

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»

А. В. Капитонов

ТОЧНОСТЬ И КОНТРОЛЬ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2021

УДК 621.83.06

Рекомендовано к изданию ученым советом Белорусско-Российского университета
«29» октября 2021 г., протокол № 3

Р е ц е н з е н т ы :

д-р техн. наук, проф. *А. В. Акулич*;
д-р техн. наук, проф. *П. Н. Громыко*

Капитонов, А. В.

Точность и контроль малогабаритных планетарных механизмов:
[монография] / А. В. Капитонов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. –
177 с.: ил.

ISBN 978-985-492-269-0.

Монография посвящена разработке методов оценки и контроля точности механизмов с телами качения торцового типа с использованием спектрального анализа. Установлены причинно-следственные связи между кинематическими показателями и погрешностями изготовления деталей механизмов. Определены конструктивные и геометрические параметры деталей передач, которые в большей степени влияют на кинематическую погрешность. Разработаны показатели точности и допуски на изготовление планетарных передач с телами качения.

Предназначена для научных работников, конструкторов и технологов, занимающихся проблемами проектирования и изготовления малогабаритных механизмов, а также для аспирантов и студентов машиностроительных вузов.

УДК 621.83.06

ISBN 978-985-492-269-0

© Капитонов А. В., 2021

© Межгосударственное образовательное
учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский
университет», 2021

Введение

Механические передачи имеют широкое применение во всех отраслях машиностроения. Непрерывно совершенствуются их конструкции, технологии изготовления, методы исследований и способы повышения их эксплуатационных характеристик. В современной промышленности все больше применяются малогабаритные передачи с телами качения. Помимо зубчатых механизмов, учеными разных стран проводятся широкие исследования планетарных ресурсоэффективных передач различных конструкций, имеющих периодические беговые дорожки, построенные по уравнениям циклоиды, синусоиды или других кривых, и сателлиты в виде тел качения – шаров или цевков. К таким передачам относятся планетарные шариковые радиально-плунжерные и планетарные роликовые торцового типа, которые разработаны в Белорусско-Российском университете. Эти передачи представляют собой относительно новый и перспективный класс механических передач. Принцип их работы основан на взаимодействии основных звеньев посредством шариков или роликов. Они имеют следующие преимущества: компактность, конструктивную простоту, технологичность, многомодульный принцип построения, обеспечивающий большие передаточные отношения редукторов до 10 000 и более, высокую кинематическую точность и плавность работы. Исследования современных типов этих передач проводятся в Белорусско-Российском университете.

Планетарные шариковые и роликовые передачи используются в качестве механизмов или редукторов в приводах машин и различного технологического оборудования. Так, например, шариковый радиально-плунжерный редуктор с передаточным отношением 4096 и размерами в миллиметрах $B \times H \times L = 125 \times 125 \times 210$ используется в устройстве для перемещения грузов и в приводе круговой подачи при фрезеровании кулачков. Редукторы на основе планетарных шариковых и роликовых передач используются в приводах станков монтажа-демонтажа автомобильных шин, в приводах технологических приспособлений, в качестве усилителей моментов к машинным тискам. Они могут использоваться в мехатронных устройствах, в приводных механизмах промышленных роботов, системах позиционирования.

К настоящему времени проведены теоретические и экспериментальные исследования конструкций, кинематики и силовых характеристик этих передач. Созданы опытные образцы редуцирующих механизмов для испытаний и оценки точности на лабораторном стенде.

Однако для планетарных передач с телами качения еще мало проведено исследований, без которых невозможно их серийное производство,

в отношении их эксплуатационных характеристик: кинематической точности, плавности работы, нагрузочной способности, точности изготовления деталей. Для этих передач (редукторов) не подходят известные методы и средства оценки точности зубчатых колес, т. к., например, для планетарной радиально-плунжерной передачи необходим контроль в сборе механизма с подшипниками, валами, корпусом. В настоящее время нет методов и серийно выпускаемых приборов и устройств для оценки точности передач в сборе.

Поэтому актуальной задачей является разработка методов исследования и оценки эксплуатационных точностных показателей планетарных передач с телами качения. Наиболее эффективными методами исследований передач могут являться методы спектрального анализа, позволяющие выявить недостатки их конструкций и технологии изготовления и предложить способы повышения их эксплуатационных характеристик. Также актуальной задачей повышения технического уровня передач данного типа является оптимизация их эксплуатационных показателей: кинематической точности, плавности работы, полноты контакта, КПД. Эти показатели связаны с точностью изготовления и характеризуют надежность и эффективность работы механизма. Важной проблемой является разработка методов оценки точности изготовления деталей планетарных шариковых и роликовых передач на основе использования технологий координатных измерений и контроля на координатно-измерительной машине, включающего построение 3D-модели реального профиля беговой дорожки и позволяющего наиболее точно оценить форму действительного профиля и установить допуски на его изготовление.

Данная работа посвящена разработке методов оценки и контроля точности передач (редукторов) с телами качения торцового типа с использованием гармонического анализа, позволяющего получить гармонические составляющие и найти их причинно-следственные связи с погрешностями изготовления деталей, а также установить конструктивные и геометрические параметры деталей передач (редукторов), которые в большей степени влияют на кинематическую погрешность. При этом необходимо провести исследования технологических причин образования погрешностей изготовления деталей планетарных передач с телами качения; разработать методы измерений на координатно-измерительной машине поверхностей сложной геометрической формы, периодических беговых дорожек; разработать методы контроля кинематических погрешностей различных типов передач (редукторов); разработать устройства для контроля кинематической точности механических передач в сборе; определить конструктивные и геометрические параметры деталей редукторов, которые в большей степени влияют на кинематическую погрешность передачи; разработать показатели точности и допуски на изготовление.

Автор выражает признательность рецензентам Акуличу Александру Васильевичу, доктору технических наук, профессору, и Громыко Петру Николаевичу, доктору технических наук, профессору, за ценные замечания в процессе рецензирования и редактирования рукописи.

Автор выражает благодарность своему научному консультанту Пашкевичу Виктору Михайловичу, доктору технических наук, профессору, за ценные рекомендации и указания при разработке теоретических и экспериментальных исследований.

1 Разработка методов оценки кинематических характеристик радиально-плунжерных передач в сборе на основе методов компьютерного моделирования

1.1 Объект и направление исследований

Планетарные передачи с промежуточными телами качения основаны на едином принципе работы и представляют собой совокупность двух или трех кулачковых механизмов с общими толкателями. Их преимущества заключаются в том, что они имеют небольшие габаритные размеры, небольшую массу, большие передаточные отношения в одной ступени, соосные валы, невысокую стоимость изготовления. Для этих передач ранее были проведены исследования и расчеты геометрических параметров, сил в зацеплении, кинематической точности, КПД, прочностные расчеты [1–11]. Эти передачи могут быть использованы в мехатронных устройствах, приводах промышленных роботов, автоматизированном производстве, технологической оснастке.

Для планетарных передач, как известно, предъявляются высокие требования точности на стадиях проектирования и изготовления. Актуальной проблемой при проектировании планетарных передач с промежуточными телами качения является повышение их кинематических и геометрических эксплуатационных показателей. В соответствии с этим поставлена цель обеспечения оптимальных показателей кинематической точности, плавности работы и полноты контакта, механических радиально-плунжерных передач путем создания методов их исследований и оценки. Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

- разработка методов оценки кинематических характеристик радиально-плунжерных передач в сборе на основе методов компьютерного моделирования;
- разработка компьютерных моделей и методики компьютерного моделирования кинематики планетарных передач с погрешностями и без погрешностей изготовления с целью оценки упругих деформаций звеньев;
- разработка методов оценки точностных параметров радиально-плунжерных передач в сборе на основе спектрального анализа их кинематических характеристик;
- разработка методики и проведение экспериментальных исследований точности планетарных радиально-плунжерных передач на автоматизированном стенде с целью определения влияния погрешностей изготовления на точность угла поворота выходного вала;

- разработка методов обеспечения точностных параметров радиально-плунжерных передач на основе определения их соответствия требованиям;
- применение метода спектрального анализа для теоретической и экспериментальной оценки точности конструкций планетарных передач и математическая обработка результатов, полученных компьютерным моделированием и натурным экспериментом.

Объектом исследования являются малогабаритные планетарные передачи с телами качения торцового типа и построенные на их основе редукторы. На рисунке 1.1 показана планетарная радиально-плунжерная передача с промежуточными телами качения – шарами. Передаточное отношение – $i = 14$, число периодов дорожки – 13.

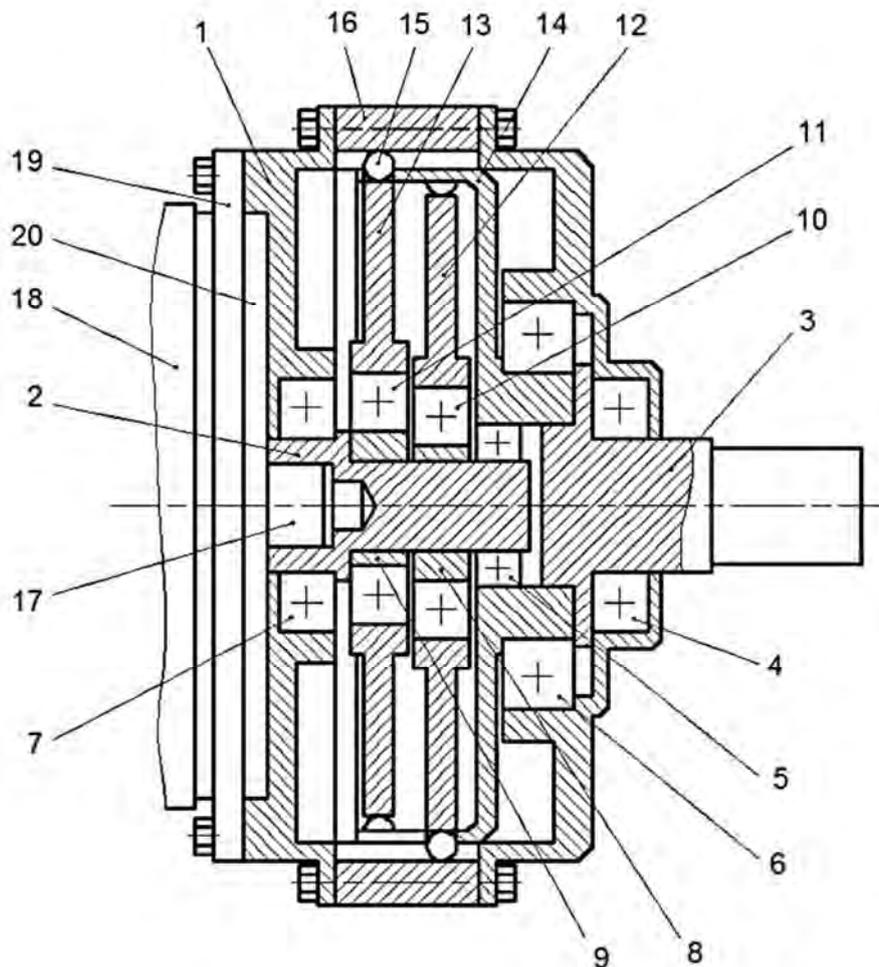


Рисунок 1.1 – Планетарная радиально-плунжерная передача

Планетарная передача имеет два эксцентрично расположенных ведущих кольца с сателлитами-шарами. Кольца установлены со смещением один относительно другого на 180 град, что позволяет устранить в некоторой степени дисбаланс на ведущем звене и обеспечить большее количество

сателлитов, передающих нагрузку. При этом повышается плавность работы и нагрузочная способность передачи.

Передача (см. рисунок 1.1) содержит: 1 – корпус; 2 – ведущий вал; 3 – ведомый вал; 4–7, 10, 11 – подшипники; 8, 9 – эксцентрики; 12, 13 – ведущие кольца; 14 – водило; 15 – сателлиты-шары; 17–20 – элементы двигателя.

Деталь 16 имеет многопериодную дорожку 21 (рисунок 1.2). Эквидистантно удаленная от нее кривая 23 является осью при формообразовании профиля дорожки и построена по уравнению смещенной окружности, замкнутой на плоскости,

$$\rho_2 = \sqrt{R^2 - A^2 \sin^2 z_2 \varphi} + A \cos z_2 \varphi, \quad (1.1)$$

где ρ_2 – радиус-вектор точки кривой;

R – радиус средней окружности, проходящей между вершинами и впадинами кривой;

A – амплитуда кривой, равная эксцентриситету эксцентриков;

z_2 – число периодов (волн) кривой;

φ – полярный угол.

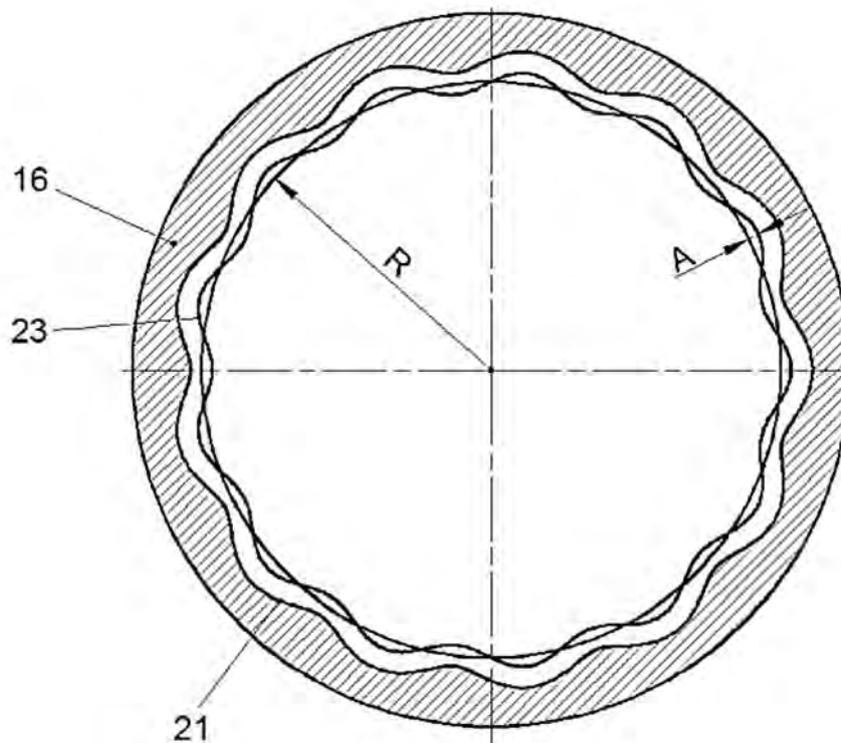


Рисунок 1.2 – Деталь с многопериодной дорожкой

1.2 Влияние зазоров и погрешностей деталей зацепления на контакт сателлитов и кинематическую погрешность планетарной передачи

В планетарной радиально-плунжерной передаче некоторые сателлиты-шары не участвуют в работе, являются пассивными, т. к. углы подъема дорожек равны нулю [1]. Количество пассивных сателлитов определяется из соотношений, представленных в [1].

Для редуктора с передаточным отношением $i = 14$, $z_1 = 1$, $z_2 = 13$ число пассивных сателлитов равно 2.

Среди участвующих в работе шаров в передаче имеются и такие, которые передают незначительную величину момента. Это те шары, которые располагаются вблизи вершин периодической дорожки, в их пассивных зонах, т. е. на участках с нулевыми и близкими к нулю углами подъема дорожек. Эти сателлиты-шары практически не передают нагрузки, и их можно рассматривать как пассивные. Согласно [1] сателлиты с номером k являются пассивными, если номер k удовлетворяет соотношению

$$\frac{2z_2 k}{z_2 + z_1} - J \left[\frac{2z_2 k}{z_2 + z_1} \right] \leq \lambda, \quad (1.2)$$

где $J \left[\frac{2z_2 k}{z_2 + z_1} \right]$ – целая часть отношения $\frac{2z_2 k}{z_2 + z_1}$;

λ – характеризует принятую величину пассивной зоны периодической дорожки (обычно $\lambda = 0,1 \dots 0,2$).

Таким образом, согласно формуле (1.2) сателлиты 0, 1, 6–8, 13 передачи находятся в пассивных зонах многопериодной дорожки (рисунок 1.3).

Некоторые из остальных сателлитов также могут не участвовать в передаче момента. Основной причиной этого являются зазоры между сателлитами и деталями зацепления.

На рисунке 1.4 показан зазор δ между сателлитом-шаром 1 и рабочей поверхностью кольца сепаратора-водила 2. Этот зазор связан с погрешностями ведущего звена – эксцентрика, многопериодной дорожки, углового шага прорезей сепаратора и диаметра шара.

Как видно из рисунка 1.4, шар 1, не находясь в пассивной зоне, является пассивным и не участвует в передаче вращения. Зазор δ между шаром 1 и сепаратором 2 не позволяет воздействовать шару на ведомое звено.

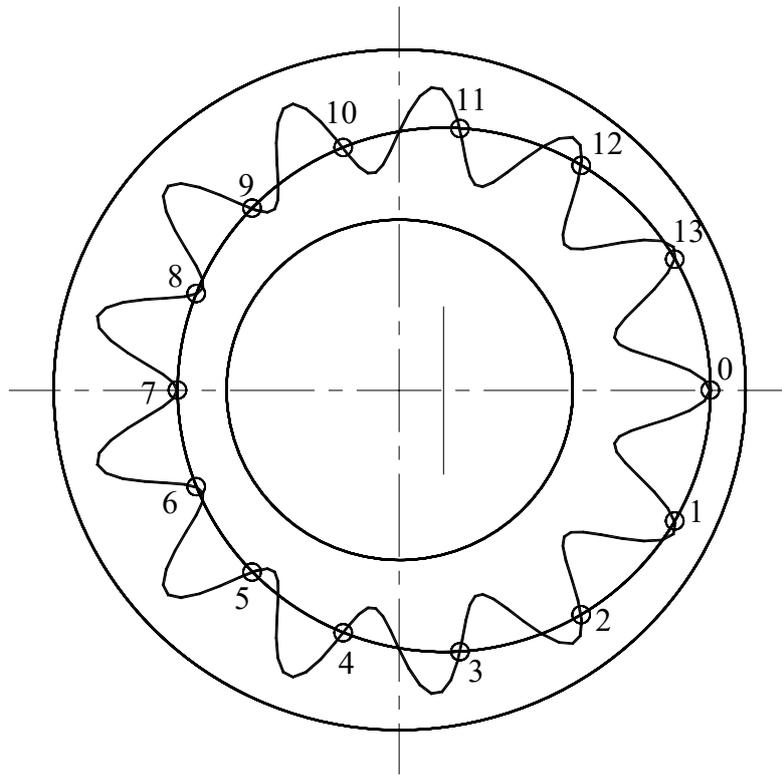


Рисунок 1.3 – Схема для оценки количества роликов, расположенных в пассивных зонах многопериодной дорожки

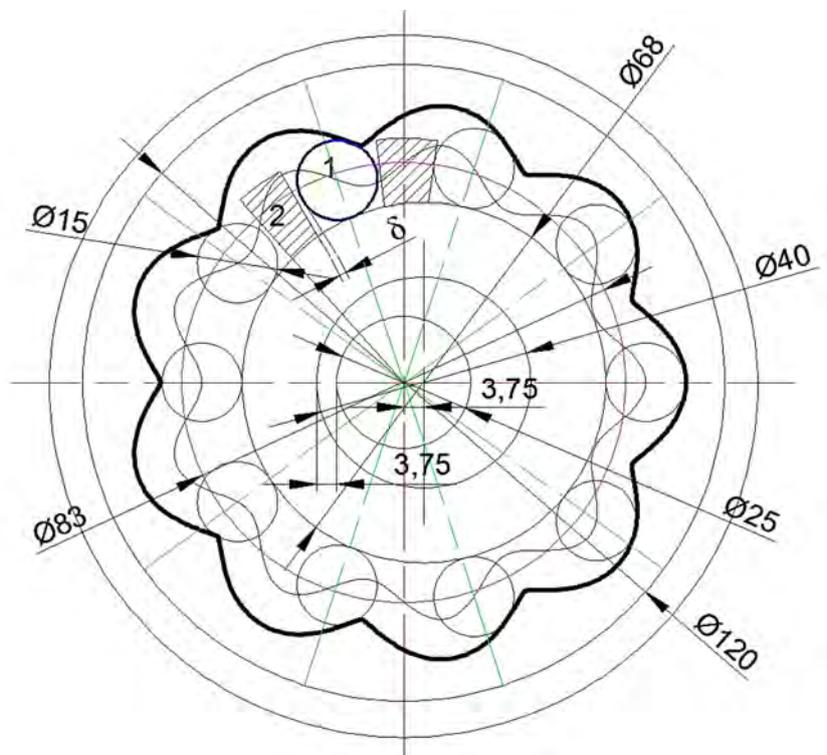


Рисунок 1.4 – Влияние зазоров на кинематическую точность планетарных радиально-плунжерных передач

Вращение ведомого звена (сепаратора) начинается с некоторым запозданием в случае, если другие шары еще не вошли в зацепление, что приводит к отклонению действительного угла поворота ведомого звена от номинального. Зазор между шаром и пазом сепаратора δ приводит к появлению кинематической погрешности.

1.3 Исследование влияния динамических нагрузок на кинематическую погрешность планетарных радиально-плунжерных передач методами компьютерного моделирования

Проводилось компьютерное моделирование оценки точности планетарных радиально-плунжерных передач в динамике. Целью исследования было определить зависимости кинематической погрешности передачи от различных факторов в условиях, близких к эксплуатационным без учета погрешностей изготовления. Это позволит оценить величину и характер изменения кинематической погрешности от динамических нагрузок, упругих деформаций, зазоров в зацеплении. Провести такие исследования экспериментально сложно, т. к. при натурном эксперименте используются передачи и механизмы, изготовленные с погрешностями в пределах заданных допусков. Поэтому указанные выше исследования проводились методами компьютерного моделирования.

Моделирование осуществлялось в среде SolidWorks. Объектом исследования являлась однопериодная радиально-плунжерная передача с промежуточными телами качения сателлитами-шарами, передаточное отношение передачи $i = 7$, число периодов ведущей дорожки $z_1 = 1$, число периодов неподвижной дорожки $z_2 = 6$, средний радиус неподвижной многопериодной дорожки $R = 41,5$ мм, амплитуда многопериодной кривой $3,75$ мм. В программе SolidWorks была создана компьютерная 3D-модель передачи (рисунок 1.5). В CAD-окне программы выполнялась проверка отсутствия зазоров в модели зацепления перед симуляцией вращения (рисунок 1.6). Зазор между замыкающим сателлитом и сепаратором не превышал $0,0012$ мм. В этом же окне программы (рисунок 1.7) проведена проверка отсутствия интерференции деталей зацепления, которая составила при пересечении поверхностей шара и колеса $4,35 \cdot 10^{-6}$ мм³.

В модуле SolidWorks Motion проведено моделирование работы передачи с целью определения влияния динамических нагрузок на ее кинематическую погрешность.

На рисунке 1.8 представлено окно модуля программы, в котором задавались следующие параметры: время вращения выходного вала за его полный оборот; направление и частота вращения двигателя; поверхности контактов деталей зацепления; нагрузочный момент на выходном валу.

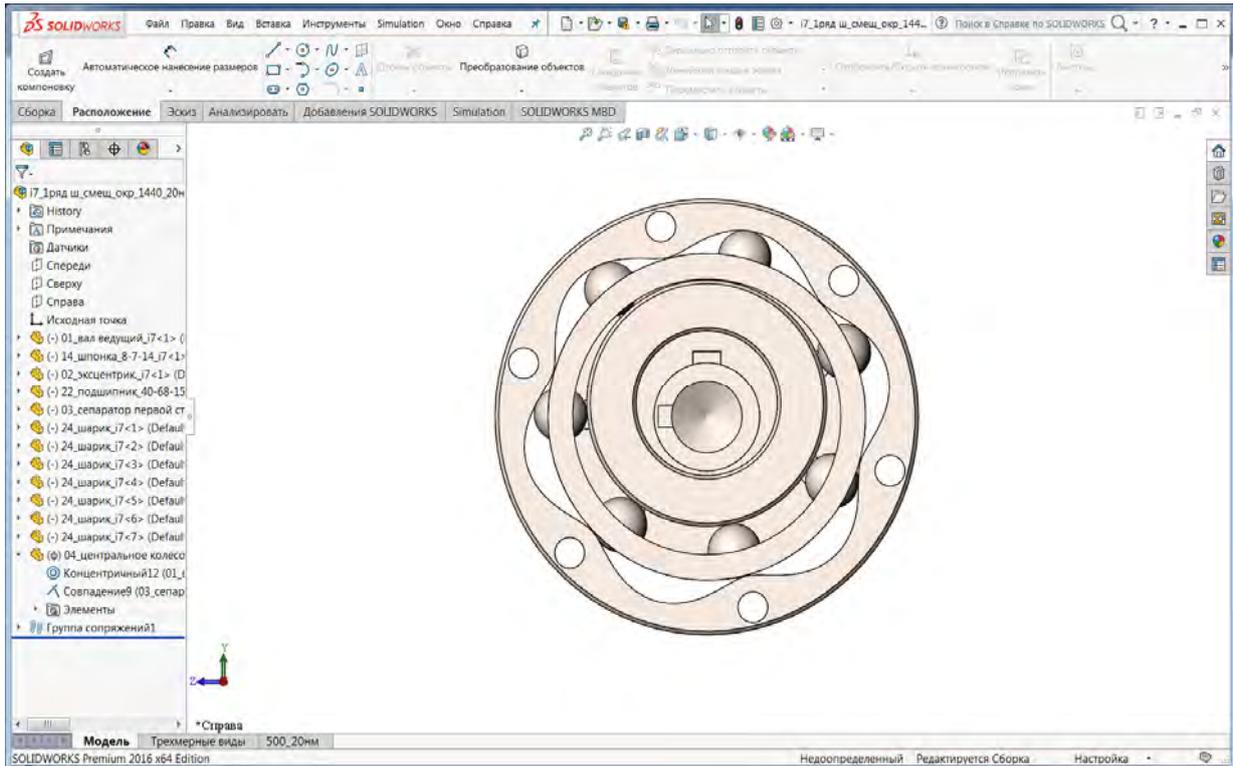


Рисунок 1.5 – Компьютерная 3D-модель планетарной радиально-плунжерной передачи

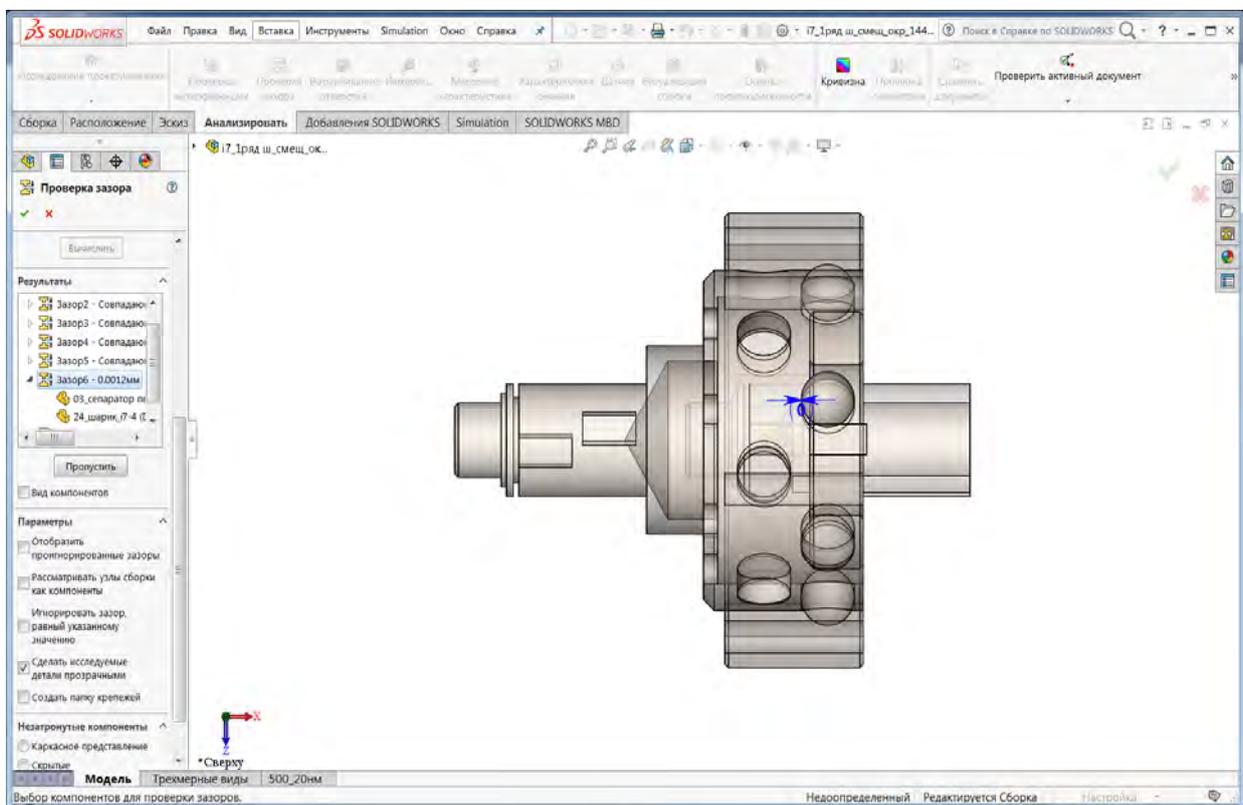


Рисунок 1.6 – CAD-окно программы SolidWorks с проверкой зазоров в зацеплении

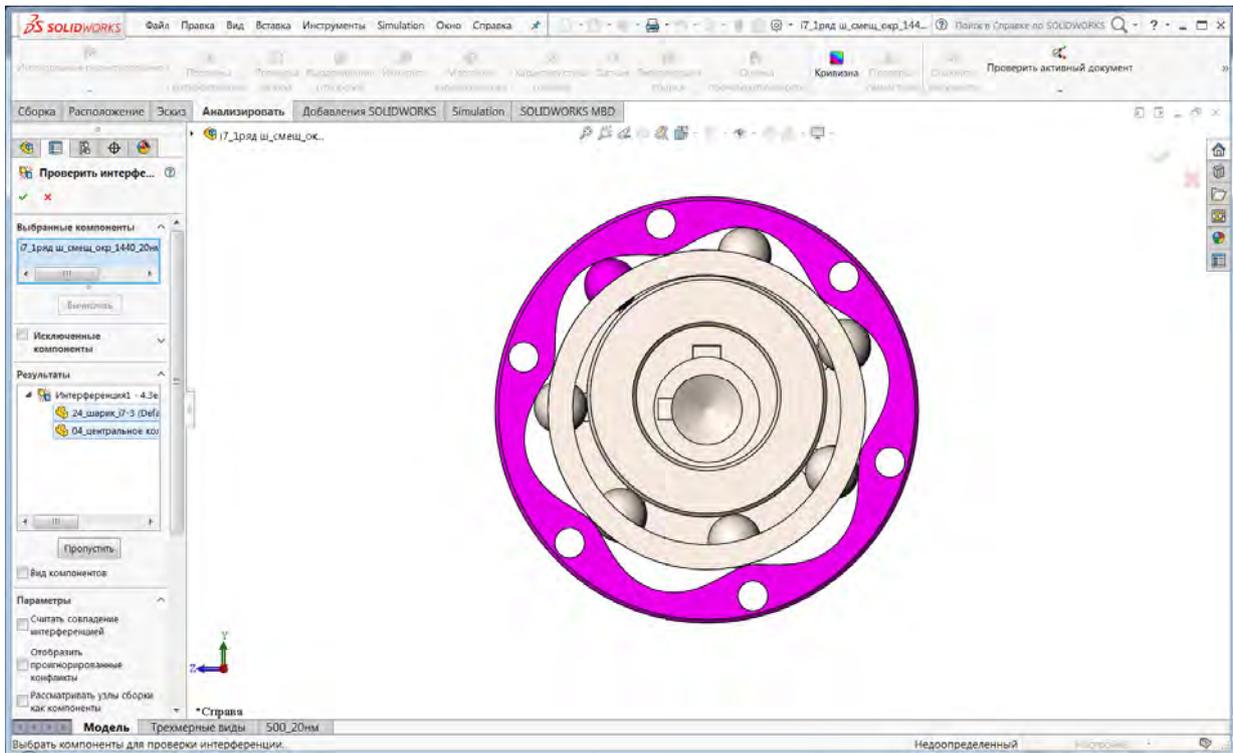


Рисунок 1.7 – CAD-окно программы SolidWorks с проверкой интерференции деталей

Также задавались значения свойств упругости: скорости и коэффициенты динамического и статического трения; жесткость деталей. При моделировании работы передачи и симуляции вращения получены графики угловых перемещений, скоростей и ускорений, а также сил и моментов, действующих на детали. На рисунке 1.9 показаны результаты моделирования с графиками в окне программы. Координаты точек на графиках, полученных моделированием, сохранялись в текстовом файле в виде ASCII-таблицы и в таблице Excel. По результатам угловых перемещений и скоростей можно построить графики кинематических погрешностей передачи.

Кинематическую погрешность передачи можно рассчитать, учитывая значения угловых перемещений, полученных моделированием в SolidWorks Motion [12, 13]. Эти значения, создаваемые программой в ASCII-таблице, которая включает столбцы времени и углового перемещения, имеют неравномерный шаг. Рассчитать кинематическую погрешность с равномерным шагом можно по следующим выведенным формулам.

Кинематическая погрешность согласно [14–16]

$$F_{к.п.} = \varphi_{\delta} - \varphi_{н}, \quad (1.3)$$

где φ_{δ} – действительный угол поворота (перемещения);

$\varphi_{н}$ – номинальный угол поворота (перемещения).

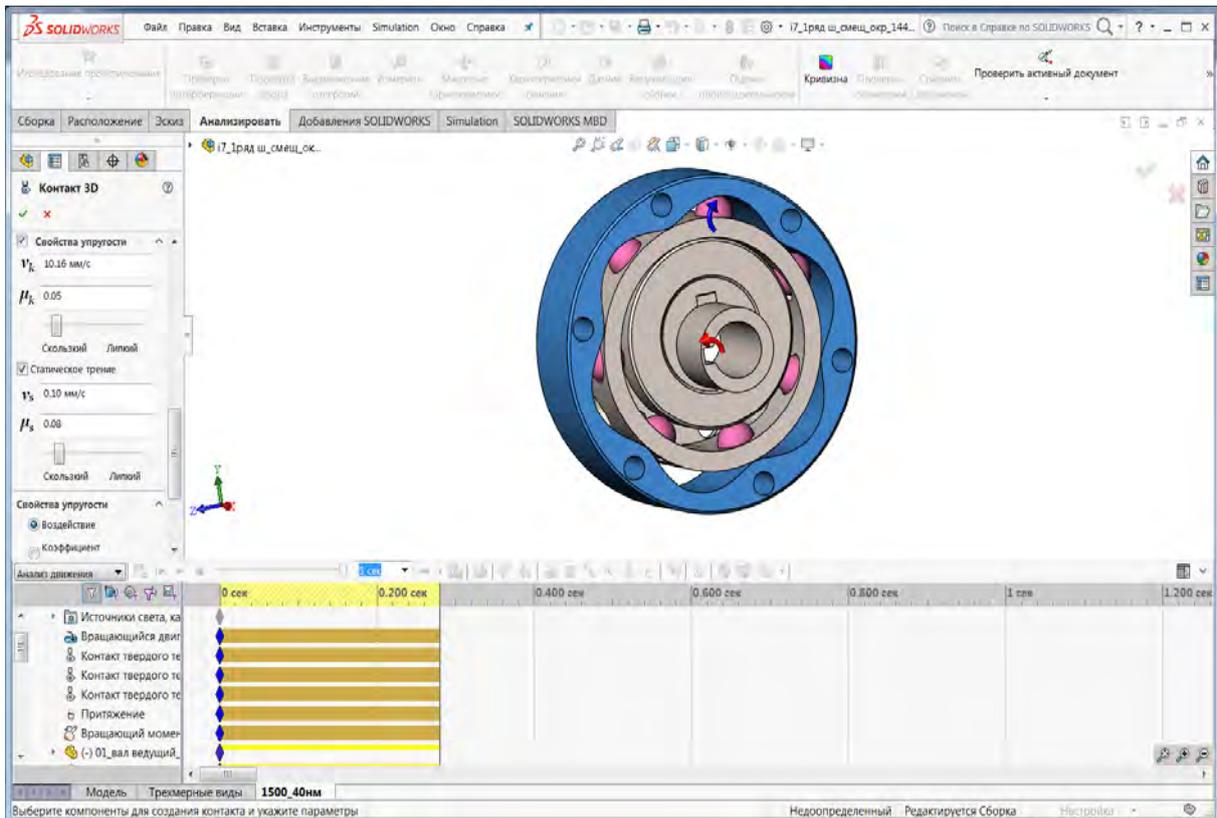


Рисунок 1.8 – Окно модуля SolidWorks Motion с моделью для определения кинематической погрешности в динамике

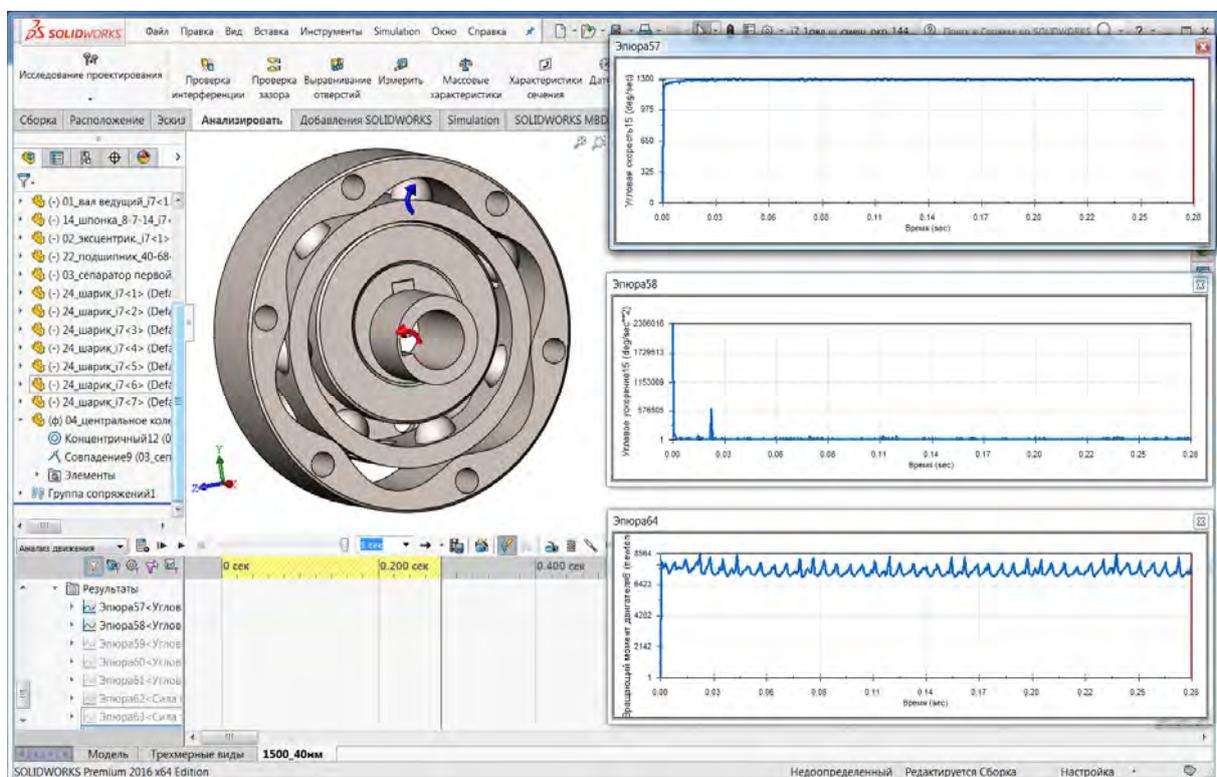


Рисунок 1.9 – Результаты моделирования кинематических и динамических характеристик радиально-плунжерной передачи

Действительный угол поворота или углового перемещения получен в результате моделирования и занесен в ASCII-таблицу результатов.

Номинальный угол поворота определим по формуле

$$\varphi_n = \frac{t_n}{t_n} \Delta\varphi_n, \quad (1.4)$$

где t_n – неравномерный временной шаг, задаваемый программой;

t_n – номинальный накопленный шаг времени;

$\Delta\varphi_n$ – номинальный угловой накопленный шаг.

Номинальный накопленный шаг времени

$$t_{n,i} = \frac{\Sigma t}{m} + t_{n,i-1}, \quad (1.5)$$

где Σt – время полного оборота выходного вала;

m – число значений действительного угла поворота, полученных в результате моделирования;

i – текущее значение.

Номинальный угловой накопленный шаг

$$\Delta\varphi_{n,i} = \frac{2\pi}{m} + \varphi_{n,i-1}. \quad (1.6)$$

После подстановки формул (1.4)–(1.6) в (1.3) получим формулы

$$F_{к.н.} = \varphi_\partial - \frac{t_n}{\frac{\Sigma t}{m} + t_{n,i-1}} \left(\frac{2\pi}{m} + \varphi_{n,i-1} \right); \quad (1.7)$$

$$F_{к.н.} = \varphi_\partial - \frac{t_n (2\pi + m\varphi_{n,i-1})}{\Sigma t + m t_{n,i-1}}. \quad (1.8)$$

По результатам моделирования и с помощью формул (1.3)–(1.8) построены графики кинематических погрешностей планетарной радиально-плунжерной передачи (рисунки 1.10–1.17).

На графиках (см. рисунки 1.10 и 1.12), полученных моделированием без нагрузки с увеличением частоты вращения двигателя, кинематическая погрешность передачи увеличивается.

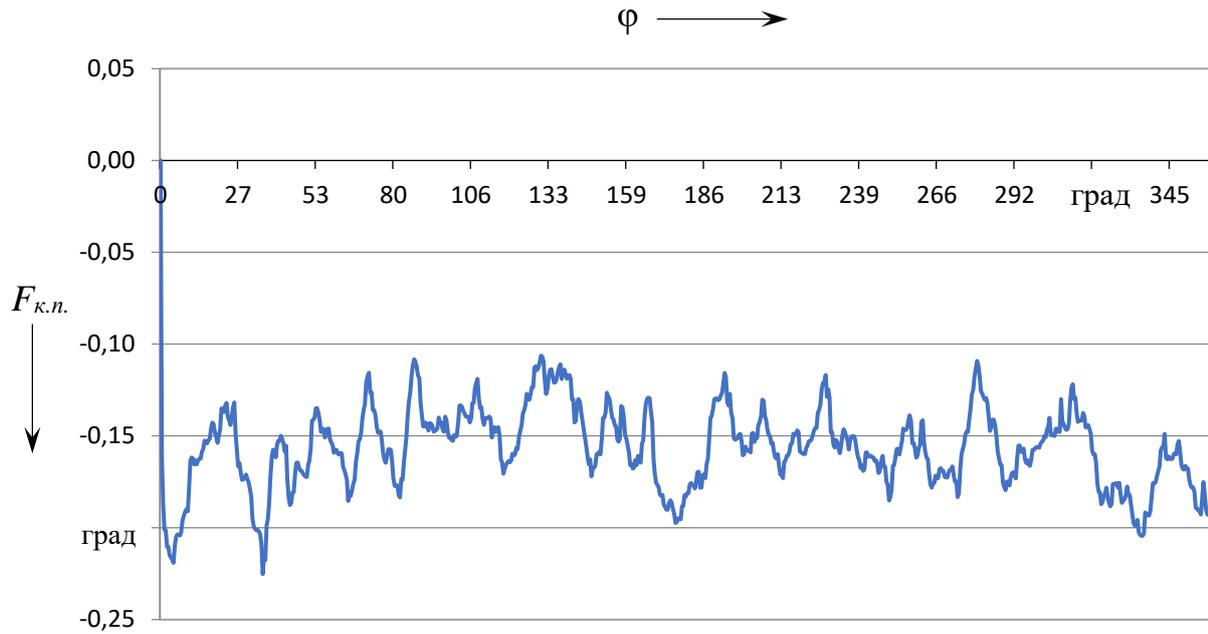


Рисунок 1.10 – Кинематическая погрешность передачи без нагрузки с частотой вращения двигателя 100 мин^{-1}

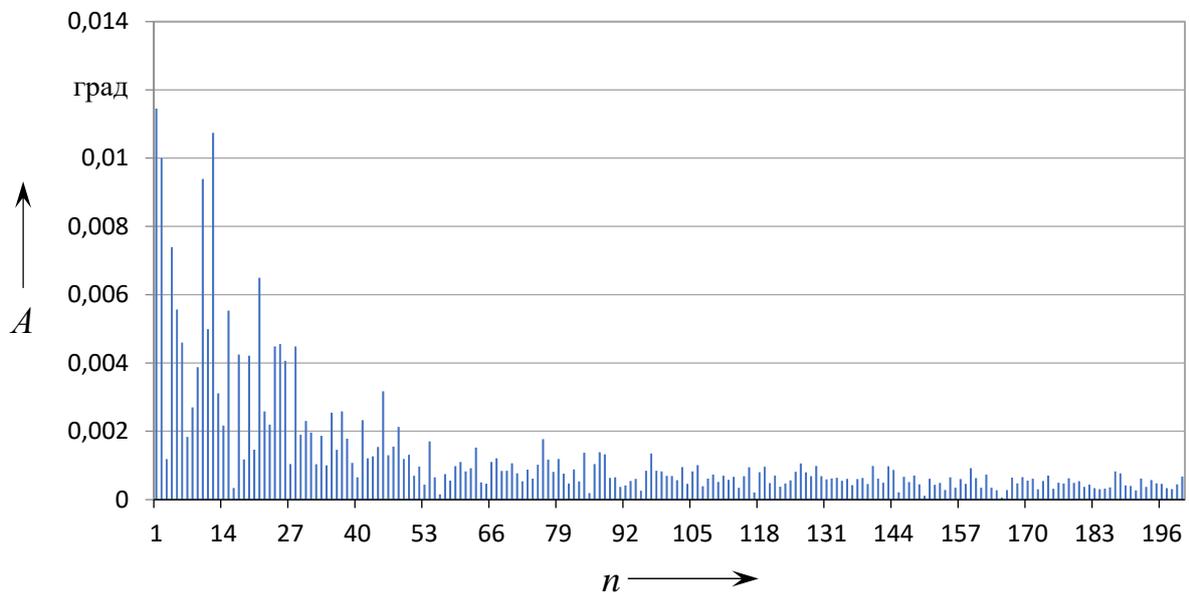


Рисунок 1.11 – Спектр амплитуд кинематической погрешности передачи без нагрузки с частотой вращения двигателя 100 мин^{-1}

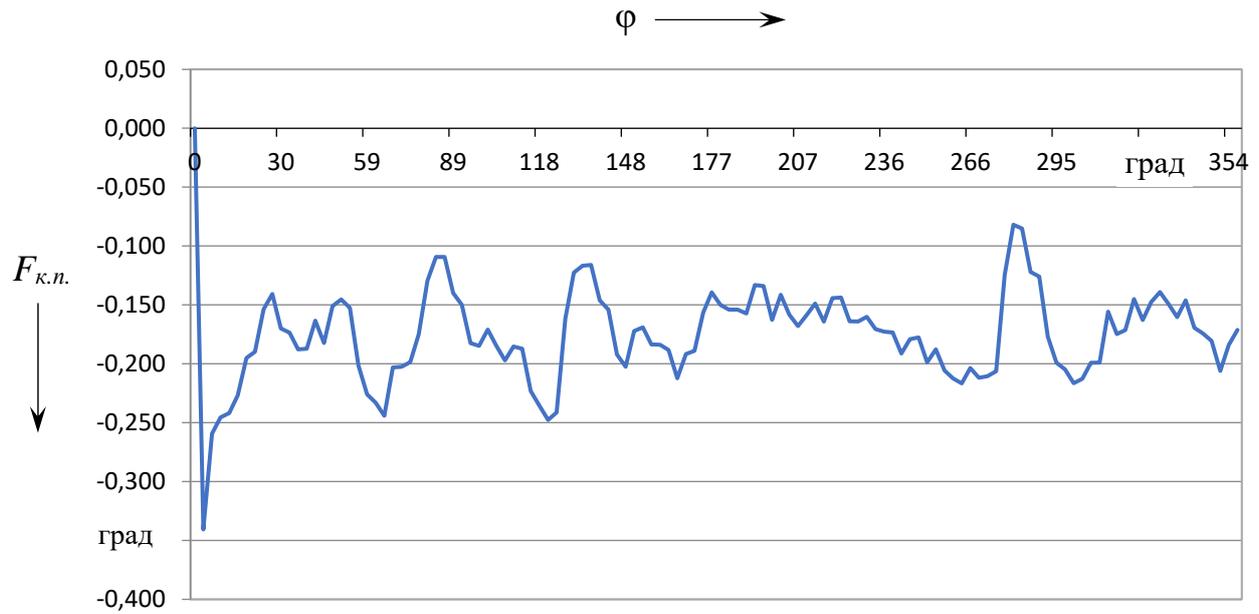


Рисунок 1.12 – Кинематическая погрешность передачи без нагрузки с частотой вращения двигателя 1500 мин^{-1}

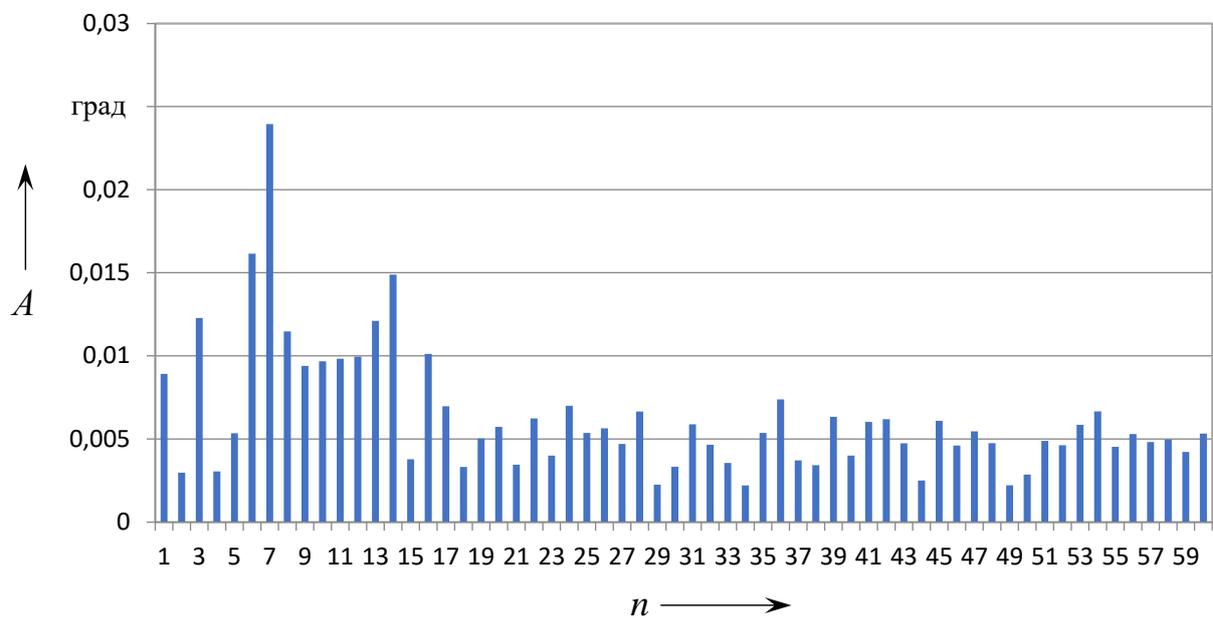


Рисунок 1.13 – Спектр амплитуд кинематической погрешности передачи без нагрузки с частотой вращения двигателя 1500 мин^{-1}

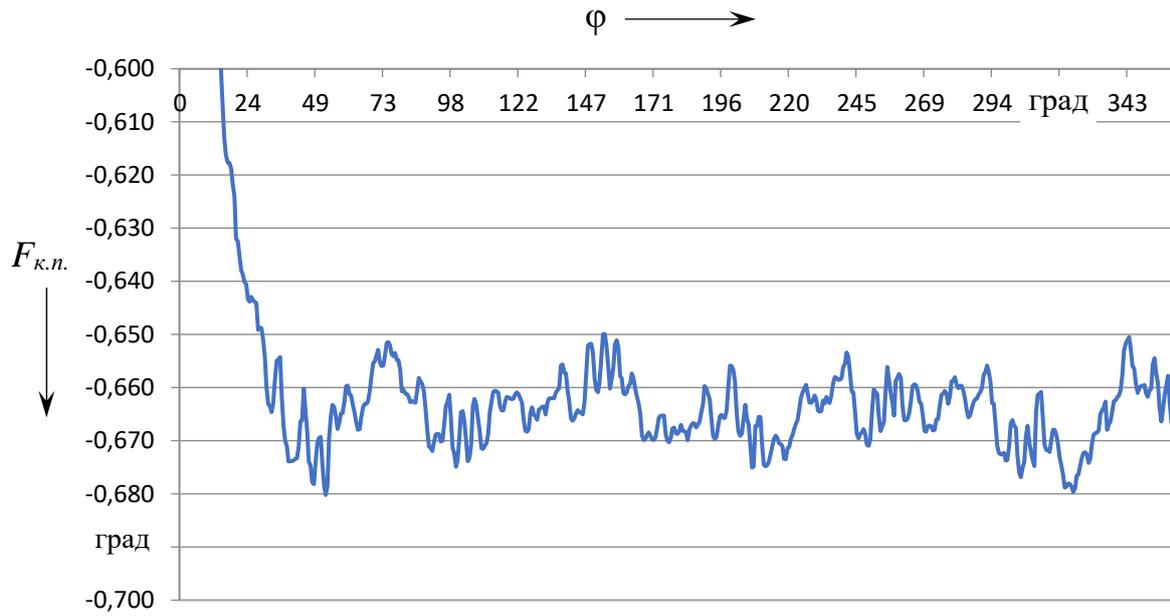


Рисунок 1.14 – Кинематическая погрешность передачи с нагрузкой 40 Н·м и частотой вращения двигателя 1500 мин⁻¹

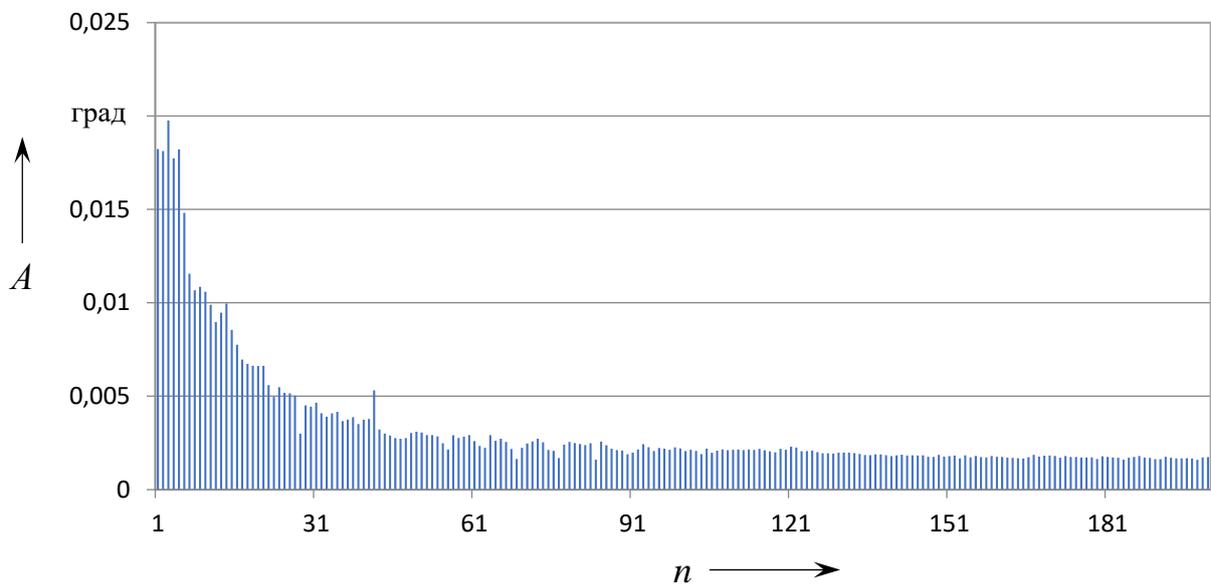


Рисунок 1.15 – Спектр амплитуд кинематической погрешности передачи с нагрузкой 40 Н·м и частотой вращения двигателя 1500 мин⁻¹

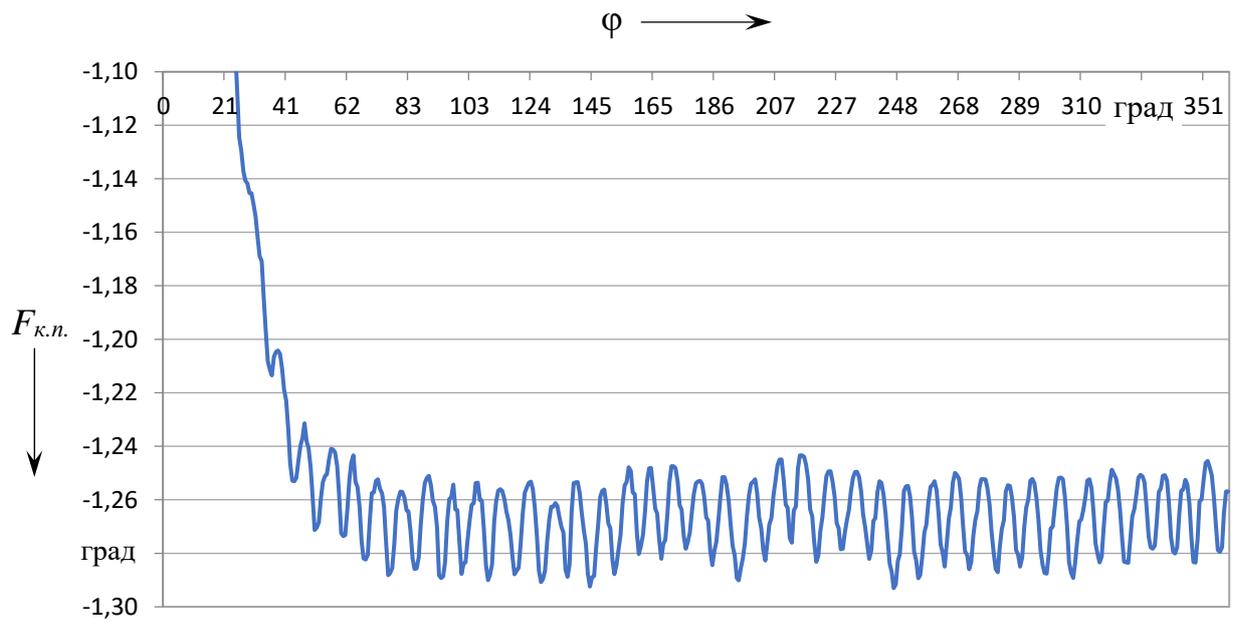


Рисунок 1.16 – Кинематическая погрешность передачи с нагрузкой 100 Н·м и частотой вращения двигателя 1500 мин⁻¹

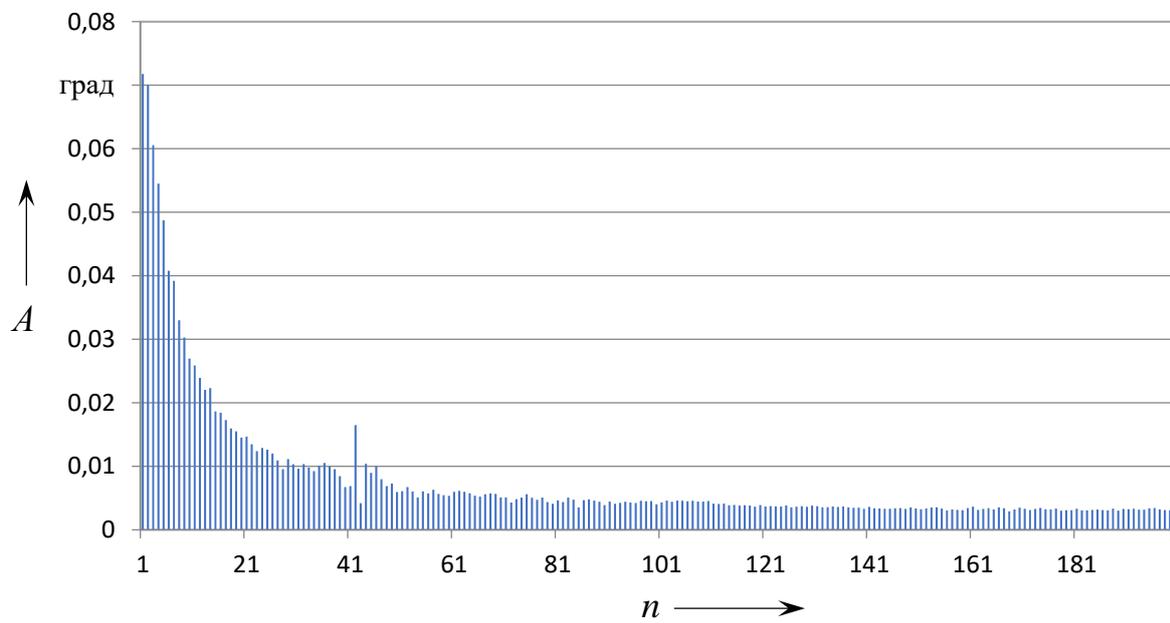


Рисунок 1.17 – Спектр амплитуд кинематической погрешности передачи с нагрузкой 100 Н·м и частотой вращения двигателя 1500 мин⁻¹

Так, при частоте вращения двигателя и, соответственно, ведущего вала 100 мин^{-1} наибольшая кинематическая погрешность установившегося вращения составила $0,119$ град, а при частоте вращения 1500 мин^{-1} – $0,166$ град. При моделировании с нагрузкой на выходном валу (см. рисунки 1.14 и 1.16) кинематическая погрешность меньше, чем без нагрузки, но с увеличением нагружающего момента она увеличивается. При частоте вращения 1500 мин^{-1} и нагрузках 40 и $100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ кинематическая погрешность без учета времени пуска составила соответственно $0,031$ и $0,052$ град. Уменьшение кинематической погрешности при работе передачи под нагрузкой объясняется выборкой зазоров и меньшей амплитудой колебаний сателлитов во время вращения, однако под нагрузкой увеличиваются упругие деформации и повышают наибольший размах угла поворота выходного звена. На графиках (см. рисунки 1.10, 1.12, 1.14 и 1.16) также видны скачки значений в начале вращения (пуска двигателя). Они связаны с инертностью масс узлов передачи. Кинематическая погрешность определяется как разность действительного и номинального углов поворота ведомого вала в соответствии с формулой (1.3). Действительный угол поворота ведомого вала отстает от номинального в начале вращения, и появляется скачок на графике. С увеличением частоты вращения и нагружаемого момента он увеличивается, ведущий вал замедляется при разгоне.

На рисунках 1.11, 1.13, 1.15 и 1.17 показаны спектры амплитуд кинематических погрешностей, представленных на графиках (см. рисунки 1.10, 1.12, 1.14 и 1.16). На спектрах, характеризующих точность вращения передачи без нагрузки (см. рисунки 1.11 и 1.13), выделяются гармоники с номерами, кратными числу периодов дорожки $z_2 = 6$ и передаточному отношению $i = 7$. На спектрах, полученных при анализе кинематических погрешностей передачи под нагрузкой (см. рисунки 1.15 и 1.17), гармоники имеют экспонентный характер и явно выделенных гармоник нет. Экспериментально можно определить показатель степени гармонической функции. Значения кинематических параметров и их спектров амплитуд получены в результате использования разработанного программного обеспечения VBA Excel (приложение А).

В результате исследований установлено, что динамические нагрузки значительно влияют только в начале вращения, при этом при пуске двигателя происходит некоторое замедление, связанное с инертностью передачи. При устоявшемся вращении изменение угла поворота выходного вала происходит незначительно, и кинематическая погрешность имеет небольшие значения.

1.4 Статический анализ для расчета деформаций и напряжений в планетарной радиально-плунжерной передаче

Как показали исследования динамики передачи, представленные в подразделе 1.3, упругие деформации незначительно влияют на ее кинематическую точность. При контакте сателлитов-шаров с беговыми дорожками и сепаратором-водителем возникают большие контактные напряжения и деформации. Целью исследования является статический анализ твердотельных моделей в программе SolidWorks Simulation методами конечных элементов для проверки на прочность деталей передачи, а также определение значений упругих перемещений для оценки ее кинематических погрешностей.

На рисунке 1.18 показано окно CAD-модуля программы SolidWorks, в котором создана твердотельная 3D-модель колеса с многопериодной дорожкой с числом периодов $z_2 = 6$. Колесо является наиболее ответственной деталью планетарной радиально-плунжерной передачи с передаточным отношением $i = 7$.

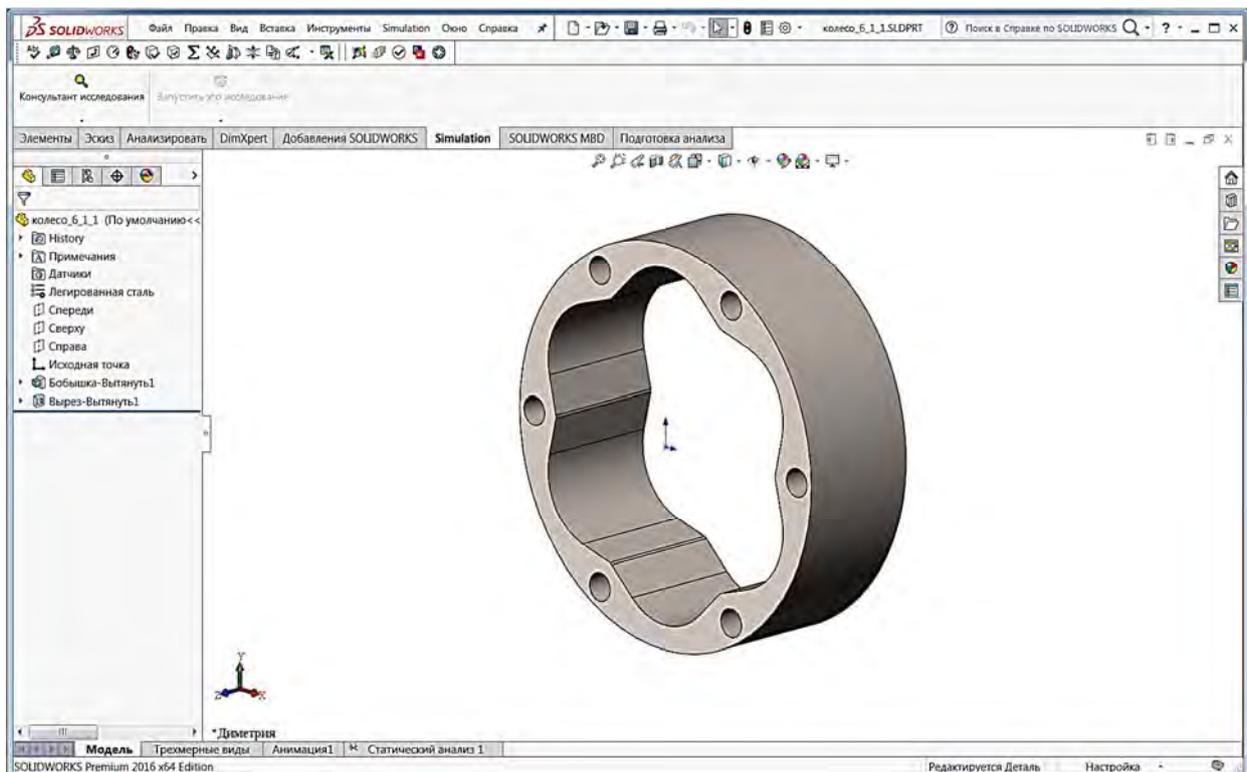


Рисунок 1.18 – Твердотельная 3D-модель колеса с многопериодной дорожкой

В модуле Simulation программы SolidWorks заданы параметры для статического анализа твердотельной модели. Задавалось крепление по всей наружной цилиндрической поверхности и в ограниченных участках этой поверхности. На рисунках 1.19 и 1.20 представлены модели колеса с разными условиями крепления. В первом случае (см. рисунок 1.19) моделировалась

установка колеса в передаче, во втором (см. рисунок 1.20) – зажим колеса при обработке дорожки на станке, например, в кулачковом патроне.

Задавалась внешняя нагрузка. Для первой модели (см. рисунок 1.19) устанавливалась рассчитанная нормальная сила, равная 1481 Н, действующая на рабочую поверхность многопериодной дорожки при передаче мощности 1,5 кВт. Для второй модели (см. рисунок 1.20) устанавливалась наибольшая сила, действующая при обработке дорожки фрезерованием, равная 1500 Н.

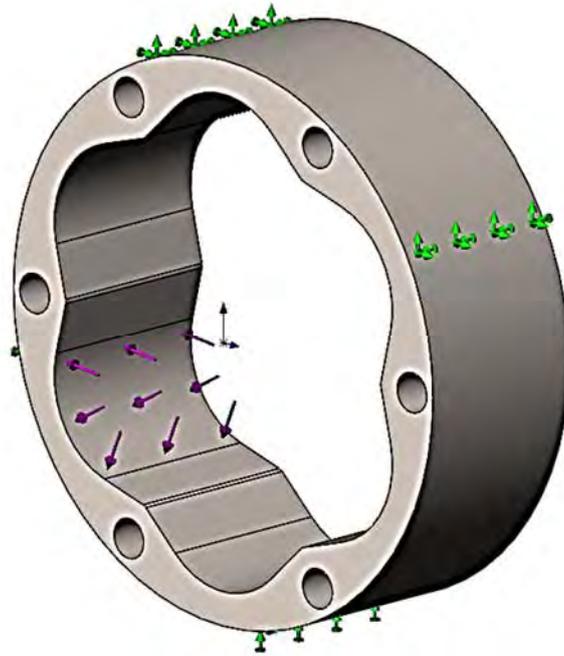


Рисунок 1.19 – Модель колеса с креплением в передаче

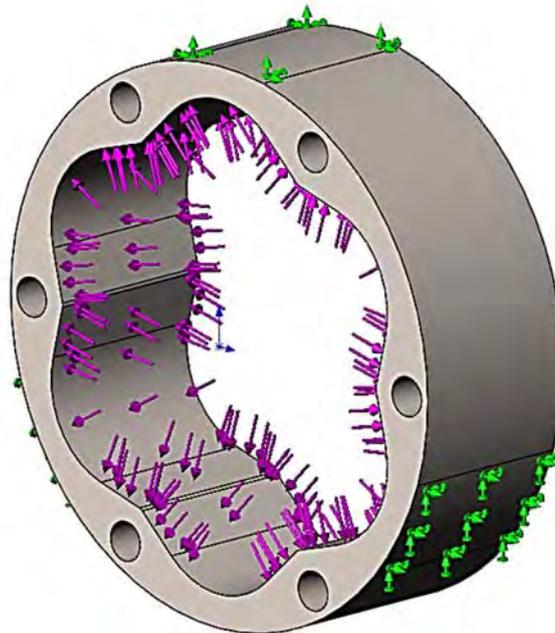


Рисунок 1.20 – Модель колеса с креплением на станке

На рисунке 1.21 показано окно модуля Simulation с созданной сеткой твердотельной модели колеса. Размер сетки (количество узлов и элементов) определялся автоматически программой в зависимости от геометрии и размеров модели, допуска и параметров управления сеткой, характеристик контакта.

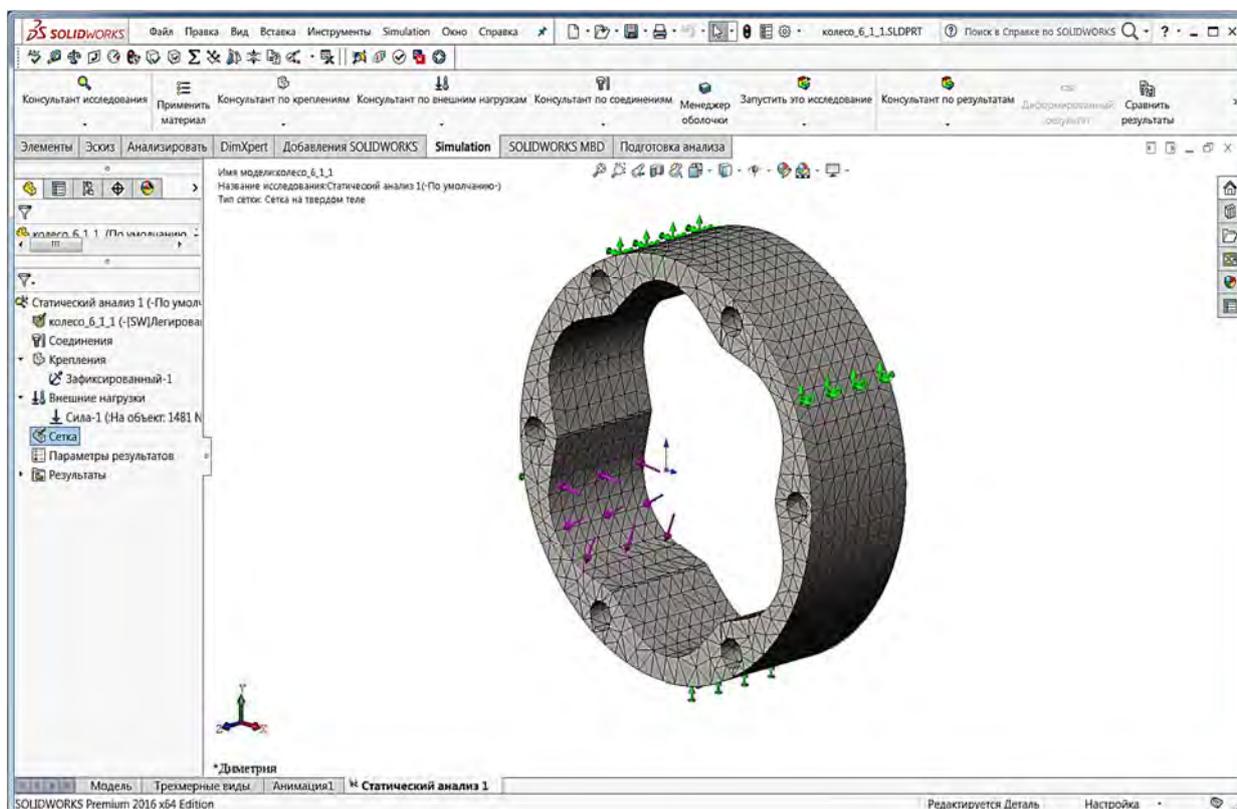


Рисунок 1.21 – Окно модуля Simulation с созданной сеткой твердотельной модели колеса

В результате статического анализа моделей получены эпюры напряжений, деформаций и перемещений в материале колеса с многопериодной дорожкой (рисунки 1.22–1.27).

На рисунке 1.22 показана эпюра нормальных напряжений на рабочей поверхности колеса с многопериодной дорожкой от действия сил при передаче мощности 1,5 кВт, т. е. при работе передачи под нагрузкой. На эпюре видно, что максимальные напряжения не превышают предела текучести материала колеса – легированной стали.

На рисунке 1.25 представлена эпюра нормальных напряжений на поверхности многопериодной дорожки колеса от действия сил при моделировании обработки на станке. Наибольшие напряжения в этом случае также не превышают предела текучести материала и возникают в отверстиях для крепления колеса. Для этой модели формирование поверхности

многопериодной дорожки (обработка дорожки фрезерованием) предполагается после получения отверстий на ободе колеса.

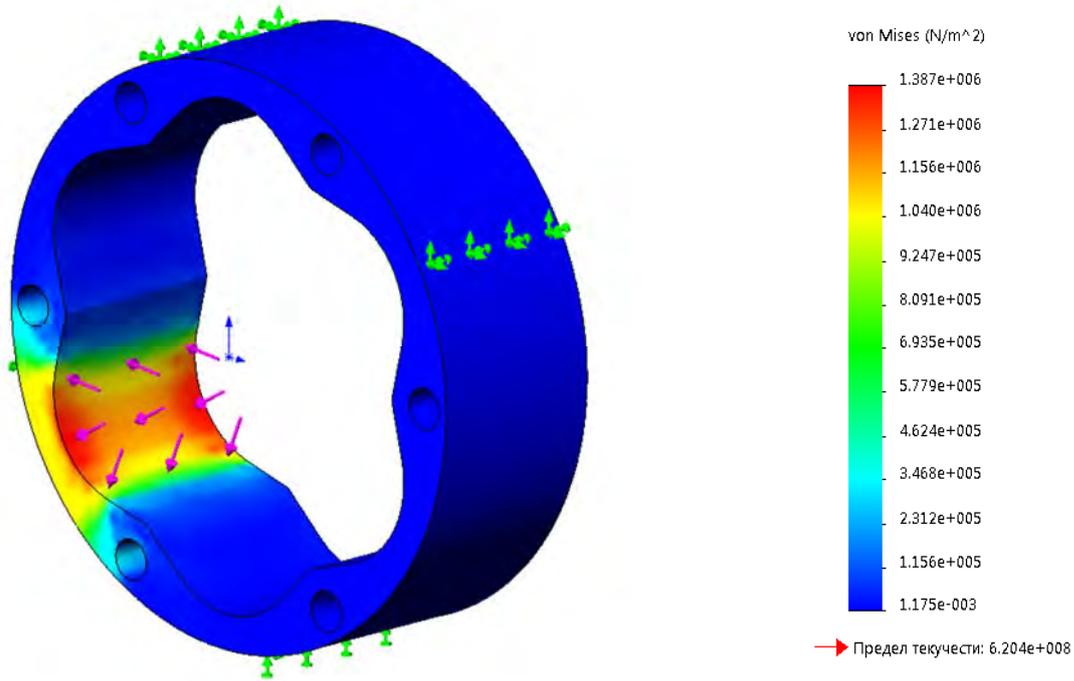


Рисунок 1.22 – Эпюра нормальных напряжений на рабочей поверхности колеса с многопериодной дорожкой от действия сил при передаче мощности

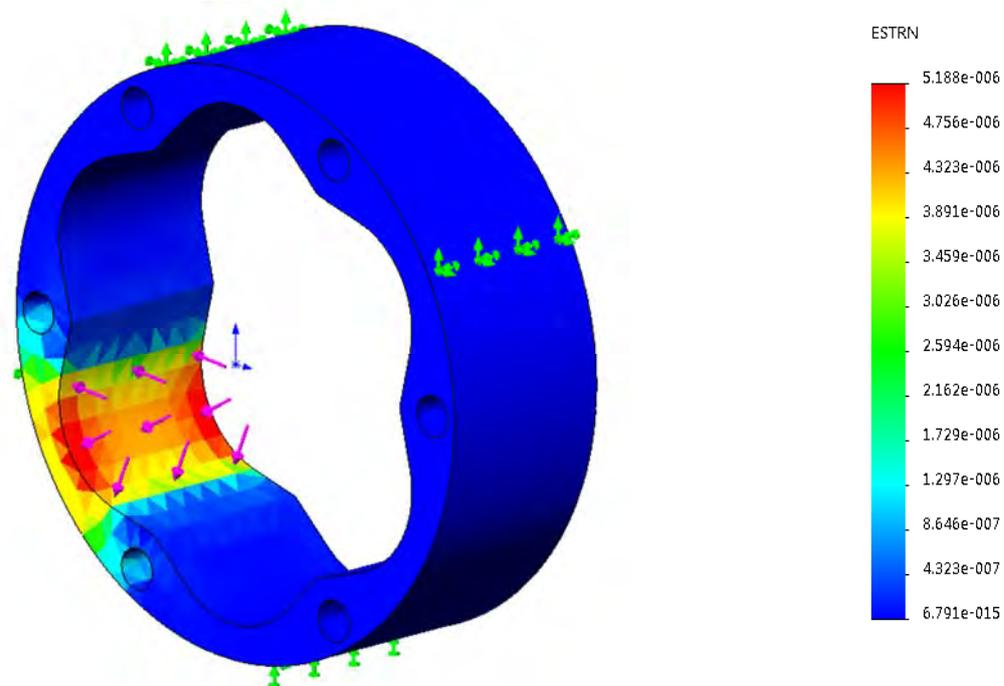


Рисунок 1.23 – Эпюра деформаций на рабочей поверхности колеса с многопериодной дорожкой от действия сил при передаче мощности

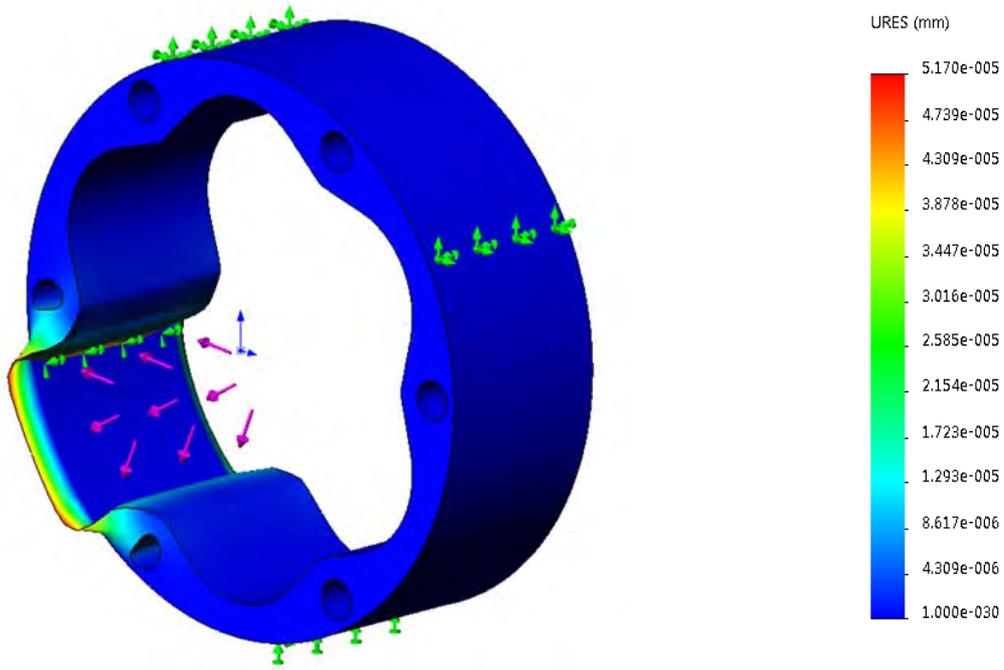


Рисунок 1.24 – Эпюра перемещений материала рабочей поверхности колеса с многопериодной дорожкой от действия сил при передаче мощности

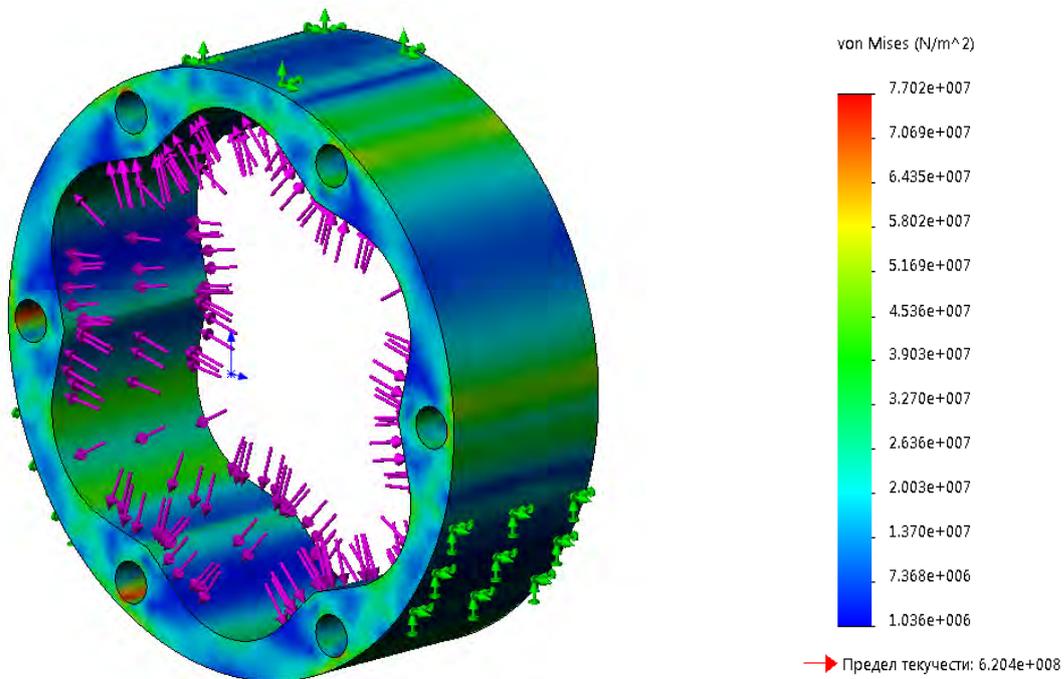


Рисунок 1.25 – Эпюра нормальных напряжений на поверхности многопериодной дорожки колеса от действия сил при моделировании обработки на станке

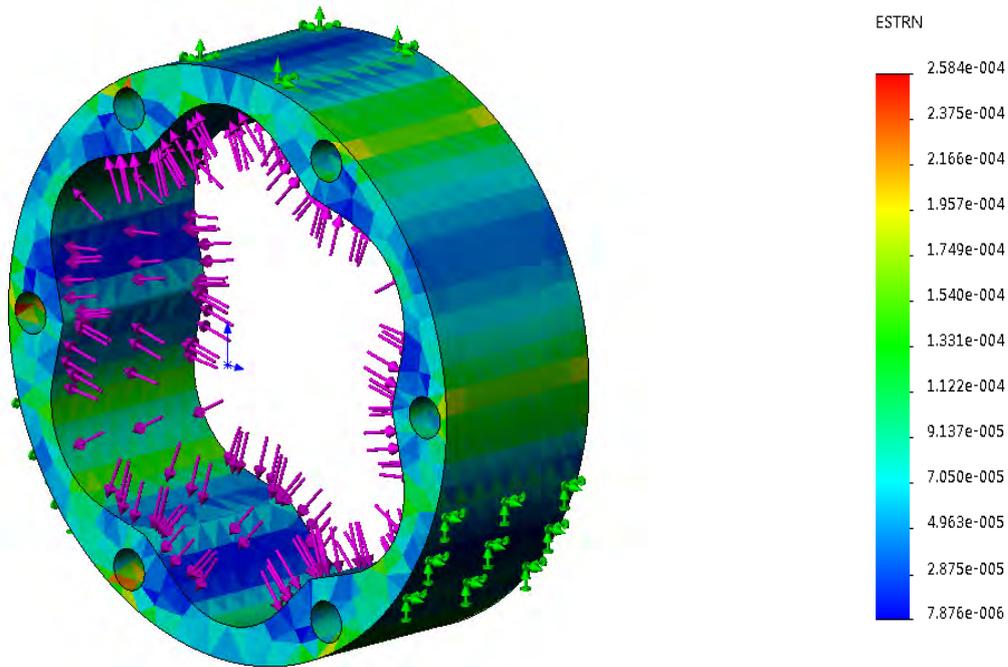


Рисунок 1.26 – Эпюра деформаций на поверхности многопериодной дорожки колеса от действия сил при моделировании обработки на станке

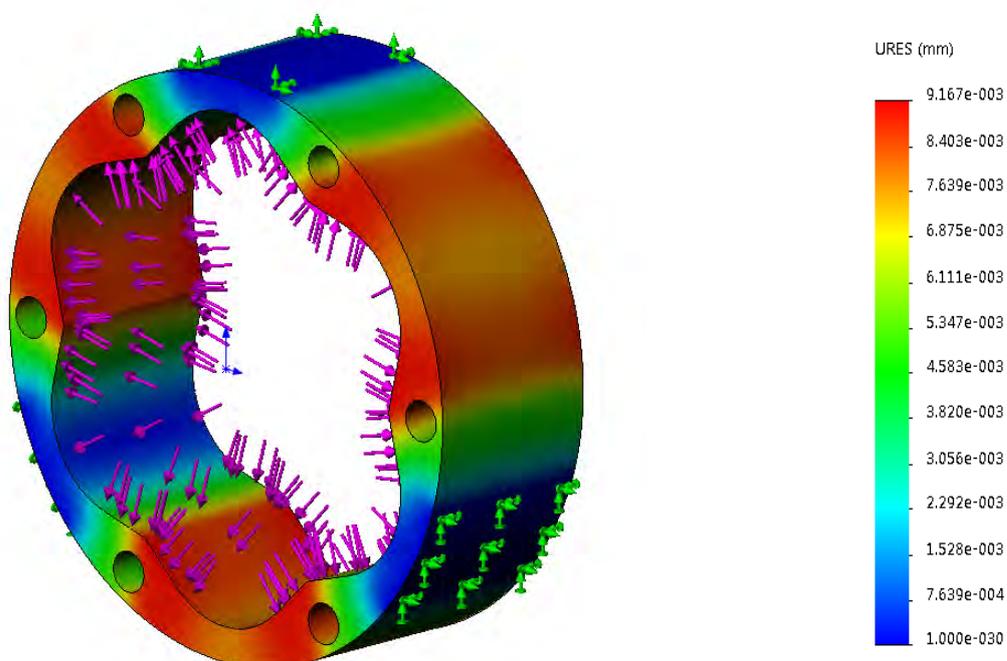


Рисунок 1.27 – Эпюра перемещений материала поверхности многопериодной дорожки колеса от действия сил при моделировании обработки на станке

Так как напряжения на рабочей поверхности колеса не превышают предела текучести материала, то при работе передачи возникают упругие деформации. На рисунке 1.24 показана эпюра перемещений на рабочей поверхности колеса с многопериодной дорожкой от действия сил при передаче мощности. Эти перемещения незначительны, наибольшие из них составляют $5,1 \cdot 10^{-5}$ мм. Они не могут повлиять на кинематическую погрешность при работе передачи.

На рисунке 1.27 показана эпюра перемещений материала поверхности многопериодной дорожки колеса от действия сил при моделировании обработки на станке. Наибольшее значение перемещений составило 0,009 мм. Эти перемещения характеризуют погрешности обработки, связанные со смещением инструмента – фрезы при упругих деформациях, и образование неточного профиля дорожки.

На рисунках 1.23 и 1.26 представлены эпюры деформаций на поверхности колеса с многопериодной дорожкой. Деформации характеризуют перемещения материала детали в долях от его размера. Они рассчитываются как отношение перемещений к размеру колеса в направлениях координатных осей этих перемещений.

1.5 Исследование КПД планетарной радиально-плунжерной передачи методами компьютерного моделирования

В среде SolidWorks Motion выполнялось моделирование реальных значений КПД планетарной радиально-плунжерной передачи с передаточным отношением $i = 7$. На рисунках 1.8 и 1.9 показаны окна программы, в которых проводилось моделирование. Для оценки КПД на входном валу устанавливалось вращение с угловой скоростью, равной 1500 мин^{-1} . На выходном валу задавался нагружаемый момент 20, 40, 60, 80 и 100 Н·м. В результате моделирования получены значения вращающего момента на входном валу передачи. КПД передачи определялось по формуле

$$\eta = \frac{W_3}{W_1} 100 \%, \quad (1.9)$$

где W_1 – мощность на входном валу передачи;

W_3 – мощность на выходном валу передачи.

Так как $W_1 = W_3 + W_n$, где W_n – потери мощности, то

$$\eta = \frac{W_3}{W_3 + W_n} 100 \%. \quad (1.10)$$

Запишем формулу (1.9) подробнее:

$$\eta = \frac{M_3 \omega_3}{M_1 \omega_1}. \quad (1.11)$$

Так как $\omega_3 = \omega_1/i$, то

$$\eta = \frac{M_3 \omega_1}{M_1 \omega_1 i}. \quad (1.12)$$

Сократив на ω_1 , получим

$$\eta = \frac{M_3}{M_1 i}. \quad (1.13)$$

На рисунках 1.28 и 1.29 показаны графики зависимости значений КПД передачи от времени за полный оборот выходного вала с различными нагружающими моментами. Из графиков видно, что значения КПД передачи несколько выше, если нагружающие моменты меньше. Также видно, что при моментах на выходном валу 20 и 100 Н·м значения КПД передачи мало отличаются. Его среднее значение на графиках составляет 77 %. Наибольшие значения КПД (если не учитывать местные выбросы на графиках) достигают 80 %...82 %.

При создании простых и эффективных моделей в SolidWorks Motion сателлиты скользят по поверхностям беговых дорожек, что упрощает и делает более адекватной компьютерную модель. В этом случае в программе задавались коэффициенты трения: коэффициент динамического трения $\mu_k = 0,05$ и коэффициент статического трения $\mu_s = 0,08$. В реальной передаче сателлиты-шары катятся с проскальзыванием по поверхностям беговых дорожек, в этом случае коэффициенты трения будут ниже.

При моделировании не учитывались погрешности изготовления передачи, которые увеличивают проскальзывание сателлитов и уменьшают значения КПД.

Влияние точности изготовления передач и механизмов на их КПД требует специального изучения. Как показывают предварительные исследования, получить более высокий КПД передачи технологическими методами можно путем повышения точности изготовления и сборки ее деталей, применением отделочных видов обработки ответственных поверхностей.

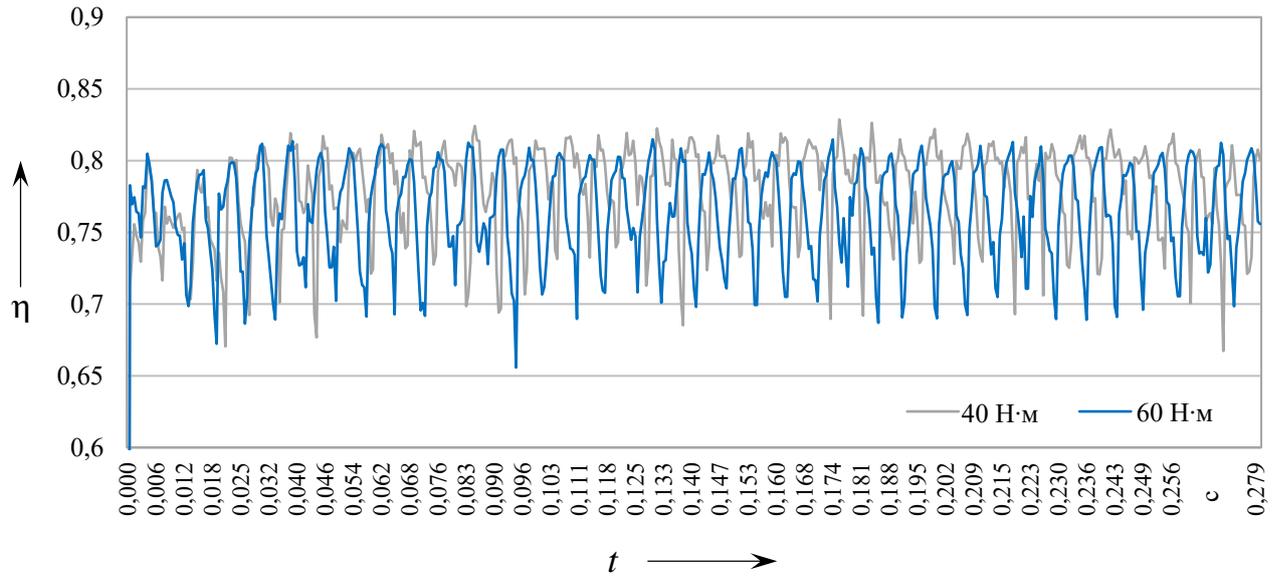


Рисунок 1.28 – Графики значений КПД планетарной радиально-плунжерной передачи с нагрузками 40 и 60 Н·м

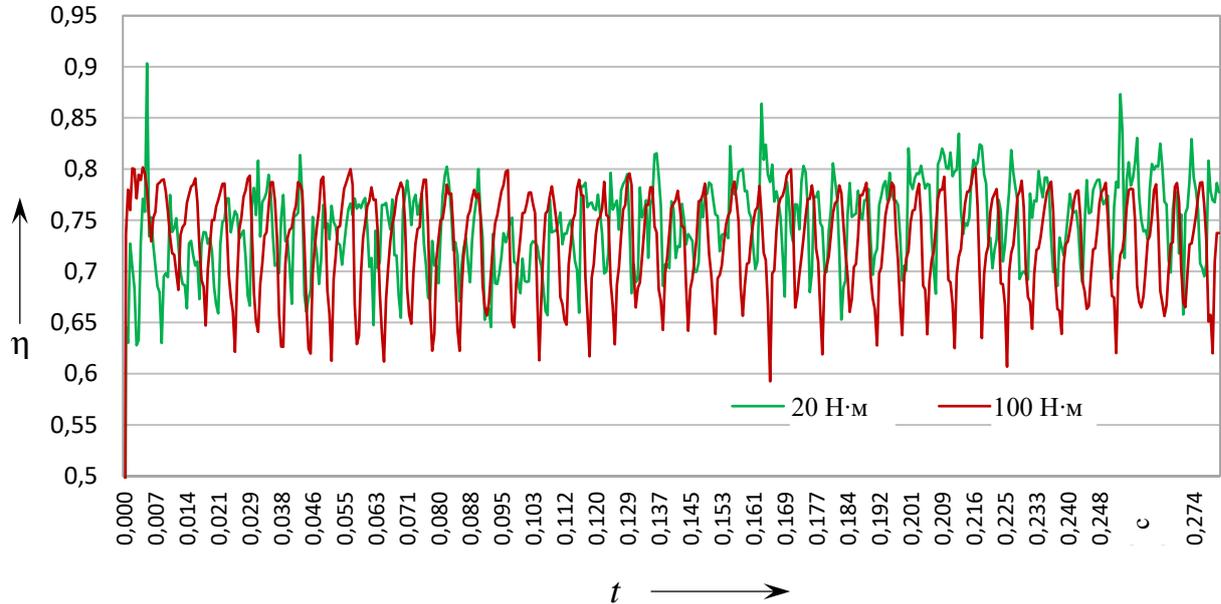


Рисунок 1.29 – Графики значений КПД планетарной радиально-плунжерной передачи с нагрузками 20 и 100 Н·м

2 Разработка методов оценки точностных параметров радиально-плунжерных передач в сборе на основе спектрального анализа их кинематических характеристик

2.1 Объект и методика экспериментальной оценки точности планетарного радиально-плунжерного редуктора

Оценка точности планетарных радиально-плунжерных передач проводилась методами экспериментальных исследований [17–26]. Объектом исследования являлся двухступенчатый планетарный радиально-плунжерный редуктор с передаточным отношением $i = 49$ и передаточным числом в каждой ступени $u = 7$. На рисунке Б.1 представлен чертеж конструкции редуктора и дано его описание. На рисунке 2.1 показан вид редуктора в сечении колеса с многопериодной дорожкой с деталями зацепления – шарами-сателлитами, сепаратором-водитилом и ведущим валом с эксцентрикром и подшипником.

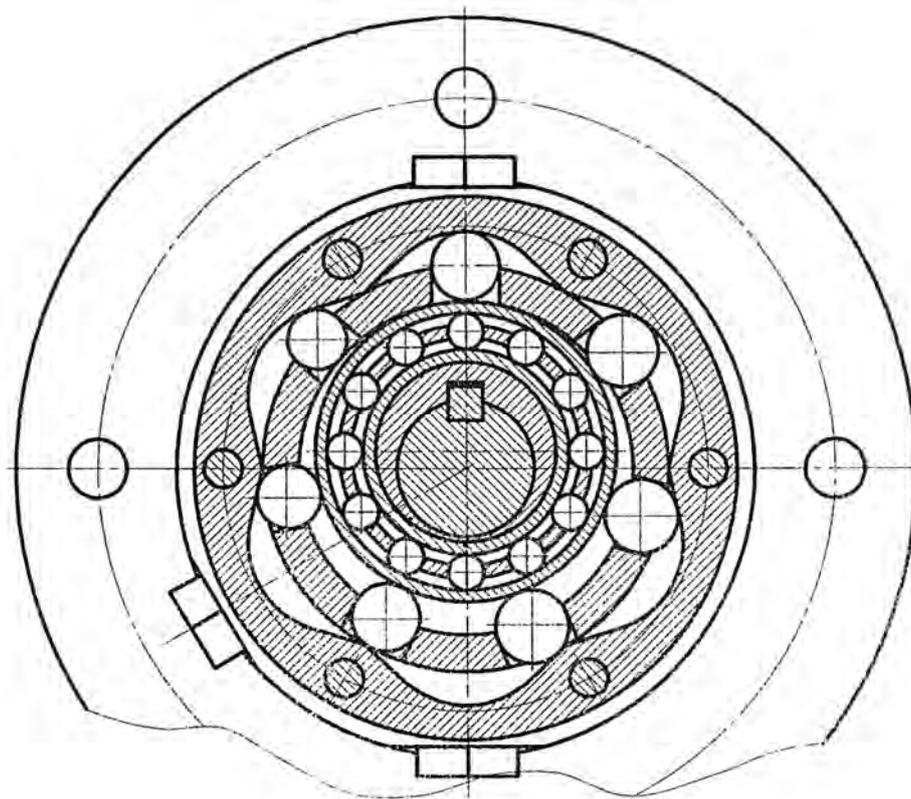


Рисунок 2.1 – Вид деталей зацепления редуктора

Разработаны методы оценки кинематической точности редукторов: метод экспериментальных измерений кинематических погрешностей на автоматизированном стенде; метод обработки экспериментальных данных и расчета значений кинематических погрешностей передачи с построением

графиков, включающий разработанное программное обеспечение; метод спектрального анализа полученных кинематических погрешностей с построением амплитудно-частотных спектров.

Методика экспериментальных исследований заключается в следующем. На стенде ведущий вал редуктора соединен с электродвигателем, ведомый вал – с датчиком угловых перемещений с дискретностью 8000 шагов (положений между импульсами) за один оборот ведомого вала. Точность измерения при этом очень высокая и составляет 2,7 угл. мин. Вал электродвигателя также соединялся с датчиком угловых перемещений, чтобы определить точность вращения на ведущем валу редуктора. Датчики подключены к специальному блоку АЦП и ПЧМ с программным обеспечением, рассчитывающим кинематическую погрешность и амплитудно-частотный спектр. После снятия сигнала на экране ПЧМ отображаются графики, рассчитанные и построенные в автоматическом режиме разработанным программным обеспечением. Численные значения, полученные на графиках, сохраняются в ASCII-файлах.

2.2 Экспериментальные методы оценки кинематических погрешностей планетарных радиально-плунжерных передач

Экспериментальные исследования кинематической точности редуктора проведены в соответствии с методикой, описанной в подразделе 2.1. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 2.2–2.13.

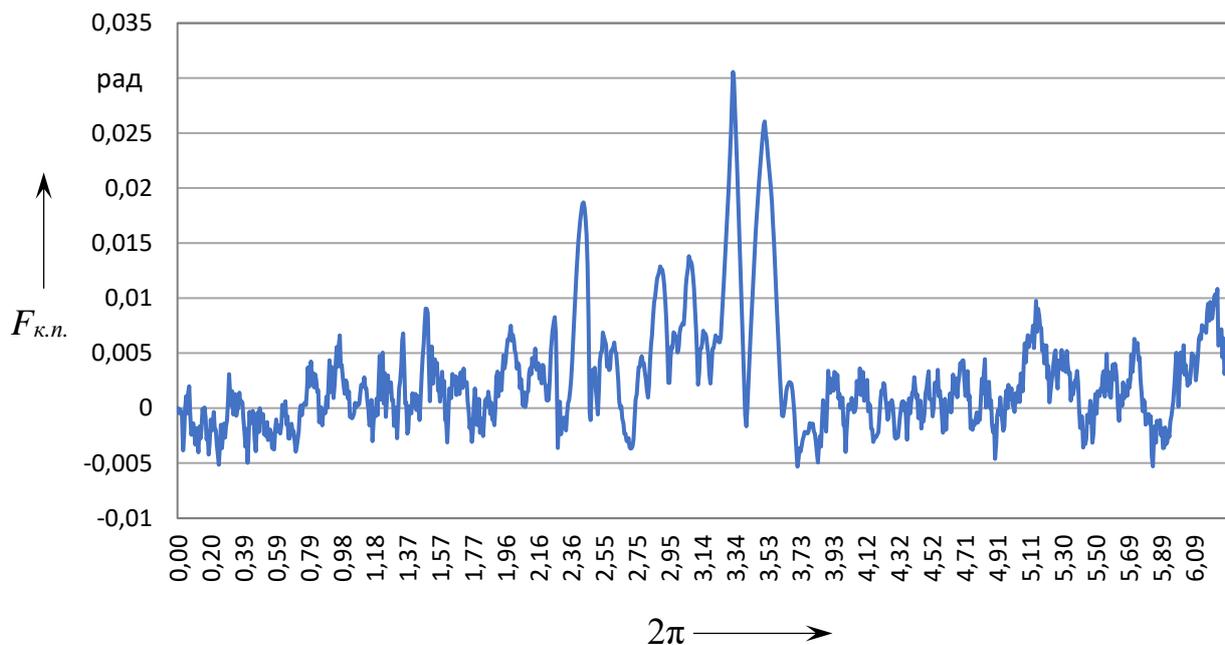


Рисунок 2.2 – Кинематическая погрешность на ведомом валу редуктора за один оборот, измеренная на стенде двумя датчиками

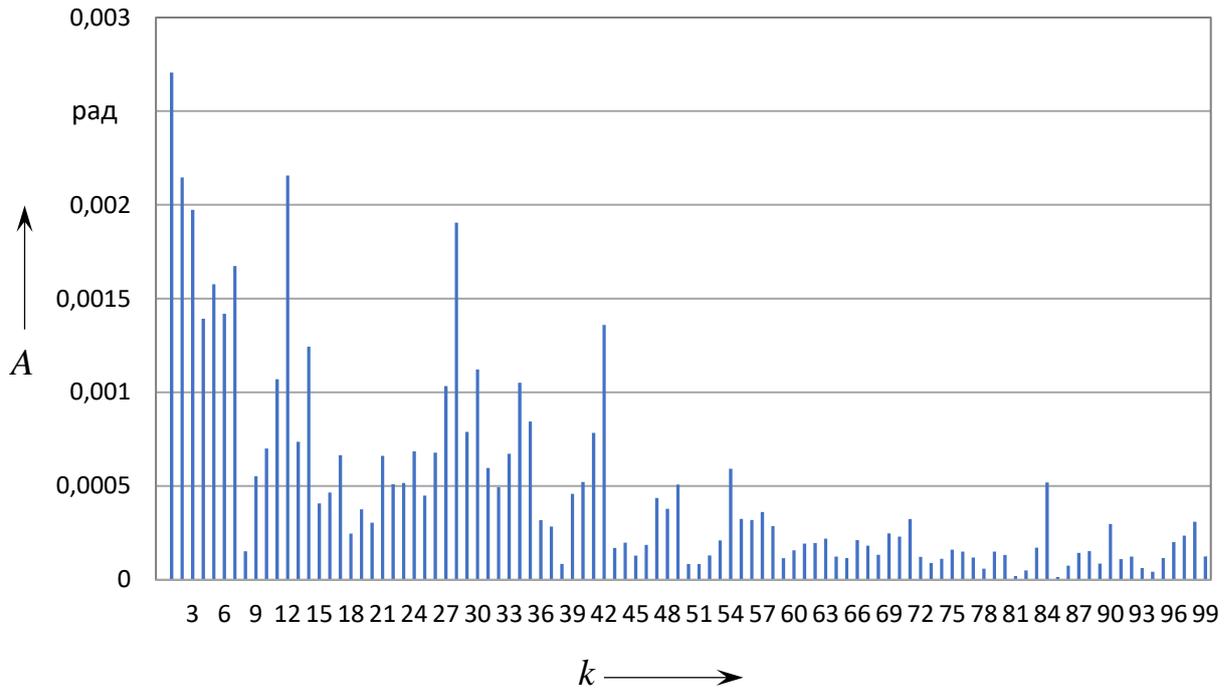


Рисунок 2.3 – Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности на ведомом валу редуктора за один оборот, измеренной на стенде двумя датчиками

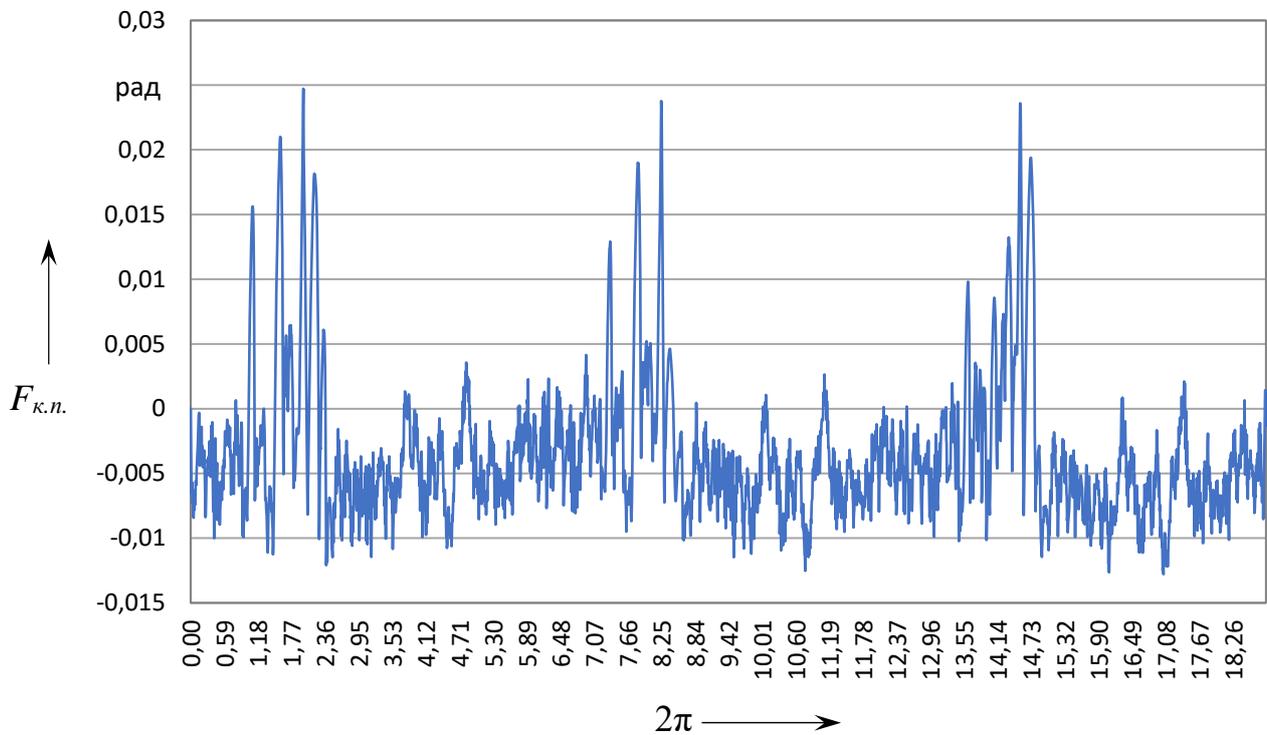


Рисунок 2.4 – Кинематическая погрешность на ведомом валу редуктора за три оборота, измеренная на стенде двумя датчиками

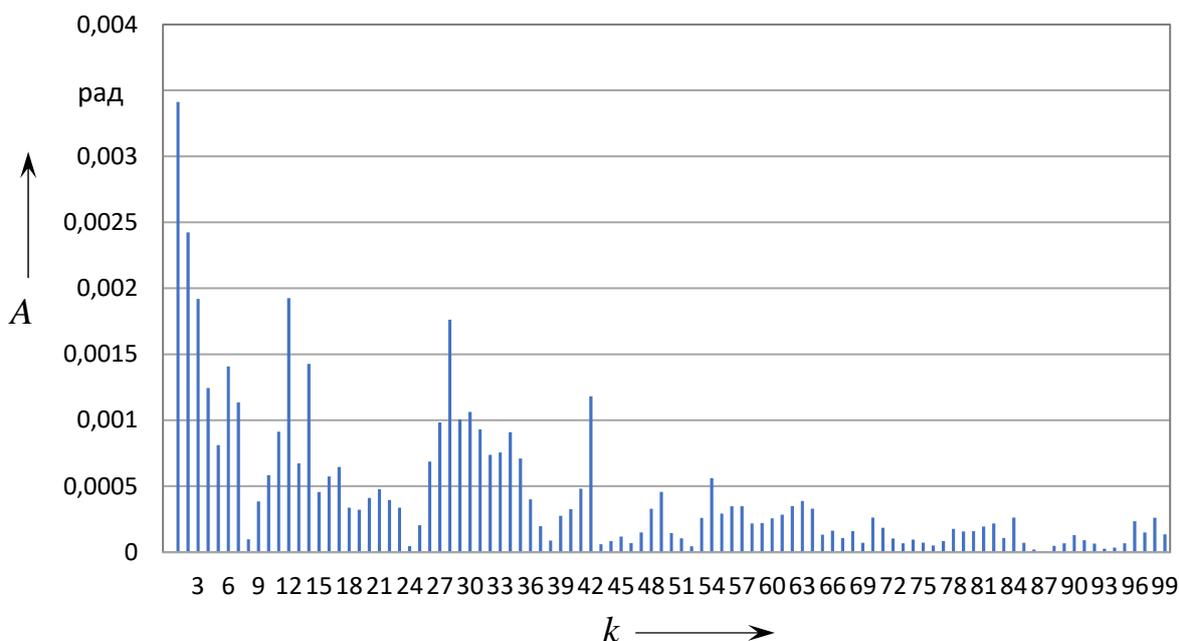


Рисунок 2.5 – Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности на ведомом валу редуктора за три оборота, измеренной на стенде двумя датчиками

На графиках обозначены: на вертикальной оси – кинематическая погрешность $F_{к.л.}$ или амплитуда A гармонических составляющих кинематической погрешности в радианах; на горизонтальной оси – угол поворота в радианах или номер гармоники.

На рисунках 2.2 и 2.4 показаны графики кинематических погрешностей на выходном валу редуктора за один и три полных оборота, измеренных на стенде, с двумя датчиками угловых перемещений, один установлен на валу электродвигателя, другой – на выходном валу. Первый датчик снимает сигнал, преобразуя его в углы поворота на входе редуктора, т. е. на ведущем валу, которые вычитаются из значений углов поворота выходного вала. Неравномерность вращения входного вала обусловлена неравномерным вращением электродвигателя, соединенного с валом на стенде, а также распределением суммарной кинематической погрешности редуктора на входной и выходной валы. Использование двух датчиков позволяет получить измерение выходного сигнала с высокой точностью.

На графиках видны выбросы и пики, которые повторяются за каждый оборот на 360 град выходного вала. Они связаны с погрешностями изготовления деталей, которые приводят к увеличению зазоров в передаче, неплавному вхождению в зацепление и соударению сателлитов. Наибольшая кинематическая погрешность, полученная при испытаниях редуктора, после фильтрации случайных пиков и впадин, проявляющихся местными выбросами на графиках, составила 60 угл. мин для одной ступени редуктора.

Амплитудно-частотные спектры позволяют провести анализ гармонических составляющих кинематической погрешности редуктора и дать дифференцированную оценку его точности изготовления. На рисунках 2.3 и 2.5 видно, что наибольшие амплитуды имеют гармоники с номером 1 и номерами, кратными 7 и 6 – передаточному отношению одной ступени редуктора и числу периодов дорожки колеса. Гармоники с номерами 1, 7 и кратные им связаны с радиальным смещением, эксцентриситетами и биением деталей зацепления, т. е. в основном с погрешностями сборки. Гармоники с номерами, кратными 6, проявляются из-за неточного изготовления профилей многопериодных дорожек.

На рисунках 2.6 и 2.8 показаны графики кинематических погрешностей на ведущем валу редуктора за один и 49 оборотов ведущего вала, равных одному полному обороту ведомого вала, т. к. передаточное отношение редуктора $i = 49$. Из графиков видно, что эти погрешности составляют 0,0045 и 0,008 рад и на выходном валу уменьшатся в 49 раз. В результате получается погрешность меньше 1 угл. мин, которая не может повлиять на кинематическую точность редуктора, определяемую на выходном валу.

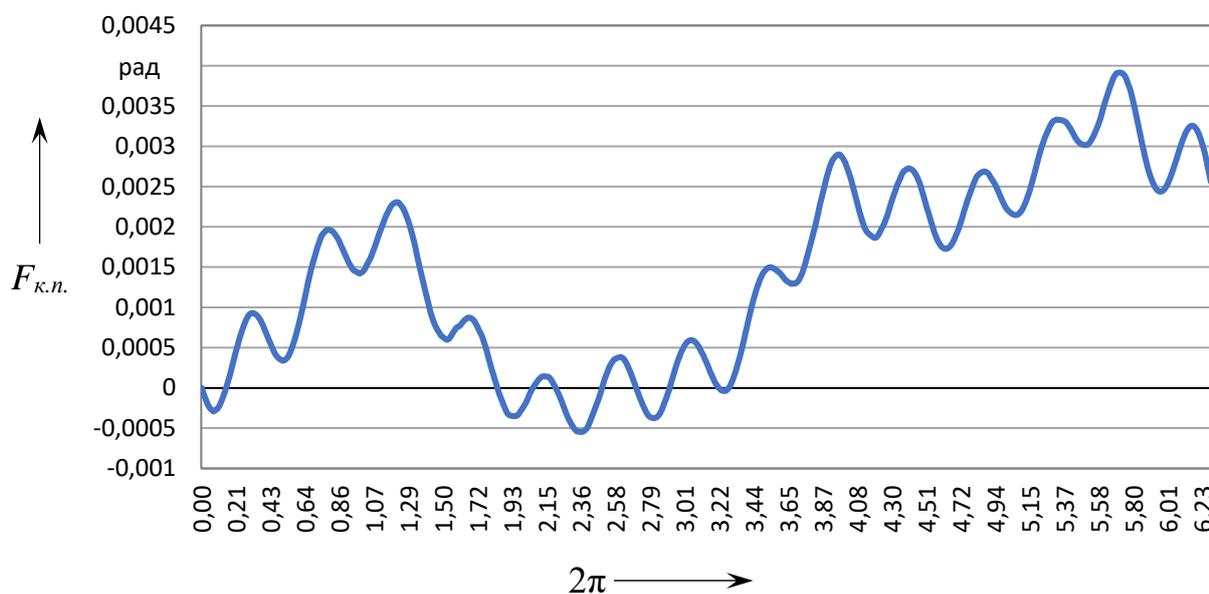


Рисунок 2.6 – Кинематическая погрешность на ведущем валу редуктора за один оборот

На рисунках 2.7 и 2.9 представлены амплитудно-частотные спектры кинематических погрешностей, измеренных на входном валу. Спектры показывают, что кинематическая погрешность редуктора распределяется и на входной вал, что подтверждают значимые гармоники с номерами, кратными передаточному отношению и числу периодов дорожки, как и в спектрах на рисунках 2.3 и 2.5. Гармоники с номерами 1 и 49 на рисунках 2.7 и 2.9

показывают также неравномерность вращения электродвигателя за его каждый оборот на 360 град.

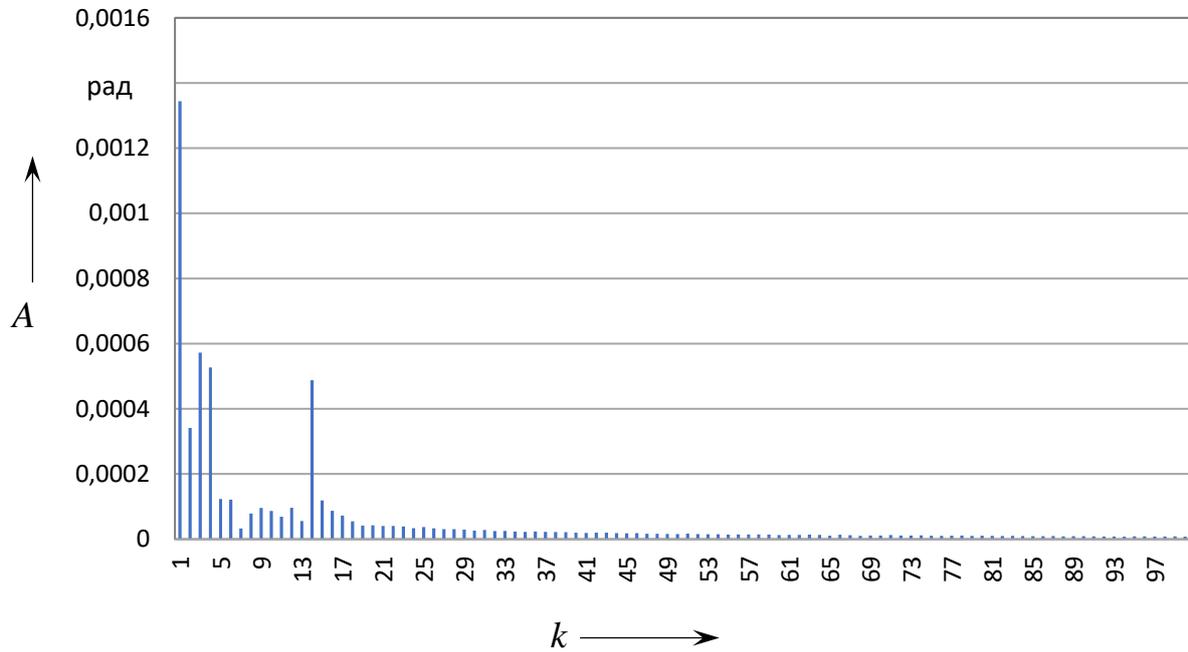


Рисунок 2.7 – Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности на ведущем валу редуктора за один оборот

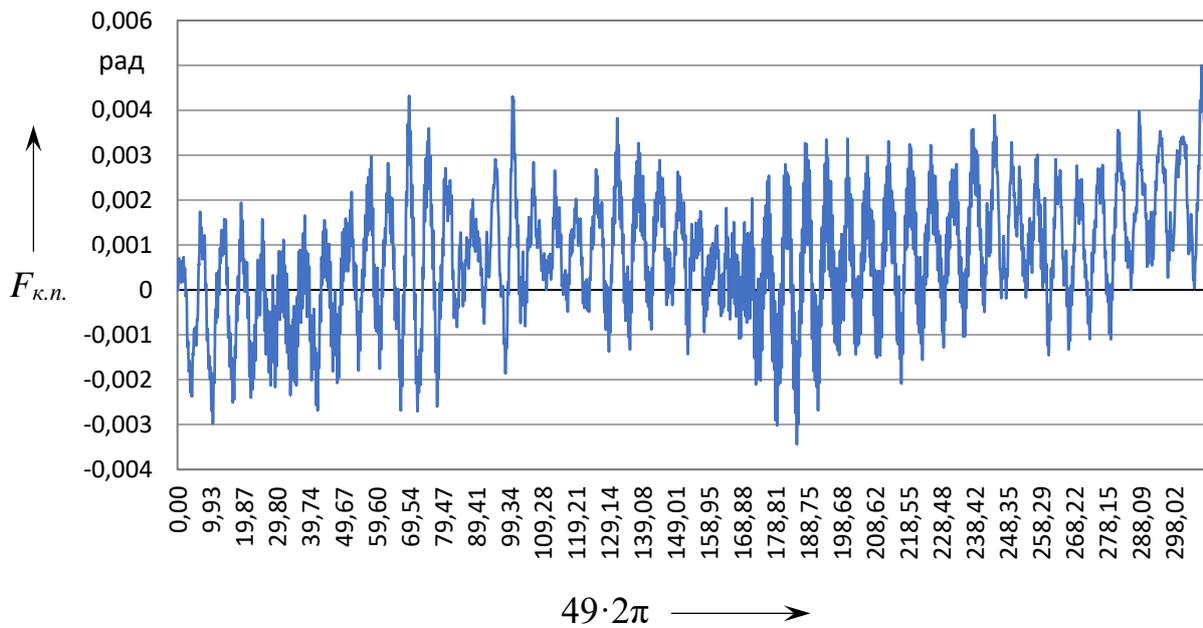


Рисунок 2.8 – Кинематическая погрешность на ведущем валу редуктора за 49 оборотов

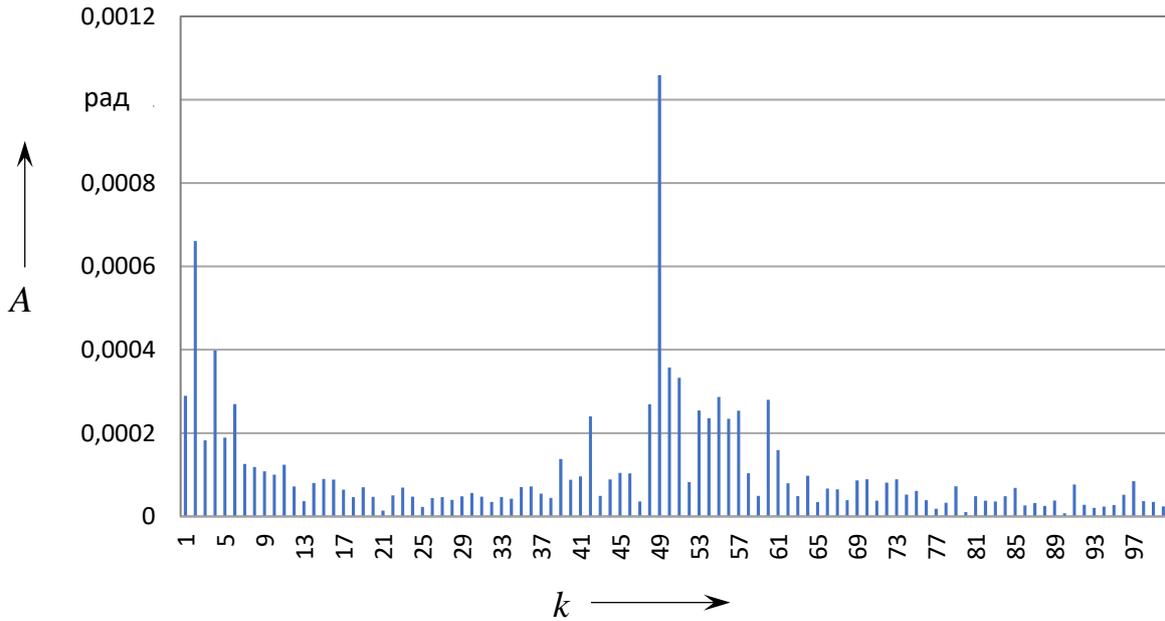


Рисунок 2.9 – Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности на ведущем валу редуктора за 49 оборотов

На рисунках 2.10–2.13 показаны графики, полученные измерением на том же стенде и последующей математической обработкой, но с одним датчиком угловых перемещений, установленным на выходном валу. С учетом того, что кинематическая погрешность на входном валу незначительная, как показали измерения на входе редуктора, и передаточное отношение редуктора 49, полученные измерения и графики мало отличаются от представленных выше при контроле двумя датчиками.

Метод оценки точности с одним датчиком угловых перемещений, установленным на выходном валу, целесообразно использовать при экспериментальных исследованиях кинематической погрешности механизмов с большими передаточными отношениями или с установкой маховика на ведущем валу для равномерности его вращения. Для редукторов с небольшими передаточными отношениями и для точного контроля необходимо использовать два датчика на входном и выходном валах, т. к. в этих случаях на ведущем валу может быть измерена кинематическая погрешность с большими значениями в противофазе, которыми нельзя пренебрегать.

Исследования кинематической точности редуктора с одним и двумя датчиками угловых перемещений дали примерно одинаковые результаты, т. к. кинематическая погрешность на ведущем валу для редуктора с передаточным отношением $i = 49$ не влияет на выходные точностные параметры передачи.

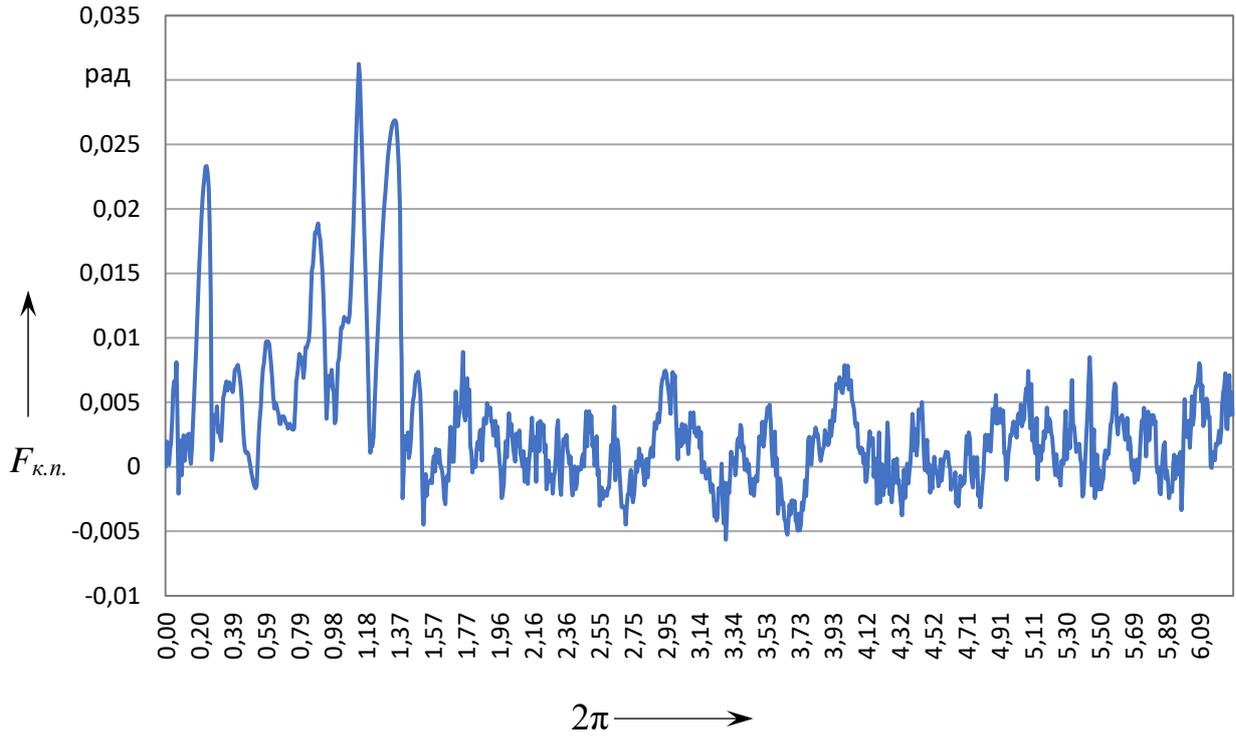


Рисунок 2.10 – Кинематическая погрешность на ведомом валу редуктора за один оборот с одним датчиком

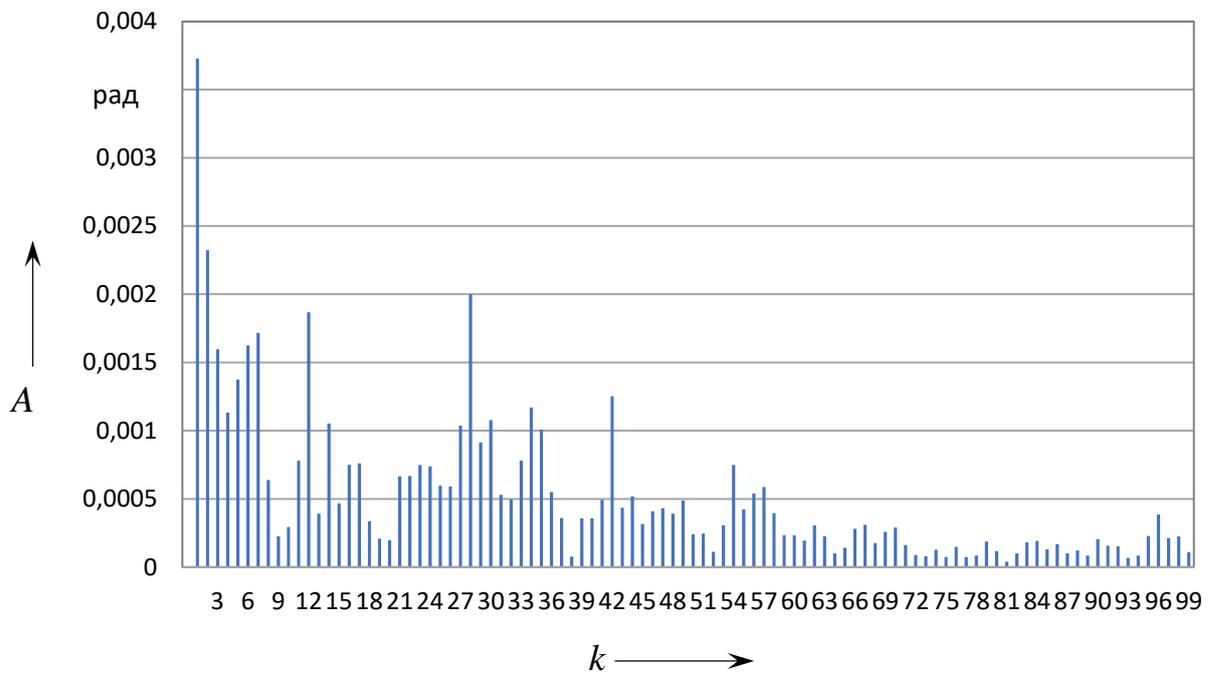


Рисунок 2.11 – Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности на ведомом валу редуктора за один оборот с одним датчиком

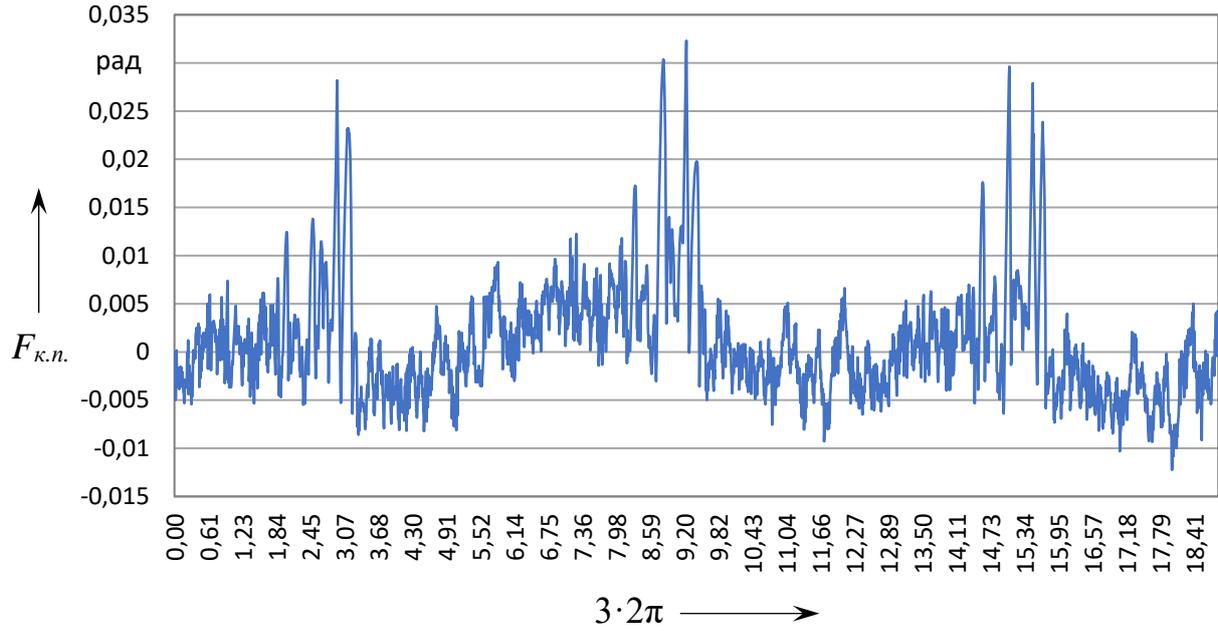


Рисунок 2.12 – Кинематическая погрешность на ведомом валу редуктора за три оборота с одним датчиком

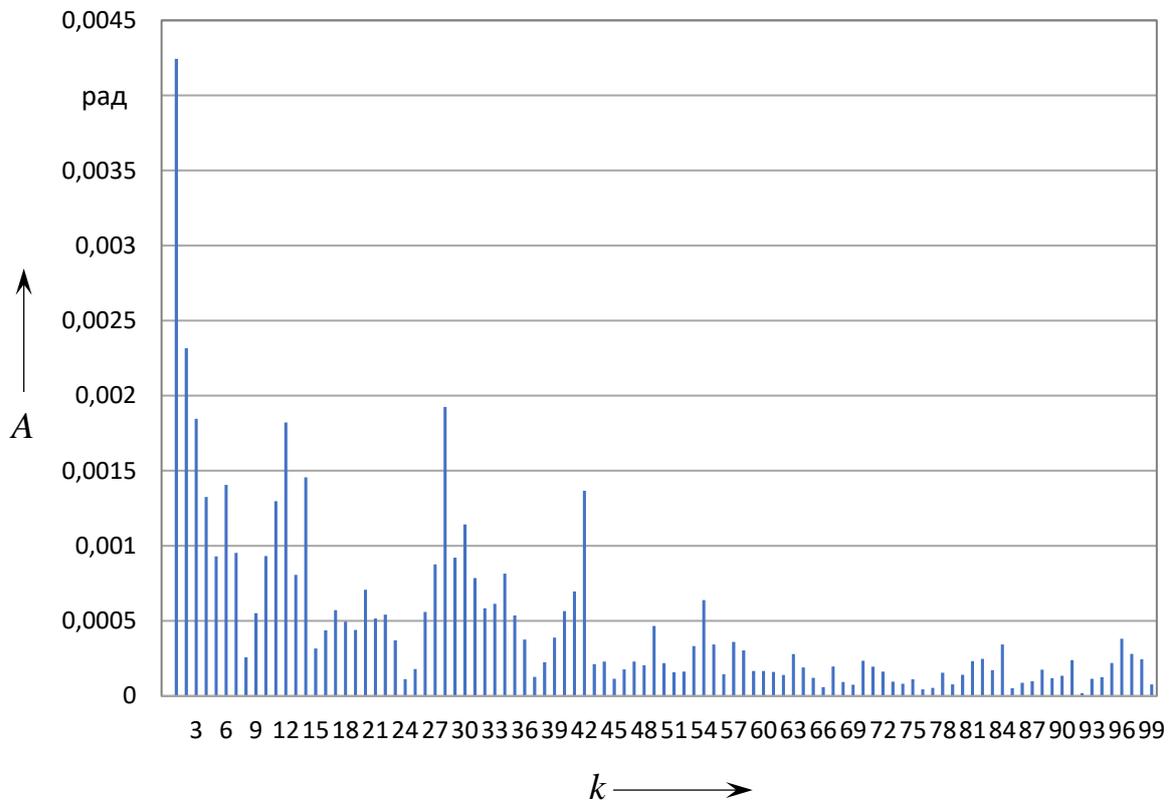


Рисунок 2.13 – Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности на ведомом валу редуктора за три оборота с одним датчиком

Полученные результаты показали, что правильная оценка кинематической точности и плавности работы передачи зависит от выбранного метода экспериментальных исследований. Скопление местных выбросов и пиков на графиках кинематических погрешностей и гармоника спектров характеризуют погрешности изготовления редуктора, которые можно уменьшить примерно в 2 раза, повысив точность их наиболее ответственных деталей.

3 Разработка дифференцированных методов экспресс-анализа точностных параметров механических передач на основе использования технологий координатных измерений

3.1 Анализ современных методов контроля и оценки точности деталей сложной геометрической формы

3.1.1 Современные методы автоматизированного размерного контроля изделий.

Современные процессы контроля выполняются с применением передового оборудования, обычно с компьютерным управлением и хранением данных [27–31]. Измерительные системы различных типов позволяют получать информацию о точках фактической поверхности изготовленной детали с высокой точностью. С помощью программных пакетов, как специализированных, так и общеинженерных САПР, реализуется обработка виртуальных моделей деталей с целью анализа отклонений их поверхностей от номинальных, заданных конструктором. Такой комплекс программно-аппаратных средств обеспечивает высокое качество производимых измерений, возможность выполнять контроль всей поверхности, а не только отдельных размеров, а также сохранение данных о проведенных измерениях для возможного дальнейшего использования. Перед автоматизированным контролем ставят следующие задачи: сокращение времени измерений; увеличение точности и повторяемости; сокращение номенклатуры необходимой оснастки; увеличение контрольной группы; применение систем графического моделирования для анализа; построение баз данных. Для измерения предлагается использовать контактные и бесконтактные координатно-измерительные установки. Данные трехмерных измерений передаются в компьютерную модель и сопоставляются с номинальной моделью. Для максимально эффективного использования автоматизированных измерительных систем при реализации технологических процессов контроля необходимо осуществлять выбор систем на основании требований к модели и технологии ее получения, предъявляемых конструктивными особенностями контролируемых объектов.

Все системы оцифровки могут быть классифицированы по различным критериям, таким как базовая технология (контактные измерительные системы, бесконтактные измерительные системы: оптические, лазерные, томографические), конструктивная схема системы (статическая или размещенная на роботе с программным управлением), тип измерения (поверхности или профиля). В отличие от традиционных средств измерений,

координатно-измерительные машины (КИМ) позволяют измерять элементы геометрии свободной формы, поскольку измерения не выполняются напрямую. Размеры геометрических элементов вычисляются на основании координат точек их поверхности, причем этих точек должно быть достаточно для однозначного определения всех неизвестных параметров, описывающих тот или иной элемент геометрии. КИМ бывают с ручным управлением и программируемые. КИМ, помимо измерения геометрических размеров, используют для определения параметров поверхности, величин отклонений формы и расположения поверхностей (рисунок 3.1).

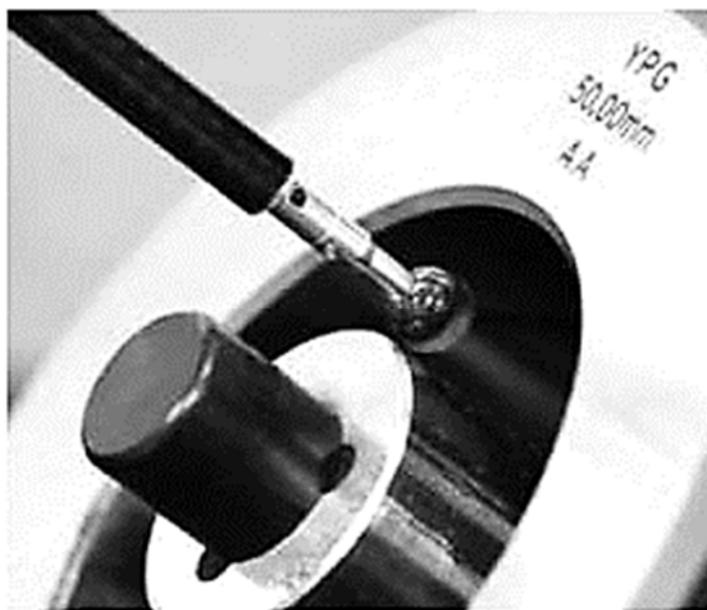


Рисунок 3.1 – Выполнение контактных измерений с помощью щупа на КИМ

Важнейшими преимуществами контактных измерительных систем являются:

- высокая точность получаемых фактических значений координат точек поверхности. Заявленная производителями КИМ точность измерения составляет около 0,5...2 мкм;
- возможность измерения значений в точках, расположенных на поверхностях с различным уклоном;
- высокая скорость измерения современных КИМ;
- получение достаточно полных данных о форме контролируемой поверхности;
- простые крепления или их отсутствие для измеряемой детали;
- возможность оцифровки участков поверхности детали, содержащих мелкие элементы, с помощью комплектов щупов разных размеров игольчатого типа.

Все эти преимущества позволяют широко использовать КИМ в качестве универсального решения для оцифровки широкой номенклатуры деталей в исследовательских лабораториях. Современные КИМ также актуальны в использовании с высокой точностью и большой степенью автоматизации при измерениях однотипных деталей серийного производства. В случаях, когда измерения производятся контактным способом, важным этапом подготовки является компьютерное моделирование процесса оцифровки. Основной задачей моделирования при этом выступает не только оптимизация процесса измерения, но и обеспечение его безопасности, а также проверка возможности его реализации путем верификации траектории перемещения щупа в условиях жестко ограниченного объема перемещения. В таких случаях разработка траекторий измерений имеет много схожих приемов с отладкой перемещений промышленных роботов и инструмента на многоосевых обрабатывающих центрах с ЧПУ. Компьютерная верификация траекторий перемещения щупа в ходе выполнения процесса измерений является критически важной, поскольку без нее невозможно гарантировать отсутствие столкновений измерительного инструмента с измеряемым объектом и другими узлами измерительной установки.

3.1.2 Лазерные измерительные системы для контроля геометрии деталей.

Задача бесконтактных измерений сложной геометрии достаточно актуальна. В современных лазерных устройствах вся информация, полученная в результате измерения, оцифровывается, это обеспечивает их широкое распространение. Компактность и легкость монтажа лазерных систем – существенное преимущество перед стационарными КИМ. Лазерные трекеры с погрешностью 10 мкм на расстоянии измерения 1 м используются для контроля и сборки крупногабаритных изделий, контроля криволинейных поверхностей, настройки стапелей и сборочных линий.

На рисунке 3.2 показаны общий вид и принципиальная схема работы установки трехмерных бесконтактных лазерных измерений. Относительно небольшие габаритные размеры лазерного излучателя и приемника отраженного излучения, которые являются основным рабочим органом установки такого типа, позволяют разместить измерительную систему практически на любом фиксирующем приспособлении и легко перемещать ее вокруг измеряемого объекта.

Применение лазерных систем в технологическом процессе должно быть заложено таким образом, чтобы к этой операции были обеспечены хорошие отражающие свойства контролируемой поверхности. При проецировании лазерного луча на поверхность в отражении четко различима прямая линия, толщина которой соответствует толщине использованного лазерного луча,

поэтому лазерные измерительные системы особенно эффективны для контроля отдельных сечений, но для получения оцифрованной модели полной поверхности детали или узла сложной формы потребуется значительное время.

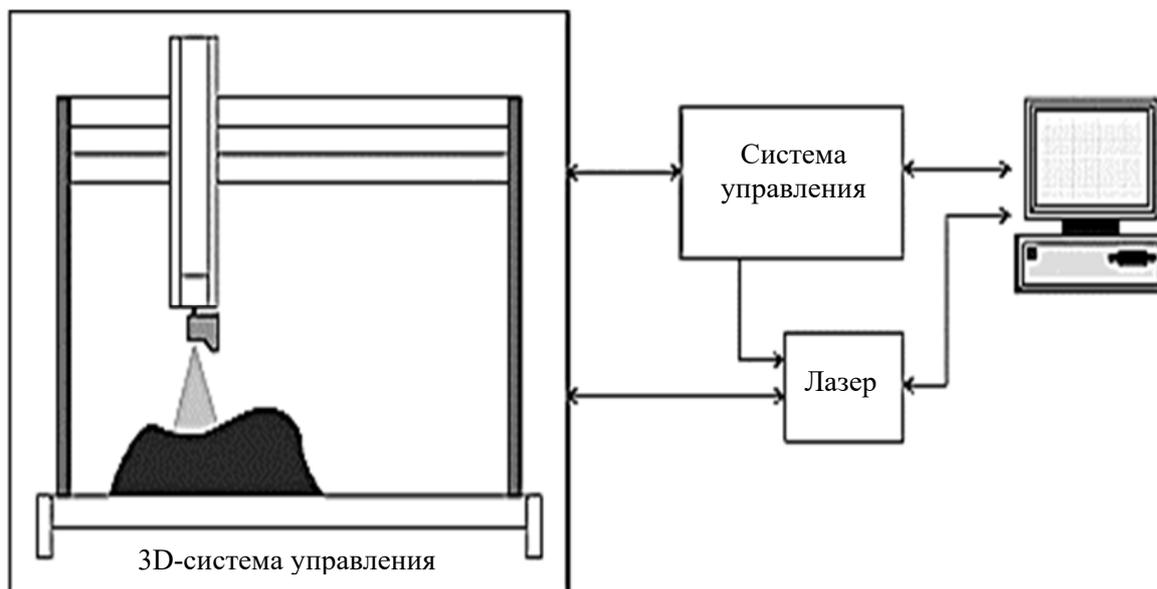


Рисунок 3.2 – Общий вид и принципиальная схема работы установки трехмерных бесконтактных лазерных измерений

Лазерные измерительные системы (трекеры) эффективно использовать для крупногабаритных объектов. Точность измерения зависит от степени освещенности и падает с увеличением расстояния между контролируемой поверхностью и рабочими органами измерительной системы.

3.1.3 Технологии оптической оцифровки поверхностей.

При использовании технологии оптической оцифровки модель поверхности формируется путем совмещения отдельных фрагментов поверхности в едином координатном пространстве. Изображение, получаемое CCD-камерой, конвертируется в цифровой формат, а информация о цвете сохраняется только в оттенках серого. На основании двух плоских изображений, полученных цифровыми камерами, расположенными под заранее определенным углом, рассчитываются пространственные координаты точек оцифровываемой поверхности. Каждая пара изображений содержит информацию о координатах до 4 млн точек поверхности, количество измеренных точек определяется разрешением цифровых камер, воспринимающих отраженное излучение. Возможна последовательная сшивка большого числа фрагментов поверхности, что позволяет выполнять полную оцифровку объектов практически любых габаритов. Модель, полученная в итоге оцифровки с использованием оптических измерительных систем, содержит полную

информацию об участках наружной поверхности объекта, для которых можно одновременно получить изображения на обеих камерах. Такая модель может быть в дальнейшем использована для оценки отклонения фактической поверхности детали от номинальной модели, спроектированной конструктором, в любой доступной точке, формирования сечений и цветowych карт отклонений.

На рисунке 3.3 показана схема интерференционного проецирования при выполнении оптических измерений; пунктирные линии – излучение, падающее на поверхность, сплошные – отраженное излучение.

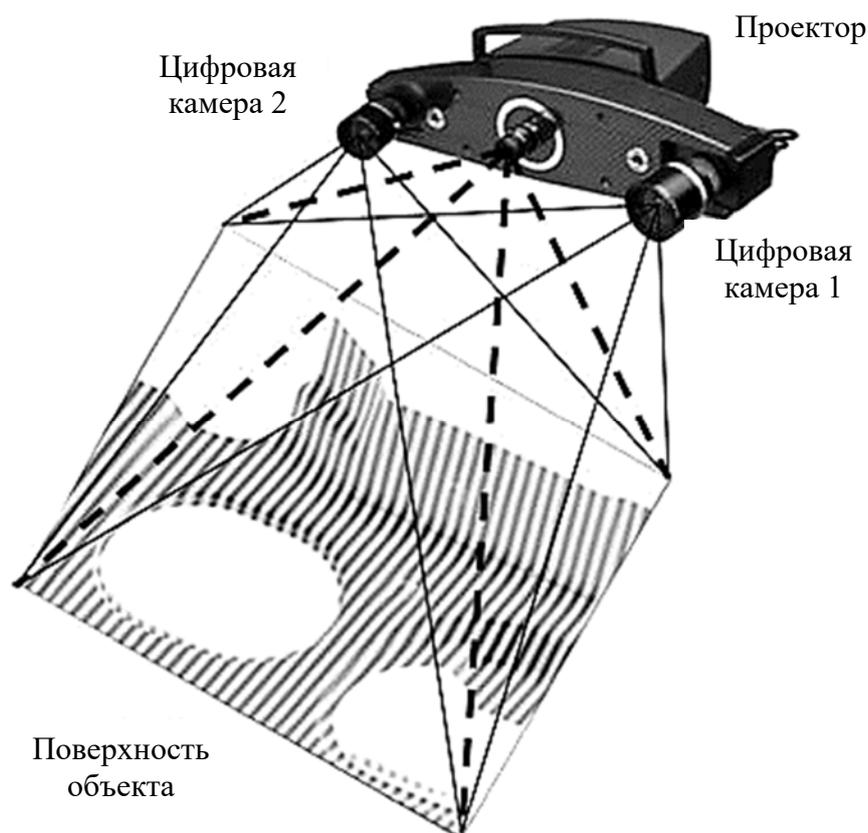


Рисунок 3.3 – Схема интерференционного проецирования при выполнении оптических измерений

Для захвата наибольшего количества точек поверхности за наименьшее количество съемов выполняют позиционирование детали в измерительном объеме таким образом, чтобы вектор нормали к поверхности большей площади совпадал с оптической осью проектора. Рассчитывают такие положения ориентации, при которых перекрытие измеряемых поверхностей другими элементами детали минимально. При реализации оптимальной последовательности измерений время, затрачиваемое на полную оцифровку поверхности объекта, зависит только от режима съемки цифровых камер и количества необходимых фрагментов поверхности.

К недостаткам оптических измерительных систем можно отнести чрезвычайную чувствительность к условиям окружающей среды и зависимость точности выполняемых с их помощью измерений от количества выполненных сканирований. Точность оптических измерений зависит от большого числа факторов (условий измерения, оптических свойств поверхности, выбранных точек совмещения) и в большинстве случаев составляет порядка сотых долей миллиметра, что ограничивает применимость данной группы систем оцифровки для контроля геометрии отдельных высокоточных деталей. Ряд трудностей, связанных с использованием оптических и лазерных измерительных систем, таких как невозможность оцифровки полностью перекрывающихся поверхностей, необходимость моделирования процесса измерений с целью определения оптимальных положений рабочих органов измерительных установок и зависимость результата измерений от механических и оптических свойств поверхности, может быть преодолен в случае использования в качестве инструмента оцифровки методов бесконтактных измерений, для реализации которых применяются проникающие излучения.

3.1.4 Метод бесконтактных измерений с применением проникающих излучений.

Измерения с использованием проникающих излучений позволяют определить параметры элементов, недоступных для контроля любыми другими методами, поскольку не сталкиваются с проблемами при перекрытии измеряемых элементов другими частями объекта. Компьютерная томография применяется в первую очередь как метод неразрушающего контроля структуры материала, позволяющий выявить дефекты, например, поры, расположенные внутри структуры материала. На рисунке 3.4 показана схема построения 3D-модели с использованием проникающего излучения.

Для создания 3D-модели необходим ряд последовательных снимков, выполненных при вращении объекта на 360 град. Затем изображения проходят через специальный алгоритм (реконструкцию) программного обеспечения, которое создает трехмерную модель образца. Помимо наружной поверхности образца, модель отображает и внутренние элементы исследуемого объекта в соответствии с их плотностью. Возможность «перемещения» сквозь 3D-модель позволяет проводить анализ, внутренние измерения, выявлять дефекты и структурные несовершенства материалов. Особое внимание следует уделить комбинации рентгеновской трубки и мишени, поскольку именно они оказывают огромное влияние на точность и производительность системы. Микрофокусный источник оснащён по умолчанию мишенью отражательного типа с трехмикронным фокальным пятном. Поскольку при использовании проникающих излучений для оцифровки

предъявляются требования безопасности, связанные со всесторонним ограничением рабочей зоны, то габариты деталей, которые можно эффективно проконтролировать с помощью данной технологии, имеют ограничения. Традиционно размер рабочей зоны не превышает 600 мм в любом из направлений измерения. Кроме того, изделия, для которых оцифровка с использованием проникающих излучений дает удовлетворительные результаты, ограничиваются параметром наибольшей толщины стенки. Эта величина существенно зависит от материала изделия и мощности используемого источника излучения, она обычно не превышает 10 % линейного размера рабочей зоны.



Рисунок 3.4 – Схема построения 3D-модели с использованием проникающего излучения

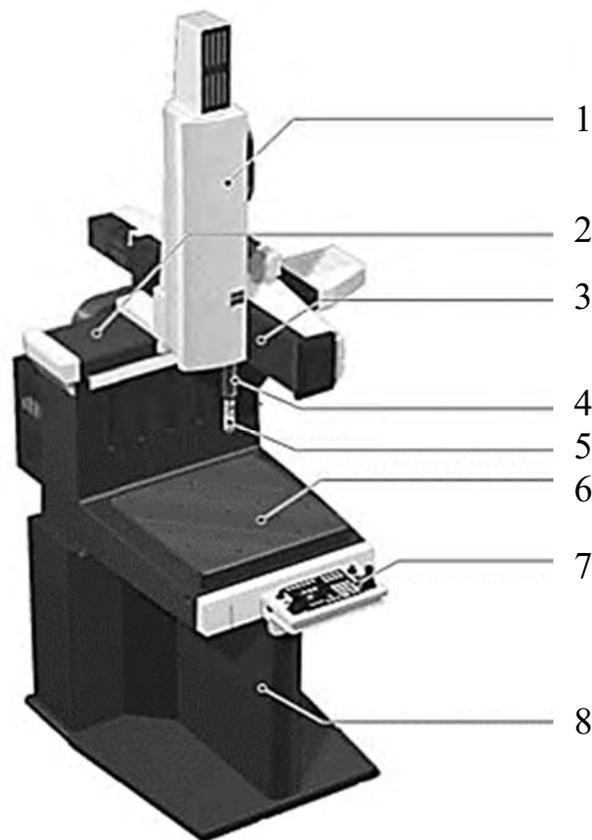
3.1.5 Выбор и обоснование направления исследования.

Анализ рассмотренных методов измерений геометрии изделий позволяет утверждать, что для контроля точности изготовления деталей зацепления планетарных передач с телами качения в наибольшей степени подходят технологии контактных измерений на координатно-измерительных установках, т. к. они являются наиболее универсальными, надежными, мало зависящими от внешних факторов, высокоточными, позволяющими давать оценку различным параметрам геометрической точности деталей.

Исследования связаны с разработкой дифференцированных и комплексных методов контроля точностных параметров механических передач, разработкой показателей норм кинематической точности и плавности работы планетарных передач торцевого типа с телами качения. Для решения этих задач использовалась координатно-измерительная машина (КИМ) Carl Zeiss DuraMax 5/5/5 с программным обеспечением Calypso (рисунки 3.5 и 3.6). КИМ универсальна, она позволяет за один установ контролировать практически все нормируемые параметры точности изготовления изделий, автома-

тизирована как на этапе реализации координатного метода измерений, так и на этапе обработки результатов этих измерений. КИМ оснащена программным обеспечением для измерения параметров точности изделий, которое включает в себя решение о последовательности измерения отдельных точек, элементов детали (стратегия измерений), числе точек, подлежащих измерению, параметрах геометрической точности, которые необходимо рассчитать, данные, выводимые в протокол в результате измерений.

КИМ DuraMax может заменить такое измерительное оборудование, как вертикальный длинномер (высотомер), калибр кольцевого типа (кольцевая мера), калибр-скоба для наружных диаметров, калибр-пробка для внутренних диаметров, контурно-измерительная машина (профилометр), ручные измерительные машины, а также некоторую измерительную оснастку. На рисунке 3.5 представлена конструкция КИМ DuraMax 5/5/5, на которой проводились измерения и экспериментальная оценка точности деталей зацепления планетарных передач с телами качения.



1 – кожух механизма привода и удлинителя измерительной головки (ось Z);
 2 – гофрированный кожух механизма привода и направляющей X (ось X);
 3 – гофрированный кожух механизма привода и направляющей Y (ось Y); 4 – удлинитель измерительной головки; 5 – измерительная головка; 6 – измерительный стол; 7 – пульт управления; 8 – подставка

Рисунок 3.5 – Конструкция КИМ DuraMax 5/5/5

На рисунке 3.6 показан общий вид КИМ DuraMax 5/5/5.



Рисунок 3.6 – Общий вид КИМ DuraMax 5/5/5

Технические характеристики КИМ DuraMax 5/5/5:

- 1) диапазон измерений – $X = 500$ мм, $Y = 500$ мм, $Z = 500$ мм;
- 2) погрешность измерений – 2,6 мкм;
- 3) температурный диапазон, в котором точность гарантирована, – $18\text{ °C} \dots 30\text{ °C}$;
- 4) интенсивность сканирования – до 500 точек в секунду;
- 5) минимальный размер шарика (щупа) – 0,3 мм;
- 6) максимальная длина щупа – 125 мм;
- 7) максимальная масса контролируемых деталей – до 100 кг.

Встроенное программное обеспечение КИМ Calypso используется для автоматизации процесса измерений и моделирования измеряемых объектов. Программа Calypso автоматически распознает геометрические элементы и одновременно генерирует пути и стратегии измерений.

При проведении экспериментальных исследований на КИМ использовались детали зацепления планетарных передач торцового типа. На рисунке 3.7 показано колесо с многопериодной дорожкой планетарной радиально-плунжерной передачи, а на рисунке 3.8 – 3D-модель этого колеса.



Рисунок 3.7 – Колесо с многопериодной дорожкой

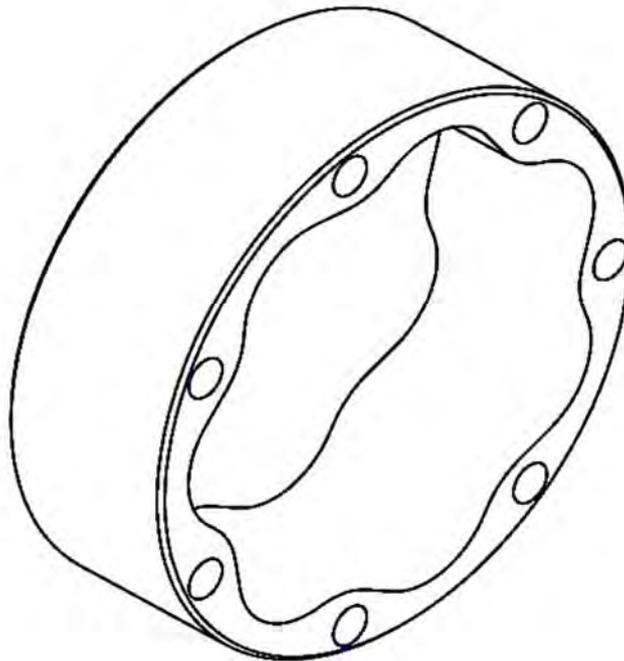


Рисунок 3.8 – 3D-модель колеса с многопериодной дорожкой

На рисунке 3.9 показан диск с многопериодной дорожкой в металле планетарной передачи торцового типа с телами качения – роликами, а на рисунке 3.10 – компьютерная модель диска.



Рисунок 3.9 – Диск с многопериодной дорожкой

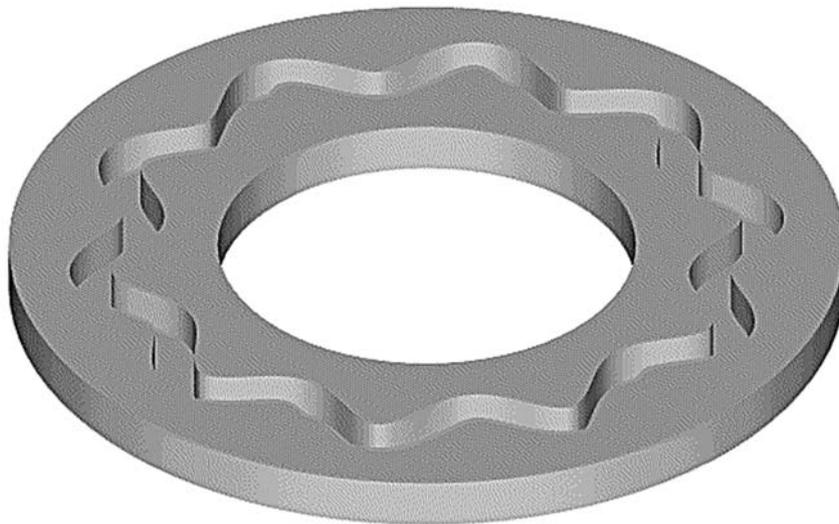


Рисунок 3.10 – Модель диска с многопериодной дорожкой

Исследования комплексных параметров точности планетарных передач с телами качения проводились на разработанных установках. На эти установки получены патенты на изобретения, в подразделе 4.1 дана их характеристика,

описан принцип работы, приведены результаты исследований на этих установках.

Исследования направлены на решение следующих задач:

1) разработка дифференцированных методов экспресс-анализа точностных параметров планетарных передач с телами качения на основе использования технологий координатных измерений;

2) разработка комплексных методов экспресс-анализа точностных параметров планетарных передач с телами качения передач на основе использования принципов контроля механизмов в сборе;

3) разработка показателей норм плавности работы планетарных передач с телами качения на основе применения дифференцированных и комплексных методов контроля.

При решении этих задач использовались теоретические и экспериментальные стандартные методы и методики координатных измерений, сканирования и оцифровки поверхностей сложной геометрической формы, компьютерного моделирования, численные, спектрального и гармонического анализа с использованием рядов Фурье, что подтверждает обоснованность и достоверность проведенных исследований. На основе этих стандартных методов разработаны новые методы и методики контроля применительно к деталям и передачам с телами качения.

3.2 Разработка методики контроля размеров, погрешностей формы и расположения поверхностей деталей зацепления планетарных передач с телами качения

Разработана методика 3D-размерного контроля на координатно-измерительной машине поверхностей деталей зацепления планетарных передач с телами качения. Методика предполагает составление плана контроля для измерения линейных размеров, погрешностей формы и расположения поверхностей деталей с помощью программного обеспечения (ПО) Calypso, встроенного в КИМ. План контроля включает создание системы координат детали в окне программы Calypso (рисунок 3.11).

На рисунке 3.12 выбираются элементы детали, к которым будет привязана система координат. На рисунке 3.13 показано окно для задания положения детали: поворот в пространстве – центральное отверстие; поворот в плоскости – перпендикуляр; X-ноль – центральное отверстие, Y-ноль – центральное отверстие, Z-ноль – верхняя плоскость детали.

После создания системы координат рабочее пространство выглядит следующим образом (рисунок 3.14).

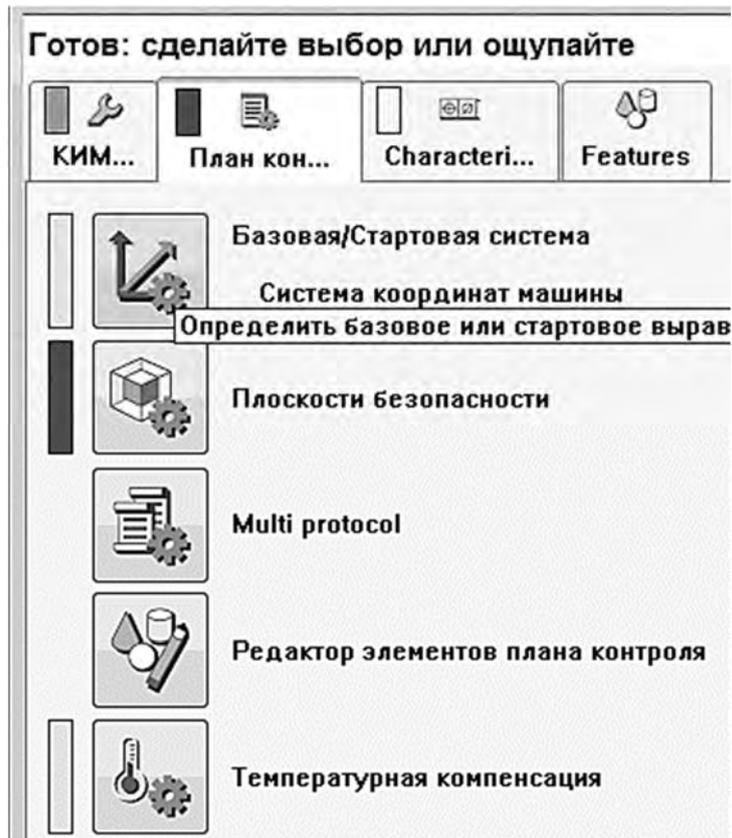


Рисунок 3.11 – Задание системы координат детали в окне ПО Calypso

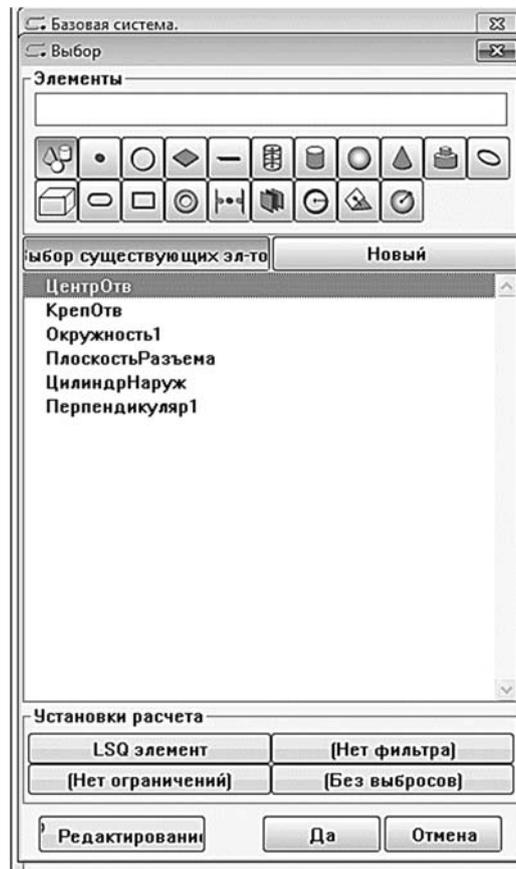


Рисунок 3.12 – Выбор элементов детали в окне ПО Calypso

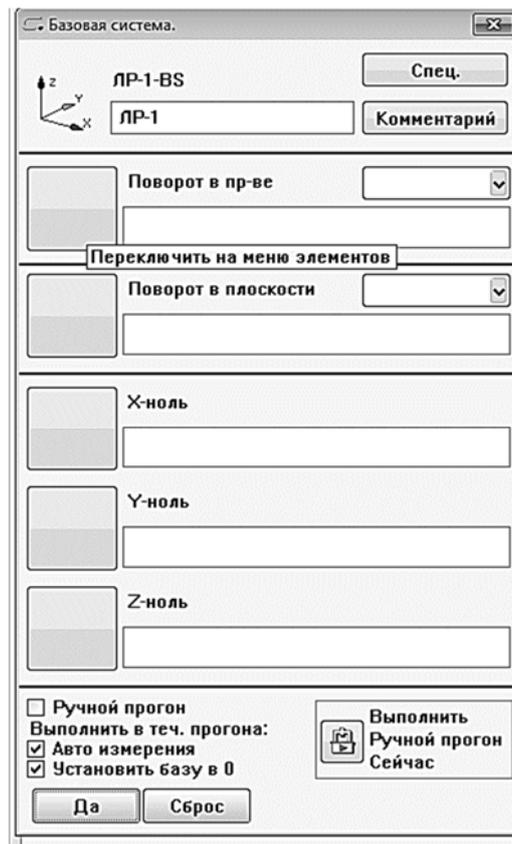


Рисунок 3.13 – Задание положения детали в окне ПО Calypso

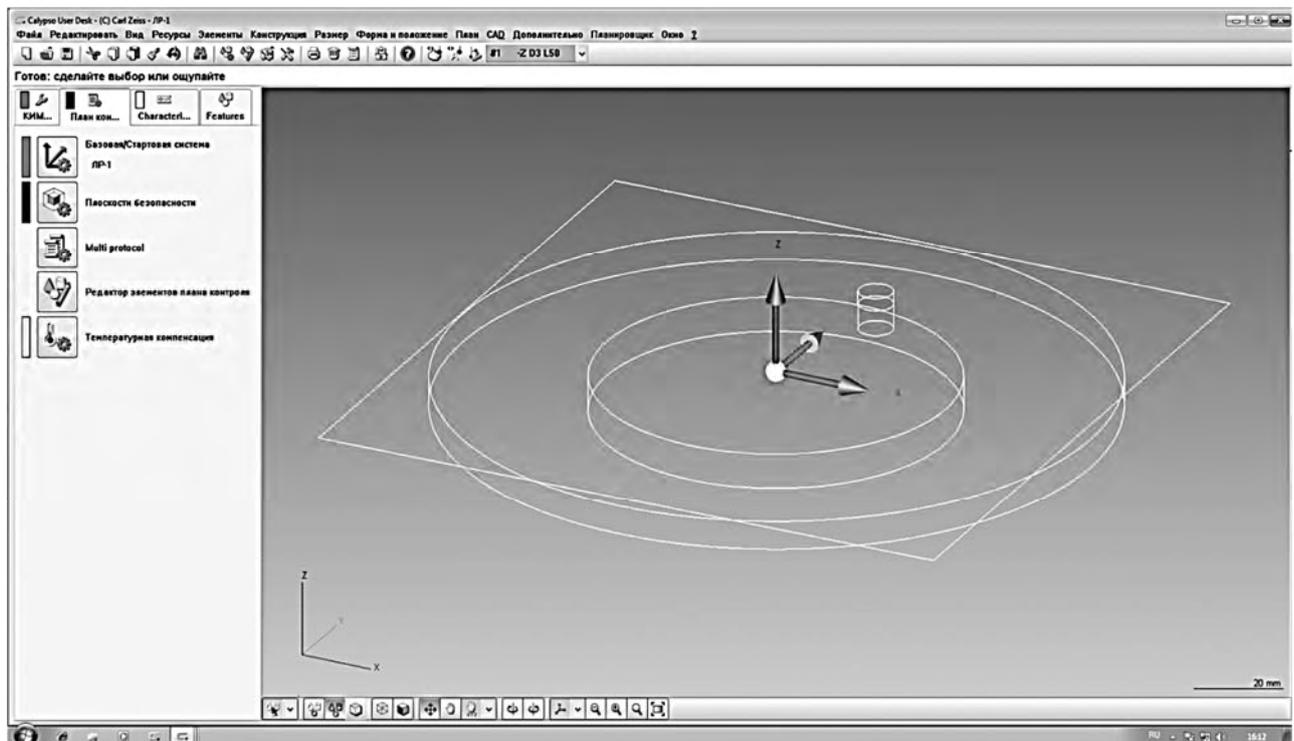


Рисунок 3.14 – Рабочее пространство контролируемой детали

Затем задаются плоскости безопасности для предотвращения столкновения измерительного щупа с контролируемой деталью при быстрых перемещениях. После этого выполняется контактное сканирование поверхностей детали либо, если все контролируемые поверхности уже сканированы, редактирование стратегии измерения отдельных поверхностей (измерение по отдельным точкам или сканирование (непрерывное измерение) с заданным шагом или с заданным количеством точек). На рисунке 3.15 показано окно с настройкой для сканирования поверхности детали. На рисунке 3.16 представлено окно для редактирования стратегии измерения поверхностей.

Допуск для:	Номинал	Действит.
<input type="checkbox"/> X	0,0000	0,0000
<input type="checkbox"/> Y	0,0000	0,0000
<input type="checkbox"/> Z	-9,2000	-9,2000
<input type="checkbox"/> D	84,0000	84,0420
<input type="checkbox"/> A1- X/Z <input checked="" type="checkbox"/>	0,0000	-0,0000
<input type="checkbox"/> A2- Y/Z	0,0000	-0,0000
Простр. ось \pm	Z	Z
Глубина	8,2000	8,2000
Старт угол <input checked="" type="checkbox"/>	0,9167	0,0000
Угловой сегм	360,0000	360,0000

Сигма	Форма	Точки
0,0063	0,0198	16
Мин	№ точки	№ точки
-0,0083	4	9
Макс	0,0115	

Рисунок 3.15 – Окно ПО Calypso для настройки сканирования поверхности детали

По окончании редактирования выполняются измерения (CNC-прогон) и представляются результаты в автоматическом режиме.

Для контроля геометрической формы деталей (отклонение от плоскостности (для плоскости разъема), отклонение от цилиндричности (для центрального отверстия), отклонение от круглости (для центрального

отверстия)) используются характеристики, которые можно выбрать в окне программы (рисунок 3.17). Для характеристик указываются элементы детали. Для отклонения от плоскостности – плоскость разреза, для отклонения от цилиндричности – центральное отверстие.

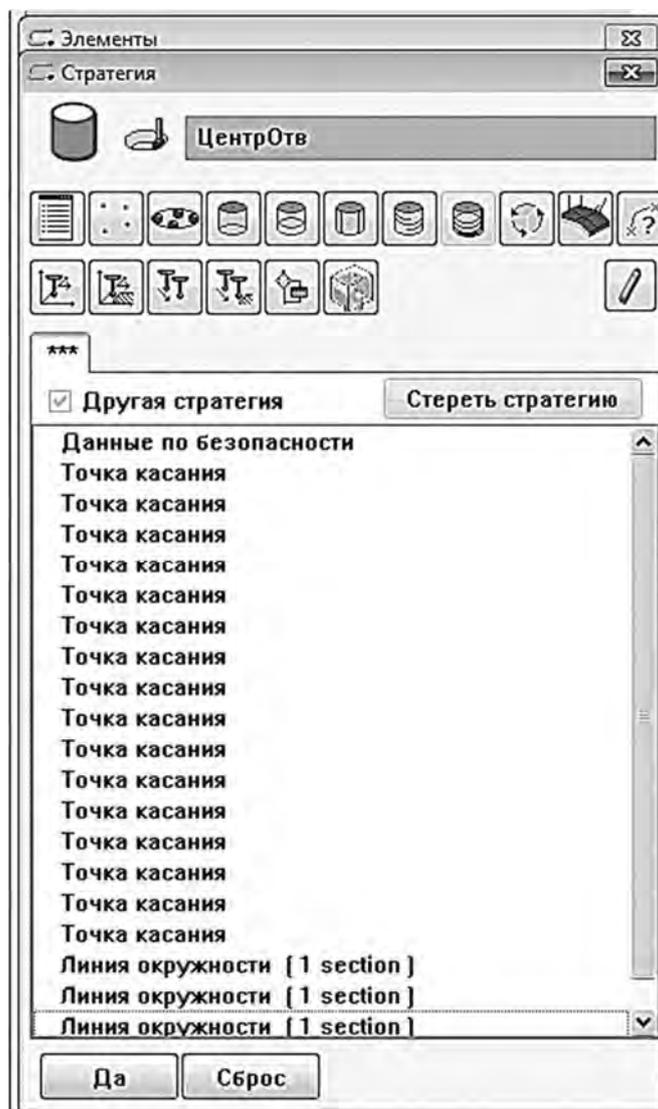


Рисунок 3.16 – Окно ПО Calypso для редактирования стратегии измерения поверхностей

Для контроля отклонений расположения поверхностей деталей зацепления используются характеристики, которые можно выбрать, так же как и для погрешностей формы, в окне программы (см. рисунок 3.17).

После расчета данных характеристик можно посмотреть их графическое представление. Формы с графическим представлением указанных характеристик приведены на рисунках 3.18 и 3.19.

На рисунке 3.19 показана круглограмма с профилем отверстия колеса передачи с увеличением неровностей профиля в 500 раз.

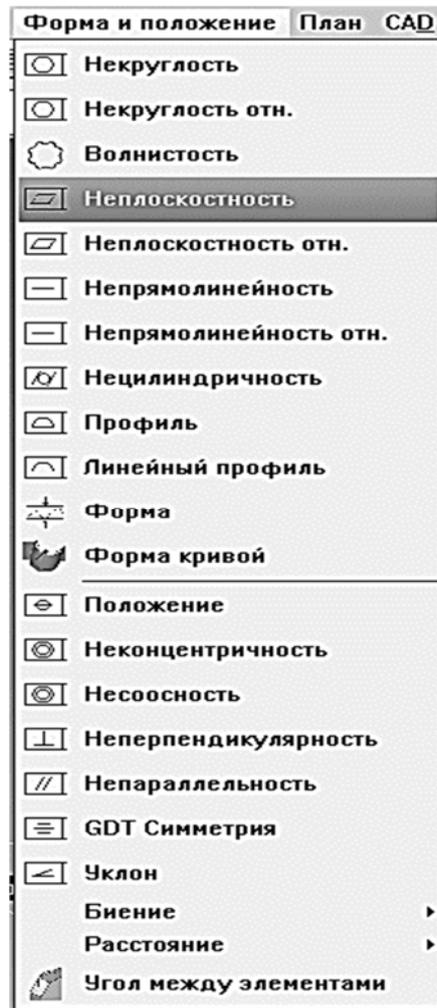


Рисунок 3.17 – Окно ПО Calypso для контроля геометрической формы деталей

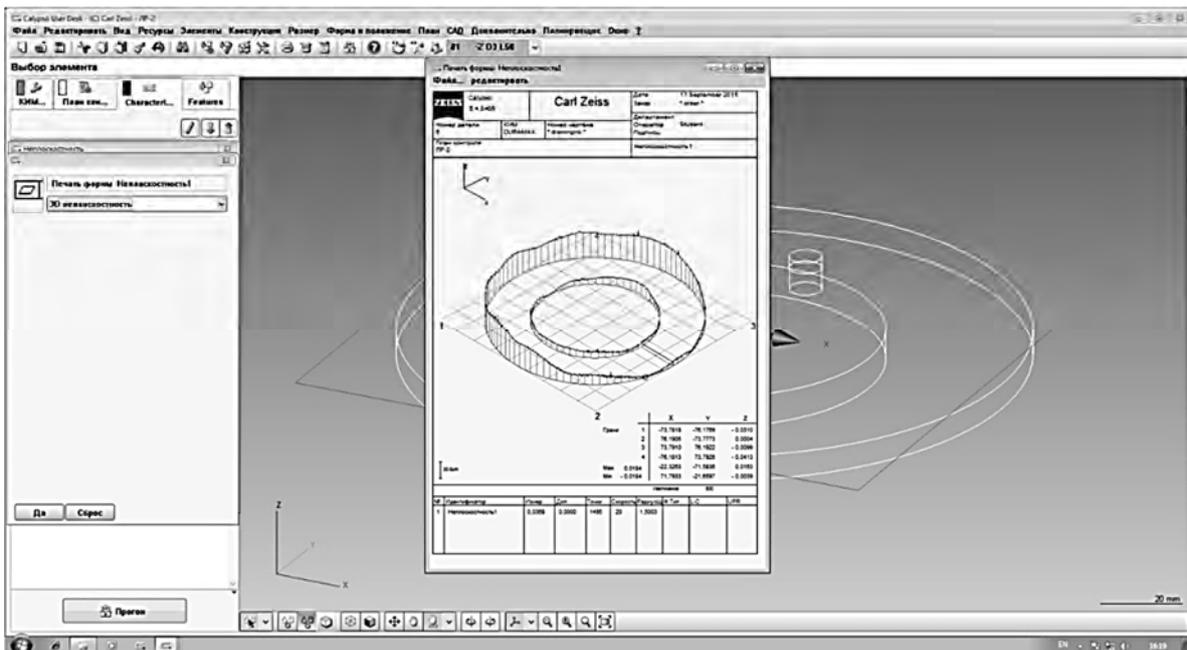


Рисунок 3.18 – Графическое представление – отклонение от плоскостности

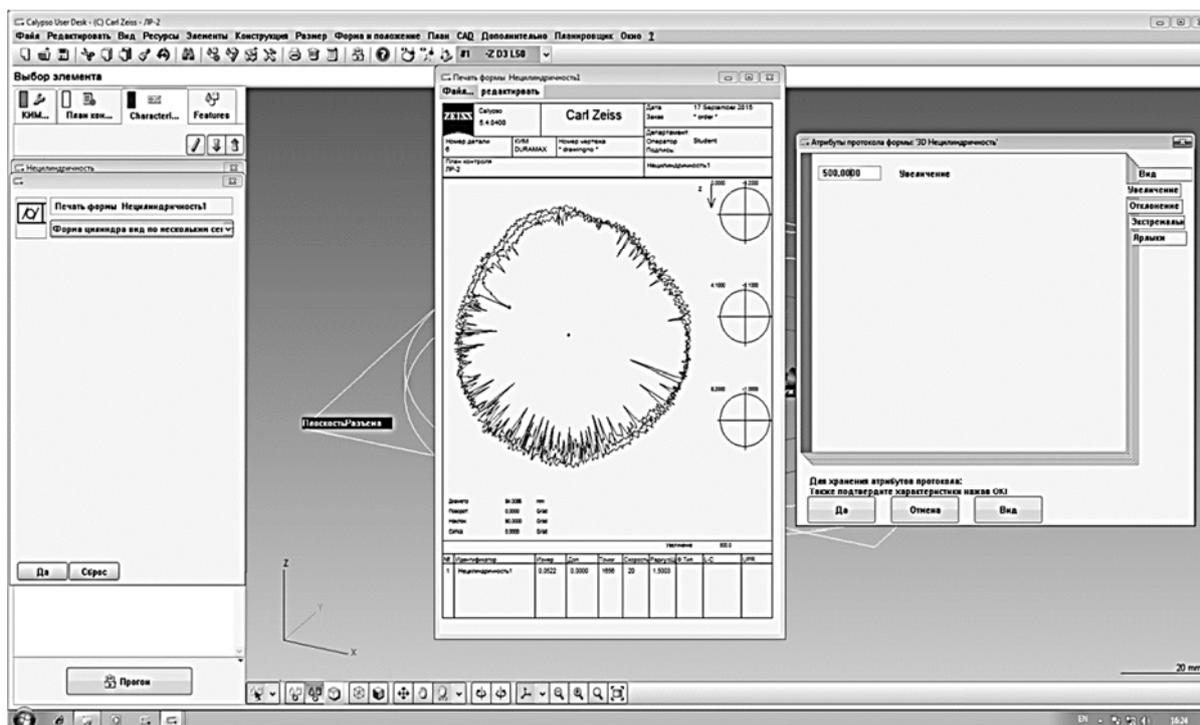


Рисунок 3.19 – Графическое представление – отклонение от цилиндричности

3.3 Разработка методики измерений методом сканирования и оцифровки криволинейных поверхностей деталей с многопериодными дорожками с выводом координат опорных точек кривой в ASCII-файл

Разработана методика сканирования криволинейных поверхностей детали с некоторым заданным линейным шагом точек кривой. Полученные точки (в зависимости от протяженности кривой и дискретности шага) могут быть выведены в текстовый ASCII-файл либо на печать. Координаты точек, выведенные в ASCII-файл, использованы для построения реального профиля кривой в CAD-программе с целью дальнейшего наложения на график идеального профиля кривой и определения погрешностей изготовления как наибольшей разности между реальным и номинальным профилями.

Опорные точки кривой, соответствующей криволинейной поверхности детали, создаются элементом программы «Кривая». В CAD-окне программы Calypso задается скорость сканирования (по умолчанию – 3 мм/с), длина шага, система координат (прямоугольная или цилиндрическая), стартовая и конечная точки кривой, толщина щупа радиусом 2,5 или 3 мм, пространственная ось Z, направление обхода кривой. По окончании сканирования в CAD-окне Calypso появится кривая (рисунок 3.20).

Данная кривая представляет собой траекторию перемещения центра щупа, т. е. является эквидистантой реальной кривой. Для получения реальной кривой необходимо редактировать номинальные значения координат щупа.

На рисунке 3.21 показано окно, в котором выполняются настройки редактирования номинальных координат.

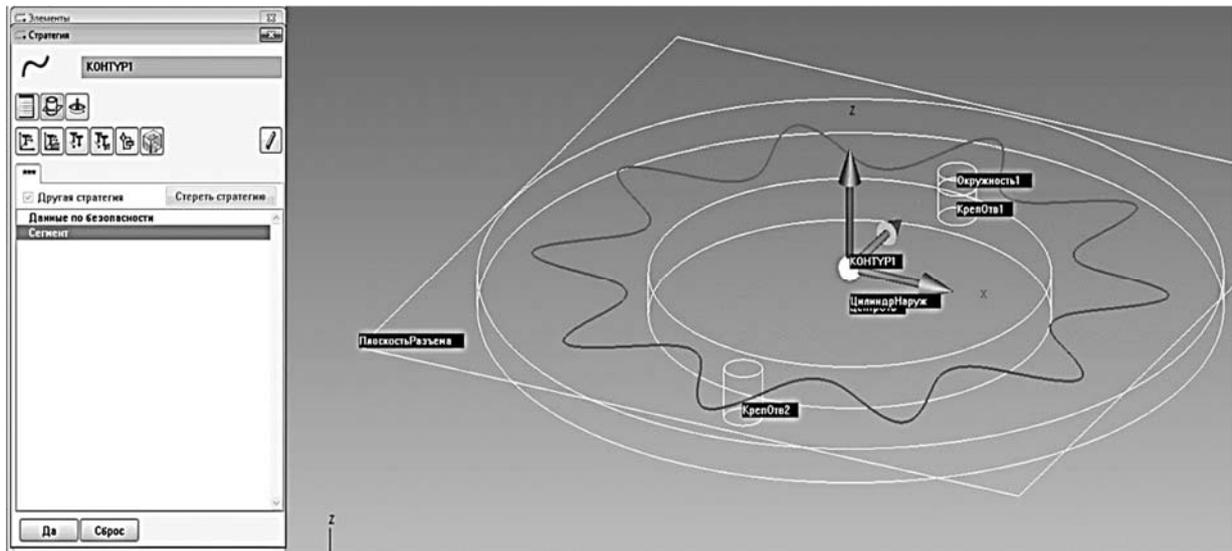


Рисунок 3.20 – Кривая профиля многопериодной дорожки колеса передачи

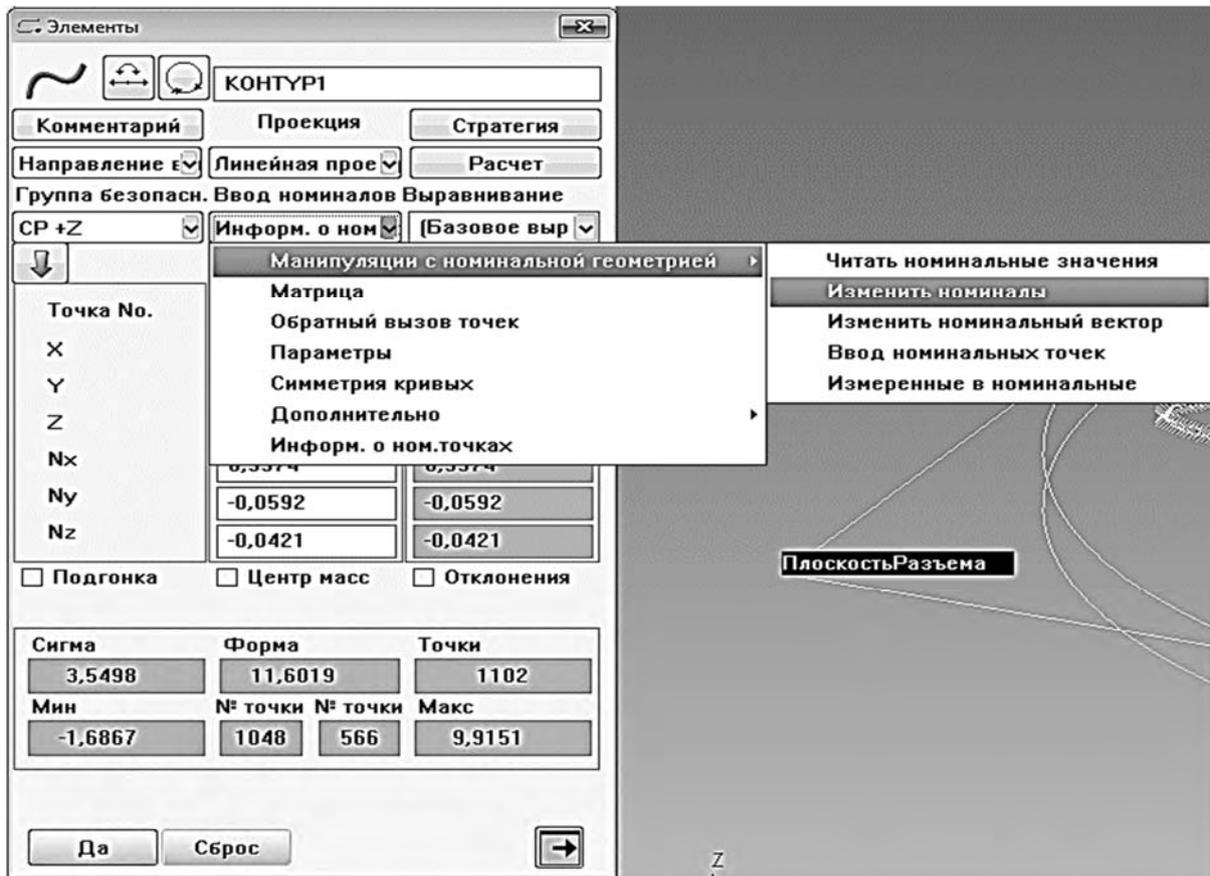


Рисунок 3.21 – Редактирование номинальных координат

В окне «Изменить номиналы» (рисунок 3.22) выбираются метод изменения координат щупа – «В направлении вектора» (по умолчанию) – и величина смещения. Величина смещения равна радиусу щупа. Поскольку кривую нужно сдвинуть в направлении, обратном вектору нормали, ставим знак «минус» $(-1,5)$ (см. рисунок 3.22).

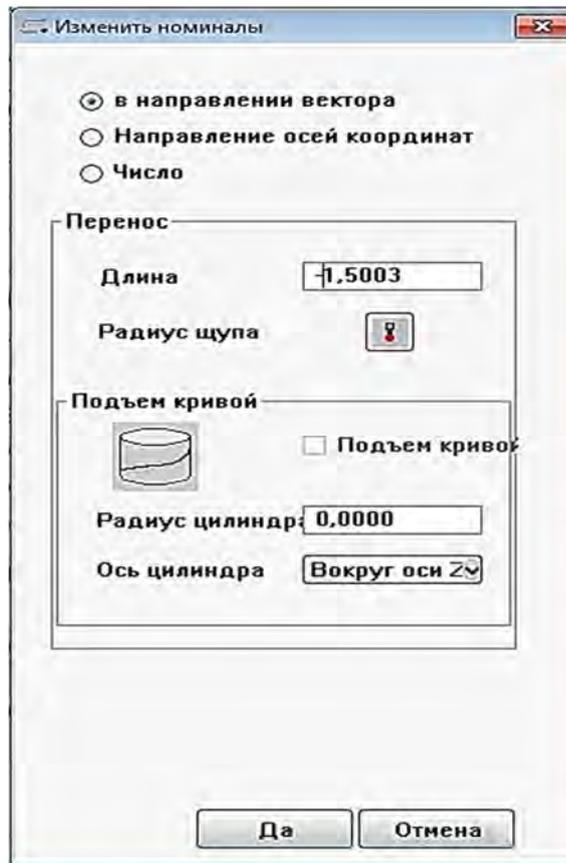


Рисунок 3.22 – Изменение номинальных координат

3.4 Разработка показателей точности для контроля деталей с многопериодными дорожками планетарных передач с телами качения

Многопериодные дорожки планетарных передач с телами качения являются важными элементами их конструкции. Они в наибольшей степени влияют на эксплуатационные характеристики передачи, и поэтому к ним предъявляются высокие требования геометрической точности профиля, т. к. по дорожкам перемещаются сателлиты (шары или ролики). Для обеспечения высокой точности изготовления дорожек необходимо использовать современные системы автоматизированного проектирования [12, 13, 18, 19, 32–35].

При проектировании технологии изготовления деталей с многопериодными дорожками планетарных передач с телами качения были

применены существующие современные методы обработки и контроля изделий на основе высокотехнологичного оборудования.

Точность изготовления профиля колеса радиально-плунжерной передачи в наибольшей степени влияет на ряд ее эксплуатационных характеристик. Периодический профиль дорожки колеса образуется фрезерованием концевой фрезой на обрабатывающем центре Mazak Smart 100. При фрезеровании ось фрезы перемещается по периодической кривой, описываемой уравнением в полярных координатах согласно [20]

$$\rho(\varphi) = \sqrt{R^2 - A^2 \sin^2 z\varphi} + A \cos z\varphi, \quad (3.1)$$

где $\rho(\varphi)$ – радиус-вектор точки периодической кривой;

R – средний радиус периодической кривой;

A – амплитуда многопериодной кривой или эксцентриситет однопериодной кривой;

z – число периодов кривой;

φ – полярный угол положения точки кривой, угол между полярной осью и радиус-вектором.

Колесо с многопериодной дорожкой представляет собой тело вращения со сложным внутренним профилем, описываемым уравнением (3.1). С целью упрощения конструкции колеса разработан более технологичный профиль, полученный сопряжением прямых линий и окружностей (рисунок 3.23).

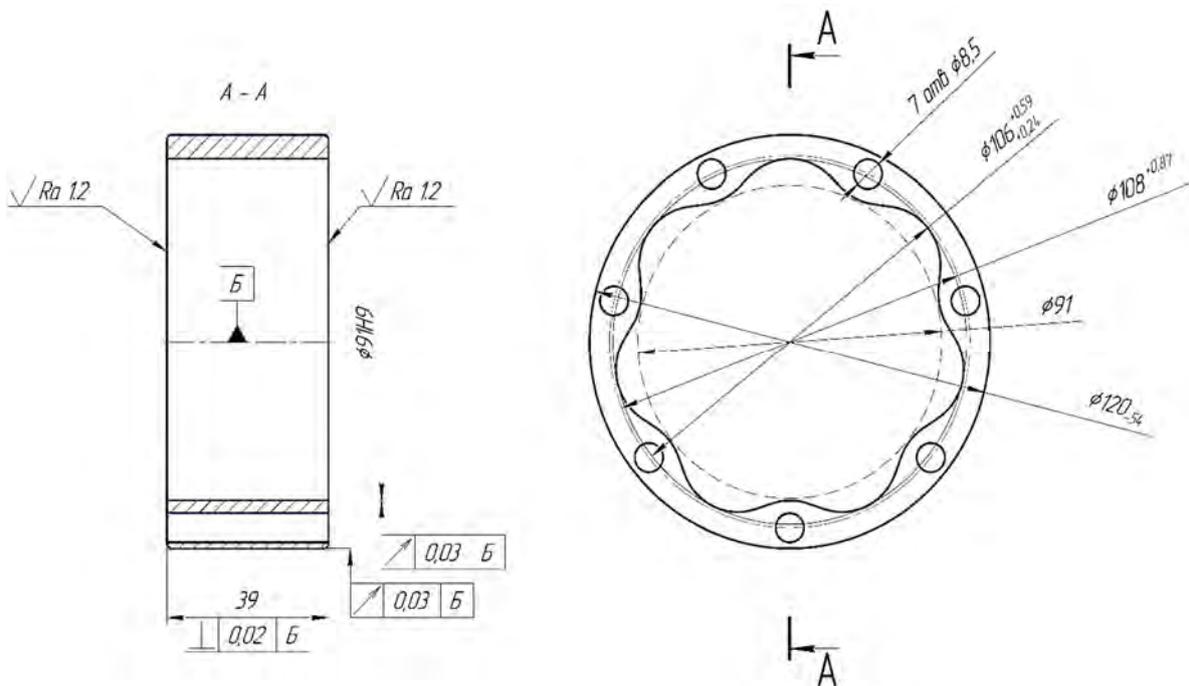


Рисунок 3.23 – Чертеж колеса с периодическим профилем дорожки

Профиль изготовлен однократным фрезерованием. Чтобы определить отклонение геометрии поверхности многопериодной дорожки с упрощенной конструкцией после изготовления от номинальной ее поверхности, по которой перемещаются спутники без кинематических погрешностей, необходимо разработать показатели оценки точности и методы контроля криволинейного профиля колеса.

Разработан метод контроля и оценки точности геометрических параметров многопериодной дорожки колеса с использованием координатно-измерительной машины (КИМ) DuraMax (Zeiss). В результате измерений и контроля на КИМ получен массив координат точек, определяющий внутренний контур колеса после обработки, на основе которого производились вычисления погрешностей профиля дорожки в программе VBA Excel (рисунок 3.24).

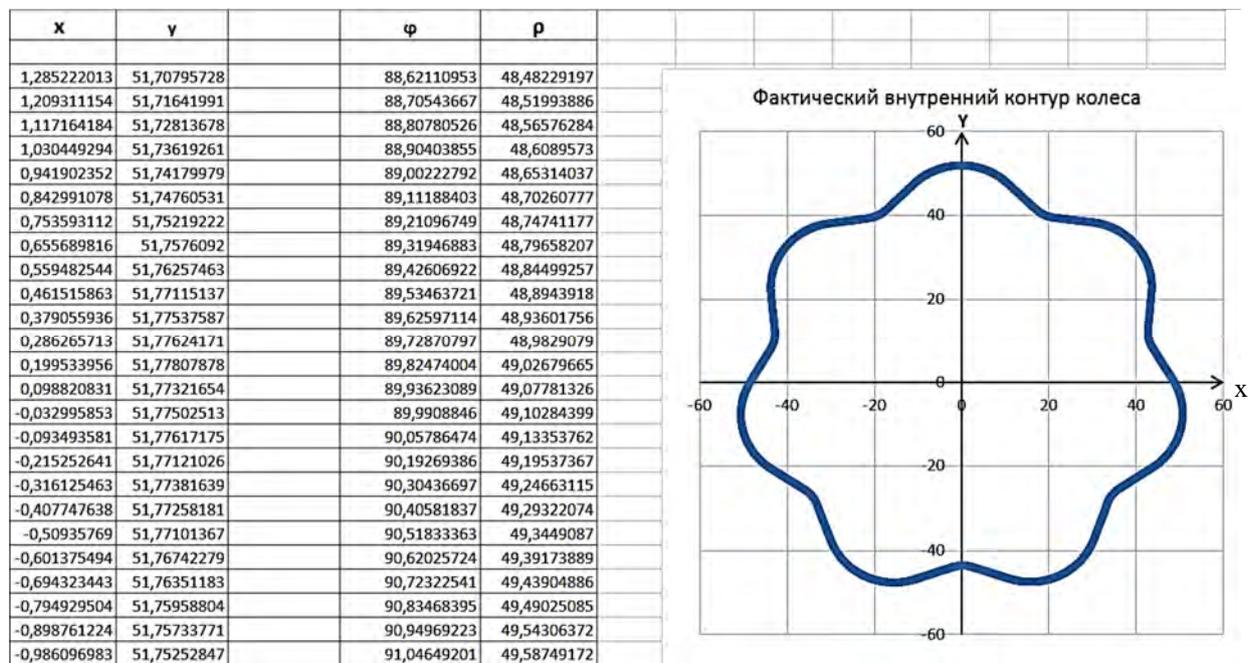


Рисунок 3.24 – Окно программы VBA Excel с круговой диаграммой периодического профиля дорожки

Для анализа полученных отклонений профиля использовалась программа VBA Excel, в которой были разработаны компьютерные программы для обработки экспериментальных результатов контроля и расчета показателей, определяющих точность профиля дорожки. На рисунке 3.24 показано окно программы Excel с полученными координатами реального профиля и его графиком – круглограммой.

Для контроля профиля многопериодной дорожки колеса необходимо разработать параметры точности и установить на них допуски на изготовление. Рассматривались кинематические и геометрические параметры

точности. Для оценки кинематической точности профиля дорожки предложены следующие параметры:

- измеренная на КИМ координата X ;
- измеренная на КИМ координата Y ;
- действительный радиус-вектор точки профиля дорожки;
- действительный угол положения точек профиля дорожки, полученный измерением;
- действительный угловой шаг профиля дорожки;
- номинальный угловой шаг точек профиля дорожки;
- относительная кинематическая погрешность профиля дорожки;
- относительная накопленная кинематическая погрешность профиля дорожки;
- номинальный накопленный угловой шаг точек профиля дорожки;
- абсолютная кинематическая погрешность профиля дорожки.

Действительный радиус-вектор точки профиля дорожки получен расчетом измеренных координат X и Y :

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (3.2)$$

Действительный угловой шаг профиля дорожки – разность соседних измеренных углов точек профиля дорожки $\varphi_{\partial(i+1)}$, $\varphi_{\partial i}$:

$$\Delta\varphi_{\partial i} = \varphi_{\partial i} - \varphi_{\partial(i-1)} = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right)_i - \arctg\left(\frac{Y}{X}\right)_{i-1}, \quad (3.3)$$

где i – номер угла двух соседних точек профиля дорожки.

Средний (номинальный) угловой шаг точек профиля дорожки, полученный расчетом:

$$\varphi_{ном} = \frac{2\pi}{N}, \quad (3.4)$$

где N – число измеренных углов (точек) профиля дорожки.

Относительная кинематическая погрешность профиля дорожки – разность действительного и номинального угловых шагов точек профиля дорожки:

$$\Delta\varphi_i = \Delta\varphi_{\partial i} - \varphi_{ном} = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right)_i - \arctg\left(\frac{Y}{X}\right)_{i-1} - \frac{2\pi}{N}, \quad (3.5)$$

где i – номер углового шага двух соседних точек профиля дорожки.

Относительная накопленная кинематическая погрешность профиля дорожки – разность действительного и номинального угловых шагов точек профиля дорожки с суммированием предыдущего значения:

$$\Delta\varphi_i^{\text{нак}} = \Delta\varphi_{\partial i} - \varphi_{\text{ном}} + \Delta\varphi_{i-1}^{\text{нак}} \quad (3.6)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i^{\text{нак}} = & \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)_i - \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)_{i-1} + \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)_{i-1} - \\ & - \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)_{i-2} + \dots + \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)_{i-n+2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{X}\right)_{i-n+1} - \frac{2\pi}{N}n, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где n – число всех угловых шагов точек профиля дорожки.

Номинальный накопленный угловой шаг точек профиля дорожки, полученный суммированием номинального текущего и предыдущего угловых шагов точек профиля дорожки:

$$\varphi_{\text{ном},i}^{\text{нак}} = \varphi_{\text{ном},i-1}^{\text{нак}} + \varphi_{\text{ном}}. \quad (3.8)$$

Абсолютная кинематическая погрешность профиля многопериодной дорожки – разность действительного (измеренного) угла положения и номинального накопленного углового шага точек профиля дорожки:

$$F_{\text{к.п.}}^{\text{МД}} = \Delta\varphi_{\text{абс}} = \varphi_{\partial} - \varphi_{\text{ном}}^{\text{нак}} \quad (3.9)$$

или

$$\Delta\varphi_{\text{абс},i} = \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)_i - \varphi_{\text{ном},i-1}^{\text{нак}} + \frac{2\pi}{N}. \quad (3.10)$$

Параметр $F_{\text{к.п.}}^{\text{МД}}$ можно рассматривать по аналогии с кинематической погрешностью зубчатого колеса и назвать кинематической погрешностью колеса с многопериодной дорожкой.

На основе точностных параметров, описанных выше и рассчитанных по формулам (3.2)–(3.10), предложены следующие показатели оценки точности

многопериодной дорожки: *действительный угловой шаг профиля дорожки; относительная кинематическая погрешность профиля дорожки; относительная накопленная кинематическая погрешность профиля дорожки; абсолютная кинематическая погрешность профиля дорожки.*

Построены графики, характеризующие предложенные показатели точности, построенные в соответствии с проведенными экспериментальными исследованиями и расчетами в соответствии с формулами (3.1)–(3.10).

На рисунке 3.25 показано окно программы Excel с результатами экспериментальных значений и расчета параметров точности многопериодной дорожки колеса радиально-плунжерной передачи, представленного на рисунке 3.23.

	кинематические параметры точности				относительные погрешности				абсолютная погрешность	
№ изм	x_экс	y_экс	p_д	φ_д	Δφ_д	φ_ном	Δφ_д ном	Δφ_д ном накопл	φ_ном накопл	Δφ_абс
1	1,285222013	51,70795728	51,72392716	88,57618358	0,08428439	0,1099908	-0,0257064	-0,0257064	88,57618358	0,0000000
2	1,209311154	51,71641991	51,73055695	88,66046798	0,10231669	0,1099908	-0,0076741	-0,0333806	88,6661744	-0,0257064
3	1,117164184	51,72813678	51,74019898	88,76278467	0,09618451	0,1099908	-0,0138063	-0,0471869	88,7961652	-0,0333806
4	1,030449294	51,73619261	51,74645352	88,85896918	0,09813959	0,1099908	-0,0118512	-0,0590382	88,9061561	-0,0471869
5	0,941902352	51,74179979	51,75037222	88,95710877	0,10960053	0,1099908	-0,0003903	-0,0594285	89,0161469	-0,0590382
6	0,842991078	51,74760531	51,7544712	89,06670929	0,09903323	0,1099908	-0,0109576	-0,0703861	89,1261378	-0,0594285
7	0,753593112	51,75219222	51,75767868	89,16574252	0,10844633	0,1099908	-0,0015445	-0,0719306	89,2361286	-0,0703861
8	0,655689816	51,7576092	51,76176233	89,27418886	0,10654635	0,1099908	-0,0034445	-0,0753751	89,3461194	-0,0719306
9	0,559482544	51,76257463	51,76559816	89,3807352	0,10851296	0,1099908	-0,0014779	-0,0768529	89,4561103	-0,0753750
10	0,461515863	51,77115137	51,77320843	89,48924816	0,09128762	0,1099908	-0,0187032	-0,0955561	89,5661011	-0,0768529
11	0,379055936	51,77537587	51,77676341	89,58053579	0,10268475	0,1099908	-0,0073061	-0,1028622	89,6760919	-0,0955561
12	0,286265713	51,77624171	51,77703307	89,68322054	0,09598338	0,1099908	-0,0140075	-0,1168697	89,7860828	-0,1028622
13	0,199533956	51,77807878	51,77846324	89,77920392	0,11143433	0,1099908	0,0014435	-0,1154262	89,8960736	-0,1168697
14	0,098820831	51,77321654	51,77331085	89,89063825	0,14587594	0,1099908	0,0358851	-0,0795411	90,0060644	-0,1154262
15	-0,032995853	51,77502513	51,77503564	90,03651419	0,06694618	0,1099908	-0,0430447	-0,1225857	90,1160553	-0,0795411
16	-0,093493581	51,77617175	51,77625616	90,10346037	0,13476077	0,1099908	0,0247699	-0,0978158	90,2260461	-0,1225857
17	-0,215252641	51,77121026	51,77165774	90,23822114	0,1116165	0,1099908	0,0016257	-0,0961901	90,3360369	-0,0978158
18	-0,316125463	51,77381639	51,7747815	90,34983764	0,10139996	0,1099908	-0,0085909	-0,1047810	90,4460278	-0,0961901
19	-0,407747638	51,77258181	51,77418744	90,4512376	0,11245822	0,1099908	0,0024674	-0,1023136	90,5560186	-0,1047810
20	-0,50935769	51,77101367	51,77351931	90,56369583	0,10187194	0,1099908	-0,0081189	-0,1104325	90,6660094	-0,1023136
21	-0,601375494	51,76742279	51,77091572	90,66556776	0,10291598	0,1099908	-0,0070749	-0,1175074	90,7760003	-0,1104325
22	-0,694323443	51,76351183	51,76816823	90,76848374	0,11440203	0,1099908	0,0014112	-0,1160962	90,8859911	-0,1175074
23	-0,794929504	51,75958804	51,76569199	90,87988577	0,11494998	0,1099908	0,0049591	-0,1111370	90,9959819	-0,1160962
24	-0,898761224	51,75733771	51,76514057	90,99483575	0,09675071	0,1099908	-0,0132401	-0,1243771	91,1069728	-0,1111370
25	-0,986096983	51,75252847	51,7619222	91,09158646	0,10581931	0,1099908	-0,0041715	-0,1285487	91,2159636	-0,1243771
26	-1,081544761	51,74430395	51,75560579	91,19740577	0,11358606	0,1099908	0,0035952	-0,1249534	91,3259544	-0,1285487
27	-1,183984918	51,73602003	51,74956607	91,31099183	0,09990216	0,1099908	-0,0100887	-0,1350421	91,4359453	-0,1249534
28	-1,274061535	51,72861599	51,7443035	91,41089399	0,12108154	0,1099908	0,0110907	-0,1239514	91,5459361	-0,1350421
29	-1,383204423	51,71942182	51,737915	91,53197553	0,12155158	0,1099908	0,0115607	-0,1123907	91,6559269	-0,1239514
30	-1,492764815	51,71090168	51,73244339	91,6535271	0,09572024	0,1099908	-0,0142706	-0,1266613	91,7659178	-0,1123907
31	-1,579045857	51,7048388	51,72894491	91,74924734	0,11296616	0,1099908	0,0029753	-0,1236859	91,8759086	-0,1266613
32	-1,680783568	51,6954109	51,72272752	91,86221351	0,10665817	0,1099908	-0,0033327	-0,1270186	91,9858994	-0,1236859

Рисунок 3.25 – Окно программы Excel с результатами экспериментальных значений и расчета параметров точности многопериодной дорожки

На рисунке 3.26 представлен график, показывающий действительный угловой шаг профиля дорожки, полученный в результате измерений на КИМ и расчета по формуле (3.3).

На рисунке 3.27 приведен график относительной кинематической погрешности профиля дорожки, рассчитанный по формуле (3.5).

На рисунке 3.28 показан график относительной накопленной кинематической погрешности профиля дорожки, рассчитанный по формулам (3.6) и (3.7).

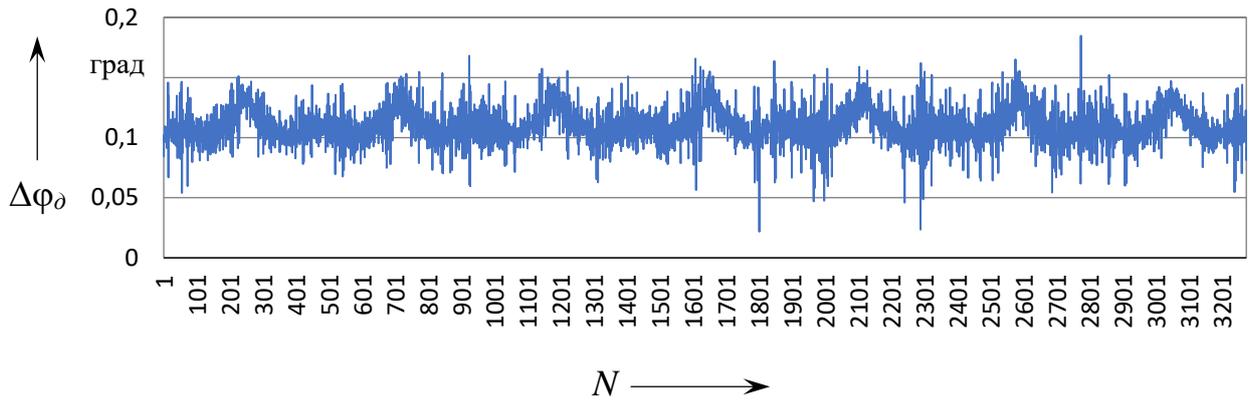


Рисунок 3.26 – График действительного углового шага профиля дорожки

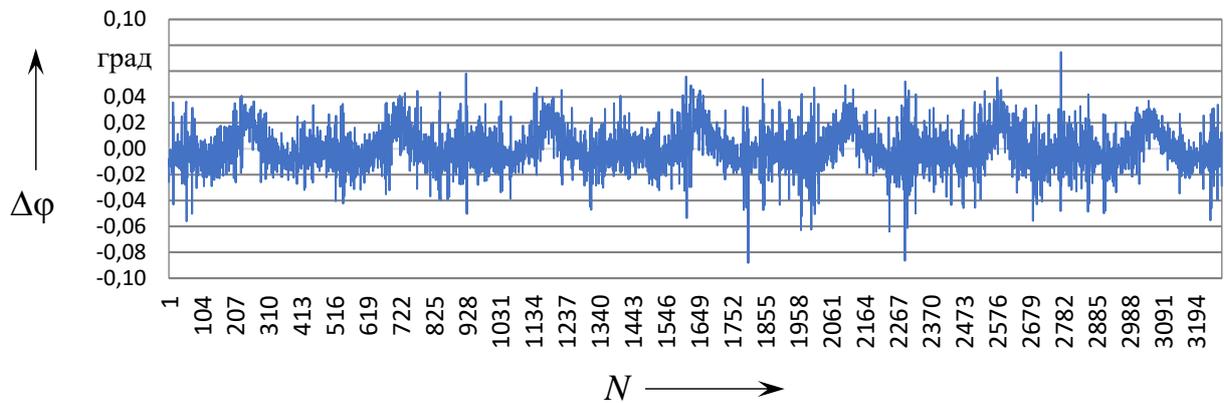


Рисунок 3.27 – График относительной кинематической погрешности профиля дорожки

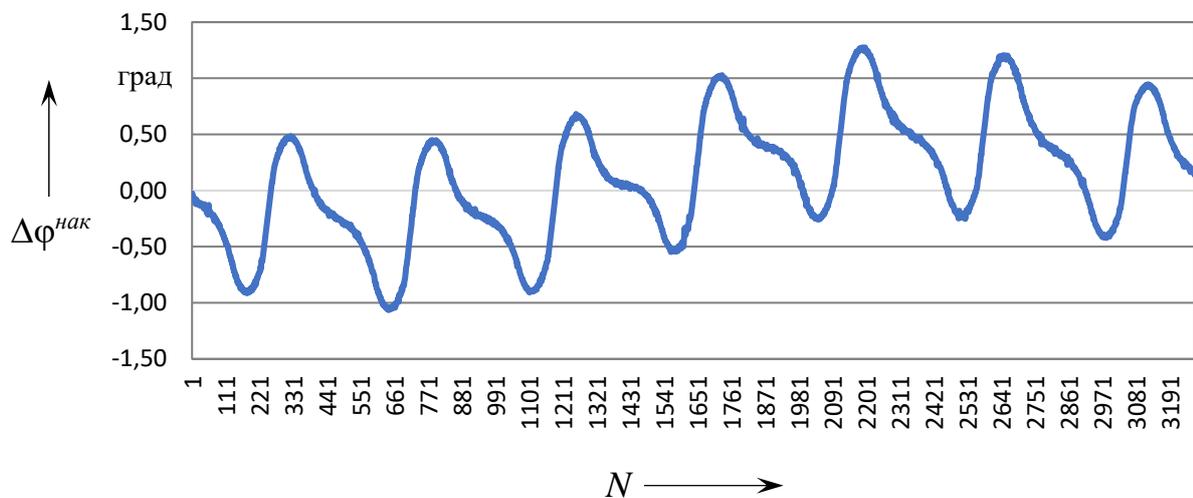


Рисунок 3.28 – График относительной накопленной кинематической погрешности профиля дорожки

Абсолютная кинематическая погрешность профиля дорожки, рассчитанная по формулам (3.9) и (3.10) имеет практически те же значения, что и накопленная кинематическая погрешность, и графики этих показателей идентичные.

На рисунках 3.26–3.28 параметр N означает количество измеренных точек поверхности профиля дорожки в пределах угла 2π .

На графиках (см. рисунки 3.26–3.28) можно определить наибольшие значения погрешностей профиля, а также местные погрешности для разных точек поверхности дорожки. На всех графиках выделяется многопериодная синусоида с периодом, равным периоду профиля дорожки колеса $z = 7$. На графиках значения погрешностей представлены для всей поверхности дорожки. При работе передачи спутники передают нагрузку только на поверхностях с углами подъема, соответствующими радиусам, близким к среднему радиусу периодической кривой R (см. формулу (3.1)), поэтому действительные погрешности изготовления профиля дорожки, которые влияют на кинематическую точность передачи, значительно меньше, чем полученные на графиках. Значения этих погрешностей будут определяться при нормировании точности изготовления дорожки.

Гармонический анализ позволяет определить местные и циклические погрешности, которые влияют на плавность работы передачи, установить влияние погрешностей профиля дорожки на кинематическую погрешность передачи, определить частоту изменения погрешностей; все это необходимо для установления допусков на показатели точности.

Амплитудно-частотный спектр функции изменения угловых значений параметра можно получить, используя ряд Фурье:

$$F(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi), \quad (3.11)$$

где $F(\varphi)$ – функция изменения угловых значений параметра;

$a_0/2$ – нулевой член разложения;

a_k, b_k – коэффициенты ряда Фурье;

k – порядковый номер гармонической составляющей.

Формулу (3.11), не учитывая нулевой член разложения, можно представить в виде

$$F(\varphi) = \sum_{k=1}^n c_k \sin(k\varphi + \varphi_k), \quad (3.12)$$

где φ_k – угол фазового смещения k -й гармоники;
 n – принятое число членов разложения функции $F(\varphi)$;
 c_k – амплитуда k -й гармоники;

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (3.13)$$

$$a_k = (2/n) \sum_{i=1}^n F(\varphi) \cos(k\varphi); \quad (3.14)$$

$$b_k = (2/n) \sum_{i=1}^n F(\varphi) \sin(k\varphi). \quad (3.15)$$

Значения точностных параметров профиля дорожки на рисунках 3.26–3.28 описываются формулами (3.11) и (3.12). По формулам (3.13)–(3.15) построены амплитудно-частотные спектры этих параметров.

На рисунке 3.29 представлен амплитудно-частотный спектр значений действительного углового шага профиля дорожки (см. рисунок 3.26), изменяющегося в пределах угла 2π , из 1000 гармоник.

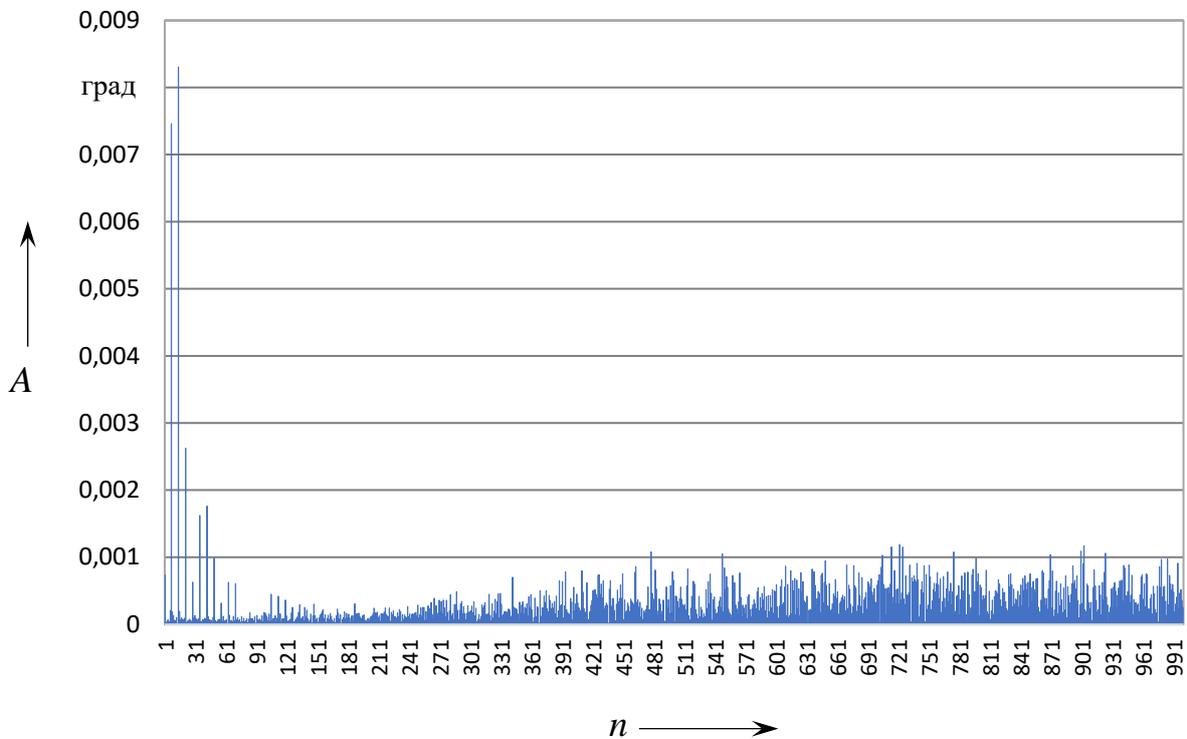


Рисунок 3.29 – Амплитудно-частотный спектр значений действительного углового шага профиля дорожки

На рисунке 3.30 показан амплитудно-частотный спектр значений относительной кинематической погрешности профиля дорожки (см. рисунок 3.27) из 100 гармоник. На рисунке 3.31 представлен амплитудно-частотный спектр значений относительной накопленной кинематической погрешности (см. рисунок 3.28) или абсолютной кинематической погрешности профиля дорожки из 100 гармоник.

На графиках (см. рисунки 3.29–3.31) выделяются гармоники n (имеют наибольшие амплитуды) с номерами, кратными числу периодов дорожки $z = 7$. Наибольшие значения имеют гармоники 1, 7, 14, 21, 35, 42. Эти гармоники с частотой больше одного периода можно записать соответственно их номерам в виде $z, 2z, 3z, 5z, 6z$. Частота их изменения соответственно $1z, \frac{1}{2}z, \frac{1}{3}z, \frac{1}{5}z, \frac{1}{6}z$.

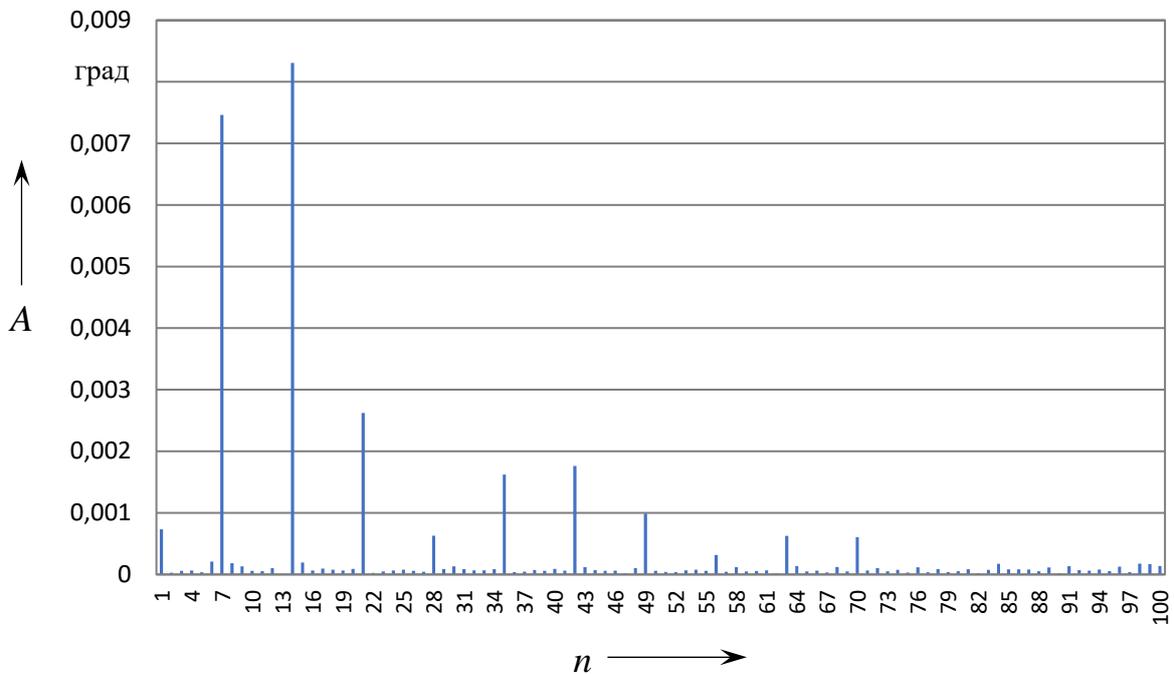


Рисунок 3.30 – Амплитудно-частотный спектр значений относительной кинематической погрешности профиля дорожки

Оценка геометрических параметров точности профиля многопериодной дорожки колеса проводилась по следующей методике. В программе VBA Excel по координатам измеренного на КИМ профиля изготовленной дорожки построена круглограмма кривой. Координаты точек кривой соответствуют координатам точек изготовленного профиля дорожки. Затем по формуле (3.1) в той же системе координат построена номинальная эквидистантная кривая без геометрических отклонений, которая описывает центр перемещения

сателлита и удалена от рабочего профиля дорожки на величину, равную радиусу сателлита. Так как при построении реальной и номинальной кривых может быть фазовое смещение, то эти кривые необходимо совместить, учитывая угол фазового смещения. Совместив реальную и номинальную кривые в одной системе координат и исключив постоянную величину – значение радиуса сателлита, определили геометрические погрешности профиля дорожки по нормали к двум кривым.

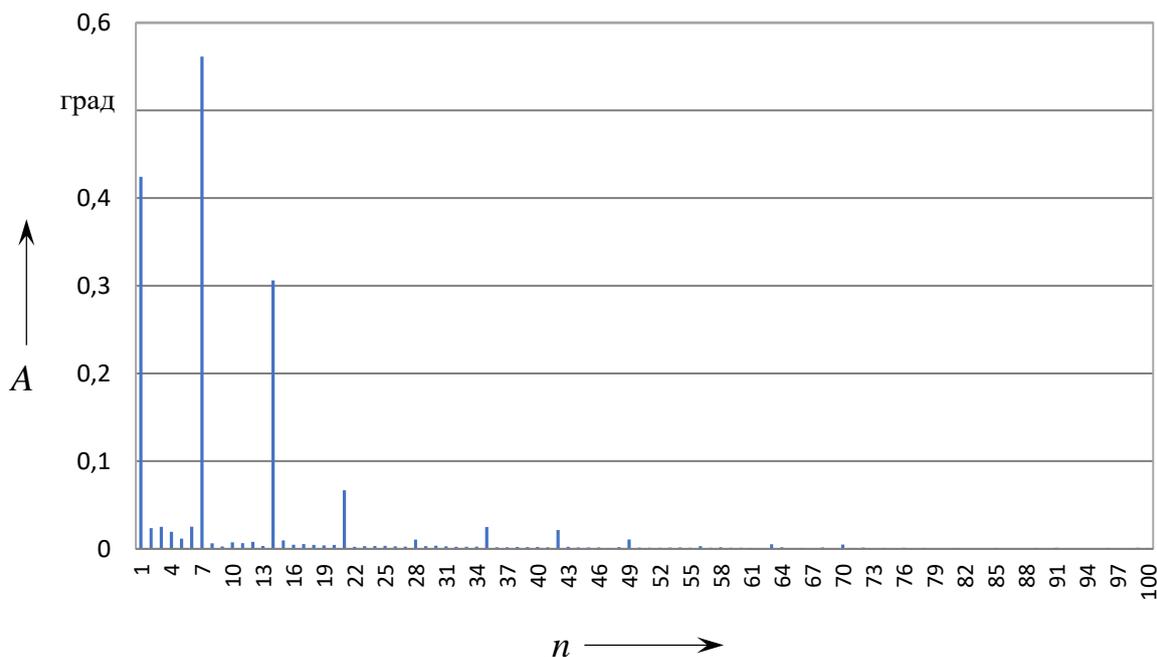


Рисунок 3.31 – Амплитудно-частотный спектр значений абсолютной кинематической погрешности профиля дорожки

На рисунке 3.32 представлены круглограммы кривых реального профиля многопериодной дорожки и номинальных (расчетных) кривых, по которым перемещается ось фрезы при формообразовании дорожки. На рисунке 3.32, а показаны круглограмма кривой реального профиля (изготовленного) с наибольшим радиусом и две круглограммы кривых с меньшими радиусами до и после совмещения симметрии с реальной кривой, полученные расчетом. На рисунке 3.32, б приведены круглограммы кривых с симметричными профилями реальной кривой с наибольшим радиусом и расчетной кривой с меньшим радиусом. Расстояния между кривыми по нормали соответствуют половине диаметра сателлита или радиусу фрезы. На круглограммах горизонтальная ось X , мм, вертикальная ось Y , мм.

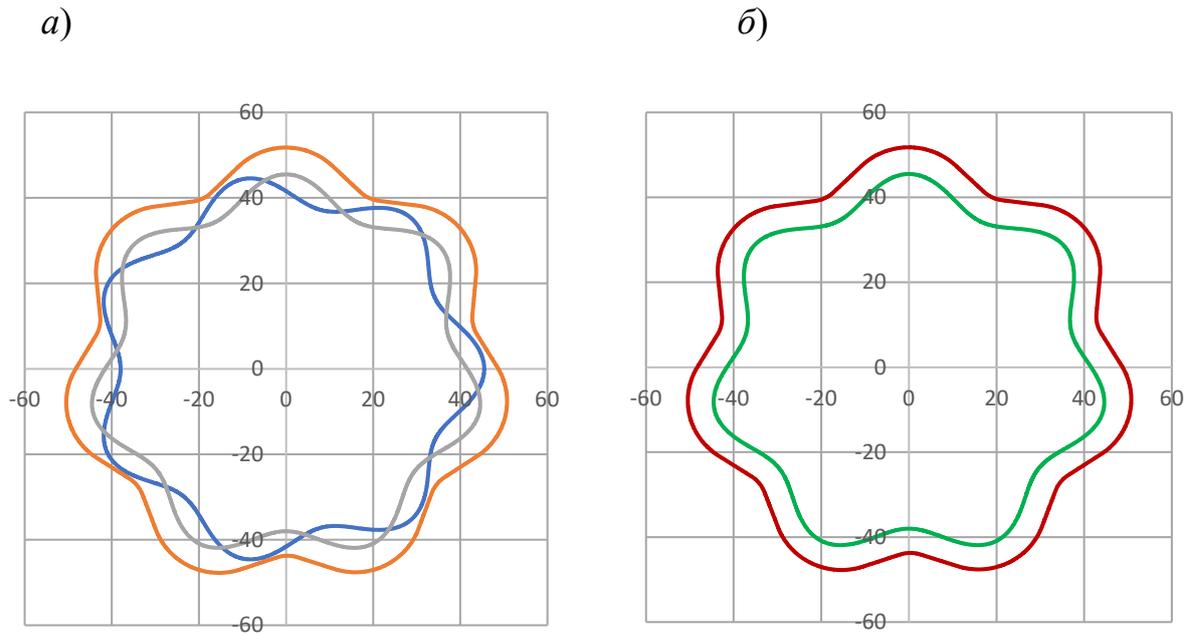


Рисунок 3.32 – Круглограммы совмещенных кривых реального и номинального профилей дорожки

На рисунке 3.33 показан график геометрической погрешности профиля дорожки как разности между точками реальной и номинальной кривых с учетом расстояния между кривыми по нормали.

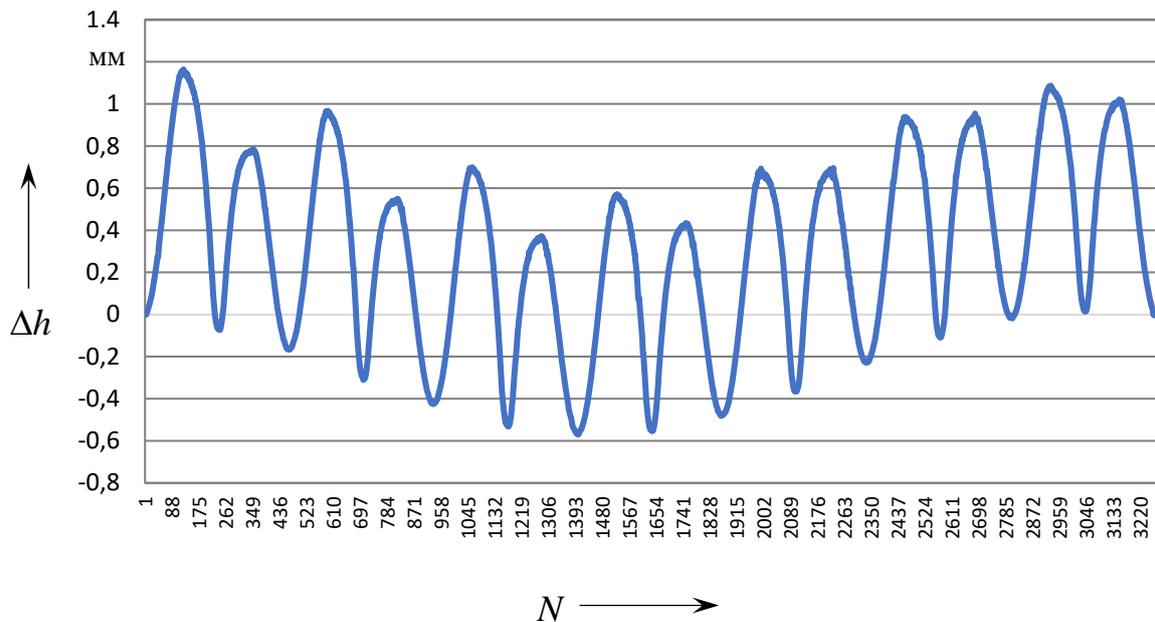


Рисунок 3.33 – Геометрическая погрешность профиля дорожки

На рисунке 3.34 показан амплитудно-частотный спектр геометрической погрешности профиля дорожки, полученный методом разложения значений на графике, представленном на рисунке 3.33, в ряд Фурье. Параметр N на спектре означает количество измеренных точек поверхности профиля дорожки в пределах угла 2π .

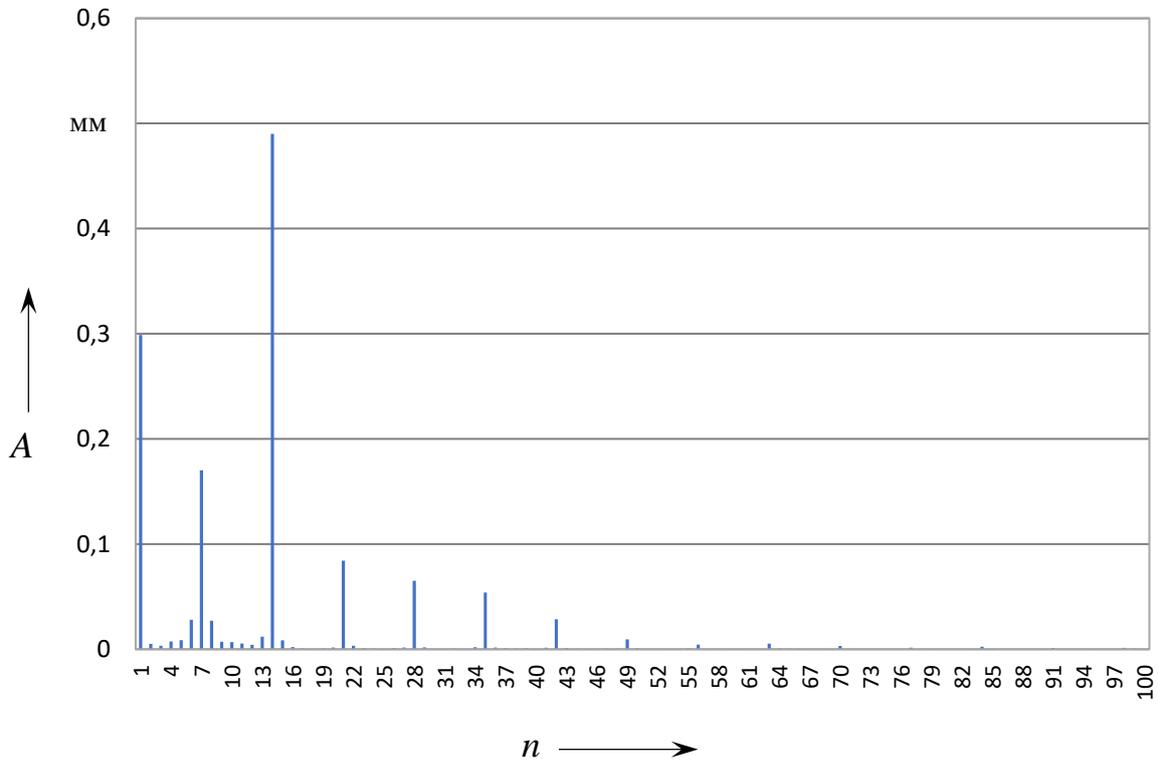


Рисунок 3.34 – Амплитудно-частотный спектр геометрической погрешности профиля дорожки

На графике (см. рисунок 3.34) выделяется 14 периодов кривой. Число этих периодов кратно геометрическому параметру дорожки $z = 7$. Вершины кривой характеризуют погрешности, связанные с подрезанием впадин дорожки, по которым спутники не передают нагрузку, поэтому действительная наибольшая геометрическая погрешность профиля дорожки значительно меньше представленной на графике (см. рисунок 3.33).

На графике (см. рисунок 3.34) наибольшие амплитуды имеют те же гармоники, что и на графиках, представленных на рисунках 3.29–3.31. Это гармоника с номером 1 и гармоники, кратные числу периодов дорожки: 7, 14, 21, 28, 35, 42.

Таким образом, в результате оценки геометрических параметров точности профиля многопериодной дорожки колеса определены отклонения

полученного профиля после обработки относительно теоретического (номинального) профиля. При этом гармонический анализ показал, что при изготовлении дорожки возникают погрешности формообразования, характеризующиеся определенными и схожими номерами гармонических составляющих исследуемых геометрических и кинематических точностных параметров.

4 Разработка комплексных методов экспресс-анализа точностных параметров механических передач

4.1 Разработка средств и методов экспресс-анализа кинематических погрешностей механических передач в сборе

Известны различные методы и средства измерения кинематических погрешностей зубчатых колес [36–43]. Они позволяют определить погрешности лишь отдельных колес или двух колес в зацеплении без монтажа их с валами, подшипниками и корпусом. Для контроля точности механизмов, например, редукторов, необходим контроль в сборе. Планетарные передачи с телами качения имеют в зацеплении более двух звеньев, поэтому для контроля их кинематической точности также необходим контроль не отдельных звеньев и деталей, а готового изделия.

Для экспериментальных исследований и экспресс-анализа точностных параметров механических передач в сборе были разработаны устройства, на четыре из которых получены патенты на изобретения [44–47].

Первое из устройств представлено на рисунке 4.1 [44]. Оно содержит контролируемую передачу 1, диск 2, закрепленный на ведущем валу передачи, диск 3, закрепленный на ее ведомом валу, и измерительное индикаторное устройство, определяющее разность между теоретическим и фактическим углами поворота ведомого диска. Измерительное индикаторное устройство имеет подвижное основание 4, на котором закреплен индикатор 5, перемещающийся вместе с основанием в перпендикулярном к оси ведомого вала направлении, совпадающем с направлением движения измерительного наконечника индикатора. На цилиндрических поверхностях дисков закреплены гибкие нерастяжимые нити 6 и 7, одна из которых связана с подвижным основанием 4 измерительного индикаторного устройства, а другая – с измерительным наконечником индикатора 5. Для придания определенного направления гибкой нити 6 используются ролики 8 и 9. При измерении кинематических погрешностей передачи учитываются радиальные биения дисков 2 и 3 по показаниям индикаторов 10 и 11.

Диски 2 и 3 имитируют эталонную передачу с точным передаточным отношением, равным передаточному отношению u контролируемой передачи, благодаря специально подобранному отношению их диаметров, равному

$$u = \frac{D_3}{D_2}, \quad (4.1)$$

где D_2, D_3 – диаметры дисков 2 и 3 соответственно.

При измерении погрешностей передачи производится поворот ведущего вала контролируемой передачи, а значит, и ведущего диска 2 эталонной передачи на некоторый угол φ_2 .

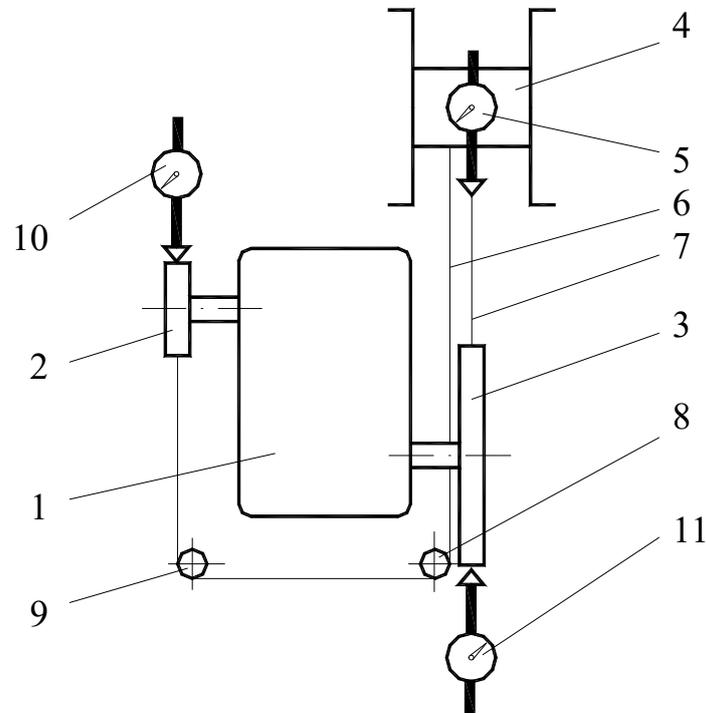


Рисунок 4.1 – Устройство с гладкими дисками на валах контролируемой передачи

При этом нить 6, наматываясь на диск 2, вызывает перемещение подвижного основания 4 измерительного устройства, вместе с которым перемещается и индикатор 5. Величина этого перемещения L_2 определяется углом φ_2 и радиусом диска 2, т. е.

$$L_2 = R_2 \varphi_2 = \frac{D_2 \varphi_2}{2}. \quad (4.2)$$

В результате поворота ведущего диска 2 на угол φ_2 получит поворот и ведомый диск 3 на угол φ_3 , который связан с углом φ_2 передаточным отношением:

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_2}{u}. \quad (4.3)$$

При этом нить 7 будет наматываться на диск 3 и перемещать измерительный наконечник индикатора 5 на величину

$$L_3 = \frac{D_3 \varphi_3}{2} = \frac{D_3 \varphi_2}{2u}. \quad (4.4)$$

Так как диаметры дисков связаны величиной передаточного отношения, то из (4.1) следует

$$D_3 = D_2 u. \quad (4.5)$$

Подставив (4.5) в (4.4), получим

$$L_3 = \frac{D_2 u \varphi_2}{2u} = \frac{D_2 \varphi_2}{2}. \quad (4.6)$$

Правые части соотношений (4.6) и (4.2) равны, т. е. $L_2 = L_3$. Это возможно лишь при идеально точной передаче 1. И тогда при любом угле поворота ее ведущего вала индикатор 5 измерительного устройства не даст показаний. Если же передача 1 имеет кинематические погрешности, то при повороте диска 2 на некоторый угол φ_2 диск 3 повернется на угол φ_3 , не подчиняющийся соотношению 3, т. е. окажется, что $\Delta = L_2 - L_3 \neq 0$. При этом индикатор 5 измерительного устройства зафиксирует кинематическую погрешность Δ , приведенную к диаметру D_3 .

Второе устройство, представленное на рисунке 4.2, позволяет измерять кинематические погрешности передач, имеющие большие передаточные отношения (100 и более) [45]. Оно состоит из контролируемой передачи 1 с ведущим 2 и ведомым 3 валами. Ведущий вал 2 соединен с эталонной передачей, которая выполнена в виде винтовой, причем шаг резьбы t подобран так, чтобы $t = \pi D/u$, где D – диаметр измерительного диска 8, закрепленного на ведомом валу 3. Гибкая нить 9, перекинутая через ролик 10, связывает наружную цилиндрическую поверхность диска 8 с наконечником индикатора 6 измерительного устройства. Индикатор закреплен на ведомом звене 5 эталонной винтовой передачи, которое при вращении винта перемещается по направляющим 7. Индикатор 11 служит для оценки радиального биения диска 8 и учета его при определении кинематической погрешности путем добавления к показаниям индикатора 6 или вычитания из этих показаний; если ведущий вал совершил, например, N полных оборотов, то ведомое звено при этом переместится на величину

$$L_1 = tN, \quad (4.7)$$

где t – шаг резьбы,
а ведомый вал 3 повернется на угол

$$\varphi = \frac{2\pi N}{u}. \quad (4.8)$$

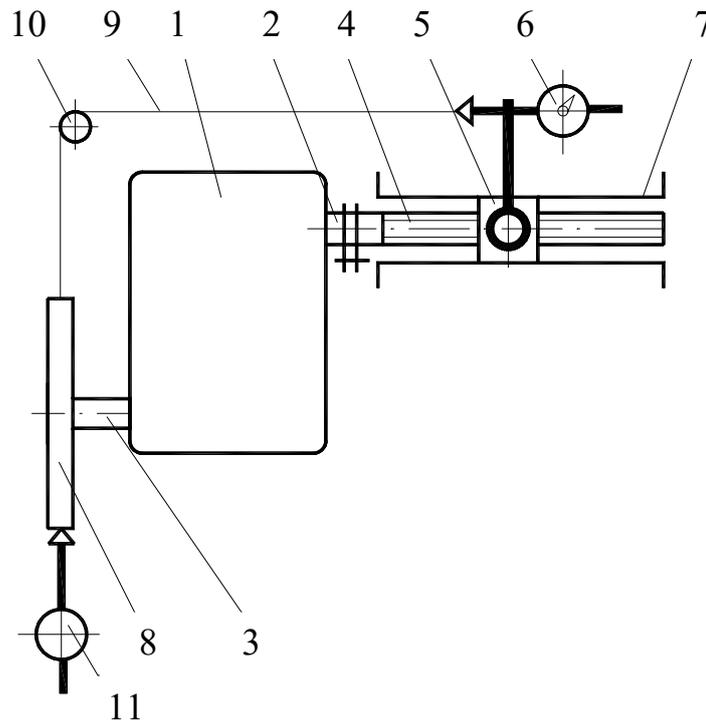


Рисунок 4.2 – Устройство с винтовой эталонной передачей

При повороте измерительного диска 8 на этот угол φ нить 9 вызовет перемещение измерительного наконечника индикатора 6 на величину

$$L_2 = \frac{D\varphi}{2}, \quad (4.9)$$

где D – диаметр диска 8.

При отсутствии кинематических погрешностей контролируемой передачи перемещения L_1 и L_2 будут равны, т. е.

$$tN = \frac{D\varphi}{2} = \frac{\pi DN}{u}, \quad (4.10)$$

откуда

$$t = \frac{\pi D}{u}. \quad (4.11)$$

Если же кинематические погрешности имеют место, то $L_1 \neq L_2$ и индикатор 6 зафиксирует кинематическую погрешность, отнесенную к диаметру D измерительного диска 8. Показания индикатора 6 дадут величину, которая корректируется с учетом радиального биения измерительного диска 8, зафиксированного индикатором 11:

$$\Delta = L_1 - L_2. \quad (4.12)$$

Диаметр D измерительного диска выбирается из условия обеспечения требуемой точности измерения φ_0 угла поворота ведомого вала контролируемой передачи в зависимости от цены деления δ измерительного индикатора. Очевидно, что

$$\delta = \frac{D\varphi_0}{2}, \quad (4.13)$$

откуда получим требуемое значение диаметра:

$$D = \frac{2\delta}{\varphi_0}. \quad (4.14)$$

Высокую точность измерения и более высокое быстродействие обеспечивает третье устройство для контроля кинематической точности передач, схема которого представлена на рисунке 4.3 [46]. Оно содержит контролируемую передачу 1, насаженную на ведущий 2 и ведомый 3 валы соответственно, установленный на ведущем валу делительный диск 4 с числом пазов для деления N_1 , фиксатор 5 делительного диска, измерительный диск 6, закрепленный на ведомом валу контролируемой передачи и размещенный в щелевом проеме фотоэлектрического преобразователя 7, регулируемый источник постоянного напряжения 8, имитирующий эталонную передачу, блок сравнения электрических сигналов 9, выполненный на двух резисторах 10 и 11, а также регистратор 12.

Устройство не имеет эталонного колеса. Его заменяет регулируемый источник постоянного напряжения 8. Величина напряжения имитирует точные углы поворота ведомого вала 3 контролируемой передачи, соответствующие одинаковым углам поворота ведущего вала 2 при условии

отсутствия кинематических погрешностей. Одинаковые углы поворота ведущего вала обеспечиваются при помощи делительного диска 4 и фиксатора 5. Поскольку контролируемая передача имеет кинематические погрешности, постольку равным углам поворота ее ведущего вала соответствуют неравные углы поворота ведомого. В данном устройстве углы поворота ведомого вала преобразуются в напряжения, пропорциональные этим углам. Это обеспечивают фотоэлектрический преобразователь 7 и измерительный диск, установленные на ведомом валу контролируемой передачи. Схема перекрытия сетевого потока 7 измерительным диском 6 представлена на рисунке 4.4.

В зависимости от погрешностей $\Delta\varphi$ угла поворота ведомого вала контролируемой передачи, а следовательно, и измерительного диска, световой поток перекрывается больше или меньше, а фотодатчик формирует больший или меньший сигнал по сравнению с сигналом, установленным эталонной передачей – источником постоянного напряжения 8.

Устройство снабжено блоком сравнения 9, выполненным в виде вычитающего элемента. Разность сравниваемых сигналов пропорциональна кинематической погрешности передачи.

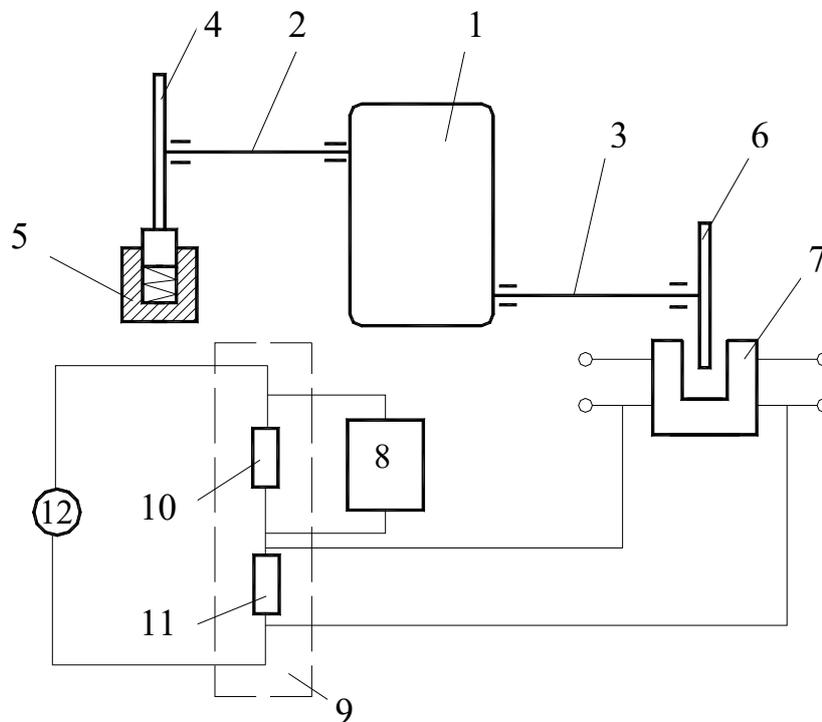


Рисунок 4.3 – Схема устройства с фотоэлектрическим преобразователем

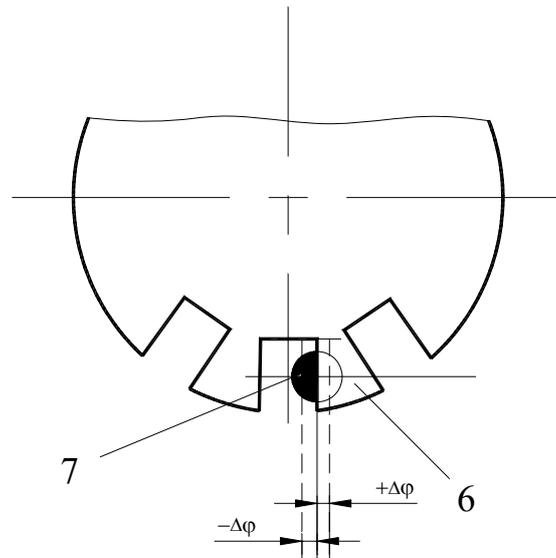


Рисунок 4.4 – Схема перекрытия светового потока измерительным диском

Для обеспечения поворота измерительного диска 6 на один угловой шаг при повороте делительного диска 4 на одно деление число пазов N_1 в делительном диске 4 и число прорезей в измерительном диске N_2 следует выбирать по соотношению

$$N_2 = N_1 u. \quad (4.15)$$

При повороте ведущего вала 3 на углы, равные

$$\varphi_1 = \frac{360^\circ}{N_1}, \quad (4.16)$$

угол поворота ведомого вала составит

$$\varphi_2 = \frac{360^\circ}{N_1 \cdot u} = \frac{360^\circ}{N_2}. \quad (4.17)$$

Если передача не имеет погрешностей, то равным углам поворота делительного диска будут соответствовать равные углы поворота измерительного диска. При наличии кинематических погрешностей при повороте делительного диска на угол $\varphi_1 = 360^\circ/N_1$ угол поворота измерительного диска будет

$$\varphi_2 = \frac{360^\circ}{N_2} \pm \Delta\varphi, \quad (4.18)$$

где $\Delta\varphi$ – угловая погрешность поворота, определяющая кинематическую погрешность передачи.

Если углы поворота одинаковы, измерительный диск 6 будет перекрывать световой поток фотоэлектрического преобразователя 7 на одну и ту же величину и преобразователь будет формировать одинаковые электрические сигналы.

На рисунке 4.4 сплошными линиями изображено расположение измерительного диска 6 относительно светового потока 7 при отсутствии погрешностей, а пунктирными линиями – при наличии кинематических погрешностей $+\Delta\varphi$ или $-\Delta\varphi$. При этом если угол поворота измерительного диска φ_2 меньше номинального на $-\Delta\varphi$, то световой поток фотоэлектрического преобразователя оказывается перекрытым в большей степени и этот преобразователь формирует электрический сигнал U меньше номинального U_n . Если же угол φ_2 больше номинального на $+\Delta\varphi$, то световой поток перекрыт в меньшей степени и преобразователь формирует электрический сигнал U больше номинального U_n .

Сформированный фотоэлектрическим преобразователем сигнал от контролируемой передачи поступает в блок сравнения сигналов 9 на резистор 10. Сигнал эталонной передачи $U_э = U_n$ поступает на резистор 11 блока сравнения в противофазе, и на выходе этого блока образуется сигнал, равный разности $U - U_n$, который регистрируется регистратором 12.

Эталонная передача имитируется регулируемым источником постоянного напряжения 8. Величина эталонного сигнала $U_э$ устанавливается такой, чтобы в исходном положении результирующий сигнал был равен нулю, т. е.

$$U - U_э = 0. \quad (4.19)$$

В данном устройстве в качестве регистратора может быть использован любой специально отградуированный вольтметр.

Наиболее информативным для измерения кинематических погрешностей является четвертое устройство – стенд, схема которого представлена на рисунке 4.5 [47].

Стенд состоит из основания 1, привода 2, нагрузителя, выполненного в виде электромагнитного тормоза 3 с обмоткой возбуждения 4, контролируемой передачи 5, датчиков 6 и 7 частоты вращения валов, интерфейса аналогового ввода информации 8, ЭВМ 9, сумматора 10, источника

регулируемого напряжения 11, генератора случайных сигналов 12 и маховика 13.

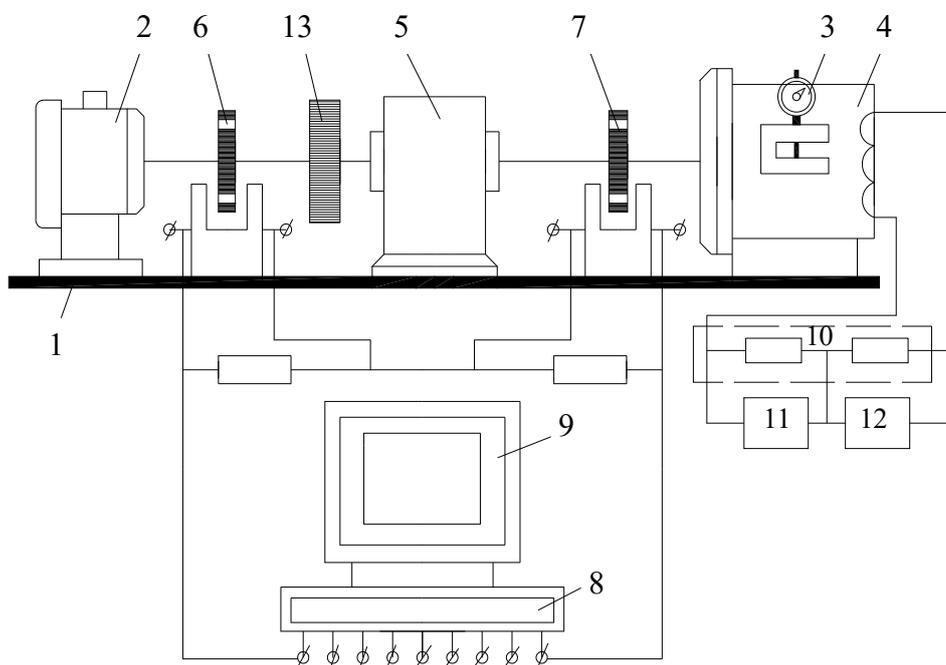


Рисунок 4.5 – Стенд для измерения кинематических погрешностей передач в сборе

Датчики частоты вращения выполнены в виде фотодатчиков типа ДФ-1 и закрепленных на валах дисков с отверстиями одинакового диаметра d , расположенными с постоянным угловым шагом по окружности.

Диски размещены в щелевых проемах фотодатчиков. Диаметры окружностей диска, на которых расположены отверстия, и количество отверстий в дисках связаны друг с другом через передаточное отношение u . Эти величины выбираются из соотношений

$$D_2 = D_1 u ; \quad (4.20)$$

$$N_2 = N_1 u , \quad (4.21)$$

где D_1, D_2, N_1, N_2 – диаметры окружностей и числа отверстий в дисках на ведущем и ведомом валах передачи соответственно.

Работает стенд следующим образом. При включении привода 2 на нагрузитель 3 подается постоянное напряжение, или напряжение от генератора случайных сигналов. На обмотке 4 возбуждения электромагнитного тормоза появляется напряжение, а на ведомом валу передачи 5 –

момент, пропорциональный напряжению, приложенному к обмотке возбуждения. Датчики частоты вращения 6 и 7 формируют последовательности импульсов, которые подаются на сумматор, выполненный на двух резисторах, в противофазе, а их разность – на шину ЭВМ 9. При наличии кинематических погрешностей последовательности импульсов будут иметь неодинаковые периоды T и неодинаковые длительности τ . По величинам отклонений значений T и τ от номинальных можно судить о величинах кинематических погрешностей. Осуществить связь ЭВМ с датчиками позволяет интерфейс 8 аналогового ввода информации. Управление процессом автоматического съема информации осуществляется при помощи программного комплекса, включающего головную управляющую программу, программу записи в порт, программу чтения из порта и программу записи файлов на магнитный диск. Обработку информации ведет и ЭВМ, которая по величине, знаку и периоду разностных импульсов $U_1 - U_2$ вычисляет значения кинематических погрешностей за один оборот ведомого вала. На основе данных тарировки ЭВМ вычисляет значения местных кинематических погрешностей, величину наибольшей кинематической погрешности передачи, значения амплитуд гармонических составляющих кинематических погрешностей, а также осуществляет графическое представление этих гармонических составляющих.

Повысить информативность стенда позволяет использование цифрового осциллографа, подключаемого к компьютеру. Его применение дает возможность осуществлять измерения с частотой 50 МГц и последующую обработку экспериментальных данных в среде Microsoft Excel и VBA Excel.

4.2 Экспериментальные исследования и сравнительная характеристика комплексных методов экспресс-анализа кинематических погрешностей механических передач

На основе патентов устройств, описанных в подразделе 4.1, спроектированы и изготовлены устройства комплексного контроля точности механических передач. На рисунках 4.1–4.3 показаны устройства для контроля кинематических погрешностей передач и собранных механизмов при дискретном повороте ведущего вала на равные углы статическим методом. Для поворота вала может использоваться автоматизированный привод – шаговый двигатель. При таком контроле исключается влияние рывков и вибраций, жестких ударов деталей зацепления, динамических нагрузок от сил инерции звеньев.

На рисунке 4.6 представлена компьютерная модель одноступенчатого планетарного роликового редуктора с передаточным отношением, равным 14. Наиболее сложными по геометрической форме деталями редуктора являются

диски с многопериодными дорожками (см. рисунки 3.9 и 3.10), которые в наибольшей степени влияют на его точность. На рисунке В.1 показана конструкция планетарного роликового редуктора и дано ее описание (таблица В.1).

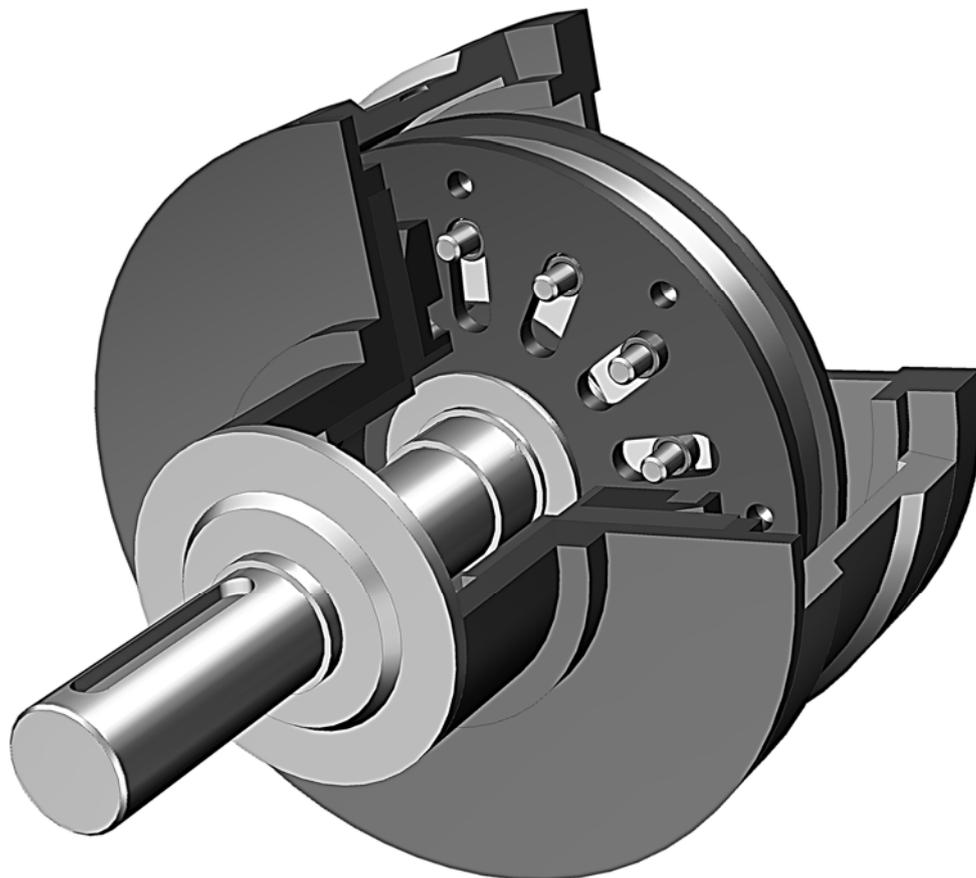


Рисунок 4.6 – Планетарный роликовый редуктор

На рисунках 4.7 и 4.8 приведены графики кинематической погрешности редуктора без нагрузки и с приложенной нагрузкой на выходном валу 20 Н·м с помощью электромагнитного тормоза, полученные при контроле на устройстве, представленном на рисунке 4.1. В одной координатной сетке построено четыре графика для одних и тех же условий нагружения. На графиках по вертикальной оси обозначена кинематическая погрешность редуктора $F_{к.п.}$, а по горизонтальной – число измерений за полный оборот выходного вала. Кинематическая погрешность выражена в миллиметрах и отнесена к окружности, соответствующей рабочему радиусу измерительного диска (см. рисунок 4.1), который составляет 99,6 мм.

На рисунках 4.7 и 4.8 видно, что графики не накладываются друг на друга, а имеют некоторое смещение по оси ординат. Это смещение связано с колебанием зазоров в передаче при дискретном измерении. Так как измерение происходит с остановками после каждого поворота ведущего вала,

то сателлиты-ролики сначала входят в зацепление, а затем после поворота смещаются относительно фиксированного положения в пределах зазоров. Под нагрузкой, как видно из графиков, это смещение уменьшается. Интервалы между верхними и нижними кривыми на рисунках 4.7 и 4.8 характеризуют величины зазоров при каждом повороте передачи.

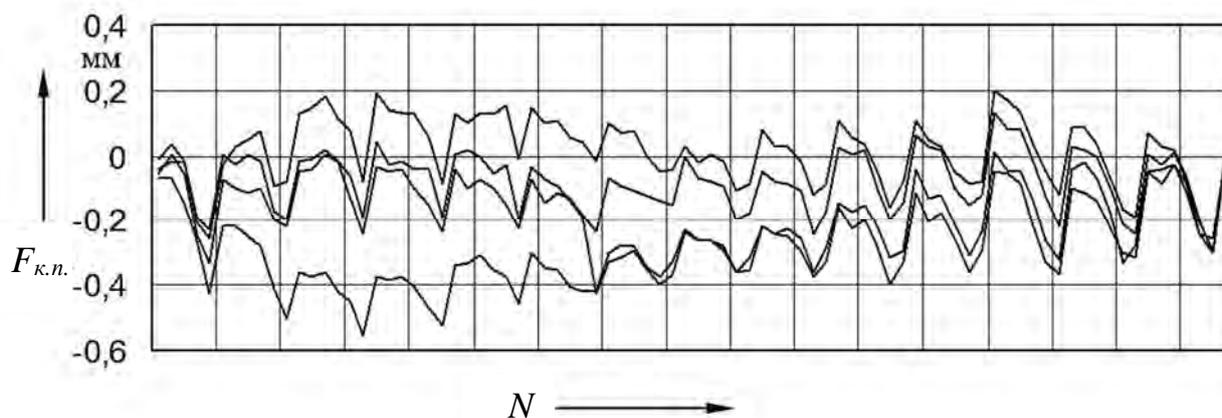


Рисунок 4.7 – Графики кинематической погрешности роликового редуктора без нагрузки при контроле статическим методом

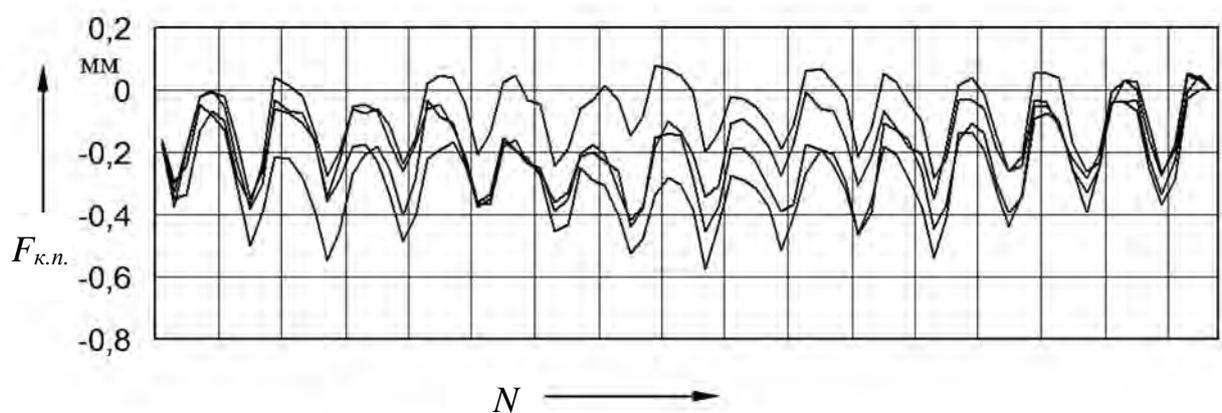


Рисунок 4.8 – Графики кинематической погрешности роликового редуктора под нагрузкой 20 Н·м при контроле статическим методом

На графиках также хорошо выделяются 14 периодов за полный оборот выходного вала. Каждый из этих периодов соответствует полному обороту ведущего вала, т. к. передаточное отношение редуктора $u = 14$. Каждый период кривой можно рассматривать как кинематическую погрешность ведущего вала редуктора.

На рисунках 4.9 и 4.10 представлены спектры амплитуд кинематических погрешностей планетарного роликового редуктора, показанных на графиках (см. рисунки 4.7 и 4.8), где A – амплитуда гармоники, k – номер гармоники.

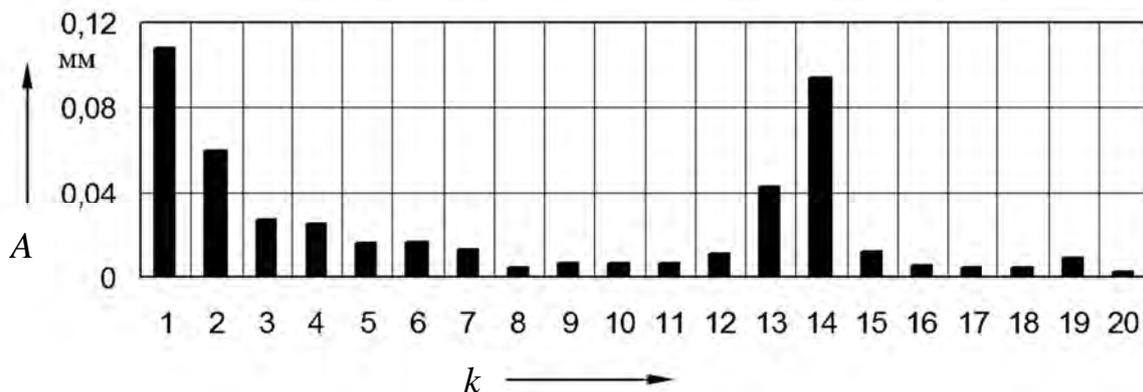


Рисунок 4.9 – Спектр амплитуд кинематической погрешности роликового редуктора без нагрузки при контроле статическим методом

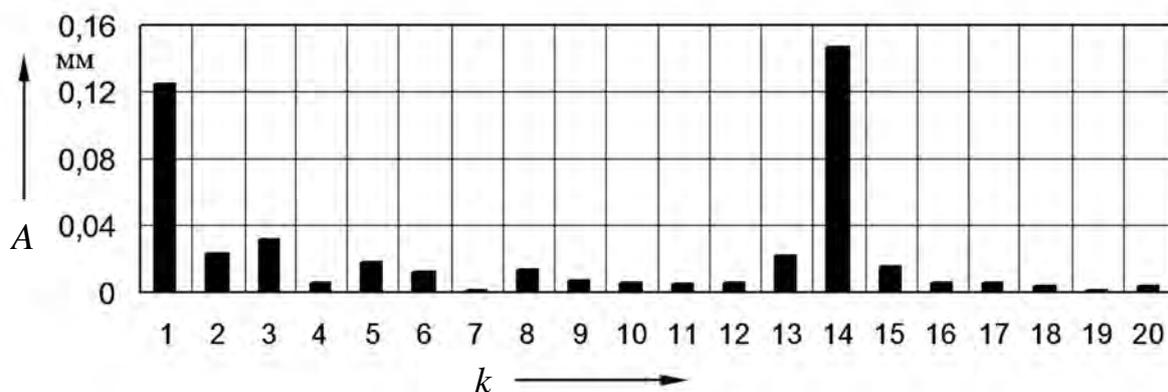


Рисунок 4.10 – Спектр амплитуд кинематической погрешности роликового редуктора под нагрузкой 20 Н·м при контроле статическим методом

Как видно из спектров, наибольшие амплитуды имеют 1, 2, 13 и 14-ю гармоники, характеризующие погрешности ведущего и ведомого звеньев редуктора. При этом величина амплитуды 14-й гармоники при измерениях под нагрузкой больше, чем при измерениях без нагрузки. Это связано с тем, что под нагрузкой в определенном положении зацепления сателлиты-ролики могут работать с натягом. При этом некоторая величина угла поворота будет уходить на выборку зазоров и деформацию деталей зацепления, что приведет к его уменьшению, а затем к его увеличению. Так как период этих колебаний равен полному обороту ведущего вала, то при передаточном отношении, равном $u = 14$, они проявляются в 14-й гармонике.

Для оценки кинематической погрешности планетарного роликового редуктора, работающего в условиях, приближенных к производственным, использовалось устройство, представленное на рисунке 4.5, и динамический

непрерывный метод контроля. Частота вращения двигателя устройства – 1500 мин^{-1} . На рисунках 4.11 и 4.12 представлены графики кинематических погрешностей планетарного роликового редуктора с передаточным отношением $u = 14$ без нагрузки и под нагрузкой $20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ на выходном валу, полученные при контроле на этом устройстве.

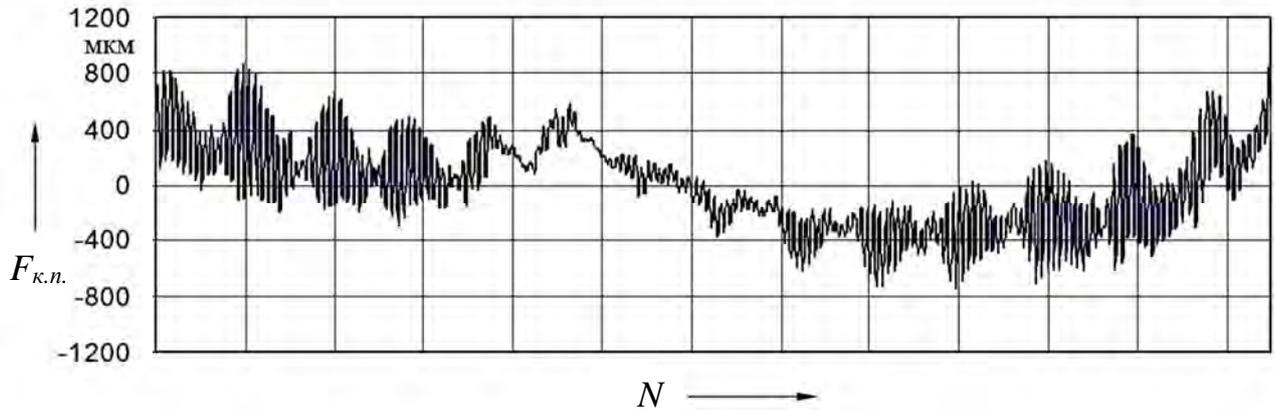


Рисунок 4.11 – График кинематической погрешности роликового редуктора без нагрузки при контроле динамическим методом

На этих графиках по оси ординат отложены значения кинематической погрешности $F_{к.п.}$ в линейных величинах (микрометрах) длиной дуги радиусом 100 мм . По оси абсцисс откладываются номера измерений.

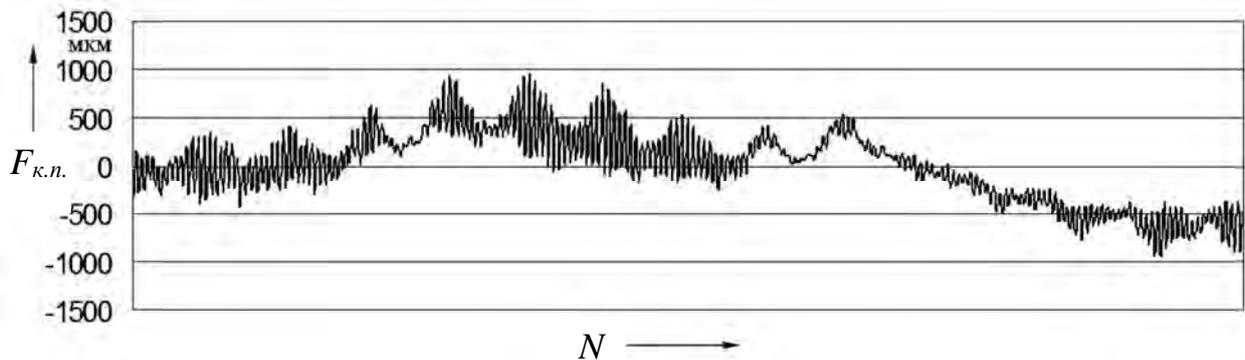


Рисунок 4.12 – График кинематической погрешности роликового редуктора под нагрузкой $20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при контроле динамическим методом

На графиках кинематических погрешностей (см. рисунки 4.11 и 4.12) просматривается 14 периодов, каждый из которых характеризует изменение угла поворота ведомого вала за полный оборот ведущего. Из графиков видно, что под нагрузкой $20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ кинематическая погрешность имеет больший

размах, чем без нагрузки. Это связано с дополнительными упругими отжатыми звеньев редуктора при его нагружении.

На рисунках 4.13 и 4.14 показан спектр амплитуд кинематической погрешности, представленной на рисунке 4.11.

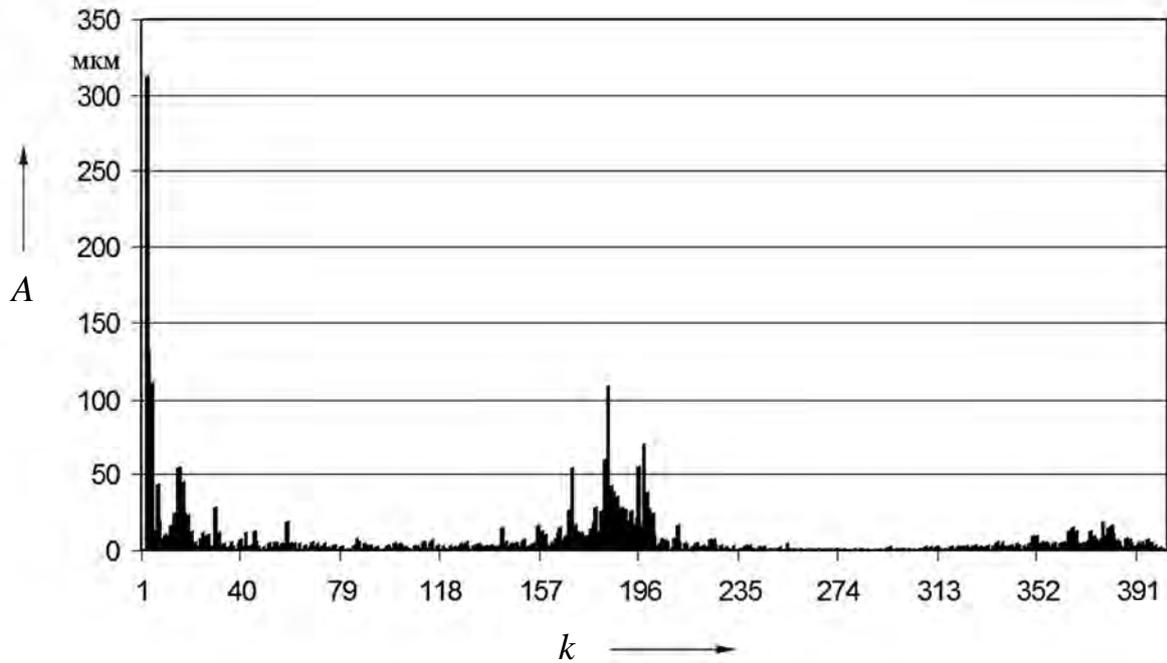


Рисунок 4.13 – Спектр амплитуд кинематической погрешности роликового редуктора без нагрузки при контроле динамическим методом

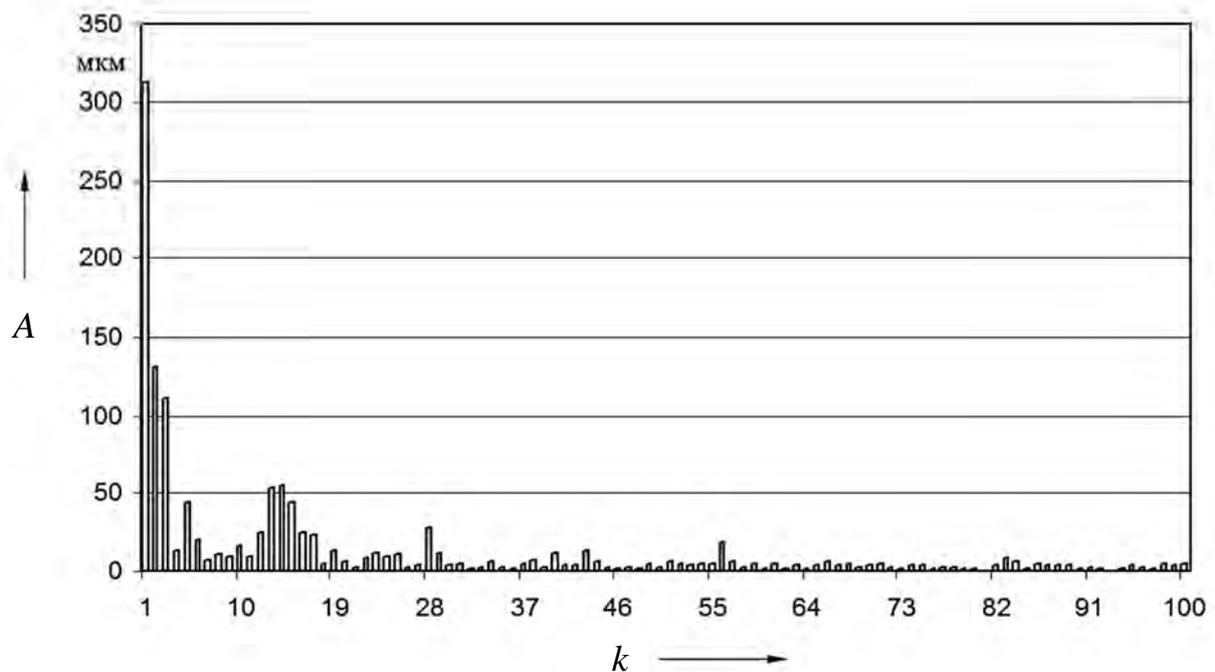


Рисунок 4.14 – Спектр амплитуд кинематической погрешности роликового редуктора без нагрузки при контроле динамическим методом, первые 100 гармоник

На спектре выделяется три участка гармоник с наибольшими значениями амплитуд. Это низкочастотный участок – гармоники 1–3, среднечастотный – гармоники 13, 14 и высокочастотный – гармоники с наибольшими амплитудами 182, 196, кратными 13, 14.

Проявление в спектре кинематической погрешности, измеренной динамическим методом, гармоник с номерами 1, 2, 13, 14 совпадает с результатами спектрального анализа, полученными статическим методом. Эти результаты подтверждают достоверность натурального эксперимента. Гармоники 182 и 196 характеризуют процесс периодического контакта сателлитов-роликов при входе в зацепление с многопериодной дорожкой и сепаратором и проявляются в спектре аналогично зубцовой частоте при контроле зубчатых передач.

При контроле статическим методом наибольшая кинематическая погрешность редуктора в соответствии с графиками на рисунках 4.7 и 4.8 в абсолютных величинах – угловых величинах – составила $0,28^\circ \dots 0,32^\circ$. При контроле динамическим методом – $0,91^\circ \dots 1,14^\circ$, что в 3,2–3,5 раз больше, чем при контроле статическим методом.

При дискретном измерении кинематическая погрешность определялась по 84 точкам. Это не позволило выявить высокочастотные гармоники, которые были определены при динамическом контроле. При контроле в статике значение максимальной кинематической погрешности за один оборот ведомого вала меньше действительного ее значения, т. к. здесь не проводится непрерывное измерение и не учитываются динамические свойства редуктора. Однако преимуществом при измерении в статике является отсутствие таких динамических явлений, как вибрации и шумы, которые накладываются на спектр кинематической погрешности и завышают ее значение.

При динамическом контроле с частотой вращения 1500 мин^{-1} измерительного устройства и наличии зазоров в зацеплении колебания звеньев редуктора и, соответственно, отклонение угла поворота выходного вала от номинального значения значительно увеличиваются.

Эти особенности контроля (экспресс-анализа) механизмов нужно учитывать при выборе для него методов и средств измерений.

4.3 Экспериментальная оценка и экспресс-анализ кинематической точности и плавности работы планетарного редуктора

Проводилась оценка кинематической точности и плавности работы двухступенчатого планетарного редуктора (с передаточным отношением $u = 68$) с телами качения – шарами динамическим методом на стенде (см. рисунок 4.5). Передаточное число редуктора в каждой ступени равно восьми. Конструкция редуктора аналогична представленной на рисунке Б.1.

На рисунках 4.15 и 4.16 приведены график кинематической погрешности редуктора и спектр амплитуд кинематической погрешности, полученные при экспресс-анализе на стенде. На графике по вертикальной оси отложена кинематическая погрешность редуктора в радианах, по горизонтальной – углы поворота выходного вала за один его полный оборот в радианах.

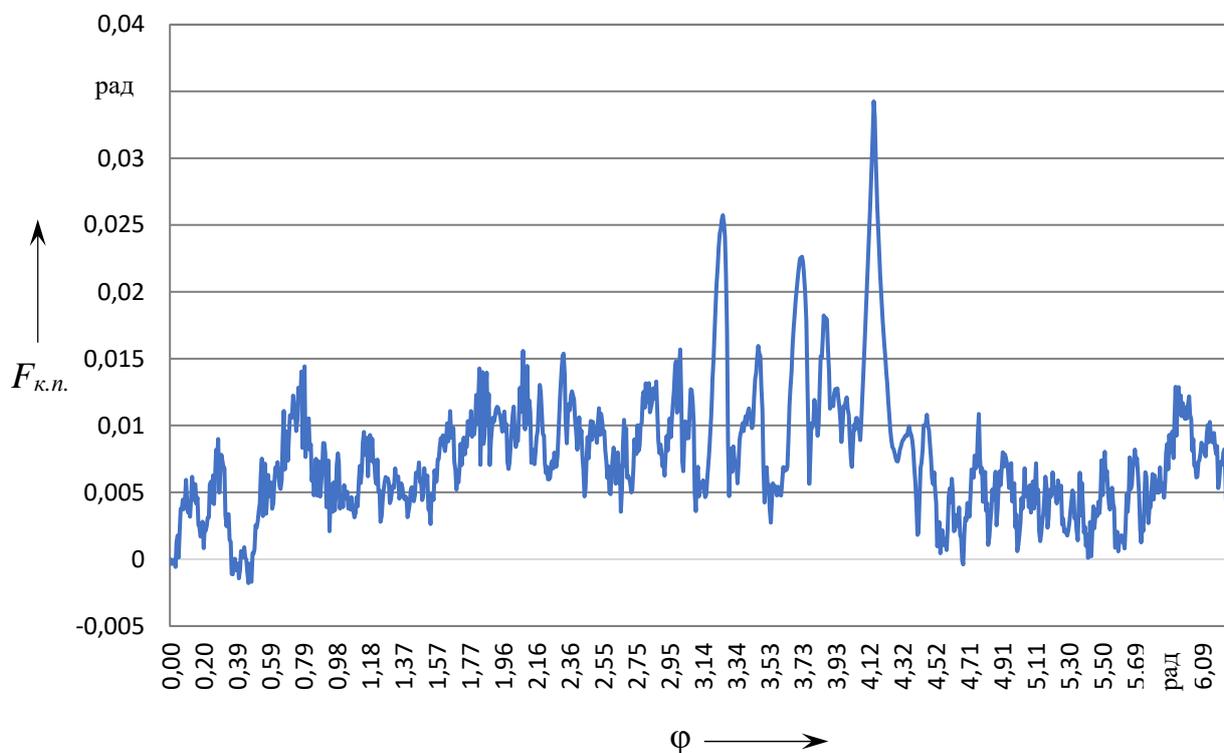


Рисунок 4.15 – График кинематической погрешности двухступенчатого планетарного редуктора

На рисунке 4.17 представлен спектр амплитуд кинематической погрешности двухступенчатого планетарного редуктора, где A – амплитуда гармоники в радианах, k – порядковый номер гармоники.

График на рисунке 4.15 имеет три пика, которые характеризуют возможные случайные сигналы при контроле и местные погрешности изготовления передачи. Отфильтровав их значения, получим наибольшую кинематическую погрешность редуктора за полный оборот выходного вала, равную 0,019 рад, или 1,13 град. Редуктор имеет две ступени, поэтому для одной ступени кинематическая погрешность составит 0,57 град.

В конструкцию двухступенчатого планетарного редуктора (см. рисунок В.1) входят два колеса с многопериодными дорожками, точность изготовления которых рассматривалась в подразделе 3.4. Дорожки колес имеют семь периодов ($z = 7$).

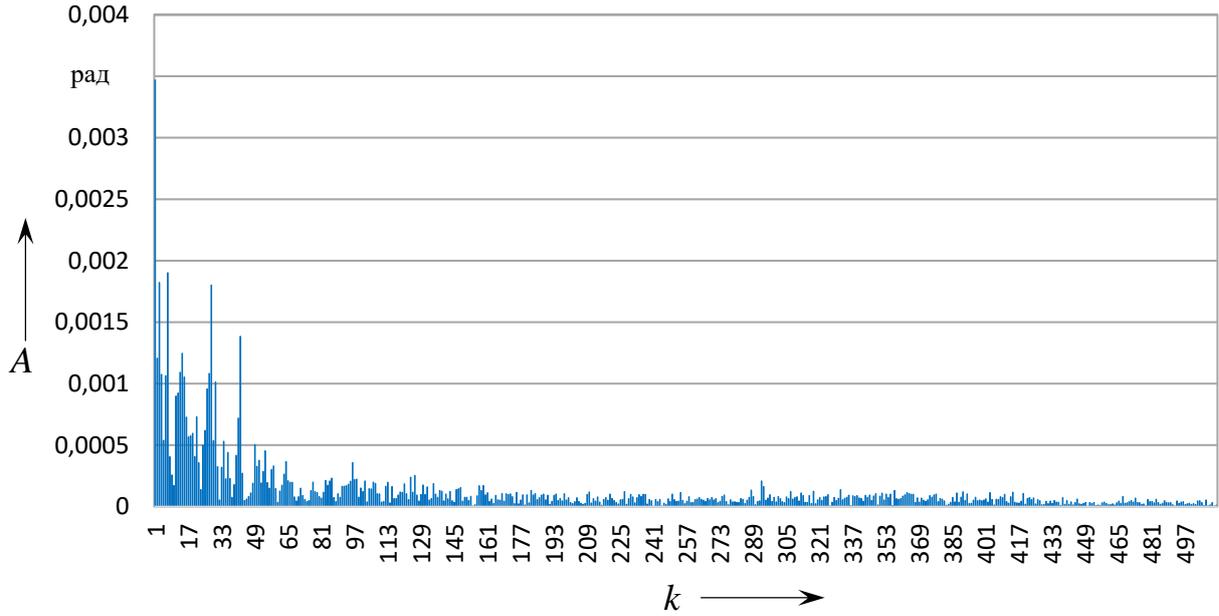


Рисунок 4.16 – Спектр амплитуд кинематической погрешности двухступенчатого планетарного редуктора

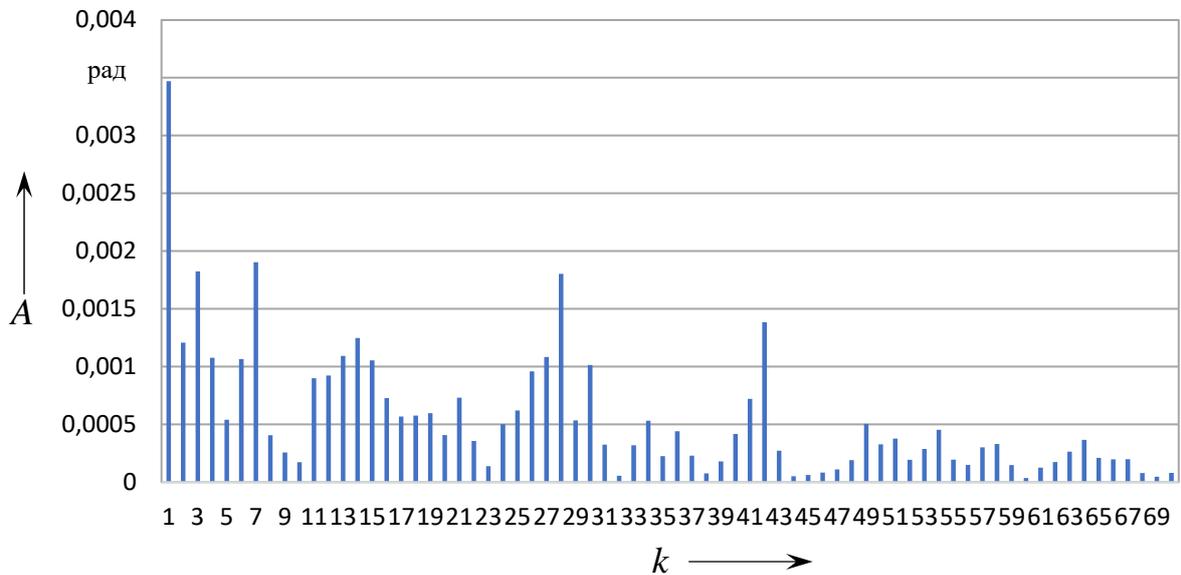


Рисунок 4.17 – Спектр амплитуд кинематической погрешности двухступенчатого планетарного редуктора, первые 70 гармоник

Проведен сравнительный анализ амплитудно-частотных спектров, полученных при исследовании кинематических погрешностей дорожки и редуктора. Абсолютная кинематическая погрешность профиля дорожки после измерения составила 2,34 град. Однако сателлиты передают нагрузку только

на некоторых площадках дорожки и имеют рабочий контакт с поверхностью только средней части полупериода (нет контакта с вершинами и впадинами) при работе передачи. Этот контакт сателлитов происходит на $1/3$ поверхности полупериода или $1/6$ поверхности периода и всей дорожки. Тогда значение абсолютной кинематической погрешности профиля дорожки будет в 6 раз меньше ее измеренного значения и равно $0,39$ град, что составляет 69 % от кинематической погрешности одной ступени редуктора. Погрешности колес с многопериодными дорожками могут несколько компенсироваться при сборке.

Сравнение амплитуд гармоник спектров на рисунках 3.29–3.31 и 4.17 показало, что при спектральном анализе кинематических характеристик профиля дорожки и кинематической погрешности передачи в спектре проявляются гармоники с одинаковыми номерами 1, 7, 14, 21, 28, 42, кратными числу периодов дорожки, значения амплитуд этих гармоник составляют в среднем 68 % от значений амплитуд гармоник в спектре кинематических погрешностей редуктора.

Таким образом, исследования показывают, что точность изготовления передачи с телами качения в большой степени зависит от точности изготовления деталей с многопериодными дорожками, входящими в эту передачу, и определяется законом распределения погрешностей при изготовлении и сборке этих деталей.

5 Разработка показателей точности и технологических допусков радиально-плунжерных передач с телами качения

5.1 Разработка показателей контроля точности деталей с многопериодными дорожками планетарных передач с телами качения

В разделах 3 и 4 разработаны дифференцированные и комплексные методы контроля и показатели точности изготовления наиболее ответственных деталей передач – деталей с многопериодными дорожками. Установлены кинематические и геометрические параметры точности этих деталей, описанные в подразделе 3.4:

- действительный радиус-вектор точки профиля дорожки, полученный расчетом измеренных координат X и Y (см. формулу (3.2));
- действительный угловой шаг профиля дорожки – разность соседних измеренных углов точек профиля дорожки (см. формулу (3.3));
- номинальный угловой шаг точек профиля дорожки, полученный расчетом (см. формулу (3.4));
- относительная кинематическая погрешность профиля дорожки – разность действительного и номинального угловых шагов точек профиля дорожки (см. формулу (3.5));
- относительная накопленная кинематическая погрешность профиля дорожки – разность действительного и номинального угловых шагов точек профиля дорожки с суммированием предыдущего значения (см. формулы (3.6) и (3.7));
- номинальный накопленный угловой шаг точек профиля дорожки, полученный суммированием номинального текущего и предыдущего угловых шагов точек профиля дорожки (см. формулу (3.8));
- абсолютная кинематическая погрешность профиля многопериодной дорожки – разность действительного (измеренного) угла положения и номинального накопленного углового шага точек профиля дорожки (см. формулы (3.9) и (3.10));
- геометрическая погрешность профиля дорожки – отклонение действительного профиля от номинального по нормали в плоскости, перпендикулярной оси колеса.

На основе кинематических и геометрических параметров установлены следующие показатели точности многопериодной дорожки:

- действительный угловой шаг профиля дорожки;
- относительная кинематическая погрешность профиля дорожки;
- относительная накопленная кинематическая погрешность профиля дорожки;

- абсолютная кинематическая погрешность профиля дорожки;
- геометрическая погрешность профиля дорожки.

Два первых показателя точности являются дифференцированными и характеризуют определенный параметр профиля дорожки. Три следующих параметра точности являются комплексными. Абсолютную кинематическую погрешность, относительную накопленную кинематическую погрешность и геометрическую погрешность профиля дорожки (комплексные параметры) можно разложить на радиальную и тангенциальную составляющие. Радиальная составляющая характеризует смещение профиля дорожки относительно оси колеса в радиальном направлении, тангенциальная – отклонение действительного профиля от номинального по нормали в плоскости, перпендикулярной оси колеса. Радиальную составляющую можно определить как $1/6$ удвоенной амплитуды первой гармоники, тангенциальную – как $1/6$ удвоенной амплитуды суммы наиболее значимых гармоник с номерами $z, 2z, 3z, 4z, 5z, 6z$, где z – число периодов дорожки.

Гармонический анализ позволил установить циклические погрешности профиля многопериодной дорожки. Это погрешности с номерами гармоник, кратными числу ее периодов. Величина этих погрешностей при гармоническом анализе может определяться с учетом коэффициентов, умноженных на значение удвоенной амплитуды гармоники с номером, равным числу периодов дорожки z .

5.2 Разработка допусков на изготовление деталей с многопериодными дорожками и рекомендации по выбору методов и средств контроля передач

В результате проведенных исследований, представленных в разделах 1–4, разработаны допуски на изготовление и для контроля точностных параметров наиболее ответственных деталей планетарных передач с телами качения торцового типа – колес и дисков с многопериодными дорожками. Показатели точности и допуски представлены в таблице 5.1.

Допуски получены в результате описанных методов исследований и расчета в предыдущих разделах.

Для циклических погрешностей установлены коэффициенты перехода к расчету гармоник более высокой частоты. Установлен допуск на значение гармоники с номером, равным числу периодов дорожки – z . Для гармоник с номерами $2z$ и $3z$ для расчета используются соответственно коэффициенты 0,54 и 0,12, полученные исследованиями соотношений гармоник спектров точности профиля дорожки и редуктора. При установлении допусков на циклические погрешности рассматривались только наиболее значимые гармоники в спектре амплитуд.

Таблица 5.1 – Допуски на показатели точности деталей с многопериодными дорожками планетарных передач с телами качения торцового типа

Показатель точности	Обозначение показателя	Значение показателя, град (мм)
1 Действительный угловой шаг профиля дорожки	$\Delta\varphi_{\partial}$	0,16
2 Относительная кинематическая погрешность профиля дорожки	$\Delta\varphi$	0,16
3 Относительная накопленная кинематическая погрешность профиля дорожки	$\Delta\varphi^{нак}$	0,39
4 Абсолютная кинематическая погрешность профиля дорожки	$\Delta\varphi_{абс}$	0,39
5 Геометрическая погрешность профиля дорожки	Δh	(0,29)
<i>Циклические погрешности</i>		
1-я гармоническая составляющая	$k = 1$	0,14
z – гармоническая составляющая	$k = z$	0,19
$2z$ – гармоническая составляющая	$k = 2z$	0,54 z
$3z$ – гармоническая составляющая	$k = 3z$	0,12 z

Допуски характеризуют точность деталей с многопериодными дорожками по нормам кинематической точности и плавности работы, соответствующей 8-й степени точности (средней точности) зубчатых передач. Точность изготовления колес с многопериодными дорожками выполнялась по 12-му качеству. Дорожка обрабатывалась однократным фрезерованием. Так как ее точность значительно влияет на кинематическую точность и плавность работы передачи, то повысить точность изготовления дорожки можно, применив чистовые и отделочные виды обработки, а также оптимизацию геометрической формы профиля. Как показали исследования, даже при обработке многопериодной дорожки со средней точностью кинематическая погрешность редуктора соответствует нормам 8-й степени точности зубчатых колес.

Для контроля (экспресс-анализа) дифференцированных и комплексных показателей точности деталей с многопериодными дорожками можно эффективно использовать методы с применением координатно-измерительной машины, что позволяет проводить быстрый контроль с высокой точностью, достоверностью и наглядностью полученных результатов.

Для контроля комплексных показателей точности передач и механизмов в сборе можно использовать статические и динамические методы контроля, описанные выше. Для быстрого контроля с наглядным результатом эффективно использовать установки с дискретным измерением, показанные в

подразделе 4.1. Такой контроль можно проводить для передач средней и повышенной точности, при этом в результате контроля кинематическая погрешность не должна превышать 0,32 град, иначе точность передачи будет ниже средней точности зубчатых передач.

Для полного комплексного контроля высокоточных механизмов эффективно использовать динамический метод контроля на стенде, описанный в подразделе 4.2, с гармоническим анализом выходного сигнала.

5.3 Разработка показателей кинематической точности и плавности работы планетарных радиально-плунжерных передач

В основе выбора показателей (параметров) кинематической точности приняты погрешности планетарной радиально-плунжерной передачи, которые вызывают неравномерность вращения однократно или многократно за полный оборот выходного вала по аналогии с зубчатыми передачами [50]. Для кинематической точности установлены следующие показатели.

Кинематическая погрешность передачи $F_{к.п.}$ является комплексным показателем кинематической точности передачи. Кинематическая погрешность передачи принимается как разность между действительным и номинальным углами поворота выходного вала за полный цикл вращения, который равен наименьшим целым числам полных оборотов входного и выходного валов. Она определяется по формуле

$$F_{к.п.} = \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_3, \quad (5.1)$$

где Φ_2 – действительный угол поворота выходного вала;
 Φ_3 – номинальный угол поворота выходного вала, равный

$$\Phi_3 = \Phi_1 / i, \quad (5.2)$$

где Φ_1 – угол поворота входного вала;
 i – передаточное отношение.

Как видно из формулы (5.2), полному обороту выходного вала всегда будет соответствовать целое число оборотов входного вала. Поэтому цикл вращения передачи равен полному обороту выходного вала.

Наибольшая кинематическая погрешность передачи $F_{к.п.}^{\max}$ – наибольшая разность значений кинематической погрешности (наибольший размах значений на графике). На этот показатель установлен допуск. Показатель $F_{к.п.}^{\max}$ рассчитывается по формуле

$$F_{к.п.}^{\max} = \Delta\Phi_{\max} - \Delta\Phi_{\min}, \quad (5.3)$$

где $\Delta\Phi_{\max}$ – значение наибольшей кинематической погрешности передачи за полный оборот выходного вала;

$\Delta\Phi_{\min}$ – значение наименьшей кинематической погрешности передачи за полный оборот выходного вала.

На рисунке 5.1 представлено графическое изображение наибольшей кинематической погрешности передачи.

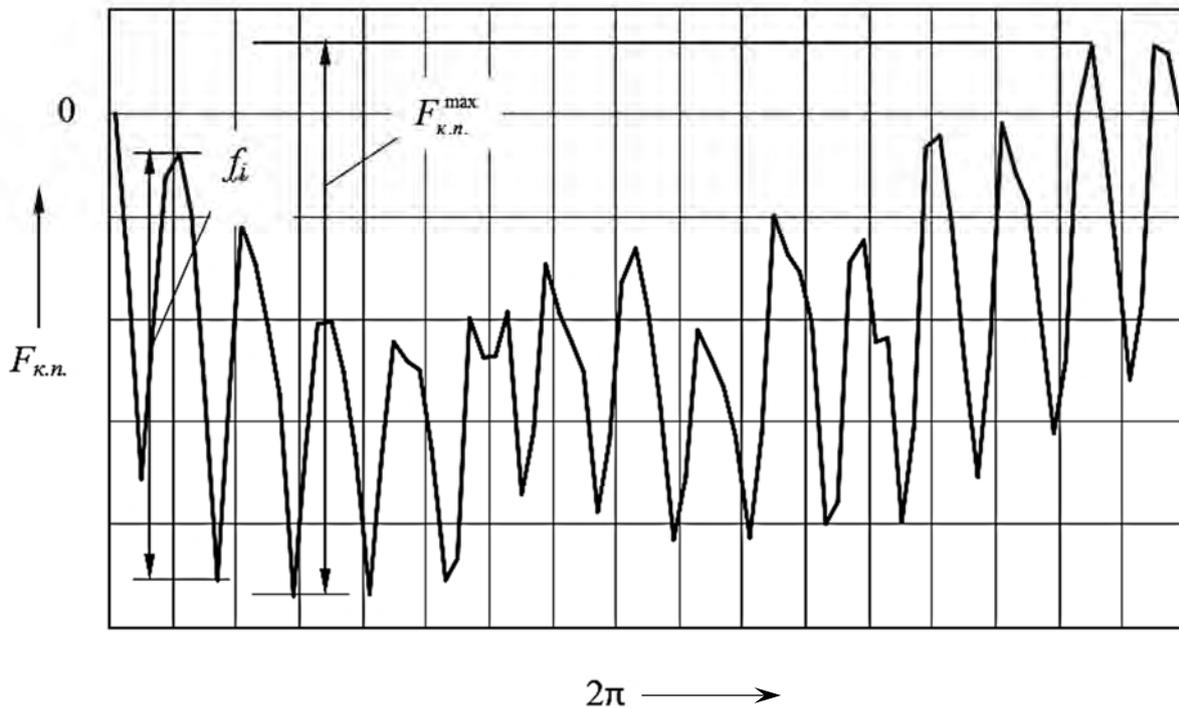


Рисунок 5.1 – Графическое изображение наибольшей кинематической погрешности передачи

В зависимости от методов и средств измерения кривые кинематической погрешности могут быть непрерывными и дискретными. Последние связаны с приборами, основанными на принципе измерения равномерных действительных углов поворота ведущего звена. При этом точность измерения наибольшей кинематической погрешности зависит от шага угла поворота ведущего звена. Очевидно, что наибольшая дискретная кинематическая погрешность передачи будет меньше непрерывной. К тому же при дискретном измерении кинематической погрешности не будут учитываться высокочастотные погрешности передачи.

Среднее значение кинематических погрешностей передачи $F_{к.п.}^{cp}$ – среднее значение кинематических погрешностей передачи, измеренных за полный

оборот выходного вала. На этот показатель установлен допуск. Показатель $F_{к.п.}^{cp}$ рассчитывается по формуле

$$F_{к.п.}^{cp} = \frac{\sum (F_i - F_j)}{N}, \quad (5.4)$$

где F_i – значения кинематической погрешности от нуля в плюс за полный оборот выходного вала;

F_j – значения кинематической погрешности от нуля в минус за полный оборот выходного вала;

N – число всех значений кинематической погрешности за полный оборот выходного вала.

На графиках кинематической погрешности передачи могут выделяться вершины, значительно превосходящие средние значения. Оценка наибольшей кинематической погрешности по этим вершинам дает завышенный результат. В этом случае целесообразно использовать также показатель средних значений кинематической погрешности передачи $F_{к.п.}^{cp}$.

Удвоенная амплитуда первой гармонической составляющей кинематической погрешности передачи $2A_1$. Разложение кинематической погрешности на гармонические составляющие дает спектр амплитуд. Амплитуда первой гармоники характеризует радиальные и тангенциальные погрешности неподвижного и ведомого звеньев (радиальное смещение выходного вала и колеса с многопериодной дорожкой, погрешности изготовления профиля дорожки в направлении углового шага). Значение удвоенной амплитуды первой гармоники оказывает большое влияние на кинематическую точность передачи, на нее установлен допуск. Она определяется по формуле

$$2C_k = \frac{4}{n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n F_i \cos(k\varphi) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n F_i \sin(k\varphi) \right]^2}, \quad (5.5)$$

где C_k – амплитуда k -й гармоники;

n – число значений кинематической погрешности;

F_i – значения кинематической погрешности;

k – номер гармонической составляющей в спектре, $k = 1$;

φ – угол поворота.

Амплитуды гармоник второй и более высокой частоты характеризуют циклические погрешности, наибольшие из которых влияют на плавность работы передачи.

Местная кинематическая погрешность передачи f_i определяется как разность между местными экстремальными значениями кинематической погрешности (см. рисунок 5.1):

$$f_i = f_{\max i} - f_{\min i}, \quad (5.6)$$

где $f_{\max i}$ – наибольшее местное значение кинематической погрешности;

$f_{\min i}$ – наименьшее местное значение кинематической погрешности.

Местные кинематические погрешности можно определять как удвоенные амплитуды гармонических составляющих в спектре с номерами, равными числу периодов дорожки или передаточному отношению либо кратными им.

Наибольшая местная кинематическая погрешность передачи f_i^{\max} рассчитывается как наибольшая разность между местными экстремальными значениями кинематической погрешности:

$$f_i^{\max} = f_{\max} - f_{\min}, \quad (5.7)$$

где f_{\max} – наибольшее значение из всех местных кинематических погрешностей за полный оборот выходного вала;

f_{\min} – наименьшее значение из всех местных кинематических погрешностей за полный оборот выходного вала.

На показатель f_i^{\max} установлен допуск. Его можно определять по формуле (5.5) при k , равном числу периодов дорожки или передаточному отношению либо кратном им. Амплитуда гармоники в спектре при этом должна быть наибольшей.

Среднее значение местных кинематических погрешностей передачи $f_{i\text{cp}}$ определяется как среднее арифметическое всех местных экстремальных значений кинематической погрешности за полный оборот выходного вала. Она рассчитывается по формуле

$$f_{i\text{cp}} = \frac{\sum f_i}{n}, \quad (5.8)$$

где n – число местных кинематических погрешностей за полный оборот выходного вала.

Показатель $f_{i\text{cp}}$ можно определять как наибольшую амплитуду гармоники с номером больше числа периодов дорожки.

Как показывают эксперименты, местные кинематические погрешности передачи в амплитудно-частотном спектре характеризуются высоко-частотными гармониками. Если передача не имеет дисбаланса,

то высокочастотные гармоники проявляются незначительно и в большей степени выражены гармоники средней частоты, равной значениям передаточного отношения и числу периодов дорожки.

Циклические погрешности f_k . Это местные кинематические погрешности передачи, которые многократно повторяются за полный оборот выходного вала. Их можно определять как удвоенную амплитуду наиболее значимых гармонических составляющих с номерами больше единицы ($k > 1$). В амплитудно-частотном спектре кинематической погрешности радиально-плунжерной передачи выделяются гармоники, кратные передаточному отношению и числу периодов дорожки. На наиболее значимые циклические погрешности установлены допуски.

Основным комплексным показателем, характеризующим величину контакта сателлитов в зацеплении, является показатель числа сателлитов, передающих вращение. Чем больше сателлитов находится одновременно в зацеплении и передает вращающий момент, тем больше их суммарная площадь контакта и меньше контактные напряжения на каждый сателлит. Этот показатель зависит от точности изготовления элементов зацепления: многопериодных дорожек, сепараторов-водил, а также от величины зазоров между сателлитами и прорезями сепаратора в клиновой щели.

Минимальный зазор для планетарных шариковых передач определяется по формуле

$$j_{\min}^{\text{ш}} = j_{1\text{ш}} + j_{2\text{ш}}, \quad (5.9)$$

где $j_{1\text{ш}}$ – величина зазора, соответствующая температурной компенсации;

$j_{2\text{ш}}$ – величина зазора, обеспечивающая нормальные условия смазки.

Значения $j_{1\text{ш}}$ и $j_{2\text{ш}}$ определяются в соответствии с [36–38].

Температурные деформации рассчитываются только для сателлитов, т. к. для многопериодной и однопериодной дорожек, а также для прорезей сепараторов температурные деформации не уменьшают рабочие щели зацепления.

Минимальные зазоры обеспечиваются допусками на изготовление деталей зацепления. Как показали исследования, для планетарных радиально-плунжерных передач зазоры не должны превышать 0,05 мм, иначе в зацеплении участвует малое количество сателлитов, ухудшаются плавность вращения и нагрузочная способность механизма. Такая точность предполагает соответствующее изготовление деталей, наиболее ответственной из которых является колесо с многопериодной дорожкой. Технология изготовления дорожки должна предусматривать точные и отделочные виды обработки для получения небольших зазоров при сборке. Получение зазора в

зацеплении, равного 0,05 мм, не представляет больших технологических трудностей и обеспечивается стандартными средствами и методами обработки и сборки деталей передачи.

Для обеспечения зазора в зацеплении компенсирующим звеном является прорезь (диаметр отверстия) сепаратора-водила, которую необходимо увеличить на величину погрешностей изготовления деталей зацепления передачи и минимального зазора при сборке.

5.4 Разработка допусков на показатели кинематической точности и плавности работы планетарных радиально-плунжерных передач

Для разработанных комплексных показателей кинематической точности и плавности работы планетарных радиально-плунжерных передач (редукторов) установлены допуски на изготовление, предполагающие методы оценки точности, описанные выше. Допуски заданы в абсолютных (угловых) единицах и поэтому могут быть использованы для изготовления передач с различными геометрическими параметрами: передаточными отношениями от 5 до 30 в одной ступени, для одно- и двухступенчатых редукторов. Допуски приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Допуски на показатели точности планетарных радиально-плунжерных передач

Показатель точности	Обозначение показателя	Значение показателя, град (угл. мин)
1 Наибольшая кинематическая погрешность передачи	$F_{к.п.}^{\max}$	0,57 (34)
2 Среднее значение кинематических погрешностей передачи	$F_{к.п.}^{cp}$	0,29 (17)
3 Удвоенная амплитуда первой гармонической составляющей кинематической погрешности передачи	$2A_1$	0,16 (10)
4 Наибольшая местная кинематическая погрешность передачи	f_i^{\max}	0,13 (8)
5 Среднее значение местных кинематических погрешностей передачи	f_{icp}	0,07 (4)
6 Циклическая погрешность	f_2	0,12 (7)
7 Циклическая погрешность	f_3	0,11 (7)

Окончание таблицы 5.2

Показатель точности	Обозначение показателя	Значение показателя, град (угл. мин)
8 Циклическая погрешность	f_{12}	0,13 (8)
9 Циклическая погрешность	F_{28}	0,11 (7)
10 Зазор в зацеплении, мкм	j	50

Допуски обеспечивают точность передачи (редуктора), соответствующую 8-й (средней) точности зубчатых колес.

6 Система нормирования погрешностей изготовления для оценки точности планетарных роликовых передач

6.1 Особенности нормирования точности планетарных роликовых передач

Планетарные малогабаритные передачи торцового типа с телами качения (сателлитами) роликами имеют линейный контакт в зацеплении в отличие от точечного контакта в шариковых передачах. Роликовые передачи имеют большую нагрузочную способность, что позволяет передавать значительные моменты сил и использовать эти передачи как силовые. В планетарных роликовых передачах упругие деформации звеньев меньше, чем в передачах с шариковым зацеплением, что повышает их надежность и кинематическую точность. Однако сателлиты-ролики не могут самоустанавливаться после сборки при работе и тем самым компенсировать частично погрешности изготовления, как сателлиты-шары. Поэтому планетарные роликовые передачи требуют более высокой точности изготовления.

Проводились широкие исследования точностных параметров роликовых передач, представленные в [14, 48, 49] и подразделе 4.2, на основе которых для них разработана система нормирования точности.

По аналогии с зубчатыми передачами для планетарных роликовых передач можно принять 12 степеней точности. Однако реально для роликовых передач можно получить не более семи степеней точности. Это связано с тем, что получение большего числа степеней (наиболее высоких степеней) ограничивается самой конструкцией этих передач, т. е. невозможностью регулирования зазоров в зацеплении, оказывающих значительное влияние на точность передачи.

Таким образом, для планетарных роликовых передач мы приняли семь степеней точности с 6-й по 12-ю. При этом, как и для зубчатых передач, меньшему номеру соответствует более высокая точность.

С учетом геометрии и кинематики рассматриваемых передач для них так же, как и для зубчатых, приняты нормы кинематической точности, плавности работы, контакта роликов и зазоров в зацеплении. Для норм точности представлены установленные показатели точности, которые характеризуют наиболее значительные погрешности передачи и деталей зацепления.

При нормировании показателей точности для деталей с многопериодными дорожками были приняты следующие исходные погрешности, через которые установлены остальные: *погрешность обработки многопериодной дорожки и радиальное смещение средней окружности диска с многопериодной дорожкой относительно ее оси.*

В отличие от зубчатой, в зацеплении планетарной роликовой передачи находятся детали разной геометрической сложности. Наряду со сложными деталями (диски с многопериодными дорожками), на которые назначены показатели точности, аналогичные зубчатым передачам, назначены и показатели точности на детали относительно простой геометрической формы (ролики, кольца, диски-сепараторы). На последние установлены допуски размеров и допуски формы и расположения поверхностей в соответствии с существующими требованиями по точности к таким деталям.

При нормировании показателей точности для роликовой передачи и ее деталей была выбрана базовая – 8-я – степень точности, для обеспечения которой предусматривается обработка деталей с многопериодными дорожками и дисков-сепараторов фрезерованием без шлифования дорожек и пазов, т. к. их шлифование является трудоемкой операцией и в настоящее время мало используется.

Для зубчатых двух-, трехступенчатых передач (у которых передаточные отношения можно сопоставить с передаточными отношениями планетарных роликовых одноступенчатых передач) допуски на кинематическую погрешность передачи в сборе с подшипниками, валами и корпусом в зависимости от ее геометрии составляют для 8-й степени точности около $20'$. Исследования показали, что для планетарных роликовых передач с нешлифованными многопериодными дорожками можно получить те же допуски на кинематическую погрешность передачи, что и для зубчатых 8-й степени точности.

На основании вышеизложенного допуски на детали планетарной роликовой передачи назначались исходя из следующих условий: установления допуска на кинематическую погрешность роликовой передачи в пределах $17' \dots 22'$, который рассматривается как замыкающее звено технологической цепи, состоящей из нормируемых погрешностей деталей передачи; обеспечения минимальных зазоров в зацеплении; технологического обеспечения точности передачи при ее изготовлении.

При этом допуски устанавливались для передачи со следующими геометрическими параметрами: передаточное отношение $u = 14$; число периодов многопериодной дорожки $z_2 = 13$; радиус средней окружности $R = 60$ мм; амплитуда $A = 10$ мм. На основе нормированных параметров по базовой степени точности можно провести расчет допусков параметров по всем нормам и для других степеней.

При нормировании кинематической погрешности передачи и максимального зазора в связи с особенностями кинематики планетарных роликовых передач учитывались погрешности не только деталей зацепления, но и других деталей передачи – валов, подшипников, фланцев и корпуса. Для этого разработана методика расчета кинематической погрешности передачи, которая предусматривает независимое влияние на кинематиче-

скую погрешность нормируемых показателей точности и погрешностей других деталей.

Так как зазоры в этих передачах не регулируются при сборке, то необходимо нормировать максимальный и минимальный зазоры, учитывающие как погрешности изготовления, так и погрешности сборки деталей передачи, а также увеличение размеров роликов и других деталей зацепления при их нагреве в процессе работы.

Нормирование максимального зазора предусматривает компенсацию погрешностей деталей редуктора за счет увеличения ширины пазов (прорезей) дисков-сепараторов. Нормирование минимального зазора связано с учетом температурного расширения деталей зацепления и обеспечением необходимой толщины масляной пленки.

При нормировании планетарных роликовых передач были приняты определенные соотношения между допусками в разных степенях точности. Для перехода к другим степеням точности приняты коэффициенты из ряда R20 предпочтительных чисел 1,6; 1,40 и 1,25. Коэффициент 1,6 принят для показателей и деталей зацепления, на которые установлены квалитеты точности и допуски формы и расположения поверхностей. Однако на диаметры роликов не рекомендуется устанавливать допуск грубее 8-го квалитета, т. к. колебание диаметров роликов значительно влияет на их величину контакта и плавность работы передачи.

При переходе к другим степеням точности для показателей, характеризующих погрешности деталей с многопериодными дорожками (погрешность станка, накопленная погрешность и погрешность шага многопериодной дорожки, а также погрешность профиля дорожки), назначены коэффициенты по тому же принципу, что и для зубчатых колес: при переходе к более грубым степеням точности коэффициент уменьшается. Так, при переходе от 6-й к 8-й степени принят коэффициент 1,6, от 8-й к 10-й – коэффициент 1,40 и от 10-й к 12-й – коэффициент 1,25. Это связано с технологически оправданными соотношениями между допусками разных степеней точности для деталей с многопериодными дорожками. Так, если принять коэффициент 1,6 для перехода к каждой степени точности, то для 12-й степени точности погрешность шага, например, будет значительно превышать действительный допуск, полученный при обработке дорожки для данной степени точности. В связи с этим приняты указанные выше коэффициенты. С учетом того, что погрешности деталей с многопериодными дорожками составляют 70 %...80 % кинематической погрешности передачи, для кинематической погрешности передачи при переходе к другим степеням точности можно использовать эти же коэффициенты.

6.2 Установление показателей точности для норм кинематической точности и плавности работы планетарных роликовых передач

В основе выбора показателей (параметров) точности для норм кинематической точности приняты те погрешности планетарной роликовой передачи, которые вызывают неравномерность вращения за полный оборот выходного вала, а для норм плавности работы – погрешности планетарной роликовой передачи, которые также влияют на кинематическую точность, но проявляются многократно за один оборот выходного вала.

Комплексным показателем кинематической точности планетарной роликовой передачи принята *кинематическая погрешность передачи* $F_{к.п.}$

Кинематическая погрешность передачи принимается как разность между действительным и номинальным углами поворота выходного вала передачи за полный цикл вращения, который равен наименьшим целым числам полных оборотов входного и выходного валов:

$$F_{к.п.} = \varphi_2 - \varphi_3, \quad (6.1)$$

где φ_2 – действительный угол поворота выходного вала;
 φ_3 – номинальный угол поворота выходного вала, равный

$$\varphi_3 = \varphi_1 / (1 + z_2), \quad (6.2)$$

где φ_1 – угол поворота входного вала;
 z_2 – число периодов неподвижной дорожки.

Как видно из формулы (6.2), полному обороту выходного вала всегда будет соответствовать целое число оборотов входного вала. Поэтому цикл вращения передачи равен полному обороту выходного вала.

На рисунке 5.1 показана *наибольшая кинематическая погрешность передачи* $F_{io} = F_{к.п.}^{\max}$ как наибольшая разность значений кинематической погрешности передачи за один оборот выходного вала.

В зависимости от методов и средств измерения кривые кинематической погрешности могут быть непрерывными и дискретными. Последние связаны с приборами, основанными на принципе измерения равномерных действительных углов поворота ведущего звена. При этом точность измерения наибольшей кинематической погрешности зависит от шага угла поворота ведущего звена. Очевидно, что наибольшая дискретная кинематическая погрешность передачи будет меньше непрерывной. К тому же при дискретном измерении кинематической погрешности не будут учитываться высокочастотные погрешности передачи.

Разложение кинематической погрешности на гармонические составляющие дает спектр амплитуд. Амплитуда первой гармоники характеризует радиальные и тангенциальные погрешности ведомого звена. Наибольшие из них принимаются исходными погрешностями при нормировании показателей кинематической точности планетарной роликковой передачи.

Амплитуды гармоник второй и более высокой частоты характеризуют циклические погрешности, наибольшие из которых приняты исходными погрешностями при нормировании плавности работы передачи.

Для норм кинематической точности установлены показатели, характеризующие радиальные и тангенциальные погрешности ведомого звена: *накопленная погрешность шага деталей с многопериодными дорожками* F_p , *смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали* F_r , *погрешность обработки многопериодной дорожки* F_c .

Накопленная погрешность шага деталей с многопериодными дорожками F_p – разность между действительным и номинальным накопленными шагами деталей с многопериодными дорожками за их полный оборот:

$$F_p = (p_{2n} - np_3) / R, \quad (6.3)$$

где p_{2n} – действительный накопленный шаг;

p_3 – номинальный шаг;

R – радиус средней окружности;

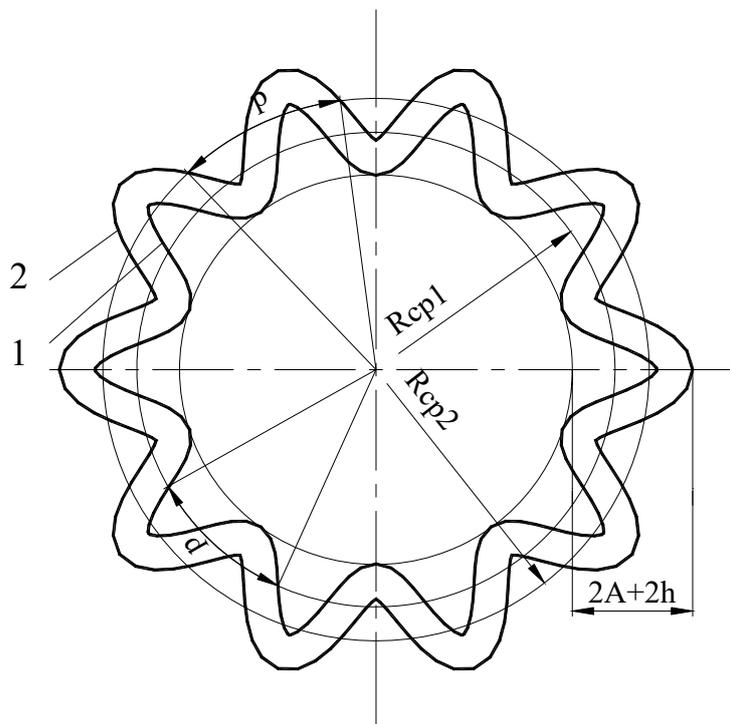
n – номер шага.

Шаг многопериодной дорожки p – расстояние между одноименными внешними или внутренними поверхностями дорожки, измеренное по окружностям любого радиуса в пределах размаха кривой, равного $2A + 2h$, где A – амплитуда многопериодной кривой; h – расстояние по нормали между многопериодной кривой и верхней или нижней эквидистантами (половина ширины канавки). Таким образом, шаг может измеряться как по внешней, так и по внутренней поверхности дорожки на различных ее участках. При этом отдельно рассматривается шаг дорожки по двум средним окружностям (для внешней и внутренней поверхностей) как параметр, наиболее удобный при нормировании погрешностей деталей с многопериодными дорожками.

Номинальный шаг дорожки

$$p_3 = 2 \pi R / z_2. \quad (6.4)$$

Схема нормирования шага многопериодной дорожки представлена на рисунке 6.1.



1 – внутренняя поверхность; 2 – внешняя поверхность; R_{cp1} – радиус средней окружности для внутренней поверхности; R_{cp2} – радиус средней окружности для внешней поверхности

Рисунок 6.1 – Схема нормирования шага многопериодной дорожки

Наибольшее значение накопленной погрешности шага F_{pmax} определяется как наибольшая разность значений F_p (рисунок 6.2).

Накопленная погрешность шага включает как радиальные, так и тангенциальные погрешности деталей с многопериодными дорожками. Вследствие этого накопленная погрешность учитывает погрешность установки детали на станке при обработке дорожки, погрешности станка, а также погрешность формы базового отверстия детали. В то же время погрешность обработки многопериодной дорожки F_c характеризует только тангенциальную составляющую, связанную непосредственно с неточностями станка, на котором производится фрезерование многопериодной канавки, и режущего инструмента. Эту погрешность можно определить, исключив из первой гармоники кинематической погрешности передачи величину амплитуды, связанной с погрешностью установки детали.

Смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали F_r – расстояние между осью вращения

детали с многопериодной дорожкой и осью средней окружности многопериодной дорожки на участке, равном ширине детали.

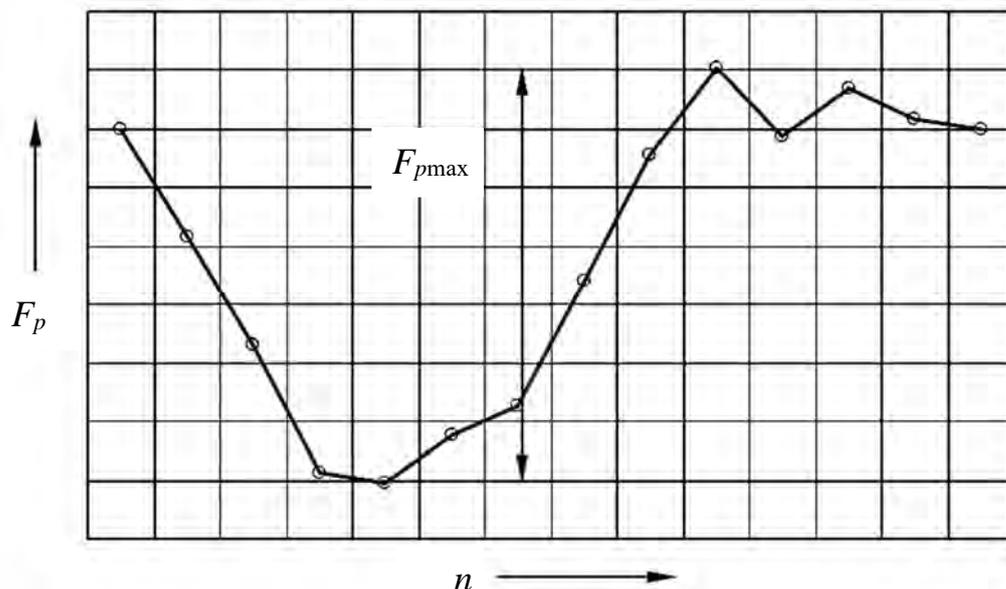


Рисунок 6.2 – Наибольшее значение накопленной погрешности шага

Установление показателей для норм плавности работы передачи связано с циклическими погрешностями, т. е. погрешностями, которые многократно повторяются за оборот выходного вала передачи.

Местная кинематическая погрешность передачи f_i определяется как наибольшая разность между местными экстремальными значениями кинематической погрешности (см. рисунок 5.1).

Среднее значение местных кинематических погрешностей передачи f_{icp} определяется как среднее арифметическое всех местных экстремальных значений кинематической погрешности за полный оборот выходного вала.

Как показывают эксперименты, среднее значение местных кинематических погрешностей передачи связано с высокочастотными погрешностями. Этот показатель можно определить по величине амплитуд высокочастотных гармоник. Если передача не имеет дисбаланса, то высокочастотные гармоники проявляются незначительно и в большей степени выражены гармоники средней частоты, равной значениям передаточного отношения и числу периодов дорожки. Так, при измерениях в статике среднюю местную кинематическую погрешность можно определять по амплитуде гармоники с периодом $2\pi/(z_1 + z_2)$. На графиках кинематической погрешности (см. рисунок 4.7) выделяется 14 периодов, каждый из которых соответствует одному обороту ведущего звена (так как передаточное отношение редуктора $u = 14$). Таким образом, среднее значение местных

кинематических погрешностей при измерениях в статике можно рассматривать как циклическую погрешность с периодом $2\pi/(z_1 + z_2)$.

Местная кинематическая погрешность f_i , как следует из ее определения, больше среднего значения f_{icp} местной кинематической погрешности.

Радиальные погрешности ведущего звена связаны с погрешностью эксцентриситета эксцентрика, установленного на ведущем валу, погрешностями радиусов ведущих колец, погрешностями диаметров роликов, погрешностью ширины канавки. Поэтому установлены следующие нормируемые параметры: *погрешность эксцентриситета ведущего звена* f_e , *погрешность радиусов рабочих поверхностей однопериодной дорожки* f_{rad} , *погрешность диаметров роликов* f_d , *погрешность ширины многопериодной дорожки* f_h .

Эти погрешности отражают неточности размеров рабочих поверхностей деталей зацепления простой геометрической формы и не требуют специальной формулировки.

На основные тангенциальные погрешности ведущего звена установлены следующие показатели.

Погрешность шага деталей с многопериодными дорожками f_p – наибольшее отклонение действительного шага от номинального:

$$f_p = (p_2 - 2\pi n / z_2)R, \quad (6.5)$$

где p_2 – действительный шаг дорожки.

Многопериодная дорожка представляет собой периодическую канавку синусоидального или другого типа, замкнутую на плоскости. При ее изготовлении высокочастотные погрешности станков, на которых производится обработка дорожек, передаются на обрабатываемый диск, в результате чего появляется волнистость рабочего профиля дорожки.

Погрешность профиля дорожки f_f – наибольшая разность отклонений действительного профиля дорожки от номинального, измеренных по нормали к номинальному профилю (рисунок 6.3):

$$f_f = \Delta f_1 - (-\Delta f_2). \quad (6.6)$$

Погрешность профиля можно измерять как разность шагов p многопериодной дорожки в пределах каждого периода на нескольких окружностях различного радиуса, центр которых совпадает с осью диска. При этом наибольшая погрешность профиля определяется как наибольшая разность шагов по всему диску.



Рисунок 6.3 – Схема для нормирования погрешности профиля диска с многопериодной дорожкой

6.3 Установление показателей точности для норм контакта и бокового зазора между роликами и другими деталями зацепления

Для норм контакта роликов установлены следующие показатели: *отклонение от радиального расположения пазов дисков-сепараторов в передаче f_{rs} , торцовое биение дисков-сепараторов f_t , отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали f_n .*

Основным комплексным показателем, характеризующим величину контакта роликов в зацеплении, является *отклонение от радиального расположения пазов дисков-сепараторов в передаче f_{rs} .* Этот показатель характеризует погрешности расположения пазов двух симметрично расположенных дисков-сепараторов в собранной передаче. При этом под точным расположением пазов подразумевается такое их расположение, при котором пазы обоих дисков-сепараторов будут точно совпадать, если их наложить один на другой.

Несимметричное расположение пазов в сепараторах приводит к перекосу роликов, уменьшению их площади контакта с пазами и рабочими поверхностями многопериодной дорожки, а также неравномерному износу всех деталей зацепления.

Чтобы обеспечить точное расположение пазов обоих сепараторов, необходимо учесть следующие погрешности этих дисков: отклонение от симметричности пазов каждого из дисков, относительное смещение осей отверстий под штифты дисков-сепараторов для их соединения, погрешность расположения отверстий под штифты дисков-сепараторов относительно оси симметрии паза.

Торцовое биение дисков-сепараторов f_t также характеризует величину контакта роликов и зазоры в передаче. Оно предусматривает наибольшее значение в пределах всей торцовой поверхности сепаратора.

Отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали f_n характеризует площадь контакта роликов с рабочими поверхностями многопериодной дорожки в передаче в сборе.

Кроме установленных выше показателей точности, на величины сопрягаемых поверхностей роликов с деталями зацепления передачи будут влиять погрешности, нормируемые по нормам плавности и нормам бокового зазора. Эти погрешности связаны между собой. Погрешности, уменьшающие величину контакта роликов, приводят к понижению плавности работы и увеличению зазоров в передаче.

При установлении параметров на минимальный боковой зазор между роликами и деталями зацепления рассматривались следующие зазоры в передаче: зазор между роликами и рабочими поверхностями многопериодной дорожки, зазор между роликами и ведущими кольцами однопериодной дорожки, зазор между роликами и поверхностями прорезей диска-сепаратора.

Между деталями зацепления установлены минимальные боковые зазоры. Каждый минимальный боковой зазор определяется по формуле

$$j = j_1 + j_2, \quad (6.7)$$

где j_1 – боковой зазор от температурных деформаций;

j_2 – боковой зазор для размещения смазки.

Значения j_1 и j_2 рассчитываются в соответствии с [36–38]. Температурные деформации определяются только для роликов, т. к. для многопериодной и однопериодной дорожек, а также для прорезей дисков-сепараторов температурные деформации не уменьшают рабочие щели зацепления.

Так как температурная деформация рассчитывается только для роликов, то величина минимального зазора между роликами и рабочими поверхностями многопериодной дорожки, роликами и ведущими кольцами однопериодной дорожки, роликами и поверхностями прорезей диска-сепаратора будет одинаковой и равной величине минимального зазора между роликами и деталями зацепления в сборе. При этом величина j_2 определяется по [36–38], а зазор от температурной деформации роликов – по формуле [36]

$$j_1 = 2R\alpha_1\Delta t_1, \quad (6.8)$$

где R – радиус ролика;

α_1 – коэффициент линейного расширения для материала диска с многопериодной дорожкой;

Δt_1 – отклонение температуры диска от 20°C , т. е. $\Delta t_1 = t_1^\circ - 20^\circ$ (где t_1° – наибольшая температура диска).

Минимальные зазоры между роликами и каждым звеном зацепления в отдельности $j_{\min.i}$ обеспечиваются допусками на детали зацепления при нормировании по нормам плавности. Также установлены такие показатели, как *минимальный зазор в собранной передаче* j_{\min} , который необходимо контролировать в передаче в сборе, и *максимальный зазор* j_{\max} , который учитывает погрешности изготовления и сборки деталей передачи, входящих в размерную цепь при расчете максимального зазора.

Для обеспечения максимального зазора компенсирующим звеном принята ширина прорезей дисков-сепараторов, которую необходимо увеличить на величину погрешностей составляющих звеньев передачи при ее сборке. Увеличение размеров прорезей дисков-сепараторов дает меньшие кинематические погрешности передачи, чем изменение размеров других деталей, если их использовать как компенсирующее звено.

6.4 Нормирование показателей точности для деталей роликового зацепления по базовой степени точности

6.4.1 Кинематическая точность.

Для норм кинематической точности нормируются следующие показатели: *смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали* F_r , *погрешность обработки многопериодной дорожки* F_c , *накопленная погрешность шага деталей с многопериодными дорожками* F_p , *наибольшая кинематическая погрешность деталей с многопериодными дорожками* F_i .

Погрешность F_r возникает из-за неточности установки детали (диска) на станке при фрезеровании дорожки, коробления диска после термообработки, погрешности установки при шлифовании центрального отверстия диска и погрешности формы центрального отверстия, которая также приводит к смещению оси диска в работе передачи и при контроле.

Допуск на погрешность F_r назначен исходя из установления заданной кинематической погрешности передачи, а также исходя из обеспечения точности изготовления многопериодной дорожки, $F_r = 25$ мкм.

Погрешность F_c характеризует кинематические погрешности фрезерных станков, на которых производится обработка периодических дорожек, и погрешности режущего инструмента – шпоночной или концевой фрезы. Погрешность F_c измеряется так же, как и накопленная погрешность шага

многопериодной дорожки, но от технологической оси. Под технологической осью понимается ось, относительно которой происходит окончательная обработка многопериодной дорожки. Поэтому погрешность F_c не включает радиальную погрешность F_r , связанную с погрешностью установки диска на станке, которая входит в накопленную погрешность шага.

Как отмечалось выше, погрешность обработки многопериодной дорожки F_c является составляющей накопленной погрешности шага дорожки. При этом не учитывается часть величины амплитуды первой гармоники спектра накопленной погрешности, которая является следствием суммарной погрешности установки диска на станках при обработке дорожки.

Экспериментальные результаты проведенных измерений накопленной погрешности дисков с разным числом периодов с последующей фильтрацией на ЭВМ первой гармоники показывают, что погрешность обработки многопериодной дорожки F_c составляет $7' \dots 10'$ как для внешней, так и для внутренней поверхности дорожки.

При нормировании погрешности F_c на основе экспериментальных результатов, а также для установления заданной точности кинематической погрешности передачи в пределах допусков 8-й степени точности для зубчатых передач принята погрешность $F_c = 8'$. Это значение подтверждено расчетом точности обработки (приложение Г).

Накопленная погрешность шага F_p включает погрешность обработки F_c и смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси диска F_r .

Перевод нормированной погрешности, выраженной в линейных величинах, $F_r = 25$ мкм в угловые величины осуществлен графически, моделированием этой погрешности с помощью программы AutoCAD. При этом погрешность составила для нормируемой передачи $F_r = \varphi_r = 1,8'$. Погрешность φ_r при графическом моделировании была отнесена к радиусу средней окружности внутренней поверхности многопериодной дорожки, т. к. для внутренней поверхности эта погрешность больше в угловых единицах, чем для внешней.

Так как направление погрешностей F_r и F_c неизвестно, принимаем накопленную погрешность шага F_p как геометрическую сумму погрешностей F_r и F_c :

$$F_p = \sqrt{F_r^2 + F_c^2}, \quad (6.9)$$

тогда

$$F_p = \sqrt{1,8^2 + 8^2} = 8,2'.$$

Кинематическая погрешность диска с многопериодной дорожкой F_i представляет собой геометрическую сумму накопленных погрешностей шага внешней и внутренней поверхностей дорожки F_p , представляющих низко-частотный спектр кинематической погрешности передачи, и погрешностей профиля этих поверхностей дорожки в торцовом сечении диска f_f , характеризующих погрешности более высокой частоты. Кинематическая погрешность одной из нормируемых поверхностей дорожки будет равна

$$F_i' = F_p + f_f = 8,2 + 2,1 = 10,3'. \quad (6.10)$$

Погрешность f_f нормируется по нормам плавности.

Кинематическая погрешность диска F_i включает погрешности двух рабочих поверхностей дорожек. Как показали экспериментальные исследования и анализ накопленной погрешности шага, кинематическая погрешность F_i примерно в 1,2 раза больше накопленной погрешности одной из поверхностей многопериодной дорожки. Следовательно,

$$F_i = 1,2 \cdot 10,3 = 12,4'.$$

6.4.2 Плавность работы.

Для норм плавности работы нормируются следующие показатели: погрешность профиля многопериодной дорожки в торцовом сечении детали f_f , погрешность шага деталей с многопериодными дорожками f_p , погрешность эксцентриситета ведущего звена f_e , погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку f_{rad} , погрешность ширины многопериодной дорожки f_h , погрешность диаметров роликов f_d .

Погрешность профиля многопериодной дорожки в торцовом сечении детали нормируется в соответствии с полученными результатами измерений деталей (дисков) роликовых передач, а также на основе установленного допуска на накопленную погрешность шага дорожки. Как показали исследования, погрешность профиля дорожки находится в соотношении $f_f = 0,25F_p$ с накопленной погрешностью шага F_p для деталей с разным числом периодов. Таким образом, погрешность профиля для 8-й степени точности, у которой $F_p = 8,2'$, равна $f_f = 0,25 \cdot 8,2 = 2,1'$.

Погрешность шага деталей с многопериодными дорожками также нормируется исходя из экспериментальных исследований и соотношения этой погрешности с накопленной погрешностью. Как показали исследования, при уменьшении смещения средней окружности многопериодной дорожки относительно ее геометрической оси погрешность шага приближается к накопленной погрешности. Поэтому для нормируемой степени точности на

основе проведенных измерений шага и накопленного шага дисков с многопериодными дорожками принимается соотношение между этими погрешностями, равное $f_p = 0,85F_p$. Тогда погрешность шага $f_p = 7'$.

Погрешность эксцентриситета ведущего звена f_e состоит из погрешности эксцентрика, погрешности монтажа эксцентрика на ведущий вал передачи, радиального биения подшипника, установленного на эксцентрик, погрешности формы внутреннего (ведущего) кольца. На основе проведенных измерений погрешностей деталей и расчета точности обработки эксцентрика, а также для установления заданной точности кинематической погрешности передачи принимается суммарная погрешность эксцентриситета ведущего звена, равная $f_e = 50$ мкм. При этом предусматривается, что допуски на составляющие погрешности деталей звена рассчитываются дополнительно. Их геометрическая сумма не должна превышать 50 мкм.

Погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку, f_{rad} определяется допусками на диаметры этих поверхностей внешнего и внутреннего ведущих колец дорожки. Для внутреннего кольца принимается допуск по 7-му качеству, для внешнего кольца – по 8-му качеству.

Допуски на диаметры колец приняты исходя из проведенных расчетов по обеспечению минимального зазора между роликами и рабочими поверхностями однопериодной дорожки, а также исходя из технологичности изготовления колец с учетом некоторого запаса точности для более высоких степеней.

Допуски на ширину многопериодной дорожки f_h и на диаметры роликов f_d установлены исходя из проведенных расчетов по обеспечению минимального зазора между этими деталями и расчетов по обеспечению точности их изготовления. Расчеты точности обработки на размеры этих деталей представлены в приложении Г. Исходя из вышеизложенного, допуск на ширину многопериодной канавки для нормируемой степени точности принят по 10-му качеству, а допуск на диаметр роликов – по 7-му качеству.

6.4.3 Контакт роликов.

Для норм контакта роликов нормируются следующие показатели: *отклонение от радиального расположения пазов дисков-сепараторов в передаче f_{rs} , торцовое биение дисков-сепараторов f_t , отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали f_n .*

Показатель f_{rs} является комплексным показателем, который предусматривает как симметричное расположение пазов для каждого диска отдельно, так и точность расположения пазов одного диска-сепаратора относительно пазов другого в собранной передаче. Этот показатель включает отклонение от

симметричности пазов каждого из дисков-сепараторов, позиционное отклонение отверстий под штифты дисков-сепараторов для их соединения, погрешность расположения отверстий под штифты дисков-сепараторов относительно оси симметрии паза. На эти погрешности при нормировании показателя f_{rs} установлены соответствующие допуски исходя из установления заданной точности кинематической погрешности передачи при ее нормировании, а также исходя из технологического обеспечения точности указанных выше параметров. На чертежах деталей передачи эти погрешности ограничиваются техническими требованиями и соответствующими допусками. В соответствии с вышеизложенным установлены следующие допуски:

- отклонение от симметричности пазов диска-сепаратора – 0,1 мм;
- позиционное отклонение отверстий под штифты диска-сепаратора – 0,1 мм;
- погрешность расположения отверстий под штифты в дисках-сепараторах относительно оси симметрии паза ограничивается величиной допуска на погрешность угла между осями паза и отверстия под штифт, равной b' .

Допуск на торцовое биение дисков-сепараторов (параметр f_t) принимается равным 0,05 мм. Этот допуск гарантирует нормальные условия сборки. Так как проверить торцовое биение дисков-сепараторов в собранной передаче невозможно, то контролируется биение каждого из дисков в сборе с ведомым валом передачи.

Допуск на отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали (параметр f_n) принимается равным 0,03 мм исходя из возможности обеспечения точности этого параметра при обработке дисков с многопериодными дорожками для заданной степени точности.

6.4.4 Боковой зазор между сателлитами-роликами и деталями зацепления.

В планетарной роликовой передаче рассматриваются боковые зазоры между роликами и рабочими поверхностями многопериодной дорожки, роликами и рабочими поверхностями ведущей дорожки, роликами и пазами дисков-сепараторов. Для каждого звена нормируется минимальный зазор. Величина минимального бокового зазора определяется по формуле

$$j_{\min} = j' + j'', \quad (6.11)$$

где j' – величина бокового зазора, соответствующая температурной компенсации деталей зацепления передачи;

j'' – величина бокового зазора, обеспечивающая нормальные условия смазки.

Минимальный зазор для каждого звена обеспечивается установлением соответствующих допусков.

При нормировании минимального зазора температурная деформация колец ведущего звена и дисков с многопериодными дорожками не учитывалась, т. к. при нагреве этих деталей в местах расположения роликов будут увеличиваться диаметры как внутренних, так и внешних рабочих поверхностей этих дорожек и величина зазора не будет уменьшаться. Не учитывались также температурные деформации пазов дисков-сепараторов в силу их малой величины. Поэтому при нормировании бокового зазора рассматривалась только температурная деформация роликов. Величина этой деформации определяется по известному соотношению [36] и будет равна

$$j' = 2R\alpha_1\Delta t_1 = 2 \cdot 4 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 75 = 0,007 \text{ мм.} \quad (6.12)$$

Величина зазора, обеспечивающая нормальные условия смазки, принимается по [36] равной 0,05 мм.

Таким образом, минимальный зазор между роликами и другими звеньями передачи будет равен

$$j_{\min} = j' + j'' = 0,007 + 0,05 = 0,057 \text{ мм.} \quad (6.13)$$

Рассмотрим обеспечение минимального зазора для каждого звена.

Для обеспечения минимального зазора между роликами и пазом многопериодной дорожки рассматриваются допуски на ширину многопериодной канавки и на диаметр роликов, установленные по нормам плавности:

$$j_{\min 1} = T_h + T_d = 0,058 + 0,015 = 0,073 \text{ мм,} \quad (6.14)$$

где $j_{\min 1}$ – наибольший зазор между роликами и рабочими поверхностями многопериодной дорожки;

T_h , T_d – допуски на ширину многопериодной дорожки и на диаметр роликов соответственно.

Как видно, предельное значение $j_{\min 1}$ перекрывает j_{\min} и, следовательно, минимальный зазор для этого звена обеспечивается.

Для обеспечения минимального зазора между роликами и кольцевой щелью ведущего звена рассматриваются допуски, установленные по нормам плавности на диаметры внешнего и внутреннего колец и на диаметр роликов. В данном случае

$$j_{\min 2} = T_{r1} + T_{r2} + T_d = 0,035/2 + 0,063/2 + 0,015 = 0,064 \text{ мм}, \quad (6.15)$$

где $j_{\min 2}$ – наибольший зазор между роликами и рабочими поверхностями однопериодной дорожки;

T_{r1} , T_{r2} – допуски на диаметры внутреннего и внешнего кольца однопериодной дорожки соответственно.

Так как $j_{\min 2} \geq j_{\min}$, то минимальный зазор и для ведущего звена также обеспечивается.

Для обеспечения минимального зазора между роликами и прорезями дисков-сепараторов рассматривается допуск на ширину паза диска-сепаратора. Тогда

$$j_{\min 3} = T_{hs} + T_d = 0,058 + 0,015 = 0,073 \text{ мм}, \quad (6.16)$$

где $j_{\min 3}$ – наибольший зазор между роликами и пазами дисков-сепараторов;

T_{hs} – допуск на ширину паза диска-сепаратора.

Таким образом, минимальный зазор и для ведомого звена также выдерживается.

6.5 Методика расчета кинематической погрешности планетарного роликового редуктора

Для планетарной роликовой передачи нормируются показатели, которые относятся непосредственно к передаче в сборе. Это комплексные показатели, включающие как погрешности изготовления и сборки деталей зацепления, так и погрешности валов, подшипников, фланцев и других деталей передачи, а также погрешности их монтажа.

Нормируются следующие погрешности: *наибольшая кинематическая погрешность передачи F_{io} , наибольшая местная кинематическая погрешность передачи f_i , среднее значение местных кинематических погрешностей передачи $f_{\text{ср}}$, максимальный зазор между роликами и деталями зацепления в сборе j_{\max} .*

Для расчета кинематической погрешности передачи разработана следующая методика. Нормирование этой погрешности проводится с учетом значений амплитуд гармонических составляющих кинематической погрешности и связи величины амплитуд с погрешностями деталей передачи. При нормировании за основу принимались экспериментальные и теоретические исследования кинематической погрешности передачи, содержащей диски с 13-периодными дорожками и диски с 14 прорезями.

При рассмотрении спектра амплитуд кинематической погрешности планетарной роликовой передачи можно выделить три основных диапазона

частот: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Для низкочастотного диапазона наибольшие значения амплитуд имеют гармоники с 1-й по 4-ю. Эти гармоники в основном характеризуют погрешности изготовления дисков с многопериодными дорожками, что подтверждает спектральный анализ накопленной погрешности шага дисков. Для среднечастотного диапазона в наибольшей степени проявляются гармоники с номерами, равными числу периодов дорожки и передаточному отношению. Для редуктора, взятого в качестве базового при нормировании точности, это будут 13-я и 14-я гармоники. Эти гармоники в наибольшей степени связаны с погрешностями ведущего звена и нормируются по нормам плавности. Высокочастотный диапазон охватывают амплитуды, наибольшие из которых связаны со входом роликов в зацепление и их выходом из зацепления. Для данного редуктора это 182-я и 196-я гармоники. Номера этих гармоник равны произведению числа роликов соответственно на число периодов дорожки и на передаточное отношение редуктора.

Таким образом, при расчете кинематической погрешности передачи учитываются погрешности дисков с многопериодными дорожками, которые охватывают низкочастотный спектр амплитуд кинематической погрешности, погрешности ведущего звена и погрешности роликов, охватывающие среднечастотный спектр. Высокочастотный спектр погрешностей, как показывают эксперименты, связан с несбалансированностью передачи, а наибольшие амплитуды гармоник этого участка спектра связаны с кинематическими погрешностями и зазорами в зацеплении. Погрешности неосновных деталей редуктора и монтажа проявляются во всем диапазоне спектра амплитуд.

Следовательно, кинематическую погрешность передачи можно определить по аналогии с зубчатыми передачами, учитывая особенности планетарной роликовой передачи [36–38]:

$$F_{к.п.} = k \left(\sqrt{F_i^2 + E_2^2} + 2k_1(\Delta_u + \Delta_{u-1}) \right), \quad (6.17)$$

где F_i – кинематическая погрешность диска с многопериодной дорожкой;

E_2 – погрешность монтажа ведомого звена;

Δ_u – суммарная погрешность, связанная со смещением средней окружности многопериодной дорожки относительно оси ведущего вала и погрешностями монтажа ведущего звена;

Δ_{u-1} – суммарная погрешность, связанная с погрешностями деталей ведущего звена, ширины многопериодной дорожки и погрешностями диаметров роликов;

k – коэффициент, учитывающий влияние высокочастотных погрешностей передачи;

k_1 – коэффициент, учитывающий влияние погрешностей профиля многопериодной дорожки в торцовом сечении диска.

Погрешности, входящие в формулу (6.17), могут быть выражены и в линейных, и в угловых величинах. В миллиметрах эти погрешности нормируются изначально и характеризуют погрешности деталей редуктора. Для расчета кинематической погрешности передачи необходимо эти элементарные погрешности перевести в угловые или в линейные величины, отнесенные к радиусу средней окружности многопериодной дорожки. Наиболее удобным при расчете кинематической погрешности передачи является приведение погрешностей деталей к угловым величинам. Эта задача решается моделированием погрешностей, приведенных в формуле (6.17), и их анализом с помощью ЭВМ по методике [48, 49]. В приложении Е приведены компьютерные программы для расчета влияния элементарных геометрических погрешностей деталей на кинематическую погрешность планетарных передач с телами качения торцового типа в угловых единицах. При этом в зависимости от погрешностей деталей передачи определяется погрешность угла поворота выходного вала. При моделировании используется та же передача, с той же геометрией, которая рассматривалась при нормировании показателей точности.

При определении числовых значений суммарной погрешности Δ_u используется формула

$$\Delta_u = \sqrt{f_r^2 + E_1^2}, \quad (6.18)$$

где f_r – погрешность смещения оси ведущего вала относительно средней окружности многопериодной дорожки;

E_1 – погрешность сборки ведущего звена с валом и подшипниками.

Погрешность E_1 , в свою очередь, состоит из суммы погрешностей:

$$E_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\delta_{n1}\right)^2 + \delta_{c2}^2}, \quad (6.19)$$

где δ_{n1} , δ_{c2} – радиальное биение подшипников ведущего вала и отклонение от соосности ведущего и ведомого валов соответственно.

Погрешность f_r без учета погрешностей валов и подшипников задана аналогично погрешности F_r , нормируемой по нормам кинематической точности, $f_r = 40$ мкм. Она создает кинематическую погрешность

передачи от неравномерности вращения ведущего вала после моделирования 0,96 угл. мин [48].

Радиальное биение подшипников ведущего вала принимается равным $\delta_{n1} = 50$ мкм в соответствии с их классом точности (0-й класс точности) и погрешностями при сборке, а отклонение от соосности ведущего и ведомого валов $\delta_{c2} = 25$ мкм – в соответствии с нормальными условиями изготовления и сборки валов. Тогда погрешность монтажа ведущего звена будет равна $E_1 = 35,4$ мкм при этом погрешность угла поворота передачи составит 0,84 угл. мин. Суммарная погрешность Δ_u равна

$$\Delta_u = \sqrt{0,96^2 + 0,84^2} = 1,28'.$$

Погрешность Δ_{u-1} определяется геометрической суммой:

$$\Delta_{u-1} = \sqrt{f_e^2 + f_{rad}^2 + f_h^2}, \quad (6.20)$$

где f_e – погрешность эксцентриситета ведущего звена в сборе;

f_{rad} – погрешность радиуса однопериодной дорожки;

f_h – погрешность ширины многопериодной дорожки.

Эти погрешности нормируются по нормам плавности в линейных единицах и в угловых единицах, определяются после моделирования: $f_e = 50$ мкм (0,44'), $f_{rad} = 17,5$ мкм (0,9'), $f_h = 50$ мкм (0,54'). Тогда

$$\Delta_{u-1} = \sqrt{0,44^2 + 0,9^2 + 0,54^2} = 1,14'.$$

В формуле (6.17) погрешности Δ_{u-1} и Δ_u складываются арифметически. Это связано с так называемыми биениями, которые возникают у погрешностей с близкими частотами и небольшой разностью начальных фаз. В этом случае погрешности как бы накладываются одна на другую, и поэтому их можно определять арифметическим сложением. В нормируемом редукторе эти погрешности соответствуют 13-й и 14-й гармоникам. При этом начальные фазы у них не превышают 10° . Таким образом, с незначительной долей погрешности величины Δ_{u-1} и Δ_u можно складывать арифметически.

Кинематическая погрешность диска с многопериодной дорожкой нормируется по нормам кинематической точности и для базовой 8-й степени точности, как определено выше, равна $F_i = 12,4'$.

Погрешность монтажа ведомого звена E_2 включает погрешности, которые определяются решением размерной цепи передачи. Эти погрешности имеют тот же период обращения, что и радиальная составляющая накоп-

ленной погрешности шага диска, т. е. однократно изменяются за оборот выходного вала. Следовательно, величину E_2 можно определить суммой:

$$E_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\delta_{n2}\right)^2 + \delta_{31}^2 + \delta_{c2}^2 + \delta_{32}^2}, \quad (6.21)$$

где δ_{n2} – радиальное биение подшипников ведомого вала;

δ_{31} – зазор между наружным кольцом подшипника ведомого вала и отверстием фланца;

δ_{c2} – отклонение от соосности отверстия и шейки фланца;

δ_{32} – зазор между шейкой фланца и отверстием диска с многопериодной дорожкой.

Указанные погрешности определяют радиальное смещение оси ведомого вала, поэтому при расчете погрешностей принимается радиальный зазор.

Радиальное биение подшипников ведомого вала принимается равным $\delta_{n2} = 50$ мкм в соответствии с их классом точности (0-й класс точности) и погрешностями при сборке.

Зазор между подшипником ведомого вала и фланца определяется классом точности и посадкой подшипника. Для подшипника 0-го класса точности и посадки H7/10 наружного кольца с диаметром 80 мм в отверстие фланца зазор

$$\delta_{31} = (15 + 35) / 2 = 25 \text{ мкм.}$$

Отклонение от соосности отверстия фланца, в которое устанавливается подшипник, и шейки фланца, на которую устанавливается диск с многопериодной дорожкой, принимается равным $\delta_{c2} = 10$ мкм.

Зазор между шейкой фланца и отверстием диска с многопериодной дорожкой определяется допусками на отверстие диска с многопериодной дорожкой ($\varnothing 84\text{H}7$) и на шейку фланца ($\varnothing 84\text{j}_6$):

$$\delta_{32} = (35 + 11) / 2 = 23 \text{ мкм.}$$

Тогда погрешность монтажа ведомого звена будет равна

$$E_2 = \sqrt{25^2 + 25^2 + 10^2 + 23^2} = 43,3 \text{ мкм.}$$

В угловых единицах эта погрешность составит 2,52'.

В формуле (6.17) при расчете погрешностей Δ_u и Δ_{u-1} по приведенной методике учитываются погрешности ведущего звена, диаметра роликов и ширины многопериодной канавки. При этом не учитываются погрешности, связанные с обработкой многопериодной дорожки, т. к. моделирование их требует сложной процедуры. Поэтому для среднечастотных составляющих Δ_u и Δ_{u-1} вводится коэффициент $k_1 = 1,3$, учитывающий погрешности профиля многопериодной дорожки в торцовом сечении диска, которые также приводят к погрешности шага дорожки. Этот коэффициент получен в результате экспериментального определения и анализа кинематической погрешности редукторов и деталей зацепления.

Коэффициент k учитывает высокочастотные погрешности передачи. Как показывают экспериментальные исследования кинематической погрешности планетарных роликовых редукторов, наибольшая удвоенная амплитуда высокочастотной составляющей равна 7 %...9 % от кинематической погрешности для несбалансированной передачи. После балансировки эта погрешность минимальна, и в этом случае можно принимать $k = 1$. Исходя из этого формулу (6.17) можно представить в следующем виде:

$$F_{к.н.} = \sqrt{F_i^2 + E_2^2} + 2k_1(\Delta_u + \Delta_{u-1}) + 2 \cdot 0,08F_{к.н.}, \quad (6.22)$$

где $0,08F_{к.н.}$ – наибольшая амплитуда высокочастотной гармоники (для нормируемого редуктора это 196-я гармоника), принятая в процентах от кинематической погрешности передачи.

Выразив эту формулу через $F_{к.н.}$, получим формулу (6.17), при этом $k = 1,2$.

Подставим в формулу (6.17) численные значения рассмотренных погрешностей в угловых минутах и определим кинематическую погрешность для несбалансированной передачи:

$$F_{к.н.} = 1,2 \left(\sqrt{12,4^2 + 2,52^2} + 2 \cdot 1,3 \cdot (1,28 + 1,14) \right) = 22,7' .$$

Нормирование кинематической погрешности передачи по 8-й степени точности проводится для сбалансированной передачи. В этом случае коэффициент $k = 1$ и $F_{к.н.} = 18,9'$. Это значение принимается в качестве нормируемого параметра.

В рассмотренной методике расчета учитываются только те гармоники, которые имеют наибольшие амплитуды в спектре кинематической погрешности. Данная методика не учитывает случайные погрешности, которые также проявляются (хоть и незначительно) в спектре амплитуд, что приводит к

некоторому уменьшению кинематической погрешности. Это уменьшение компенсируется арифметическим суммированием низкочастотных и среднечастотных погрешностей, приведенных в формуле (6.17).

В соответствии с методикой рассчитаем кинематическую погрешность экспериментального редуктора с передаточным отношением $u = 14$ и сравним полученные результаты с экспериментальными данными. Погрешности этого редуктора по установленным показателям точности определены выше. Кинематическую погрешность данной передачи определим по формуле

$$F_{к.п.} = \sqrt{F_i^2 + (2 \cdot \Delta A_i)^2} + 2(A_u + A_{u-1}) + 2A_z, \quad (6.23)$$

где F_i – кинематическая погрешность диска с многопериодной дорожкой;

ΔA_i – погрешность монтажа ведомого звена;

A_u – амплитуда гармоники кинематической погрешности экспериментального редуктора с номером, равным передаточному отношению (14-я гармоника);

A_{u-1} – амплитуда гармоники кинематической погрешности экспериментального редуктора с номером, равным числу периодов диска с многопериодной дорожкой (13-я гармоника);

A_z – амплитуда гармоники кинематической погрешности экспериментального редуктора с номером, равным числу вхождения рабочих роликов в зацепление за оборот ведомого вала (196-я гармоника).

В формуле (6.23) кинематическая погрешность диска принимается в соответствии с рассмотренной выше методикой $F_i = 1,2(F_p + f_f) = 1,2(31 + 6) = 44,4'$, где накопленная погрешность шага F_p и погрешность профиля f_f соответствуют измеренным наибольшим погрешностям многопериодной дорожки.

Погрешность монтажа ведомого звена ΔA_i характеризует суммарный эксцентриситет от биения подшипников ведомого вала и зазоров между деталями ведомого звена при сборке и определяется экспериментально как разность амплитуд первых гармоник в спектрах кинематической погрешности редуктора и накопленной погрешности шага диска с многопериодной дорожкой.

Амплитуды A_u , A_{u-1} , A_z принимаются также из спектра кинематической погрешности, полученной экспериментальным путем.

Значения величин, входящих в формулу (6.23), следующие: $F_i = 44,4'$, $\Delta A_i = 2'$, $A_u = 1,6'$, $A_{u-1} = 2'$, $A_z = 3,2'$. Подставим эти значения в формулу (6.23):

$$F_{к.п.} = \sqrt{44,4^2 + (2 \cdot 2)^2} + 2(1,6 + 2) + 2 \cdot 3,2 = 58,2'.$$

Среднее значение наибольшей кинематической погрешности планетарного роликового редуктора, полученное при многократных измерениях на экспериментальном стенде, составило $57,3'$. Как видно, расчетная кинематическая погрешность по принятой методике отличается от экспериментального среднего значения не более чем на 2 %. Это свидетельствует об высокой эффективности принятой методики.

Проведем нормирование для остальных показателей точности планетарной роликовой передачи.

Местная кинематическая погрешность передачи связана, как показывают исследования, с высокочастотными погрешностями, т. е. погрешностями, возникающими при смене рабочих роликов. Эти погрешности возникают из-за зазоров между роликами и деталями зацепления, неточностей самих деталей зацепления, а также из-за несбалансированности передачи.

Наибольшие амплитуды высокочастотных гармоник характеризуют среднее значение местной кинематической погрешности передачи. Наибольшая местная кинематическая погрешность не имеет четкой зависимости от гармоник или деталей зацепления. Обе эти погрешности нормируются на основе экспериментальных исследований кинематической погрешности передачи.

Среднее значение местной кинематической погрешности передачи принимается равным удвоенной амплитуде наибольшей высокочастотной гармоники (для нормируемой передачи это 196-я гармоника) и в угловых минутах принимается $f_{icp} = 3'$. Наибольшая местная кинематическая погрешность принимается равной $f_i = 8'$.

При расчете максимального зазора между роликами и другими деталями зацепления учитываются погрешности изготовления и сборки всех деталей передачи, которые приводят к уменьшению минимальных зазоров в передаче. Компенсация максимального зазора осуществляется за счет увеличения ширины пазов дисков-сепараторов. При этом также нормируется допуск на ширину паза. Тем самым обеспечивается гарантированный минимальный зазор между роликами и другими деталями зацепления. Максимальный зазор рассчитывается путем решения размерной цепи, которая в числе своих звеньев содержит зазоры и погрешности деталей собранной передачи. Для представленного на рисунке В.1 редуктора получим

$$j_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\delta_{n1}\right)^2 + \delta_{c1}^2 + f_e^2 + f_p^2 + \delta_s^2 + \delta_{c3}^2 + \delta_{c4}^2}, \quad (6.24)$$

где δ_{n1} – радиальное биение подшипников ведущего вала;

δ_{c1} – отклонение от соосности ведущего и ведомого валов;

f_e – погрешность эксцентриситета ведущего звена;

f_p – погрешность шага диска с многопериодной дорожкой;

δ_s – отклонение от симметричности пазов дисков-сепараторов;

δ_{c3} – отклонение от соосности центральных отверстий диска с многопериодной дорожкой и диска-сепаратора, расположенных со стороны выходного вала;

δ_{c4} – отклонение от соосности отверстий под штифты дисков-сепараторов.

Значения первых пяти параметров получены при нормировании точности по нормам кинематической точности, плавности и контакта. Параметры δ_{c3} и δ_{c4} являются комплексными и определяются путем решения размерных цепей. Определим эти параметры:

$$\delta_{c3} = \sqrt{\delta_{32} + \delta_{31} + \delta_{n2} + \delta_{33}} = \sqrt{23^2 + 25^2 + 25^2 + 23^2} = 48 \text{ мкм}, \quad (6.25)$$

где δ_{32} – зазор между шейкой фланца и отверстием диска с многопериодной дорожкой;

δ_{31} – зазор между наружным кольцом подшипника ведомого вала и отверстием фланца;

δ_{n2} – радиальное биение подшипников ведомого вала;

δ_{33} – зазор между отверстием диска-сепаратора и шейкой ведомого вала;

$$\delta_{c4} = \sqrt{\delta_{r1} + \delta_{r2}} = \sqrt{100^2 + 100^2} = 141,4 \text{ мкм}, \quad (6.26)$$

где δ_{r1} – позиционный допуск на отверстие под штифты диска-сепаратора;

δ_{r2} – допуск на расположение отверстия под штифт диска-сепаратора относительно оси симметрии паза (принимается 6 угл. мин).

Погрешности, рассматриваемые в соотношениях (6.25) и (6.26), установлены при нормировании, проведенном выше. Подставив численные значения в формулу (6.24), получим величину максимального зазора передачи:

$$j_{\max} = \sqrt{50^2 + 25^2 + 25^2 + 122,2^2 + 100^2 + 48^2 + 141,4^2} = 225,8 \text{ мкм}.$$

Если рассчитать максимальный зазор без учета погрешности δ_{c4} , т. е. не учитывая погрешности второго диска-сепаратора, то в этом случае $j'_{\max} = 176$ мкм. Таким образом, можно назначить разные допуски на ширину пазов каждого из дисков-сепараторов для компенсации макси-

мального зазора. При этом уменьшение зазоров между роликами и пазами одного из дисков повысит плавность работы передачи.

Исходя из этого для обоих дисков-сепараторов увеличивается ширина пазов на 200 мкм и устанавливаются допуски на ширину пазов. Для диска-сепаратора, расположенного со стороны ведомого вала, устанавливается размер и допуск на ширину паза $\varnothing 8,2H10$, для диска-сепаратора, расположенного к ведущему валу, – $\varnothing 8,2H11$.

6.6 Результаты нормирования показателей точности планетарных роликовых передач и рекомендации по их практическому использованию

В таблице 6.1 приведены установленные выше допуски на показатели точности планетарной роликовой передачи с параметрами $u = 14$, $z_2 = 13$, $R = 60$ мм, $A = 10$ мм для 8-й степени по всем нормам точности. Допуски на параметры точности представлены в угловых и линейных величинах, приведенных к радиусу средней окружности многопериодной дорожки $R = 60$ мм.

Так как в таблице 6.1 на показатели точности, характеризующие погрешности роликов, колец ведущего звена и дисков-сепараторов, назначены допуски размеров и расположения в соответствии с существующими стандартами, то для этих показателей не нужно проводить специального нормирования точности в зависимости от геометрических размеров этих деталей. При определении допусков на эти показатели точности для деталей передачи, имеющих другие размеры, отличные от представленных в таблице 6.1, следует использовать существующие стандарты.

Как показали экспериментальные исследования, накопленная погрешность шага и погрешность профиля многопериодной дорожки мало зависят от числа периодов дорожки и величины ее амплитуды. Поэтому показатели точности в таблице 6.1, характеризующие погрешности деталей с многопериодными дорожками и представленные в угловых величинах, можно использовать для таких же деталей с другими геометрическими параметрами. Представленный в таблице 6.1 в угловых величинах допуск на кинематическую погрешность передачи можно использовать при контроле планетарных роликовых передач с любыми передаточными отношениями.

Таким образом, результаты, представленные в таблице 6.1, дают возможность осуществлять контроль планетарных роликовых передач с различными передаточными отношениями и различной геометрией их деталей по 8-й степени точности. Для других степеней точности следует использовать переходные коэффициенты, приведенные выше.

Таблица 6.1 – Допуски на нормируемые показатели точности планетарных роликовых симметрично нагруженных передач для 8-й степени точности

Номер показателя	Показатель точности	Показатель точности передачи или деталей зацепления	Значение показателей, мкм (угл. мин)
<i>Кинематическая точность</i>			
1	Кинематическая погрешность передачи	$F_{к.п.}$	330 (18,9)
2	Кинематическая погрешность деталей с многопериодными дорожками	F_i	216 (12,4)
3	Накопленная погрешность шага деталей с многопериодными дорожками	F_p	143 (8,2)
4	Погрешность обработки многопериодной дорожки	F_c	140 (8)
5	Смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали	F_r	25
<i>Плавность работы</i>			
1	Местная кинематическая погрешность передачи	f_i	140 (8)
2	Среднее значение местных кинематических погрешностей передачи	f_{icp}	52 (3)
3	Погрешность шага деталей с многопериодными дорожками	f_p	122 (7)
4	Погрешность профиля многопериодной дорожки	f_f	37 (2,1)
5	Погрешность эксцентриситета ведущего звена	f_e	50
6	Погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку: отклонение диаметра внутреннего кольца однопериодной дорожки отклонение диаметра внешнего кольца однопериодной дорожки	f_{rad}	h7 H8
7	Погрешность диаметров роликов	f_d	h7
8	Погрешность ширины многопериодной дорожки	f_h	H10

Окончание таблицы 6.1

Номер показателя	Показатель точности	Показатель точности передачи или деталей зацепления	Значение показателей, мкм (угл. мин)
<i>Контакт роликов</i>			
1	Отклонение от радиального расположения пазов дисков-сепараторов в передаче:	f_{rs}	100
	отклонение от симметричности пазов диска-сепаратора		
	позиционное отклонение отверстий под штифты диска-сепаратора		
	погрешность расположения отверстий под штифты в дисках-сепараторах относительно оси симметрии паза		(6)
2	Торцовое биение дисков-сепараторов	f_t	50
3	Отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали	f_n	40
<i>Зазоры в передаче</i>			
1	Минимальный зазор между роликами и деталями зацепления в сборе	j_{min}	57
2	Максимальный зазор между роликами и деталями зацепления: допуск на ширину пазов двух дисков-сепараторов	j_{max}	226/176
			H10/H11

6.7 Разработка комплексов контроля точности изготовления планетарных роликовых передач и деталей зацепления

В таблице 6.2 представлены комплексы контроля точности изготовления деталей зацепления, а в таблице 6.3 – комплексы контроля передачи по нормам кинематической точности, плавности работы и контакта роликов, а также контроля зазоров в зацеплении. Все комплексы контроля деталей зацепления (см. таблицу 6.2) в пределах каждой нормы точности равноценны. Каждый комплекс содержит один или несколько параметров, которые либо соответствуют достаточному контролю по заданной степени точности, либо связаны с другими параметрами точности и комплексами контроля. Так, комплексы, дающие неполный контроль, связаны математическими зависимостями с комплексами, которые наиболее полно характеризуют точность по данной норме (если выполняются комплексы, менее предпоч-

тительные для данной степени точности, то будут выполняться и комплексы более предпочтительные). Такое назначение комплексов контроля обеспечивает выбор средств и возможностей контроля планетарных роликовых передач. Хотя комплексы и являются равноценными при одинаковых возможностях контроля, все же рекомендуется для более точных передач использовать комплексы, указанные в таблицах первыми для каждой нормы, т. к. они наиболее полно характеризуют погрешности деталей зацепления и передачи.

Таблица 6.2 – Комплексы контроля точности изготовления деталей зацепления

Норма точности	Номер комплекса	Комплекс контроля	Обозначение	Степень точности
Кинематическая	1	Кинематическая погрешность деталей с многопериодными дорожками	F_i	6–9
	2	Накопленная погрешность шага деталей с многопериодными дорожками	F_p	6–9
	3	Погрешность обработки многопериодной дорожки	F_c	6–9
		Смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали	F_r	
4	Смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали	F_r	10–12	
Плавность работы	1	Погрешность профиля многопериодной дорожки	ff	6–9
		Погрешность эксцентриситета ведущего звена	f_e	
		Погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку	f_{rad}	
		Погрешность диаметров роликов	f_d	
		Погрешность ширины многопериодной дорожки	f_h	

Окончание таблицы 6.2

Норма точности	Номер комплекса	Комплекс контроля	Обозначение	Степень точности
	2	Погрешность шага деталей с многопериодными дорожками Погрешность эксцентриситета ведущего звена Погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку Погрешность диаметров роликов Погрешность ширины многопериодной дорожки	f_p f_e f_{rad} f_d f_h	6–9
	3	Погрешность эксцентриситета ведущего звена Погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку Погрешность диаметров роликов	f_e f_{rad} f_d	10–12
Контакт роликов	1	Отклонение расположения пазов дисков-сепараторов в сборе Торцовое биение диска-сепаратора на радиусе средней окружности Отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали	f_{rs} f_t f_n	6–8
	2	Отклонение расположения пазов дисков-сепараторов в сборе Торцовое биение диска-сепаратора на радиусе средней окружности	f_{rs} f_t	9–10
	3	Отклонение расположения пазов дисков-сепараторов в сборе	f_{rs}	11–12
Зазоры	1	Максимальный зазор между роликами и деталями зацепления	j_{max}	6–12

Для норм кинематической точности (см. таблицу 6.2.) первый, второй и четвертый комплексы включают по одному показателю точности, а третий комплекс включает два показателя точности. Два показателя в одном комплексе характеризуют радиальные и тангенциальные погрешности деталей и в геометрической сумме дают накопленную погрешность шага по одной из рабочих поверхностей многопериодной дорожки.

Таблица 6.3 – Комплексы контроля точности планетарных роликовых передач

Норма точности	Номер комплекса	Комплекс контроля	Обозначение	Степень точности
Кинематическая	1	Кинематическая погрешность передачи	F_{io}	6–9
Плавность работы	1	Местная кинематическая погрешность передачи	f_i	6–9
	2	Среднее значение местных кинематических погрешностей	f_{icp}	6–9
Зазоры	1	Минимальный зазор между роликами и деталями зацепления в сборе	j_{min}	6–12

Накопленные погрешности по двум поверхностям многопериодной дорожки и погрешность профиля дорожки дают кинематическую погрешность детали. Таким образом, все комплексы контроля по норме кинематической точности связаны между собой и каждый комплекс в большей или меньшей степени характеризует одну и ту же накопленную погрешность шага многопериодной дорожки. На эти три комплекса установлены степени точности с 6-й по 9-ю. Для грубых степеней точности 10–12 принят четвертый комплекс контроля, который включает только один показатель – смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали, т. к. для этих степеней точности влияние этой радиальной погрешности наиболее существенно по сравнению с тангенциальной погрешностью обработки многопериодной дорожки.

Для норм плавности (см. таблицу 6.2) установлено три комплекса контроля для деталей зацепления. Первые два комплекса включают тангенциальные погрешности детали с многопериодной дорожкой (погрешность профиля в торцовом сечении и погрешность шага многопериодной дорожки) и радиальные погрешности деталей зацепления (погрешность эксцентриситета, отклонение диаметров внутреннего и внешнего колец ведущего звена, погрешность диаметров роликов, погрешность ширины многопериодной дорожки).

Эти радиальные и тангенциальные погрешности для первого и второго комплексов в геометрической сумме дают среднечастотные погрешности, которые в наибольшей степени проявляются в спектре амплитуд с частотами, равными передаточному отношению и числу периодов многопериодной дорожки, и учитываются при расчете кинематической погрешности передачи. При этом для степеней точности 10–12 (третий комплекс контроля по нормам плавности) нормируются только радиальные погрешности, т. к. контроль

профиля и шага многопериодной дорожки для этих степеней точности нецелесообразен.

Для норм контакта (см. таблицу 6.2) установлено три комплекса для контроля расположения дисков-сепараторов и деталей с многопериодными дорожками в собранной передаче. Для каждого комплекса приняты показатели, соответствующие требованиям контроля по указанной степени точности.

Для норм бокового зазора установлен один комплекс контроля – максимальный зазор в зацеплении. Этот показатель предусматривает контроль ширины пазов дисков-сепараторов.

В таблице 6.3 представлены комплексы контроля для передачи в сборе. Наиболее полный контроль планетарной роликковой передачи достигается измерением кинематической погрешности передачи $F_{к.п.}$ с гармоническим анализом. Контроль кинематической погрешности передачи, местной кинематической погрешности или среднего значения местных кинематических погрешностей и минимального зазора также обеспечивают полный контроль точности передачи.

Рассмотренные комплексы контроля для передачи определяют предпочтительный контроль. Однако это требует весьма сложных средств измерения. Поэтому можно контролировать точность передачи по комплексам для деталей зацепления (см. таблицу 6.2). В этом случае необходимо выбирать один из комплексов для каждой нормы точности.

Для контроля кинематической погрешности передачи можно использовать средства контроля, рассмотренные в подразделе 4.1. Для контроля погрешностей деталей с многопериодными дорожками (накопленной погрешности и погрешности шага многопериодной дорожки, погрешности обработки и погрешности профиля) можно использовать КИМ. В этом приспособлении погрешность обработки многопериодной дорожки контролируется так же, как и накопленная погрешность шага, но относительно технологической оси детали. Наиболее точный контроль этого показателя можно осуществить, если измерять накопленную погрешность шага в том же приспособлении, в котором проводилась обработка дорожки.

Контроль смещения средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси диска можно проводить несколькими способами.

Первый способ заключается в измерении расстояния от отверстия до впадин многопериодной дорожки. При этом для контроля могут использоваться как универсальные, так и специальные штангенциркули с различной точностью. Разность между наибольшим и наименьшим измеренными расстояниями равна удвоенному смещению оси многопериодной дорожки.

Второй способ заключается в измерении радиального биения вершин или впадин многопериодной дорожки. В этом случае при измерении радиального биения будут учитываться также погрешности профиля в вершинах и во впадинах, поэтому при использовании данного способа контроля необходимо увеличивать допуск контролируемого параметра на величину этих погрешностей. Так, для нормированной базовой степени точности допуск на радиальное биение вершин и впадин многопериодной дорожки может быть принят 0,1 мм, соответственно, допуск на смещение средней окружности дорожки при таком методе контроля составит 50 мкм. Измерение радиального биения вершин и впадин можно проводить в специальных приспособлениях или косвенными методами контроля с помощью КИМ.

Местная кинематическая погрешность и среднее значение местных кинематических погрешностей контролируются после измерения и графического представления кинематической погрешности передачи. Для определения величины среднего значения местных кинематических погрешностей проводится гармонический анализ. Величина этой погрешности будет равна наибольшей удвоенной амплитуде высокочастотной гармоники, у которой номер равен произведению передаточного отношения и числа роликов или передаточного отношения и числа периодов дорожки. Местная кинематическая погрешность определяется непосредственно из графика кинематической погрешности передачи.

Для контроля минимального зазора (свободный ход) в собранной передаче можно использовать как универсальные средства контроля (угломеры различных типов), так и устройства для контроля кинематической погрешности в статике (см. рисунки 4.1–4.4).

Контроль других комплексов и показателей норм плавности и контакта осуществляется известными методами и средствами измерения.

Для зубчатых передач при установлении степеней точности на проектируемое колесо допускается принимать разные степени точности для каждой нормы. Для планетарных роликовых передач с учетом тесной связи всех норм точности такое допущение неприменимо, т. к. оно приводит к изменению значений показателей других норм точности. В связи с этим для планетарных роликовых передач рекомендуется принимать одинаковую степень точности для различных норм.

Заключение

Результаты, представленные в монографии, носят прикладной характер, сочетают теоретические и последующие экспериментальные исследования.

Разработаны методы оценки кинематических характеристик радиально-плунжерных передач в сборе на основе современных технологий компьютерного моделирования.

Разработаны методы оценки точностных параметров планетарных передач с телами качения в сборе на основе спектрального анализа их кинематических характеристик.

Разработаны дифференцированные методы контроля и расчета точности деталей планетарных радиально-плунжерных передач на основе использования технологий координатных измерений на координатно-измерительной машине и анализа современных методов контроля и оценки точности механических передач.

Разработан метод экспресс-анализа точностных параметров механических передач на основе использования автоматизированных средств контроля.

Разработан комплексный метод контроля и спектрального анализа кинематической погрешности механических передач в сборе.

Разработаны показатели норм кинематической точности и плавности работы механических передач на основе применения дифференцированных и комплексных методов контроля.

Установлены допуски для контроля показателей кинематической точности, плавности работы и контакта планетарных передач с телами качения после изготовления.

Научная новизна исследований:

- установлены зависимости между гармоническими составляющими амплитудно-частотных спектров кинематических характеристик планетарных передач с телами качения и неточностями их геометрических параметров при проектировании и изготовлении;

- установлены зависимости между упругими деформациями, погрешностями изготовления и наибольшей кинематической погрешностью радиально-плунжерной передачи;

- получены зависимости угловых перемещений выходного звена от времени;

- разработан метод расчета значений кинематической погрешности передачи, в основе которого лежит спектральный анализ с использованием рядов Фурье;

- разработан метод оценки контакта деталей зацепления передач с телами качения в зависимости от их точностных параметров;
- установлена зависимость между погрешностями изготовления и величиной контакта деталей передачи;
- установлены технологические причины, приводящие к перекосу и уменьшению числа работающих сателлитов в передаче;
- разработаны компьютерные модели и методики компьютерного моделирования кинематики планетарных передач;
- установлены численные значения допусков для контроля показателей кинематической точности планетарных передач с телами качения после изготовления.

Результаты исследований позволяют обеспечить оптимальные по затратам численные показатели кинематической точности и плавности работы планетарных передач с телами качения торцового типа и повысить их технический уровень.

Опытные испытания экспериментальных образцов планетарных радиально-плунжерных редукторов проведены в лабораториях Белорусско-Российского университета.

Полученные результаты могут быть использованы в образовательном процессе и производстве для повышения эксплуатационных характеристик механических передач и приводов машин.

Список литературы

- 1 Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
- 2 **Лустенков, М. Е.** Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности: монография / М. Е. Лустенков. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.
- 3 Планетарная роликовая передача: пат. ВУ 4985 / А. М. Пашкевич, М. Ф. Пашкевич. – Оpubл. 30.03.2003.
- 4 Планетарная передача: пат. ВУ 254 / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, М. В. Соколов. – Оpubл. 30.03.2001.
- 5 Фрикционный двухступенчатый шарикоподшипниковый редуктор: пат. ВУ 1616 / М. Ф. Пашкевич, Д. В. Давыденко. – Оpubл. 30.12.2004.
- 6 Шариковое редукторное устройство для ручного перемещения кабины лифта: пат. ВУ 3258 / П. М. Рудник, А. В. Тюков, И. Н. Балабанов, С. С. Грибов, С. В. Миронов, М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, А. М. Пашкевич. – Оpubл. 30.12.2006.
- 7 Планетарная передача: пат. ВУ 5092 / А. М. Пашкевич, В. М. Пашкевич, В. В. Геращенко, М. Ф. Пашкевич. – Оpubл. 30.03.2003.
- 8 Планетарная эксцентриковая передача: пат. ВУ 199 / М. Ф. Пашкевич, О. Е. Печковская, Д. А. Забелин. – Оpubл. 30.06.2005.
- 9 Червячная передача: пат. ВУ 7773 / В. И. Сотников, Н. Г. Чернов, М. Э. Подымако, Н. И. Рогачевский, М. Ф. Пашкевич. – Оpubл. 30.12.2011.
- 10 **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные передачи с повышенной нагрузочной способностью для реверсивной работы в приводах строительных и дорожных машин / М. Ф. Пашкевич, О. Е. Печковская // Вестн. МГТУ. – 2005. – № 2. – С. 127–131.
- 11 Методы экспериментальных исследований кинематической точности планетарных передач с промежуточными телами качения и контроля профиля беговых дорожек / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50.
- 12 Автоматизированное проектирование конструкций малогабаритных радиально-плунжерных редукторов с использованием современных САПР / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3 (48). – С. 25–32.
- 13 **Капитонов, А. В.** Компьютерное 3D-моделирование конструкций и кинематических параметров планетарных малогабаритных передач / А. В. Капитонов, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. – 2016. – № 11. – С. 34–40.

14 **Капитонов, А. В.** Методика оценки и анализ кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 88–97.

15 **Капитонов, А. В.** Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 40–50.

16 Исследование кинематической погрешности планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 14–24.

17 **Пашкевич, М. Ф.** Стенды для испытания редукторов / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко. – Минск: БелНИИНТИ, 1991. – 44 с.

18 Теория механизмов и механика машин: учебник / К. В. Фролов [и др.]; под ред. К. В. Фролова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1998. – 196 с.

19 **Машков, А. А.** Теория машин и механизмов: учебное пособие / А. А. Машков. – Минск: Вышэйшая школа, 1971. – 469 с.

20 **Капитонов, А. В.** Планетарная радиально-плунжерная передача с улучшенными эксплуатационными характеристиками / А. В. Капитонов, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3 (56). – С. 27–34.

21 **Капитонов, А. В.** Исследование эксплуатационных характеристик планетарных эксцентриковых передач с модифицированным профилем зубьев / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2015. – № 3 (47). – С. 34–39.

22 Управление точностью планетарных роликовых передач на основе их моделирования и спектрального анализа кинематических погрешностей / М. Ф. Пашкевич [и др.] // Изв. Белорус. акад. наук. – 2002. – № 1 (13). – С. 45–52.

23 **Kapitonov, A. V.** Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission Advances in Engineering Research / A. V. Kapitonov // International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). – 2018. – Vol. 158. – P. 165–168.

24 Методы формообразования и 3D-моделирование профилей зубьев сателлита планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 13–20.

25 Повышение точности механических передач на основе компьютерного моделирования и использования технологий искусственного интеллекта: монография / В. М. Пашкевич [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – 139 с.: ил.

26 **Капитонов, А. В.** Математическое моделирование кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестн. МГТУ. – 2003. – № 2 (10). – С. 44–48.

27 **Капитонов, А. В.** Методы контроля геометрических параметров деталей с многопериодными дорожками / А. В. Капитонов // Вестн. МГТУ. – 2011. – № 3. – С. 40–46.

28 **Легаев, В. П.** Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учебное пособие / В. П. Легаев. – Владимир: Владимир. гос. ун-т, 2009. – 123 с.

29 **Макаров, В. В.** Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Общие сведения об измерениях, испытаниях и контроле: учебное пособие / В. В. Макаров. – Орел: ОрелГТУ, 2008. – 40 с.

30 Применение достижений в области искусственного интеллекта в средствах измерений и управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://plasma.karelia.ru/~ekostq/site/index.php?id=primenenie-dostizhenij-v-oblasti-iskusstvennogo-intellekta-v-sredstvah-izmerenij-i-upravleniya>. – Дата доступа: 23.11.2017.

31 **Пашкевич, В. М.** Математическое обеспечение геометрического контроля сложных периодических профилей с использованием КИМ Dura Max фирмы «Карл Цейс» (Carl Zeiss) / В. М. Пашкевич // Вестн. МГТУ. – 2014. – № 4. – С. 42–48.

32 **Кондаков, А. И.** САПР технологических процессов: учебное пособие / А. И. Кондаков. – Москва: Академия, 2008. – 272 с.

33 **Малюх, В.** Введение в современные САПР / В. Малюх. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 192 с.

34 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. Г. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 655 с.

35 Технологическая оснастка: учебное пособие / В. Е. Антонюк [и др.]; под ред. В. Е. Антонюк. – Минск: Изд-во Гревцова, 2011. – 375 с.

36 **Тайц, Б. А.** Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – Москва: Машиностроение, 1972. – 367 с.

37 **Тайц, Б. А.** Точность и контроль зубчатых передач / Б. А. Тайц, Н. Н. Марков. – Ленинград: Машиностроение, 1978. – 136 с.

38 Производство зубчатых колес: справочник / Под ред. Б. А. Тайца. – Москва: Машиностроение, 1975. – 728 с.

39 **ГОСТ 5368–81.** Приборы для измерения цилиндрических зубчатых колес. Типы и основные параметры. Нормы точности. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 23 с.

40 **ГОСТ 8137–81.** Приборы для измерения радиального биения зубчатого венца. Технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 2 с.

41 **ГОСТ 10387–81.** Приборы для измерения цилиндрических мелко-модульных зубчатых колес. Типы и основные параметры. Нормы точности. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 12 с.

42 **ГОСТ 9776–82.** Приборы для измерения цилиндрических червяков червячных колес и червячных передач. Типы и основные параметры. Нормы точности. – Москва: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.

43 **ГОСТ 11357–89.** Приборы для измерения конических мелко-модульных зубчатых колес и пар. Типы и основные параметры. Нормы точности. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 11 с.

44 Устройство для контроля кинематической точности передач: пат. ВУ 4358 / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко, В. М. Пашкевич, А. В. Капитонов, А. М. Пашкевич. – Оpubл. 30.03.2002.

45 Устройство для контроля кинематической точности зубчатых передач: пат. ВУ 4341 / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко, В. М. Пашкевич, А. В. Капитонов, А. М. Пашкевич. – Оpubл. 30.03.2002.

46 Устройство для контроля кинематической точности передач: пат. ВУ 4359 / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко, В. М. Пашкевич, А. В. Капитонов, А. М. Пашкевич. – Оpubл. 30.03.2002.

47 Стенд для контроля кинематической точности передач: пат. ВУ 4858 / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко, В. М. Пашкевич, А. В. Капитонов, А. М. Пашкевич. – Оpubл. 03.12.2002.

48 **Капитонов, А. В.** Нормирование точности планетарных роликовых передач и технологические пути ее обеспечения: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08, 05.02.11 / А. В. Капитонов. – Могилев, 2002. – 243 л.

49 **Капитонов, А. В.** Кинематические и массогабаритные характеристики ресурсоэффективных механических передач. Компьютерное моделирование, экспериментальная оценка: монография / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 248 с.

50 **ГОСТ 1643–81.** Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 68 с.

51 Технология машиностроения: учебное пособие / М. Ф. Пашкевич [и др.]; под ред. М. Ф. Пашкевича. – Минск: Новое знание, 2008. – 478 с.

52 Технология машиностроения. Практикум: учебное пособие / Под ред. А. А. Жолобова. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 335 с.: ил.

Приложение А (рекомендуемое)

Компьютерная программа для расчета кинематических параметров передач с промежуточными телами качения

Компьютерная программа на языке VBA для расчета значений кинематических параметров планетарных передач с телами качения

```
Sub КинематПараметры_ПРПП()
```

```
' Определяем максимальное, минимальное, среднее значения кинематических параметров ПРПП, угловую скорость, угловое ускорение, нормальную силу
```

```
Dim par As Variant
Dim par_max As Variant
Dim par_min As Variant
Dim N As Variant
Dim par_nom As Variant
Dim par_sum As Variant
Dim I As Variant
Dim del_par_max As Variant
Dim otkl_plus As Variant
Dim otkl_minus As Variant
Dim par_sred As Variant
Dim del_par_sred As Variant
```

```
'ввести
```

```
With Sheets("Лист1")
  par = .Range("B4:B124").Value 'кинематический параметр
End With
```

```
'ввести
```

```
par_max = -5000
par_min = 5000
N = 121 'число значений параметра
```

```
'ввести
```

```
par_nom = 1500 * 6 / 7 'значение номинального параметра
```

```
par_sum = 0
```

```
For I = 1 To N
```

```
    par = Range("B3").Offset(0 + I, 0) 'смещение на одну строку вниз
```

```
    If par > par_max Then
```

```
        par_max = par
```

```
    End If
```

```
    If par < par_min Then
```

```
        par_min = par
```

```
    End If
```

```
par_sum = par_sum + par
```

```
Next I
```

```
del_par_max = par_max - par_min 'наибольший размах параметра
```

```
otkl_plus = par_max - par_nom 'верхнее отклонение параметра от  
номинального
```

```
otkl_minus = par_min - par_nom 'нижнее отклонение параметра от  
номинального
```

```
par_sred = par_sum / N 'значение среднего параметра
```

```
del_par_sred = par_sred - par_nom 'отклонение от среднего параметра
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 17).Value = par_nom
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 18).Value = par_max
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 19).Value = par_min
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 20).Value = del_par_max
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 21).Value = otkl_plus
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 22).Value = otkl_minus
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 23).Value = par_sred
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 24).Value = del_par_sred
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 25).Value = par_sum
```

```
End Sub
```

Компьютерная программа на языке VBA для расчета наибольшего значения кинематической погрешности планетарных передач с телами качения

```
Option Explicit
```

```
Sub МаксКинПогреш_ПРПП()
```

```
'Определяем наибольшую кинематическую погрешность
```

```
Dim par As Variant
```

```
Dim par_max As Variant
```

```
Dim par_min As Variant
```

```
Dim N As Variant
```

```
Dim I As Variant
```

```
Dim del_par_max As Variant
```

```
'ввести
```

```
With Sheets("Лист1")
```

```
par = .Range("U4:U590").Value 'кинематический параметр
```

```
End With
```

```
'ввести
```

```
par_max = -100
```

```
par_min = 100
```

```
N = 587 'число значений параметра
```

```
For I = 1 To N
```

```
par = Range("U3").Offset(0 + I, 0) 'смещение на одну строку вниз
```

```
If par > par_max Then
    par_max = par
End If
```

```
If par < par_min Then
    par_min = par
End If
```

```
Next I
```

```
del_par_max = par_max - par_min 'наибольшая кинематическая погрешность
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(3, 25).Value = par_max
Worksheets("Лист1").Cells(3, 26).Value = par_min
Worksheets("Лист1").Cells(3, 27).Value = del_par_max
Worksheets("Лист1").Cells(3, 28).Value = del_par_max * 60
```

```
End Sub
```

Компьютерная программа на языке VBA для расчета спектра амплитуд кинематической погрешности планетарных передач с телами качения

```
Option Explicit
```

```
Sub СпектрАмплитуд ()
```

```
'Выводит спектр амплитуд кинематической погрешности передачи
```

```
Dim F
```

```
Dim N
```

```
Dim co
```

```
Dim ak
```

```
Dim bk
```

```
Dim K
```

Dim I

Dim col

Dim ak1

Dim bk1

Dim fik

Dim ck

With Sheets ("Лист1") *'ввести название листа*

F = .Range ("B8:B815").Value *'ввести исследуемый диапазон*

End With

N = 808 *'ввести число значений кинематической погрешности*

co = 0

ak = 0

bk = 0

For K = 1 To 400 *'число гармоник*

For I = 1 To N

F = Range("B7"). Offset (0 + I, 0)

ak = ak + F * Cos (K * I * 2 * 3.1415926 / N)

bk = bk + F * Sin (K * I * 2 * 3.1415926 / N)

co = co + F

Next I

ak1 = ak * 2 / N

bk1 = bk * 2 / N

ck = (ak1 ^ 2 + bk1 ^ 2) ^ 0.5

$$co1 = co / N$$

$$fik = \text{Atn} (bk1 / ak1)$$

Worksheets ("Лист1"). Cells (2 + K, 27). Value = ck *'значения*
амплитуд гармоник

$$ak = 0$$

$$bk = 0$$

$$co = 0$$

Next K

End Sub

Приложение Б (справочное)

Конструкция двухступенчатого планетарного радиально-плунжерного редуктора с $i = 49$

Редуктор (рисунок Б.1) состоит из ведущего 1 вала, четырех эксцентриков 2, двух сепараторов первой и второй ступеней 3 и 7. Сепаратор-водило второй ступени выполнен одной деталью с выходным валом. Наиболее ответственными деталями являются два колеса с многопериодными дорожками 4. Корпус выполнен в виде фланцев 5 и 8. На ведущие звенья установлены четыре радиальных шариковых подшипника 22. Вращение передают шары-сателлиты 24. Остальные стандартные детали служат для сборки редуктора.

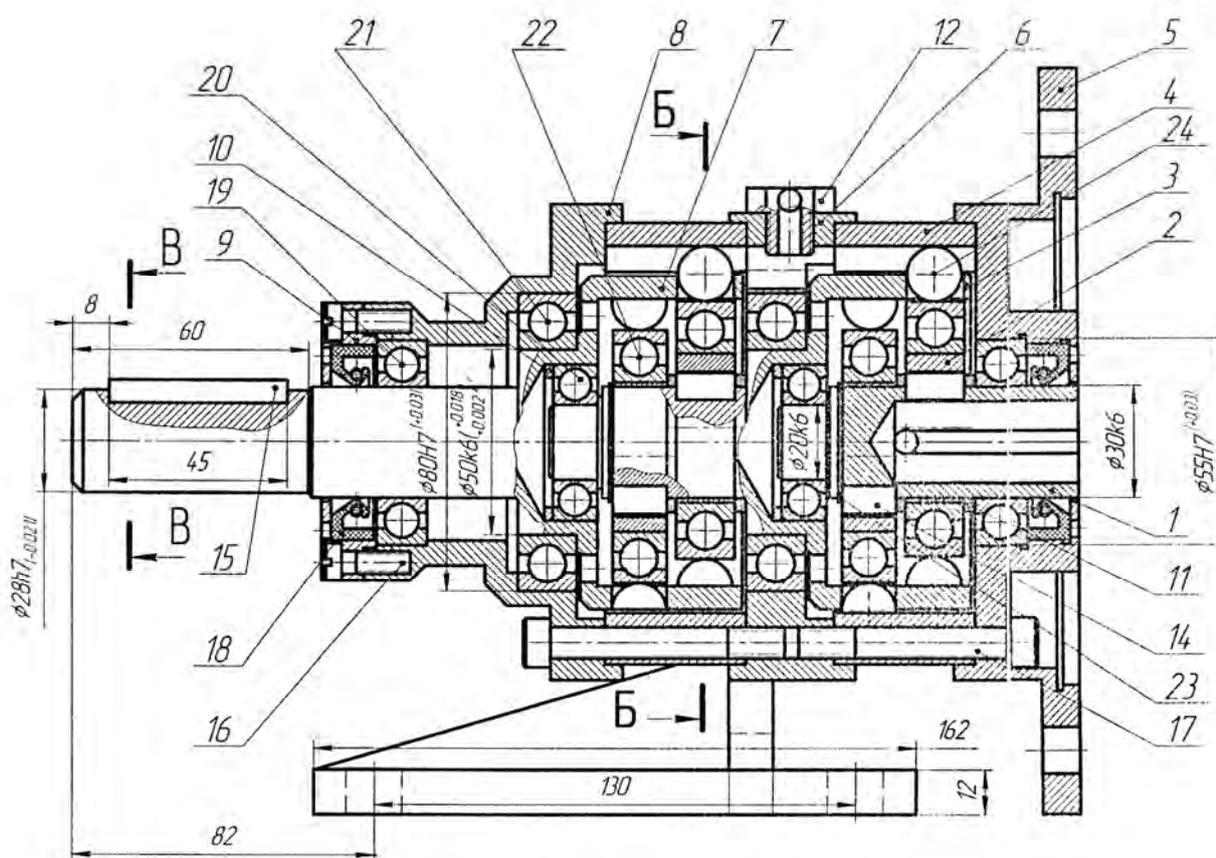


Рисунок Б.1 – Конструкция планетарного редуктора

Таблица В.1 – Описание конструкции планетарного роликового редуктора

Поз.	Наименование	Кол.	Поз.	Наименование	Кол.
			18	Болт М8 – 6g × 50,58	8
	Сборочные единицы			ГОСТ 7798–70	
			19	Болт М6 – 6g × 25,58	6
1	Вал ведомый	1		ГОСТ 7798–70	
			20	Болт М22 × 1,5 – 6g × 5,58	1
	Детали			ГОСТ 7798–70	
			21	Гайка М8 – 6Н.5	8
2	Корпус	1		ГОСТ 5915–70	
3	Фланец	1	22	Крышка 12 – 80 × 35	1
4	Крышка	1		ГОСТ 18512–73	
5	Вал ведущий	1	23	Подшипник 208	4
6	Диск с многопериодной дорожкой правый	1		ГОСТ 8338–75	
			24	Подшипник 207	1
7	Диск с многопериодной дорожкой левый	1		ГОСТ 8338–75	
			25	Подшипник 205	1
8	Эксцентрик	1		ГОСТ 8338–75	
9	Кольцо внутреннее	1	26	Манжета 1–35 × 58	1
10	Кольцо внешнее	1		ГОСТ 8752–70	
11	Ролик	14	27	Манжета 1–38 × 60	1
12	Диск-сепаратор правый	1		ГОСТ 8752–70	
13	Диск-сепаратор левый	1	28	Шайба 22	1
14	Фланец	1		ГОСТ 11371–78	
15	Кольцо	1	29	Шайба 8	8
				ГОСТ 11371–78	
	Стандартные изделия		30	Шпонка 6 × 6 × 25	4
				ГОСТ 23360–78	
16	Болт М8 – 6g × 40,58	8	31	Шпонка 5 × 5 × 14	1
	ГОСТ 7798–70			ГОСТ 23360–78	
17	Болт М8 – 6g × 25,58	16			
	ГОСТ 7798–70				

Приложение Г (обязательное)

Технологическое обеспечение точности планетарных роликовых передач

Г.1 Расчет точности обработки на отдельных операциях и разработка технологического маршрута изготовления дисков с многопериодными дорожками

Для обеспечения точности изготовления деталей зацепления в соответствии с установленными допусками на параметры (показатели) точности (см. таблицу 6.1) проведены расчеты точности обработки для технологических операций и на их основе разработаны технические требования по точности к чертежам деталей зацепления и типовые технологические маршруты обработки на оригинальные детали: диски с многопериодными дорожками и диски-сепараторы.

Так, для 8-й степени точности разработан технологический маршрут обработки дисков с многопериодными дорожками (таблица Г.1), который может быть принят как базовый для других степеней точности. При его разработке исследовались типовые технологические маршруты изготовления деталей класса дисков, а также виды контурной обработки на станках с ЧПУ [34, 35, 51, 52]. Чертеж диска с многопериодной дорожкой представлен на рисунке Д.1.

Расчет точности технологических операций проводился в соответствии с известной методикой, представленной в [34, 51].

Согласно этой методике суммарная погрешность обработки состоит из элементарных случайных и систематических погрешностей. Эту погрешность можно определить по следующей формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i \Delta_i)^2} + \Sigma \Delta_{\text{сист}}, \quad (\text{Г.1})$$

где Δ_i – элементарные погрешности обработки случайного характера;
 $\Delta_{\text{сист}}$ – элементарная суммарная систематическая погрешность;
 K_i – коэффициент относительного рассеивания.

Для закона нормального распределения $K_i = 1$. Для некоторой гарантии обработки этот коэффициент принимают $K_i = 1,2$, учитывая возможность рассеивания параметров по другим законам распределения.

Таблица Г.1 – Технологический маршрут обработки диска с многопериодной дорожкой

Название операции	Содержание операции
Заготовительная	Заготовка – прокат. Резка заготовок
Токарная	Черновая обработка наружной поверхности, черновая и чистовая обработка центральных отверстий и торцов с припуском под шлифование
Шлифовальная	Предварительное шлифование двух торцов с припуском под чистовое шлифование
Фрезерная с ЧПУ	Черновое и чистовое фрезерование многопериодной дорожки с установкой диска в приспособление по базовому торцу и наружной цилиндрической поверхности. За базовый торец принимается поверхность диска, которая будет использоваться при установке диска на фланец в собранной передаче
Фрезерная	Фрезерование шпоночных пазов
Термическая	Закалка и отпуск
Шлифовальная	Окончательное шлифование двух торцов
Шлифовальная	Шлифование центрального отверстия с установкой диска по рабочим поверхностям многопериодной дорожки и базовому торцу

Г.1.1 Обеспечение точности ширины многопериодной дорожки 8Н10^(+0,058) (параметр f_h , см. таблицу 6.1)

Чистовое фрезерование дорожки выполняется стандартной фрезой из быстрорежущей стали.

Суммарная погрешность обработки размера 8Н10^(+0,058) включает случайные и систематические погрешности и в основном зависит от систематических погрешностей, связанных с погрешностями режущего инструмента. Случайные же погрешности при данной обработке малы, и их можно не учитывать. Рассчитаем погрешность обработки по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_u \cdot n - (\Delta_T + \Delta_{p.б.}), \quad (Г.2)$$

где Δ_u – износ фрезы при обработке одной детали;

n – число деталей, обработанных с одной заточки фрезы;

Δ_T – увеличение диаметра фрезы из-за тепловых деформаций;

$\Delta_{p.б.}$ – радиальное биение фрезы.

Знак «минус» в формуле (Г.2) принят потому, что погрешность от износа фрезы уменьшает ширину многопериодной дорожки, а нагрев фрезы и ее радиальное биение увеличивают ширину многопериодной дорожки.

Износ фрезы определим по следующим формулам [34, 51]:

$$\Delta_u = \frac{2u_{0фр}L}{1000} ; \quad (\text{Г.3})$$

$$u_{0фр} = \left(1 + \frac{100}{B}\right)u_0 ; \quad (\text{Г.4})$$

$$L = \frac{\pi D l}{1000 S_0} , \quad (\text{Г.5})$$

где L – путь резания;
 $u_{0фр}$ – удельный износ при фрезеровании;
 u_0 – удельный износ при точении;
 B – ширина фрезерования;
 l – длина фрезерования;
 S_0 – подача на оборот;
 D – диаметр фрезы.

Длину фрезерования l определим следующим образом. Разобьем периодическую кривую многопериодной дорожки, по которой будет перемещаться ось фрезы на большое число дуг с равным угловым шагом. Соединив концы этих дуг, получим отрезки (хорды). Если принять большое число таких отрезков по всей периодической кривой и их сложить, то с заданной небольшой погрешностью можно получить длину дуги многопериодной кривой, которая и будет длиной фрезерования. Длина дуги периодической кривой была получена с помощью ЭВМ. При этом кривая была разбита на такое количество хорд, что каждой хорде соответствовал угол, равный одной угловой секунде. При этом погрешность расчета длины дуги периодической кривой составила не более 0,001 мм.

Таким образом, путь резания можно определить по следующим формулам:

$$d = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} ; \quad (\text{Г.6})$$

$$l = \sum_{i=1}^n ((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2) , \quad (\text{Г.7})$$

где d – длина хорд, полученных разбиением периодической кривой;

$x_i, x_{i-1}, y_i, y_{i-1}$ – координаты начала и конца каждой хорды периодической кривой;

n – число хорд.

Приняв допустимую погрешность $\Delta_{\Sigma\delta on}$ обработки, равную допуску на ширину многопериодной дорожки 0,058 мм из формулы (Г.2), найдем число деталей, которые можно обработать с одной заточки фрезы:

$$n = \frac{\Delta_{\Sigma\delta on} + \Delta_T + \Delta_{p.б.}}{\Delta_u} . \quad (\text{Г.8})$$

Подставим числовые значения в формулы (Г.3)–(Г.5), (Г.8):

$$L = \frac{\pi \cdot 8 \cdot 664,059}{1000 \cdot 0,08} = 208,620 \approx 208,6 \text{ м};$$

$$u_{0фр} = \left(1 + \frac{100}{8}\right) \cdot 7 = 94,5 \text{ мкм};$$

$$\Delta_u = \frac{2 \cdot 94,5 \cdot 208,620}{1000} = 39,4 \text{ мкм};$$

$$n = \frac{58 + 15 + 20}{39,4} = 2,4 \approx 2 \text{ детали.}$$

Значения $\Delta_T = 15$ мкм и $\Delta_{p.б.} = 20$ мкм приняты из [34].

Таким образом, установленный допуск 0,058 мм на ширину многопериодной дорожки обеспечивается. При этом за одну настройку можно обработать две детали.

Г.1.2 Обеспечение точности обработки многопериодной дорожки (параметр погрешность обработки многопериодной дорожки F_c , см. таблицу 6.1)

Определим суммарную погрешность обработки при фрезеровании многопериодной дорожки, учитывая влияние элементарных погрешностей контурной обработки на фрезерных станках с ЧПУ с наиболее распространенными системами ЧПУ замкнутого типа, у которых обратной связью охвачен привод станка (погрешность привода станка $\delta_{np} = 0$) [34]. Суммарная погрешность обработки на этих станках включает следующие погрешности:

δ_n – погрешность механизма подачи станка;

δ_{zc} – погрешность от геометрических неточностей станка;

δ_{yc} – погрешность от упругих деформаций станка;

δ_{yu} – погрешность от упругих деформаций инструмента;

$\delta_{инт}$ – погрешность интерполяции;

$\delta_{анр}$ – погрешность программирования.

Согласно [34], $\delta_n = 60$ мкм, $\delta_{zc} = 20$ мкм, $\delta_{yc} = 20$ мкм, $\delta_{yu} = 20$ мкм, $\delta_{инт} = 15$ мкм, $\delta_{анр} = 15$ мкм.

Тогда суммарная погрешность обработки с учетом погрешностей $\Delta_u = 39,4$ мкм и $\Delta_T = 15$ мкм

$$\begin{aligned} \delta_{\Sigma} &= 1,2 \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{zc}^2 + \delta_{yc}^2 + \delta_{yu}^2 + \delta_{инт}^2 + \delta_{анр}^2} + |\Delta_u - \Delta_T| = \\ &= 1,2 \sqrt{60^2 + 20^2 + 20^2 + 20^2 + 15^2 + 15^2} + |39,4 - 15| = 111,35 \text{ мкм.} \quad (\text{Г.9}) \end{aligned}$$

Рассчитанная погрешность в угловых минутах, приведенная к радиусу средней окружности $R_{cp} = 60$ мм, составляет 6,38 угл. мин. На эту погрешность для 8-й степени точности установлен допуск $F_c = 8$ угл. мин.

При изготовлении деталей с многопериодными дорожками по 8-й степени точности многопериодные дорожки не шлифуются, поэтому при расчете параметра F_c необходимо учитывать погрешность коробления диска после термообработки. Как показывают экспериментальные исследования, погрешность коробления после термообработки может быть небольшой, если правильно выбрана технология термообработки, например закалка дисков в пакетах или штампах, и сопоставима с другими погрешностями, входящими в формулу (Г.9), поэтому принимаем, что точность параметра F_c обеспечивается.

Г.1.3 Расчет допуска на размер между центральным отверстием диска и впадинами многопериодной дорожки

Допуск на размер между центральным отверстием диска и впадинами многопериодной дорожки не является нормируемым параметром точности. Однако этот размер удобно контролировать при косвенной оценке параметра F_r (смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали) и параметра F_c (погрешность обработки многопериодной дорожки). Определим допуск на этот размер. Он включает в себя комплексную погрешность, связанную с обработкой многопериодной дорожки диска и смещением средней окружности многопериодной дорож-

ки относительно оси отверстия диска. Погрешность обработки найдем по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{2\Delta\varepsilon_y^2 + \Delta_{ov}^2 + \Delta_{Fc}^2}, \quad (\text{Г.10})$$

где $\Delta\varepsilon_y$ – погрешность базирования диска в приспособлении при обработке центрального отверстия;

Δ_{ov} – овальность центрального отверстия диска.

Погрешность $\Delta\varepsilon_y = F_r = 25$ мкм. На эту погрешность установлен допуск согласно таблице 6.1. Овальность центрального отверстия $\Delta_{ov} = 0,6Td$, где Td – допуск на диаметр отверстия $\varnothing 84\text{H}7(^{+0,035})$. Тогда погрешность на размер между отверстием диска и впадинами многопериодной дорожки

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{50^2 + 21^2 + 140^2} = 180 \text{ мкм.}$$

Принимаем допуск на этот размер равным $\pm 0,1$ мм (размер и допуск $(4 \pm 0,1)$ указаны на чертеже диска (см. рисунок Д.1)).

Г.1.4 Обеспечение допуска перпендикулярности рабочей поверхности многопериодной дорожки относительно базового торца (параметр f_n , см. таблицу 6.1)

Отклонение от перпендикулярности рабочей поверхности многопериодной дорожки относительно базового торца рассчитаем по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{\Delta_{\phi 1} + \Delta_{nrc} + \Delta_{\phi 2} + \Delta_T + \Delta_{\zeta c}}, \quad (\text{Г.11})$$

где $\Delta_{\phi 1}$ – погрешность формы базового торца диска перед фрезерованием многопериодной дорожки;

Δ_{nrc} – погрешность приспособления при фрезеровании многопериодной дорожки;

$\Delta_{\phi 2}$ – погрешность формы второго торца диска при шлифовании базового торца после термообработки;

Δ_T – погрешности, вызванные температурными деформациями станка (наклон шпиндельной бабки);

$\Delta_{\zeta c}$ – геометрические погрешности станка (отклонение от перпендикулярности оси вращения шпинделя, рабочей поверхности стола).

Элементарные погрешности определены в соответствии с [34, 48, 49]. Подставив численные значения этих погрешностей в формулу (Г.11), определим суммарную погрешность обработки:

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{16+10+10+15+16} = 36,7 \text{ мкм.}$$

На параметр f_n установлен допуск 40 мкм (см. таблицу 6.1). Так как $36,7 < 40$, то точность параметра f_n обеспечивается.

Технологические допуски на размеры в зависимости от видов их обработки (обработка наружной цилиндрической поверхности, обработка отверстий и торцов) представлены в справочной литературе. Поэтому для дисков с многопериодными дорожками специальных расчетов по обеспечению точности обработки других поверхностей не требуется.

Г.2 Расчет точности обработки на отдельных операциях и разработка технологического маршрута изготовления дисков-сепараторов

Г.2.1 Обеспечение допуска симметричности пазов дисков-сепараторов относительно их осей симметрии (параметр f_{rs} , см. таблицу 6.1)

Типовой технологический маршрут изготовления дисков-сепараторов представлен в таблице Г.2. Чертеж детали представлен на рисунке Д.2.

Таблица Г.2 – Технологический маршрут обработки диска-сепаратора

Название операции	Содержание операции
Заготовительная	Заготовка – прокат. Резка заготовок
Токарная	Черновая обработка наружной поверхности, черновая и чистовая обработка центральных отверстий и торцов с припуском под шлифование
Шлифовальная	Предварительное шлифование двух торцов с припуском под чистовое шлифование
Сверлильно-фрезерная с ЧПУ	Фрезерование пазов диска, сверление отверстий, сверление и развертывание отверстий под штифты с установкой диска в приспособление по торцу и наружной цилиндрической поверхности
Термическая	Закалка и отпуск
Шлифовальная	Окончательное шлифование двух торцов
Шлифовальная	Шлифование центрального отверстия с базированием диска по отверстиям под штифты

Обработку пазов и отверстий диска под штифты и болты целесообразно проводить (с целью уменьшения погрешностей их взаимного расположения) на станках с ЧПУ. Тогда фрезерование пазов, сверление и развертывание отверстий можно выполнять за одну установку детали и на одном станке. При этом будет обеспечена более высокая точность взаимного расположения пазов и отверстий диска, чем при их обработке на разных станках.

Отклонение от симметричности пазов дисков-сепараторов состоит из погрешностей, которые проявляются при обработке на станке, и погрешности базирования на последующей шлифовальной операции.

Суммарную погрешность обработки определим по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{\Delta_{\delta}^2 + \Delta_n^2 + \Delta_{гс}^2 + \Delta_{ус}^2 + \Delta_{уи}^2 + \Delta_{инт}^2 + \Delta_{анр}^2 + \Delta_{ноз}^2 + \Delta_{\phi}^2}, \quad (\text{Г.12})$$

где Δ_{δ} – погрешность базирования диска при шлифовании центрального отверстия;

Δ_n – погрешность настройки;

$\Delta_{гс}$ – погрешность от геометрических неточностей станка;

$\Delta_{ус}$ – погрешность от упругих деформаций станка;

$\Delta_{уи}$ – погрешность от упругих деформаций инструмента;

$\Delta_{инт}$ – погрешность интерполяции;

$\Delta_{анр}$ – погрешность программирования;

$\Delta_{ноз}$ – погрешность позиционирования;

Δ_{ϕ} – погрешность фиксации револьверной головки.

Погрешность базирования Δ_{δ} равна зазору при базировании диска-сепаратора по отверстиям под штифты (ØH7/h6) на шлифовальной операции. Погрешность настройки Δ_n равна погрешности, равной цене деления индикатора при настройке (привязке) с помощью центроискателя. Остальные погрешности определяются по [34]. Если используются станки типа обрабатывающий центр (ОЦ), имеющие высокую точность (В), то погрешности $\Delta_{гс}$, $\Delta_{ус}$ в формуле (Г.12) нужно умножить на коэффициент 0,6.

Подставим эти погрешности в формулу (Г.12) и рассчитаем суммарную погрешность обработки:

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{12^2 + 10^2 + 12^2 + 12^2 + 10^2 + 35^2 + 15^2 + 15^2 + 7^2} = 58 \text{ мкм}.$$

В соответствии с таблицей 6.1 на отклонение от симметричности пазов дисков-сепараторов относительно их осей симметрии установлен допуск $f_{rs} = 100$ мкм, который также учитывает коробление диска после термообработки.

Г.2.2 Обеспечение точности ширины пазов 8,2Н10_(-0,058) (параметр j_{\max})

Длина фрезерования пазов l определяется следующим образом:

$$l = l_1 n, \quad (\text{Г.13})$$

где l_1 – длина фрезерования одного паза;
 n – число пазов диска-сепаратора.

Длина фрезерования для рассматриваемого случая

$$l = 22 \cdot 14 = 308 \text{ мм.}$$

Расчет точности ширины пазов диска-сепаратора проводится по формулам (Г.2)–(Г.5), (Г.8).

Износ фрезы при фрезеровании одного диска $u = 18,3$ мкм. Число деталей, обработанных до переточки фрезы, $N = 5$ деталей.

Таким образом, точность выполнения размера 8,2Н10_(-0,058) обеспечивается. При этом до переточки фрезы можно обработать пять дисков.

Г.2.3 Обеспечение позиционного допуска осей отверстий под штифты (параметр f_{rs})

Позиционное отклонение отверстий под штифты дисков-сепараторов рассчитаем по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\delta} + \Delta_n + \Delta_{zc} + \Delta_{yc} + \Delta_{nc} + \Delta_{инт} + \Delta_{ноз} + \Delta_{\phi}}, \quad (\text{Г.14})$$

где Δ_{nc} – перекося сверла из-за отклонения от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости стола станка.

Погрешности в формуле (Г.14) определены в соответствии со справочной литературой [34, 48]. Подставим эти погрешности в формулу (Г.14).

Тогда

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{12^2 + 10^2 + 12^2 + 12^2 + 15^2 + 15^2 + 15^2 + 7^2} = 42,5 \text{ мкм.}$$

На позиционное отклонение осей отверстий под штифты диска-сепаратора по таблице 6.1 установлен допуск, равный 100 мкм, учитывающий коробление диска после термообработки.

Г.3 Расчет точности обработки на отдельных операциях деталей зацепления ведущего звена

Г.3.1 Обеспечение точности размера $10 \pm 0,02$ при обработке отверстия эксцентрика $\varnothing 15H7$ на сверлильном станке с ЧПУ

Эта погрешность является составляющей погрешности эксцентриситета ведущего звена (параметр f_e).

Суммарную погрешность обработки размера $10 \pm 0,02$ определим по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_{ст}^2 + \Delta_{смещ}^2 + \Delta_{пер}^2 + \Delta_{\phi}^2}, \quad (\text{Г.15})$$

где $\Delta_{ст}$ – суммарная погрешность геометрических неточностей станка и позиционирования, влияющая на точность межосевого расстояния при сверлении отверстий на станках с ЧПУ [34];

$\Delta_{смещ}$ – смещение оси режущего инструмента в результате его радиального биения;

$\Delta_{пер}$ – перекос режущего инструмента из-за отклонения от перпендикулярности оси вращения шпинделя к рабочей поверхности стола.

Подставим числовые значения в формулу (Г.15) и вычислим

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{10^2 + 25^2 + 10^2 + 15^2 + 7^2} = 39,78 \text{ мкм}.$$

Так как $40 > 39,78$, то точность размера $10 \pm 0,02$ обеспечивается.

Г.3.2 Обеспечение точности диаметра сателлитов-роликов $\varnothing 8H7_{(-0,015)}$ (параметр f_d)

Суммарную погрешность обработки рассчитаем по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = 1,2\sqrt{\Delta_y + \Delta_n + \Delta_{зст} + \Delta_{суст}}, \quad (\text{Г.16})$$

где $\Delta_{суст}$ – систематическая погрешность, вызванная износом шлифовальных кругов.

Систематическую погрешность определим по формуле

$$\Delta_{суст} = \Delta'_{суст}n, \quad (\text{Г.17})$$

где $\Delta'_{сист}$ – износ шлифовальных кругов при обработке одной детали;
 n – число деталей, обработанных с одной настройки.

Погрешность $\Delta'_{сист}$ найдем по формулам (Г.3)–(Г.5), $\Delta'_{сист} = 0,014$ мкм. Остальные погрешности определены в соответствии с [34, 48].

Число деталей n , обработанных при одной настройке с учетом формулы (Г.17), рассчитаем по формуле

$$n = \frac{\Delta_{\Sigma доп} - 1,2\sqrt{\Delta_{ус} + \Delta_n + \Delta_{zc}}}{\Delta'_{сист}} = \frac{15 - 1,2\sqrt{5,1^2 + 2^2 + 1,3^2}}{0,014} = 588. \quad (\text{Г.18})$$

Расчеты точности на остальные показатели точности, представленные в таблице 6.1, не требуются, т. к. эти показатели либо являются составляющими от рассчитанных выше, либо их обеспечение осуществляется типовыми видами обработки.

Г.4 Рекомендации по изготовлению и сборке деталей роликового зацепления для обеспечения заданной точности передачи

Исследование погрешностей планетарных роликовых передач, а также разработка технологических маршрутов изготовления деталей зацепления и расчеты их точности обработки позволяют дать некоторые рекомендации по изготовлению и сборке роликовых передач.

Наибольшее влияние на кинематическую погрешность роликовой передачи оказывают погрешности изготовления деталей с многопериодными дорожками. При их изготовлении по установленной 8-й степени точности экономически целесообразным является черновое и чистовое фрезерование дорожки на станках с ЧПУ. Черновое фрезерование выполняется фрезой, у которой диаметр меньше на величину припуска под чистовое фрезерование. Такая обработка на станках повышенной точности с замкнутыми системами ЧПУ обеспечивает погрешность обработки F_c не более 8 угл. мин для дисков с различным числом периодов. Для степеней точности 7 и выше можно использовать станки более высокой точности и шлифование многопериодной дорожки с базированием дисков по шлифованному отверстию. При шлифовании многопериодной дорожки могут использоваться координатные станки с ЧПУ или фрезерные станки с ЧПУ, оснащенные шпиндельной головкой с отдельным приводом.

Техпроцесс изготовления дисков с многопериодными дорожками предусматривает при шлифовании центрального отверстия после термообработки для уменьшения радиального смещения многопериодной дорожки относительно оси вращения отверстия диска принимать за технологические

базы рабочие поверхности многопериодной дорожки. При этом может использоваться специальное приспособление, в котором диск базируется по торцу, расположенному со стороны дорожки, и по рабочим поверхностям дорожки на ролики, расположенные на средней окружности.

После термообработки происходит коробление диска с многопериодной дорожкой в плоскости, перпендикулярной его оси. Уменьшить коробление при закалке можно путем использования либо жестких обкладок, либо путем сборки дисков в пакеты, либо применяя закалку ТВЧ.

Как показали расчеты точности обработки дисков с многопериодными дорожками (см. раздел Г.3), износ фрезы может значительно влиять на точность обработки дорожки. Используя при обработке дорожки несколько фрез, каждая из которых может обрабатывать лишь часть дорожки, можно уменьшить влияние износа фрезы. При этом смену фрез целесообразно производить в вершинах или впадинах дорожки там, где не передается нагрузка.

При изготовлении дисков-сепараторов для 8-й степени точности и грубее пазы не шлифуются. При этом закалка дисков производится по той же технологии, что и закалка дисков с многопериодными дорожками. Для степеней точности 7 и выше необходимо шлифовать пазы дисков-сепараторов с базированием дисков по шлифованному отверстию.

Изготовление роликов-сателлитов, колец ведущего звена, эксцентрика, а также ведущего и ведомого валов и других деталей роликовых передач не требует отдельного рассмотрения, т. к. при обработке этих деталей используются типовые виды обработки.

На точность планетарных роликовых передач, кроме того, влияют и погрешности сборки. Уменьшить в передаче накопленную погрешность шага многопериодной дорожки можно при расположении двух неподвижных дисков с многопериодными дорожками таким образом, чтобы наибольшие значения накопленных погрешностей для каждого из них находились в противофазе. В этом случае общий эксцентриситет двух дисков значительно уменьшится, а также частично уменьшатся и тангенциальные погрешности дорожки.

При сборке планетарных роликовых передач необходимо учитывать влияние несоосности ведущего и ведомого валов, которое проявляется в колебании величин амплитуд гармонических составляющих кинематической погрешности передачи с первым номером и номером, равным передаточному отношению передачи. Первая гармоника определяется смещением оси вращения ведомого вала относительно средней окружности многопериодной дорожки, а гармоника с номером, равным передаточному отношению, – смещением оси ведущего вала. При отсутствии отклонения от соосности ведущего и ведомого валов в собранной передаче эти погрешности будут

равны. Однако и при равенстве этих погрешностей наибольшее значение будет иметь первая гармоника. Если же имеет место несоосность ведущего и ведомого валов, то величина амплитуды гармоники с номером, равным передаточному отношению, может быть больше величины амплитуды первой гармоники. Рассмотрим эти положения более подробно.

На рисунке Г.1 погрешности δ_1 и δ_2 равны, т. к. отклонение от соосности валов отсутствует. На рисунке Г.2 показано такое расположение осей валов и средней окружности, при котором погрешность смещения оси ведущего вала δ_2 больше погрешности смещения оси ведомого вала δ_1 на величину δ_3 несоосности валов.



Рисунок Г.1 – Схема расположения осей деталей передачи

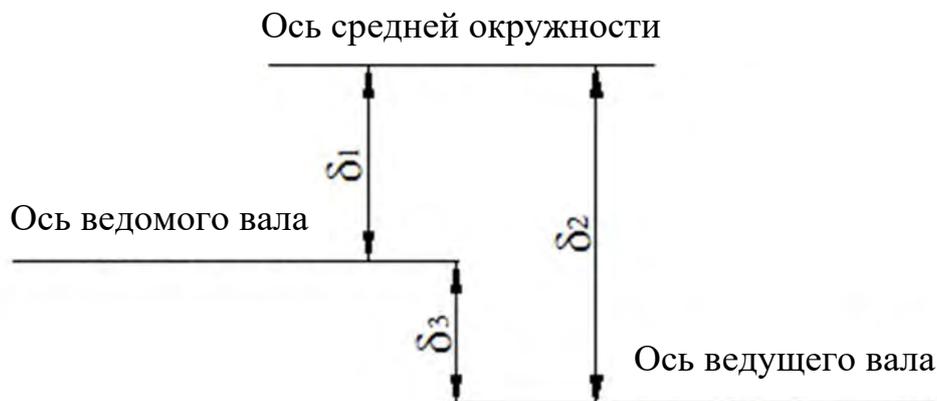


Рисунок Г.2 – Схема расположения осей деталей передачи со смещением

При таком расположении осей амплитуда гармоники с номером, равным передаточному отношению, может быть больше амплитуды первой гармоники, что приведет к ухудшению плавности работы передачи. В связи с этим при высоких требованиях к плавности работы необходимо добиваться минимального отклонения от соосности ведущего и ведомого валов.

Наибольшая кинематическая погрешность планетарных роликовых симметрично нагруженных передач для 8-й степени точности и передаточного отношения $u = 14$ соответствует значениям наибольших кинематических погрешностей цилиндрических зубчатых передач той же точности и с тем же передаточным отношением. При одинаковых передаточных отношениях планетарных роликовых и цилиндрических зубчатых передач последние будут двух- или трехступенчатыми (в зависимости от передаточного отношения), и поэтому на точность зубчатой передачи будут влиять погрешности всех ее ступеней. В этом случае планетарная роликовая передача может и превосходить по точности зубчатые передачи.

Приложение Е (рекомендуемое)

Компьютерные программы для расчета влияния элементарных геометрических погрешностей деталей на кинематическую погрешность планетарных передач с телами качения торцового типа

Option Explicit

Sub ПогрАмплЭксцРадОкр_ТаблДан()

' ПогрВходЗвена_АмплЭксц_РадОкр Макрос

' Погрешности эксцентриситета эксцентрика и радиуса средней окружности

Dim R As Single

Dim R1 As Single

Dim A As Single

Dim A1 As Single

Dim z2 As Integer

Dim alfa As Single

Dim del_alfa As Single

Dim fi As Single

Dim del-fi As Single

Dim betta As Single

Dim del_betta As Single

Dim ro1 As Single

Dim ro2 As Single

Dim del_ro As Single

Dim x As Single

Dim y As Single

Dim u As Single

Dim I As Integer

Dim K As Single

Dim fi_grad As Single

Dim betta_grad As Single

Dim x2 As Single

Dim y2 As Single

Dim betta_nom As Single

Dim alfa_5
 Dim t
 Dim gamma
 Dim M
 Dim E
 Dim W
 Dim pi

pi = 4 * Atn(1)

R = 60 'ввести радиус средней окружности многопериодной кривой

R1 = 60.05 'ввести радиус средней окружности однопериодной кривой

A = 10 'ввести амплитуду многопериодной кривой

A1 = 10 'ввести амплитуду однопериодной кривой

z2 = 13

u = 14

alfa = 0

betta = 0

del_beta = 10 / 3600 * pi / 180 '10 угл. секунд

del_fi = 10 / 3600 * pi / 180 '10 угл. секунд

t = 3 'число точек между вершинами многопериодной кривой

gamma = 180 / z2 'угол половины периода

M = gamma / t 'деление половины периода на t частей

E = M / 2

W = M - E 'смещение к вершине кривой

alfa = (E - M) * u 'начальное значение угла поворота ведущей дорожки

del_alfa = M * u

'N=t*z2*2 число поворотов вых. звена

For K = 1 To 78 'счетчик углов ведущей дорожки

alfa = alfa + del_alfa 'угол поворота ведущей дорожки

betta = (alfa / u - 0.5) * pi / 180 'угол поворота вых. звена

fi = (alfa / u - 0.5 - alfa) * pi / 180 'углы в окрестности пересечения кривых

alfa = alfa * pi / 180

For I = 1 To 360 'счетчик углов в окрестности пересечения кривых

fi = fi + del_fi

betta = betta + del_beta

```

x = (((R1 ^ 2 - A1 ^ 2 * (Sin(fi)) ^ 2) ^ 0.5 + A1 * Cos(fi)) * Cos(fi)) * Cos(alfa)
- (((R1 ^ 2 - A1 ^ 2 * (Sin(fi)) ^ 2) ^ 0.5 + A1 * Cos(fi)) * Sin(fi)) * Sin(alfa)
y = (((R1 ^ 2 - A1 ^ 2 * (Sin(fi)) ^ 2) ^ 0.5 + A1 * Cos(fi)) * Cos(fi)) * Sin(alfa)
+ (((R1 ^ 2 - A1 ^ 2 * (Sin(fi)) ^ 2) ^ 0.5 + A1 * Cos(fi)) * Sin(fi)) * Cos(alfa)
ro1 = (x ^ 2 + y ^ 2) ^ 0.5
ro2 = (R ^ 2 - A ^ 2 * (Sin(z2 * betta)) ^ 2) ^ 0.5 + A * Cos(z2 * betta)
x2 = ((R ^ 2 - A ^ 2 * (Sin(z2 * betta)) ^ 2) ^ 0.5 + A * Cos(z2 * betta)) *
Cos(betta)
y2 = ((R ^ 2 - A ^ 2 * (Sin(z2 * betta)) ^ 2) ^ 0.5 + A * Cos(z2 * betta)) * Sin(betta)
del_ro = ro2 - ro1      'разность радиус-векторов кривых
fi_grad = fi * 180 / pi
betta_grad = betta * 180 / pi

```

```

Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 0 + K).Value = del_ro
Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 80 + K).Value = betta_grad
Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 170 + K).Value = x
Worksheets("Лист1").Cells(730 + I, 170 + K).Value = y
Worksheets("Лист1").Cells(1460 + I, 170 + K).Value = x2
Worksheets("Лист1").Cells(2200 + I, 170 + K).Value = y2

```

Next I

```

alfa_5 = alfa * 180 / pi
alfa = alfa_5
betta_nom = alfa / u
Worksheets("Лист1").Cells(367, 80 + K).Value = betta_nom

```

Next K

End Sub

Option Explicit

Sub ПогрАмплЭксцРадОкр_Кин()

'Кинематическая погрешность передачи от погрешностей эксцентриситета эксцентрика и радиуса средней окружности

```

Dim betta As Variant
Dim betta1 As Variant
Dim betta_nom As Variant
Dim del_ro As Variant

```

```

Dim del_ro1 As Variant
Dim del_ro_min As Variant
Dim pr As Variant
Dim Kin As Variant
Dim I As Variant
Dim K As Variant

```

```
With Sheets("Лист1")
```

```

del_ro = .Range("A4:BZ363").Value 'разность радиус-векторов
del_ro1 = .Range("A4:BZ363").Value 'разность радиус-векторов

```

```

beta = .Range("CC4:FB363").Value 'угол поворота вых. звена,
соответствующий радиус-вектору

```

```

beta1 = .Range("CC4:FB363").Value 'угол поворота вых. звена,
соответствующий радиус-вектору

```

```

beta_nom = .Range("CC367:FB367").Value 'номинальный угол поворота
вых. звена

```

```
End With
```

```
For K = 1 To 78 'счетчик столбцов
```

```
For I = 1 To 300 'счетчик строк
```

```

del_ro = Range("A3").Offset(0 + I, -1 + K) 'смещение по столбцу вниз, по
строке вправо

```

```
del_ro1 = Range("A3").Offset(1 + I, -1 + K) 'то же на ячейку ниже
```

```
beta = Range("CC3").Offset(0 + I, -1 + K)
```

```
beta1 = Range("CC3").Offset(1 + I, -1 + K)
```

```
beta_nom = Range("CC367").Offset(0, -1 + K)
```

```
pr = del_ro * del_ro1
```

```
If pr <= 0 Then
```

```
del_ro_min = del_ro1
```

```
Kin = beta1 - beta_nom 'кинематическая погрешность
```

```

Worksheets("Лист1").Cells(726, 2 + K).Value = del_ro_min 'пересечение
радиус-векторов

```

```
Worksheets("Лист1").Cells(727, 2 + K).Value = beta1
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(728, 2 + K).Value = beta_nom
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(729, 2 + K).Value = Kin
```

```
End If
```

Next I

Next K

End Sub

Option Explicit

Sub ПогрАмплЭксцРадОкр_МаксКин()

' ПогрАмплЭксцРадОкр_МаксКин Макрос

' Наибольшая кинематическая погрешность передачи от погрешностей эксцентриситета эксцентрика и радиуса средней окружности

Dim Kin As Variant

Dim Kin_max As Variant

Dim Kin_min As Variant

Dim del_Kin_grad As Variant

Dim del_Kin_мин As Variant

Dim I As Variant

With Sheets("Лист1")

 Kin = .Range("C729:DD729").Value 'кинематическая погрешность
End With

Kin_max = -5

Kin_min = 5

For I = 1 To 78

 Kin = Range("B729").Offset(0, 0 + I) 'смещение на один столбец вправо

If Kin > Kin_max Then

 Kin_max = Kin

End If

If Kin < Kin_min Then

 Kin_min = Kin

End If

Next I

```
del_Kin_grad = Kin_max - Kin_min
del_Kin_мин = del_Kin_grad * 60
```

```
Worksheets("Лист1").Cells(731, 3).Value = Kin_max
Worksheets("Лист1").Cells(732, 3).Value = Kin_min
Worksheets("Лист1").Cells(733, 3).Value = del_Kin_grad 'наиб. кинем.
погрешность в градусах
Worksheets("Лист1").Cells(734, 3).Value = del_Kin_мин 'наиб. кинем.
погрешность в угл. минутах
```

```
End Sub
```

```
Option Explicit
```

```
Sub ПогрВыхЗвена_СмещОси()
```

```
' ПогрВыхЗвена_СмещОси Макрос
```

```
' Погрешность углов поворота вых. звена от смещения оси вых. вала
относительно средней окружности МД
```

```
Dim pi
```

```
Dim A
```

```
Dim R
```

```
Dim N
```

```
Dim c
```

```
Dim d
```

```
Dim b
```

```
Dim fi
```

```
Dim fi1
```

```
Dim del_fi
```

```
Dim x
```

```
Dim y
```

```
Dim x1
```

```
Dim y1
```

```
Dim tg
```

```
Dim F_rad
```

```
Dim F_grad
```

```
Dim I
```

```
Dim z2
```

```
Dim tg1
```

Dim betta

pi = 4 * Atn(1)

A = 10

R = 60

c = 0.0208 'ввести значение погрешности

z2 = 13 'ввести число периодов неподвижной дорожки

d = -0.01 'ввести значение d (d<c по модулю)

N = 90 'ввести число поворотов вых. звена (избегать углов 90 градусов)

b = -Sqr(c ^ 2 - d ^ 2)

fi = 0

del_fi = 2 * pi / N 'N-число поворотов

For I = 1 To N

fi = fi + del_fi

x = (Sqr(R ^ 2 - A ^ 2 * (Sin(z2 * fi)) ^ 2) + A * Cos(z2 * fi)) * Cos(fi)

y = (Sqr(R ^ 2 - A ^ 2 * (Sin(z2 * fi)) ^ 2) + A * Cos(z2 * fi)) * Sin(fi)

x1 = x - d

y1 = y - b

tg1 = y1 / x1

tg = y / x

fi1 = Atn(tg1) 'действительный угол поворота (сепаратора)

betta = Atn(tg) 'номинальный угол поворота (равный fi)

F_rad = fi1 - betta

F_grad = F_rad * 180 / pi

Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 1).Value = F_rad

Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 2).Value = F_grad

Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 3).Value = betta * 180 / pi

Worksheets("Лист1").Cells(3 + I, 4).Value = fi1 * 180 / pi

Next I

End Sub

Option Explicit

Sub ПогрВыхЗвена_МаксКинПогр()

' ПогрВыхЗвена_МаксКинПогр Макрос

' Определяет максимальную кинематическую погрешность вых. звена от смещения оси вых. вала относительно средней окружности МД

Dim Kin As Variant

Dim Kin_max As Variant

Dim Kin_min As Variant

Dim del_Kin_grad As Variant

Dim del_Kin_мин As Variant

Dim N

Dim I As Variant

With Sheets("Лист1")

 Kin = .Range("B4:B93").Value 'кинематическая погрешность

End With

Kin_max = -5

Kin_min = 5

N = 90 'ввести число значений кинематической погрешности (число поворотов вых. звена)

For I = 1 To N

 Kin = Range("B3").Offset(0 + I, 0) 'смещение на одну строку вниз

If Kin > Kin_max Then

 Kin_max = Kin

End If

If Kin < Kin_min Then

 Kin_min = Kin

End If

Next I

del_Kin_grad = Kin_max - Kin_min

del_Kin_мин = del_Kin_grad * 60

```
'Worksheets("Лист1").Cells(730, 3).Value = Kin_max  
'Worksheets("Лист1").Cells(731, 3).Value = Kin_min  
Worksheets("Лист1").Cells(18, 9).Value = del_Kin_grad  
'наиб.кинем.погрешность в градусах  
Worksheets("Лист1").Cells(19, 9).Value = del_Kin_мин 'наиб.кинем.  
погрешность в минутах
```

```
End Sub
```

Оглавление

Введение.....	3
1 Разработка методов оценки кинематических характеристик радиально-плунжерных передач в сборе на основе методов компьютерного моделирования.....	6
1.1 Объект и направление исследований.....	6
1.2 Влияние зазоров и погрешностей деталей зацепления на контакт сателлитов и кинематическую погрешность планетарной передачи.....	9
1.3 Исследование влияния динамических нагрузок на кинематическую погрешность планетарных радиально-плунжерных передач методами компьютерного моделирования.....	11
1.4 Статический анализ для расчета деформаций и напряжений в планетарной радиально-плунжерной передаче.....	21
1.5 Исследование КПД планетарной радиально-плунжерной передачи методами компьютерного моделирования.....	27
2 Разработка методов оценки точностных параметров радиально-плунжерных передач в сборе на основе спектрального анализа их кинематических характеристик.....	30
2.1 Объект и методика экспериментальной оценки точности планетарного радиально-плунжерного редуктора.....	30
2.2 Экспериментальные методы оценки кинематических погрешностей планетарных радиально-плунжерных передач.....	31
3 Разработка дифференцированных методов экспресс-анализа точностных параметров механических передач на основе использования технологий координатных измерений.....	40
3.1 Анализ современных методов контроля и оценки точности деталей сложной геометрической формы.....	40
3.2 Разработка методики контроля размеров, погрешностей формы и расположения поверхностей деталей зацепления планетарных передач с телами качения.....	51
3.3 Разработка методики измерений методом сканирования и оцифровки криволинейных поверхностей деталей с многопериодными дорожками с выводом координат опорных точек кривой в ASCII-файл.....	57

3.4 Разработка показателей точности для контроля деталей с многопериодными дорожками планетарных передач с телами качения.....	59
4 Разработка комплексных методов экспресс-анализа точностных параметров механических передач.....	73
4.1 Разработка средств и методов экспресс-анализа кинематических погрешностей механических передач в сборе.....	73
4.2 Экспериментальные исследования и сравнительная характеристика комплексных методов экспресс-анализа кинематических погрешностей механических передач.....	82
4.3 Экспериментальная оценка и экспресс-анализ кинематической точности и плавности работы планетарного редуктора.....	88
5 Разработка показателей точности и технологических допусков радиально-плунжерных передач с телами качения.....	92
5.1 Разработка показателей контроля точности деталей с многопериодными дорожками планетарных передач с телами качения.....	92
5.2 Разработка допусков на изготовление деталей с многопериодными дорожками и рекомендации по выбору методов и средств контроля передач.....	93
5.3 Разработка показателей кинематической точности и плавности работы планетарных радиально-плунжерных передач.....	95
5.4 Разработка допусков на показатели кинематической точности и плавности работы планетарных радиально-плунжерных передач.....	100
6 Система нормирования погрешностей изготовления для оценки точности планетарных роликовых передач.....	102
6.1 Особенности нормирования точности планетарных роликовых передач.....	102
6.2 Установление показателей точности для норм кинематической точности и плавности работы планетарных роликовых передач.....	105
6.3 Установление показателей точности для норм контакта и бокового зазора между роликами и другими деталями зацепления.....	110
6.4 Нормирование показателей точности для деталей роликового зацепления по базовой степени точности.....	112
6.5 Методика расчета кинематической погрешности планетарного роликового редуктора.....	118

6.6 Результаты нормирования показателей точности планетарных роликовых передач и рекомендации по их практическому использованию.....	127
6.7 Разработка комплексов контроля точности изготовления планетарных роликовых передач и деталей зацепления.....	129
Заключение.....	135
Список литературы.....	137
Приложение А. Компьютерная программа для расчета кинематических параметров передач с промежуточными телами качения.....	141
Приложение Б. Конструкция двухступенчатого планетарного радиально-плунжерного редуктора с $i = 49$.....	147
Приложение В. Конструкция одноступенчатого планетарного роликового редуктора с $u = 14$.....	148
Приложение Г. Технологическое обеспечение точности планетарных роликовых передач	150
Приложение Д. Чертежи деталей зацепления планетарной роликовой передачи с $u = 14$.....	164
Приложение Е. Компьютерные программы для расчета влияния элементарных геометрических погрешностей деталей на кинематическую погрешность планетарных передач с телами качения торцового типа	165

Научное издание

Капитонов Александр Валентинович

ТОЧНОСТЬ И КОНТРОЛЬ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Редакторы *Т. А. Рыжикова, А. А. Подошевка*

Художественное оформление обложки *В. П. Бабичева*

Компьютерный дизайн *Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 23.12.2021. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 11,06. Тираж 100 экз. Заказ № 925.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.