

10. Шульц В. В. и др. Геометрическая оптимизация по износу цилиндрических червячных передач // Вестн. машиностроения. – 1985. – № 9. – С. 28–33.

11. ГОСТ 9369-77. Передачи глобоидные. Основные параметры. – Введ. 01.01.1979. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.

12. ГОСТ 17696-89. Передачи глобоидные. Расчет геометрии. – Введ. 01.07.1991. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 18 с.

13. ГОСТ 24438-80. Передачи глобоидные. Параметры исходного глобоидного червяка. – Введ. 01.01.1982. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.

УДК 621.822

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВРАЩЕНИЯ МЕЖДУ ВАЛАМИ

**Канд. техн. наук, доцент К.В. Сашко¹⁾, канд. техн. наук, доцент
В.Н.Основин²⁾**

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),
sashko.k.v@bntu.by

²⁾Белорусский аграрный технический университет

Аннотация. В статье рассматриваются конструктивные особенности и принципы действия модернизированных соединительных муфт. Проведён анализ современных тенденций проектирования муфт, включая цифровизацию, адаптивные конструкции и применение композитных материалов. Предложенные технические решения позволяют повысить надёжность, технологичность и нагрузочную способность муфт, расширяя их область применения в машиностроении.

Ключевые слова: муфта, пружина сжатия, соединение валов, демпфирование, цифровое моделирование, патент, адаптивность.

Abstract. The article examines the design features and operating principles of modernized shaft couplings. It analyzes current trends in coupling design, including digitalization, adaptive structures, and the use of composite materials. The proposed technical solutions enhance the reliability, manufacturability, and load-bearing capacity of couplings, expanding their application in mechanical engineering.

Keywords: coupling, compression spring, shaft connection, damping, digital modeling, patent, adaptability

Введение

Муфты представляют собой ключевые элементы механических систем, обеспечивающие передачу вращательного движения между валами. Несмотря на относительно низкую стоимость по сравнению с основным оборудованием, они существенно влияют на надежность агрегатов, компенсируя монтажные и эксплуатационные погрешности (несоосность, вибрации, температурные деформации) и передавая крутящий момент. Отказы соединительных муфт приводят к остановке технологических процессов, значительным экономическим потерям и составляют существенную долю внеплановых простоев оборудования.

В связи с этим современное машиностроение предъявляет повышенные требования к надежности, долговечности и технологичности систем передачи вращения, что определяет актуальность разработки перспективных конструкций муфт.

Теоретическое обоснование

Современное проектирование муфт основывается на комплексном анализе напряжённо-деформированного состояния их элементов. Исходным параметром для расчёта служит расчётный крутящий момент $T_{расч.}$, определяемый с учётом динамических нагрузок по формуле [1]:

$$T_{расч.} = K \cdot T,$$

где K — коэффициент режима работы муфты, T — передаваемый крутящий момент.

При расчёте муфты на прочность особое внимание уделяется наиболее уязвимым элементам конструкции. В упругих муфтах такими элементами являются неметаллические упругие вставки (чаще всего резиновые) и металлические упругие компоненты (например, цилиндрические и пластинчатые пружины). Прочность на смятие оценивается по критерию:

$$\sigma_{см} = F_t / A_{см} \leq [\sigma_{см}],$$

где F_t — сминающая сила, $A_{см}$ — площадь смятия, $[\sigma_{см}]$ — допускаемые напряжения на смятие резины.

Для кулачковых муфт, в которых основная нагрузка падает на кулачки, обеспечивающие передачу вращательного движения за счёт механического зацепления, оценка давления в зоне контакта определяется:

$$p_m = F_t / A \leq [p_m],$$

где F_t — сминающая сила, A — суммарная опорная площадь кулачков, $[p_m]$ — допускаемое давление кулачков;

Напряжение изгиба в основании кулачка:

$$\sigma_{\text{и}} = M/W \leq [\sigma_{\text{и}}],$$

где M – изгибающий момент, W – момент сопротивления изгибу всех кулачков, $[\sigma_{\text{и}}]$ – допускаемое напряжение на изгиб кулачков.

Для оценки износостойкости фрикционных муфт, в которых передача вращательного момента происходит за счет сил трения, применяется критерий среднего контактного давления:

$$p = 12T_p/\pi(D^2 - D_1^2)fz \leq [p],$$

где p – давление на рабочих поверхностях дисков, $\pi(D^2 - D_1^2)/4$ – площадь кольцевой поверхности диска, $[p]$ – допускаемое давление, f – коэффициент трения, z – число пар поверхностей трения.

Таким образом, совершенствование конструкций муфт требует строгого применения соответствующего расчётного аппарата, что является основой для повышения их надёжности, долговечности и эффективности.

Муфта для соединения валов. Одним из приоритетных направлений разработки новых конструкций муфт является упрощение конфигурации упругого узла при одновременном повышении нагрузочной способности изделия. Это достигается конструкцией муфты, в которую встроена гибкая цилиндрическая деталь с осевым отверстием и упругий узел в виде проволоочной пружины сжатия. Концы пружины загнуты и фиксируются в отверстиях валов [2].

Пружина воспринимает часть крутящего момента и стабилизирует цилиндрическую деталь, предотвращая потерю ее устойчивости. Это позволяет не только снизить трудоёмкость изготовления и сборки муфты, но и обеспечивает ее надёжную работу в условиях повышенных эксплуатационных нагрузок.

Решение поставленной задачи реализуется за счёт конструктивного изменения упругого узла муфты для соединения валов [2]. Модернизированная муфта, как показано на рис. 1, состоит из следующих элементов:

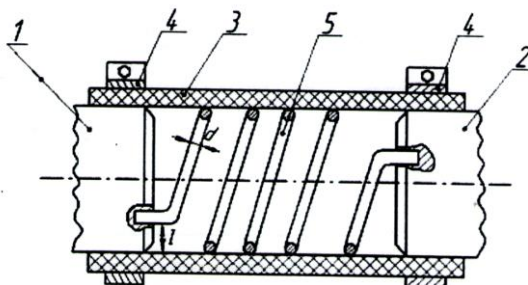


Рисунок 1 - Модернизированная муфта для соединения валов. 1, 2 - валы, 3 – гибкая цилиндрическая деталь, 4 – элемент для закрепления гибкой цилиндрической детали, 5 – пружина сжатия

Концы пружины 5 загнуты и входят в отверстия, выполненные в торцевых частях валов 1 и 2. Эти отверстия расположены у наружных диаметров валов на расстоянии $l = (1...2) \cdot d$, где: l — расстояние от наружного диаметра вала до центра отверстия; d — диаметр проволоки пружины сжатия 5.

При вращении одного из валов крутящий момент передаётся через цилиндрическую деталь на второй вал. В процессе работы материал детали 3 подвергается кручению и прогибу, компенсируя незначительные отклонения в соосности. Пружина 5 стабилизирует положение детали, предотвращая её деформацию и обеспечивая равномерное распределение усилий. Она также воспринимает часть крутящего момента, повышая общую нагрузочную способность узла.

В результате нашей модификации муфта приобретает следующие технические преимущества: компенсацию несоосности валов, повышенную устойчивость к монтажным погрешностям и увеличенную нагрузочную способность благодаря эффективному распределению усилий. Это позволяет упростить процесс сборки и повысить общую надёжность узла.

Муфта для передачи вращения между валами. Ключевым требованием к современным соединительным узлам является принцип отказобезопасности (fail-safe), предполагающий сохранение работоспособности даже при повреждении отдельных элементов. Этому требованию отвечает предлагаемое нами устройство [3] для передачи вращения, в котором реализована двойная мембранная муфта с предохранительным механизмом. При разрушении одной из гибких мембран специальное устройство предотвращает опасный дисбаланс валов. Для адаптации жёсткости узла к переменным нагрузкам и повышения демпфирования в конструкции применена многовитковая пружина с переменным шагом. Учёт демпфирующих свойств требует уточнения расчётного момента:

$$T_{расч.} = K \cdot T \cdot K_d ,$$

где K_d — коэффициент демпфирования, учитывающий характер изменения нагрузки во времени (для плавного режима $K_d = 1,2-1,3$, для ударного $K_d = 1,8-2,0$).

На рис. 2 показана конструктивная схема устройства [3] для передачи вращения между валами. Оно включает двойную мембранную муфту, установленную на первом промежуточном валу, например, валу газотурбинного двигателя.

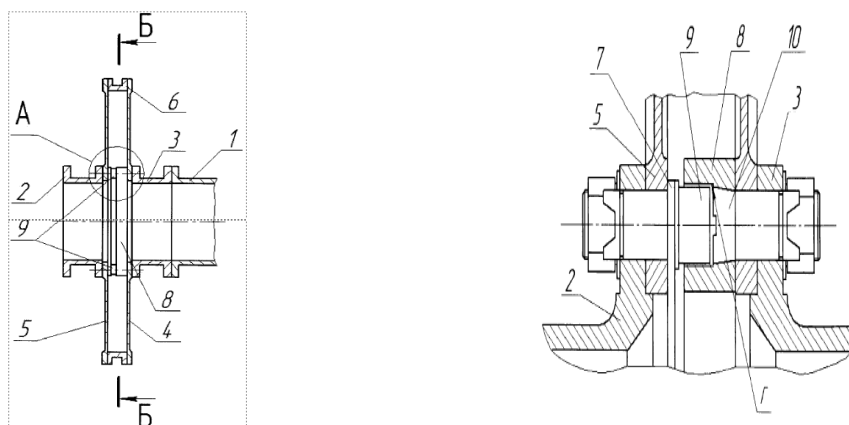


Рисунок 2 - а) Устройство для передачи вращения между валами, б) каплевидная проточка. Основными элементами муфты являются две ступицы (2 и 3), соединённые с валом (1) через гибкие мембраны — первую (4), компенсирующую перекосы, и вторую (5), обеспечивающую симметричную компенсацию. Их фиксация и поддержание формы осуществляются соединительным кольцом (6) и прижимными кольцами (7 и 8)

Ключевым предохранительным элементом служат цилиндрические шипы (9), расположенные на внутренней поверхности ступицы (2). В нормальном режиме они не контактируют с элементами конструкции, но при разрушении мембраны входят в каплевидную проточку Г прижимного кольца (8), которое соединяется с мембраной (4) и ступицей (3) с помощью винтов (10). Тем самым происходит предотвращение аварийного дисбаланса и компенсируется взаимный перекося ступиц.

Режимы работы устройства. В нормальном режиме вращение между валами передается через гибкие мембраны 4 и 5, соединяющие ступицы 3 с соединительным кольцом 6, компенсируя перекося валов 1 и 2 за счет своей эластичности. Цилиндрические шипы, установленные на внутренней поверхности ступиц, находятся в каплевидных проточках Г с зазором, не вступая в контакт с их стенками. Это позволяет ступицам свободно смещаться в пределах допустимых угловых отклонений (до 15 угловых минут), не создавая дополнительных нагрузок.

В аварийном режиме, при разрушении одной из гибких мембран (например, вследствие усталости материала или перегрузки), ступицы проворачиваются, относительно друг друга. При этом шипы входят в узкую часть каплевидных проточек, обеспечивая жесткое механическое зацепление между ступицами и передачу вращения в аварийном режиме без дисбаланса вала и повреждения подшипников

Такое конструктивное решение сочетает компенсацию перекося соединяемых валов за счет деформации мембран, fail-safe механизм за счёт механического зацепления шипов и проточек, и исключение дисбаланса промежуточного вала, возникающее при отказе гибких элементов. Встроенные датчики крутящего момента и температуры позволяют в реальном

времени регулировать демпфирование натягом пружинных элементов, повышая надежность, технологичность и компактность устройства

Технические преимущества такой конструкции выражаются в обеспечении повышенной надежности (сохранение работоспособности при отказе мембран), снижении вибраций за счет исключения дисбаланса, компактности и технологичности без дополнительных демпфирующих узлов, а также адаптивности с компенсацией перекосов без потери прочности соединения.

Предложенное техническое решение реализует принцип активной адаптации к режиму работы. Встроенные датчики крутящего момента и температуры позволят контролировать состояние узла в реальном времени. При превышении допустимых параметров система управления изменяет характеристики демпфирования путем регулирования натяга пружинных элементов.

По результатам экспериментальных испытаний достигается [4]:

- Снижение вибраций на 18–25% по сравнению с традиционными втулочно-пальцевыми муфтами.
- Увеличение предельного крутящего момента на 12–15% при тех же габаритах.
- Сокращение времени сборки на 30% за счёт упрощённой фиксации пружины.
- Повышение ресурса до 1,5–2 раз при работе в условиях переменных нагрузок.

Перспективы применения. Модернизированные муфты с упругим узлом целесообразно использовать в следующих областях:

- Газоперекачивающие агрегаты: соединение валов газотурбинного двигателя и нагнетателя, где требуется компенсация температурных расширений и вибраций.
- Сельскохозяйственная техника: в карданных передачах тракторов и комбайнов, где важна устойчивость к ударным нагрузкам.
- Металлургическое оборудование: в приводах прокатных станов, где муфты работают в условиях высокой температуры и пульсирующих нагрузок.
- Робототехника и автоматизированные линии: в сервоприводах, где критична точность позиционирования и компенсация микроперекосов.

Внедрение подобного предохранительного механизма позволяет реализовать принципы fail-safe проектирования, обеспечивая устойчивость к отказам и расширяя ресурс агрегатов.

Можно выделить следующие современные тенденции в области проектирования муфт [5,6]:

- Цифровизация: применение CAD/CAE-систем для моделирования напряжений и вибраций.
- Адаптивные конструкции: переменная жёсткость и демпфирование.

- Интеграция сенсоров: мониторинг температуры и крутящего момента.
- Композитные материалы: снижение массы и повышение коррозионной стойкости.
- Модульность: упрощение замены компонентов.

Исследования показывают, что применение композитных материалов позволяет снизить массу муфт на 30-40% при сохранении прочностных характеристик. Углепластиковые элементы демонстрируют повышенную демпфирующую способность, снижая динамические нагрузки на 25-35%.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть связаны с разработкой адаптивных муфт, способных изменять свои характеристики в зависимости от условий эксплуатации, что откроет новые возможности для их применения в перспективных отраслях техники.

Заключение

В данной работе рассмотрены конструктивные особенности и принципы действия фрикционных компенсирующих предохранительных муфт, а также муфт для соединения валов с упрощённым упругим узлом. Проведённый анализ показал, что традиционные конструкции обладают рядом недостатков, включая ограниченную надёжность, сложность сборки и чувствительность к перегрузкам.

Модернизированные конструкции муфт обладают рядом преимуществ по сравнению с известными аналогами и представляют собой перспективное направление для дальнейших исследований и внедрения в промышленную практику.

Внедрение цифровых технологий мониторинга открывает возможности для предиктивного обслуживания и оптимизации режимов эксплуатации оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детали машин. Проектирование : справ. учеб.-метод. пособие / Л. В. Курмаз, А. Т. Скойбеда. – 2-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 2005. – 308 с.
2. Патент 2463495 РФ, МПК F16D 3/50. Муфта для соединения валов / Н. Н. Романюк, К. В. Сашко, А. Л. Вольский, К. М. Кудравец ; № u 20121163 ; заявл. 27.12.2012 ; опубл. 30.06.2013. – № 9323 РБ, МПК F16D 3/50.
3. Патент 2150035 РФ, МПК F16D 9/00. Устройство для передачи вращения между валами / Н. Н. Романюк, К. В. Сашко и др. ; № u 20100208 ; заявл. 05.03.2010 ; опубл. 30.12.2010. – № 6792 РБ.
4. Современные проблемы машиностроения : сб. ст. XVI Междунар. науч.-техн. конф. / Томск. политехн. ун-т. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2024. – 567 с.
5. Иванов В. И., Петров П. С. Современные тенденции в проектировании муфт // Вестн. машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 45–50. Statia-MTK-25-Mufty.docx

6. What is a coupling 2024: types and trends [Электронный ресурс] // Richconn. – URL: <https://richconn.com/ru/what-is-a-coupling-2024-types-and-trends/> (дата обращения: 03.12.2025).

УДК 621: 004.77

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Докт. техн. наук, проф. В.М. Пашкевич, асп. С.П. Шишов

Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь)
standbruch@yandex.by

Аннотация. В статье рассматривается применение искусственного интеллекта и агентно-ориентированного подхода для повышения автономности киберфизических систем (КФС) в машиностроении. Автономность определена как спектр возможностей, включающих восприятие, мониторинг, обучаемость и коммуникацию. Обоснована эффективность использования многоагентных систем (MAS) для создания децентрализованных, гибких и масштабируемых производственных архитектур. Описана иерархическая организация агентов (исполнительных, диагностических, координаторов и др.), обеспечивающая координацию и распределение ответственности. Приведен пример практической реализации роботизированной ячейки, демонстрирующий взаимодействие агентов.

Ключевые слова: киберфизические системы, искусственный интеллект, автономность, многоагентные системы, агентно-ориентированный подход, машиностроение.

Abstract. The article explores the application of artificial intelligence and an agent-oriented approach to enhance the autonomy of cyber-physical systems (CPS) in mechanical engineering. Autonomy is defined as a spectrum of capabilities, including perception, monitoring, learning, and communication. The effectiveness of using multi-agent systems (MAS) for creating decentralized, flexible, and scalable production architectures is substantiated. A hierarchical organization of agents (executive, diagnostic, coordinators, etc.) is described, ensuring coordination and distribution of responsibilities. An example of a robotic cell implementation demonstrates the interaction of agents.

Keywords: cyber-physical systems, artificial intelligence, autonomy, multi-agent systems, agent-oriented approach, mechanical engineering.

Понятие автономности в киберфизических системах