благодаря передаточному отношению СРП, равному 105, частота вращения ведомого составляет $12,8 \text{ мин}^{-1}$. Это позволяет использовать мотор-редуктор в низкооборотных приводах, например в приводах запорной арматуры, открывания и закрывания дверей, шлагбаумов и т. д.

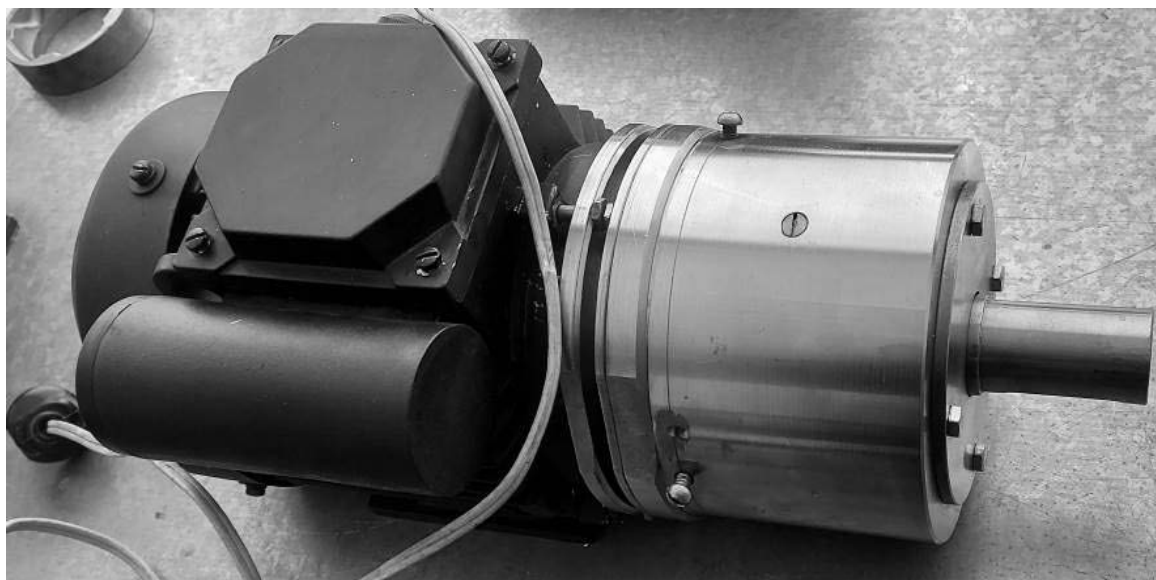


Рис. 6. Мотор-редуктор с СРП с передаточным отношением редукторного узла 105

Также был спроектирован и создан электромеханический привод, включающий двигатель постоянного тока, редукторный модуль с СРП, анализ характеристик которого приведен ранее, и быстроходную ступень в виде планетарного редуктора с передаточным отношением, равным 4,8. Таким образом, общее передаточное отношение двухступенчатого редукторного узла составляет $4,8 \cdot 44 = 211,2$. При частоте вращения вала двигателя, равной 1340 мин^{-1} , ведомый вал будет иметь частоту вра-

щения $6,3 \text{ мин}^{-1}$. Привод приспособлен для питания от бортовой электросети легкового автомобиля и может быть использован для привода баллонных ключей, гайковертов, лебедок и домкратов. При этом достаточно сменить рабочий орган привода (рис. 7).

Дополнительно разработан и собран усилитель момента с СРП, обеспечивающий передаточное отношение, равное 16, диаметр корпуса – 100 мм. Конструктивная схема привода приведена на рис. 8.

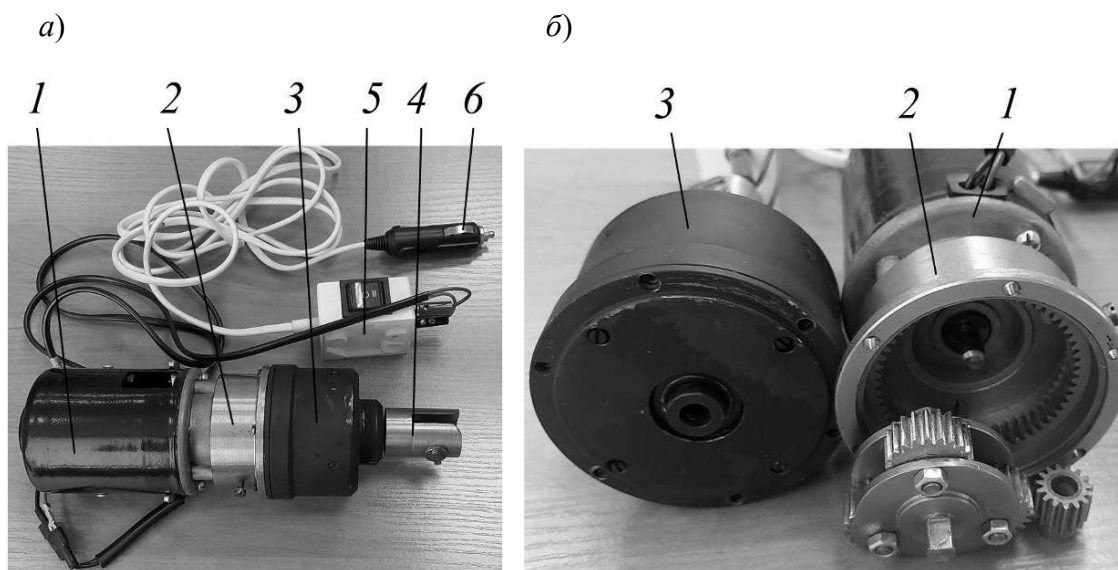


Рис. 7. Электромеханический привод с питанием от электросистемы автомобиля: а – общий вид; б – редукторные узлы; 1 – двигатель постоянного тока; 2 – редукторный модуль с планетарной передачей; 3 – редукторный модуль с СРП; 4 – рабочий орган на приводном валу; 5 – выключатель, в т. ч. для обеспечения реверса вращения; 6 – штекер для автомобильного «прикуривателя»

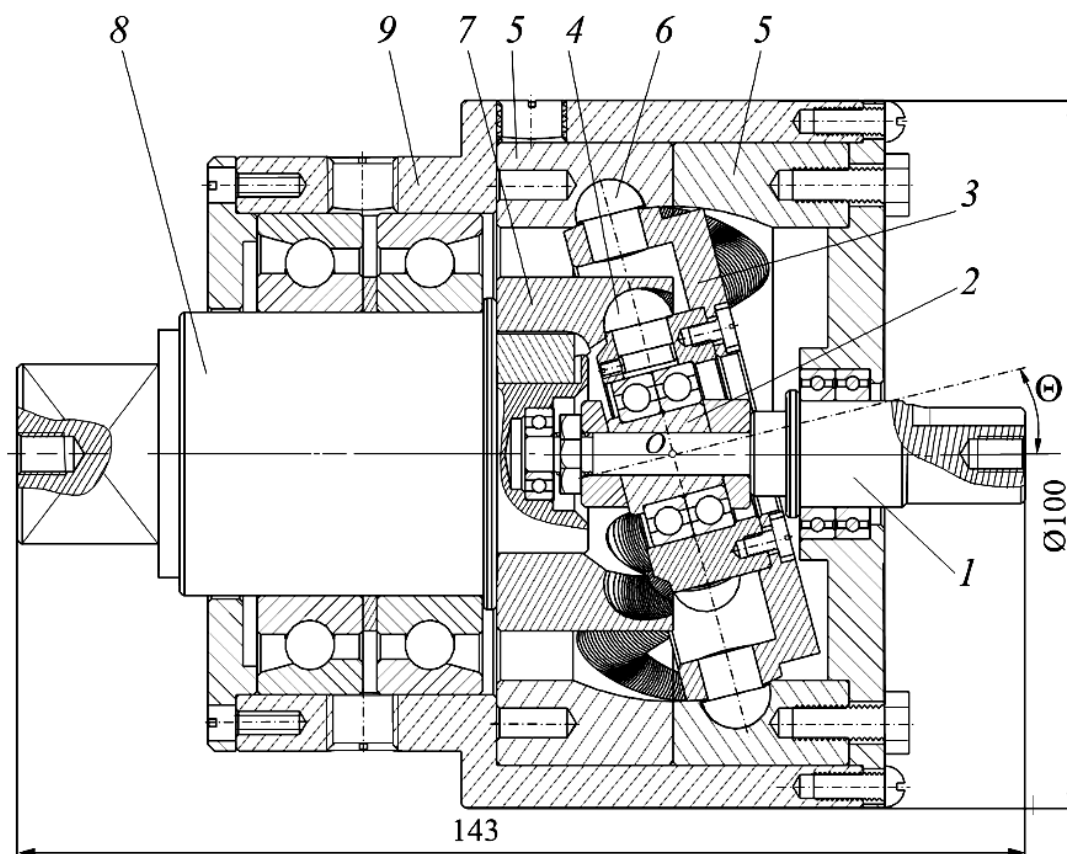


Рис. 8. Общий вид редуктора с СРП с двухрядным сателлитом: 1 – ведущий вал; 2 – эксцентрик; 3 – составной сателлит; 4 – ролики внутреннего ряда; 5 – остановленные кулачки; 6 – ролики наружного ряда; 7 – ведомый кулачок; 8 – ведомый вал; 9 – корпус

В редукторе использован вышеописанный механизм стопорения роликов в радиальном направлении. Усилитель момента может иметь как ручной, так и электрический привод.

Заключение

Подтверждена эффективность внедрения СРП для замены червячной передачи мотор-редуктора с передаточным отношением механической части, равным 44. Разработанные методики дают возможность проектировать редукторы с СРП высокого уровня по критерию массы, отнесенной к передаваемому моменту. По сравнению с чер-

вячными редукторами при равных условиях нагружения и эксплуатации СРП позволяют снизить массу и габариты привода, а также расходы на материалы. Экономический эффект, включающий расходы на изготовление и материалы, при изготовлении небольшой партии в условиях конкретного предприятия (на производственных мощностях Белорусско-Российского университета), составил около 200 BYN на единицу продукции. Разработан ряд редукторов с СРП, встраиваемых в составе мотор-редукторов в качестве модулей в электро-механические приводы, а также применяемых в качестве приводов механизированного инструмента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Расчет и проектирование сферических роликовых передач: монография / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 177 с.: ил.
2. **Лустенков, М. Е.** Сферическая роликовая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2019. – № 5. – С. 32–43.
3. **Lustenkov, M. E.** Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion / M. E. Lustenkov, E. S. Lustenkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 795 (2020) 012020. – 6 p.
4. **Лустенков, М. Е.** Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Ижевского гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 23–27.
5. **Иванов, А. С.** Конструирование современных мотор-редукторов / А. С. Иванов, С. В. Муркин. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 147 с.
6. **Лустенков, М. Е.** Детали машин: учебное пособие / М. Е. Лустенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – 258 с.: ил.
7. **Лустенкова, Е. С.** Методика расчета и проектирования сферических роликовых передач с двухрядным сателлитом / Е. С. Лустенкова // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 2. – С. 18–24.
8. NX [Электронный ресурс]: официальный сайт компании Siemens PLM Software. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>. – Дата доступа: 28.01.2021.
9. Проектирование механических передач: учебное пособие / С. А. Чернавский [и др.]. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2013. – 536 с.
10. Торговая интернет-площадка b2b-продаж «Пульс цен» [Электронный ресурс] // ООО «Вило рус». – Режим доступа: <https://pulscen.by>. – Дата доступа: 11.08.2021.
11. Цены (тарифы) на энергоресурсы [Электронный ресурс]: официальный сайт Министерства энергетики Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/activities/tseny-tarify-na-energoresursy/>. – Дата доступа: 19.07.2021.

Статья сдана в редакцию 12 августа 2021 года

Екатерина Сергеевна Лустенкова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: fittsova@gmail.com.

Ekateryna Sergeevna Lustenkova, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: fittsova@gmail.com.