А. В. Попов, И. В. Нотов, А. А. Рожнов

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКА СФЕРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗУЮЩЕГО
МЕХАНИЗМА РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ИСПОЛНЕНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: apopov34@rambler.ru

В статье проводится сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния элементов сферических преобразующих механизмов, работающих в различных конструктивных исполнениях. При проведении анализа действующих напряжений были разработаны расчетные схемы действующих сил, смоделировано напряженно-деформированное состояние элементов сферического преобразующего механизма в динамике. Для полученных результатов проведенного теоретического исследования разработаны рекомендации по повышению надежности и прочности, при условии использования данного механизма в составе различных типов привода.

Ключевые слова: сферический механизм, бесступенчатый привод, импульсный вариатор.

A. V. Popov, I. V. Notov, A. A. Rozhnov

**COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF BEARING
OF SPHERICAL TRANSFORMING MECHANISM OF VARIOUS STRUCTURES**

Volgograd State Technical University

The article presents a comparative analysis of the stress-strain state of the elements of a spherical transforming mechanisms operating in various structural versions. During the analysis of the acting stresses, the calculation schemes of the acting forces were developed, the stress-strain state of the elements of the spherical transforming mechanism in dynamics was modeled. For the obtained results of the theoretical study, recommendations were developed to improve the reliability and strength, provided that this mechanism is used as part of various types of drive.

Keywords: spherical mechanism, stepless drive, pulse variator.

Актуальной проблемой современного машиностроения, является повышение прочности и надежности существующих механизмов. Для этих целей могут использоваться различные подходы и методы. Для современных бесступенчатых передач, которые в основном используют силу трения при передаче полезной мощности от двигателя к движителю, применение новых материалов для изготовления ответственных частей механизма, совершенствование конструкций и т. д., не дало существенных результатов. Поэтому проблема по передаче больших мощностей при помощи механических приводов с регулированием параметров преобразования движения на ходу и под нагрузкой остается актуальной. Одним из подходов к решению данной проблемы может быть, применение нефрикционного типа передач способных обеспечить бесступенчатое регулирование при сохранении показателей надежности.

Одним из технических решений можно считать импульсный вариатор с генератором механических колебаний на основе сферического преобразующего механизма. Ранее авторами были рассмотрены вопросы, связанные с применением данного типа передачи в составе

транспортных средств малой мощности различного назначения [1, 2], а также проведен анализ напряженно-деформированного состояния различных элементов сферического преобразующего механизма и даны рекомендации по их проектированию [3, 4, 5, 6, 7].

Поскольку применение одного преобразующего сферического механизма в составе привода транспортного средства с колесной формулой 4×4 не способно обеспечить требуемую равномерность вращения выходных валов при реализации на диапазоне передаточных чисел в области малых значений, поэтому была предложена конструктивная схема с двумя механизмами [1, 2], обеспечивающая передачу мощности на все ведущие колеса. Это потребовало проведения дополнительных теоретических исследований напряженно-деформированного состояния элементов. Сравнение смоделированных конструкций работающего одного механизма и соединенных по параллельной схеме двух механизмов (рис. 1) показали сопоставимые значения деформаций основных элементов (внутреннего и промежуточного шарниров, цапф выходных звеньев и т. д.) за исключением подшипника качения, являющегося неотъемлемой их частью.

Рис. 1. Привод с параллельным соединением преобразующих механизмов:
1 – ведущий вал; 2 – механизмы изменения угла наклона внутреннего кольца;
3 – опоры; 4 – сферические преобразующие механизмы

В ранее проведенных исследованиях описывались напряжения, возникающие при статическом нагружении механизмов. Для анализа и сравнения этого оказалось недостаточно. Развитием исследований вызвана необходимость рассмотрения изменений нагрузок на элементы в процессе работы. Для определения наиболее нагруженных элементов механизмов были использованы программные возможности среды автоматизированного проектирования и конструирования *Autodesk Inventor*. Данный этап потребовал переработки созданных виртуальных

моделей. Для возможности сравнения результатов, моделирование проводилось с использованием динамических моделей механизмов. Это позволило провести анализ действующих сил и напряжений в произвольный момент времени и для различных положений звеньев.

При моделировании к ведущему валу был приложен крутящий момент 50 Н·м, а все шарнирные элементы также были заменены на соответствующие сопряжения с одной вращательной подвижностью. Рассмотрение изменений деформаций звеньев механизмов и внут-

ренных напряжений в шарнирных элементах во времени, главным образом, совпало с максимальными значениями статического нагружения и ранее полученными результатами. Однако, ввиду изменения величины и направления деформаций ведущего вала при использовании параллельно соединенных сферических механизмов, работающих в противофазах, нагрузки на подшипник заметно увеличились.

а

б

Рис. 2. Напряжения в подшипнике качения с одним (а) и с двумя (б) сферическими механизмами

Одной из причин увеличения нагрузок на рассматриваемые детали механизмов можно считать повышенное сопротивление вращению вала, поскольку, в некоторые моменты времени происходит передача полезной мощности сразу в двух направлениях без разъединения потока, т. е. перекрытие рабочих циклов. При этом, в динамических моделях, для более полной картины, должны также учитываться направления, амплитуды изменений и периоды работы механизмов, в которые происходит передача мощности. На данном этапе данная задача не решена, поскольку конструктивная схема позволяет реализовывать различные варианты управления и работы привода в целом.

Для выбора подшипника качения использовались ранее сформулированные рекомендации на основе силового анализа нагрузок и их особенности при использовании в составе сферических механизмов [5]. Как показало динамическое моделирование напряженно-деформированного состояния подшипников для двух параллельно работающих механизмов, их выбор по динамической грузоподъемности следует проводить с не менее чем двухкратным запасом по радиальным и осевым составляющим нагрузок.

Данное исследование позволило смоделировать и проанализировать деформации эле-

На рис. 2 приведены результаты распределения напряжений в подшипнике при динамическом моделировании приводов с одним (а) и двумя (б) сферическими механизмами. При прочих равных условиях, а именно крутящий момент, размеры и характеристики материалов звеньев, действующие напряжения на подшипник механизма при схеме с двумя механизмами оказались в крайних положениях в два раза больше.

ментов при динамическом моделировании преобразующих сферических механизмов работающих как отдельно, так и в параллельной схеме. Также удалось сравнить результаты ранее проведенных исследований при статическом нагружении с полученными данными при динамическом моделировании работы сферических механизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, А. В. Адаптация трансмиссии на основе регулируемого привода со сферическими механизмами для мототехники / А. В. Попов, А. А. Рожнов, И. В. Нотов // Инновационная наука. – 2020. – № 12. – С. 45–48.
2. Пат. 2586430 Российская Федерация, МПК В60К17/34, В60К23/08. Привод колес транспортного средства с передним и задним ведущими мостами / Ан. В. Попов, И. В. Нотов; ВолгГТУ. – 2016.
3. Попов, А. В. Анализ напряженно-деформированного состояния ведущего вала сферического преобразующего механизма / А. В. Попов, И. В. Нотов, А. А. Рожнов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (245) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 39–41.
4. Попов, А. В. Исследование распределения напряжений в шарнирном элементе ведущего кольца сферического преобразующего механизма / А. В. Попов, А. А. Рожнов, И. В. Нотов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (239) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 28–30.

5. *Попов, А. В.* Особенности выбора подшипника качения для сферического преобразующего механизма / А. В. Попов, И. В. Нотов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (237) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 52–54.

6. *Попов, А. В.* Выбор конструкции и особенности напряженно-деформированного состояния шарнирных элементов преобразующего сферического механизма / А. В. Попов, И. В. Нотов // Известия ВолгГТУ : научный

журнал № 10 (233) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 62–64.

7. *Попов, А. В.* Моделирование и анализ деформаций звеньев сферического преобразующего механизма с двумя степенями свободы / А. В. Попов, И. В. Нотов, А. А. Рожнов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (213) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 82–84.