

1. **Разработка переднего моста трактора МТЗ, как базовой платформы всего семейства. От концепции до испытаний**

Проект 2001 года

Постановка задачи

Разработать специальную методику проектирования переднего управляемого ведущего моста (ПВМ) для создания круговой формы зубьев конических передач и проведения соответствующих геометрических и прочностных расчетов на базе модуля Gear Wizard.



Реализация

Проект включал в себя следующие этапы:

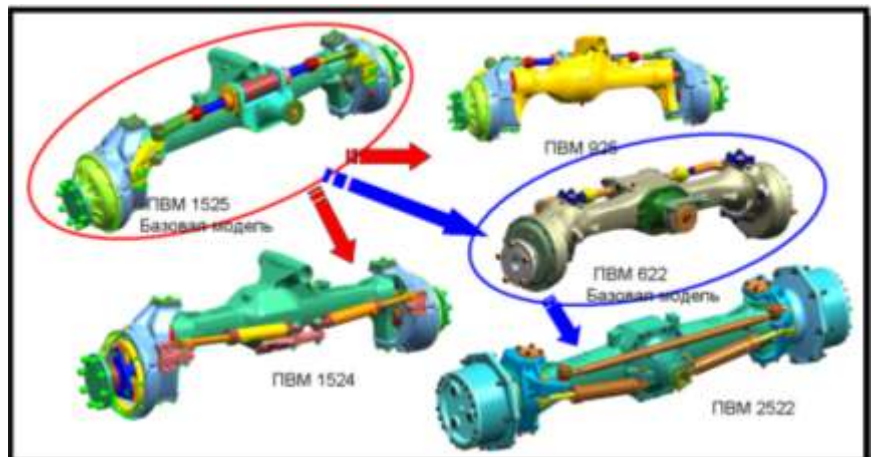
- *Концептуальное проектирование* (создание упрощенной концептуальной модели рулевого механизма, а также проведение кинематического и динамического анализа модели в UG/Motion, Gear Wizard)
- *Детальное проектирование* (выполнение полной детализации механизмов, структурно-прочностной анализ корпуса переднего моста в UG Scenario for Structure), проектировочный расчет зубчатых колес в **Mechsoft**.
- *Виртуальные испытания* (с помощью модулей UG Scenario for FEA и UG Scenario for Motion был проведен расчет, который позволил максимально приблизить виртуальные результаты к результатам натурных испытаний).

Использовались наиболее актуальные версии программных продуктов.

Результаты

Разработанная методика позволила еще на стадии создания деталей определить их прочностные параметры, усовершенствовать проблемные места и обеспечить необходимые кинематические характеристики ПВМ **при минимуме материалоемкости** конструкции и **без проведения** трудоемких и дорогостоящих сравнительных **испытаний**.

Проделанная работа позволила выявить на примере ПВМ общие закономерности и особенности проведения расчетных и кинематических исследований при проектировании ответственных сборочных узлов. Соответственно, полученная методика может быть использована при создании объемных моделей не только ведущих передних и задних мостов, но также и **других узлов тракторов и автомобилей**.



2. Разработка коробки передач трактора МТЗ мощностью

Проект 2002 года

80-120 л. с.

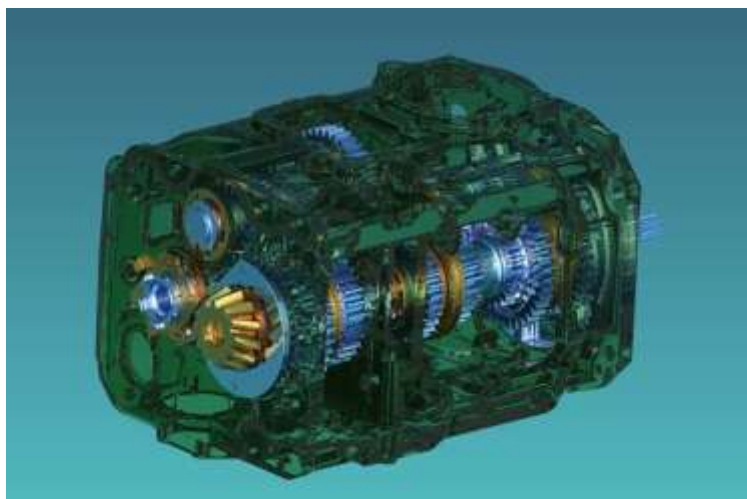
Постановка задачи

Создание методики проектирования коробки передач современного энергонасыщенного трактора.

Реализация

Проект включал в себя следующие этапы:

- а) Создание трехмерной модели,
- б) Проведение структурно-прочностного анализа средствами PATRAN/NASTRAN и устранение ошибок проектирования,
- в) Проектирование механизма управления коробкой передач,
- г) Переход к реальной геометрии шестерен (Построение точной геометрии зубчатого соединения при помощи модуля UG Gear Wizard), расчет зубчатых колес в **Mechsoft**.
- д) Монтаж механизма и проведение кинематического и динамического анализа работы коробки передач (Кинематический и динамический анализ механизма), е) Создание технической конструкторской документации (на базе iMAN).



Использовались наиболее актуальные версии программных продуктов.

Результаты

Использование средств инженерного анализа позволяет конструктору самостоятельно проводить расчеты, повышая тем самым качество и глубину проработки конструкции. Поэтому сокращается в разы трудоемкость не только конструкторских работ, но и изготовления опытных образцов, и проведения испытаний. Наш опыт показал, что при реализации данной методики время проектирования изделия можно **сократить в 3 раза**, а стоимость подготовки производства уменьшить более чем **в 2 раза**.

3. Решение задачи реверсинжиниринга на примере разработки задней балансирной тандемной тележки лесной машины «МЛ-131» для ПО «МТЗ»

Проект 2003 года

Постановка задачи

Ранее закупаемая задняя тандемная тележка, не удовлетворяла по параметрам надежности и цены. Поэтому была поставлена задача разработать собственную тележку, которая была бы дешевле и выдерживала бы большие нагрузки, с максимальным использованием уже существующих на предприятии технологий и деталей.



Реализация

На этапе концептуального проектирования проведен функциональный анализ существующего прототипа для определения наиболее приемлемых конструкторских решений. Была воссоздана трансмиссия прототипа с использованием упрощенной геометрии деталей, проведен проверочный расчет кинематики, включая анимацию движения, а также расчет на прочность и долговечность всех элементов.

Результаты

По результатам расчетов был создан второй вариант трансмиссии, наиболее полно отвечающий предъявляемым требованиям: планетарная ступень - в центральной части, тормоза - на ступицах колес.

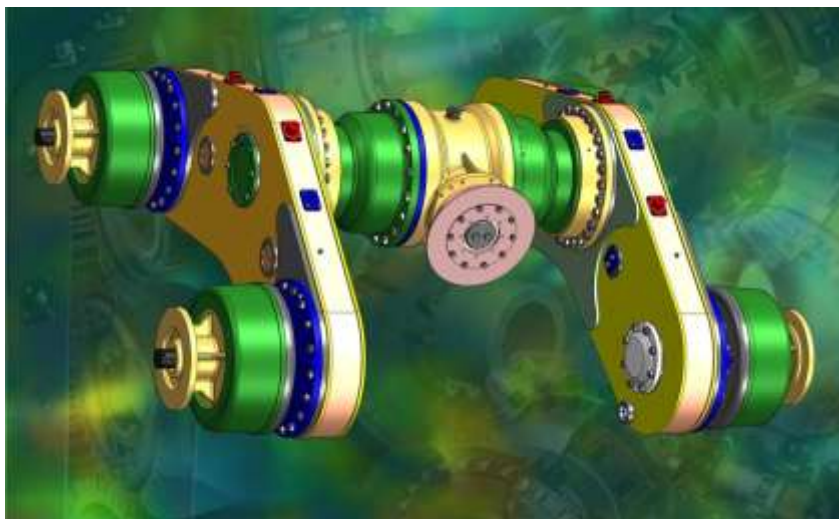
Использование наиболее актуальных в то время пакетов **Unigraphics** и **Mechsoft** для проектирования и проверки собираемости сложных узлов и агрегатов позволило конструкторам избежать серьезных ошибок и типичных недоработок.

4. Детальное проектирование сдвоенного заднего моста лесной машины для ПО «МТЗ»

Проект 2002 года

Постановка задачи

Данный агрегат является покупным изделием, в эксплуатации было выявлено несоответствие прочностных характеристик новому нагрузочному режиму. Была поставлена задача разработки сдвоенного заднего моста лесной машины собственного производства. Требовалось окончательно спроектировать узел и провести необходимые проверочные расчеты.



Реализация

На всех этапах выполнения работ активно использовался разработанный нами сценарный подход, позволяющий учитывать множество различных вариантов действия нагрузок Функциональный анализ основных элементов трансмиссии (зубчатых колес, валов, подшипников, шлицев) проводился с помощью пакета **MechSoft**. Использовалась наиболее актуальная версия программы. В рамках этого анализа выполнялись проектный и проверочный расчеты на прочность и долговечность всех элементов трансмиссии тележки. В процессе построения моделей и их сборки вносились уточнения и доработки, проводился анализ собираемости изделия. Полный комплекс виртуальных испытаний был проведен на полученной 3D-модели изделия. В результате был выявлен ряд ошибок, в частности, корпус балансира пришлось усилить накладками.

Результаты

Использование наших методик позволило значительно **сократить цикл проектирования**. По разработанной документации была изготовлена первая партия задних мостов. Изделия были поставлены потребителям для пробного использования в реальных условиях. В течение двух лет лесные машины, оборудованные этим задним мостом, *работали в тайге без поломок*.

5. Модернизация конструкции сложной вальной коробки передач для ПО «МТЗ»

Проект 2003 года

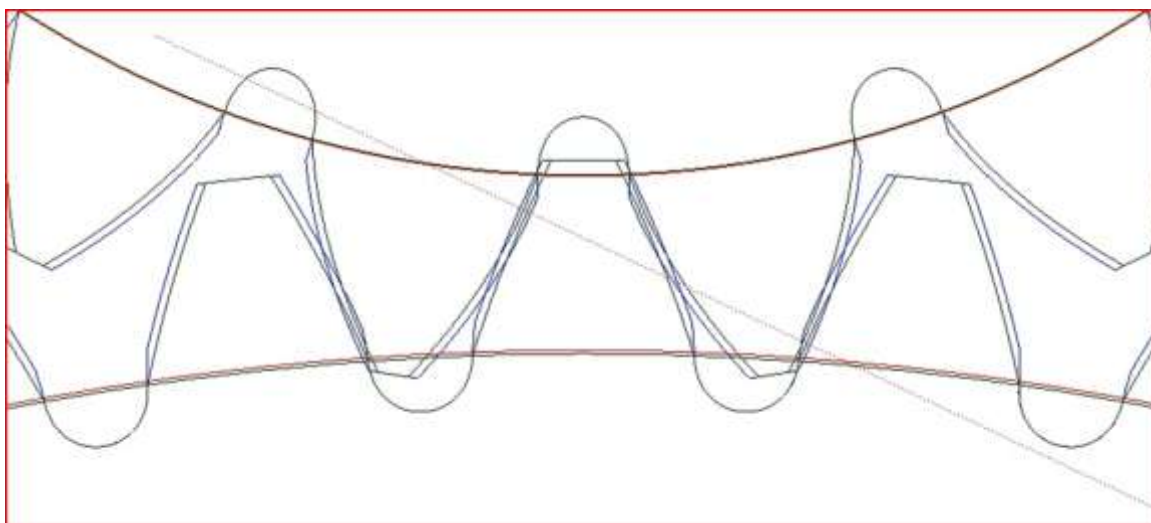
Постановка задачи: Заказчику требовалось модернизировать коробку передач трактора мощностью 100 л. с. из механической в гидромеханическую с минимальными изменениями в корпусных деталях и определить слабые элементы существующей конструкции.

Реализация

Была создана 3D-модель механической части и корпусных деталей исходной коробки передач по чертежам заказчика (использовался программный продукт **Solid Edge EDS**). Затем был проведен функциональный анализ основных элементов трансмиссии (зубчатых колес, валов, подшипников, шлицев) с помощью пакета **MechSoft**, в рамках которого была воссоздана упрощенная модель трансмиссии прототипа. Использовались наиболее актуальные версии программных продуктов. На этом же этапе проводился проверочный расчет на прочность и долговечность всех элементов. В результате удалось определить слабые места в конструкции трансмиссии коробки и сделать необходимые доработки. Изменения вносились в **параметризованную модель трансмиссии**.



Результаты: Результатом этой работы стала конструкция гидромеханической коробки передач, совместимая с двигателями в 150-180 л. с. и являющаяся усовершенствованным вариантом существующей вальной механической коробки передач. Общее время работ, затраченных на изменение конструкции оказалось в 10 раз меньше, чем при традиционном проектировании. Участие нашей компании в проекте позволило заказчику **сократить в 2 раза** количество опытных образцов и свести к минимуму натурные испытания.



Постановка задачи

Была поставлена задача сокращения времени разработки зуборезных инструментов. Кроме того, точность выполнения геометрических построений представлялась не достаточной, были случаи возникновения необходимости перепроектирования зуборезного инструмента. Ранее для получения параметров профиля зуба зуборезных инструментов выполнялось геометрическое построение профиля зуба исходя из обрабатываемого профиля. В результате разработка инструмента занимала от 3 до 5 рабочих дней.

Реализация

В качестве инструмента для расчёта профилей зуборезных инструментов была использована программа KissSoft, с автоматическим построением рассчитанной геометрии в формате CAD программы AutoCAD. Были произведены расчёты профилей:

- червячной фрезы для изготовления зубчатого колеса без шлифования;
- червячной фрезы для изготовления зубчатого колеса с последующей операцией шлифования;
- червячной фрезы для изготовления шлицевого вала;
- зубчатого колеса, обработанного заданной фрезой;
- долбяка для обработки зубчатого колеса внешнего или внутреннего зацепления;
- зубчатого колеса, обработанного имеющимся долбяком.

Результаты

В результате работы сотрудники ОАО «БелАЗ» убедились в том, что при использовании программы KissSoft разработка любого зуборезного инструмента занимает 1 рабочий день, причём расчёт и оптимизация профиля занимает 30-60 минут рабочего времени. Точность расчётов обеспечивается алгоритмами программы.

По результатам проекта и на основании опыта использования программы KissSoft в технологическом бюро была создана заводская инструкция по расчёту профилей зуборезных инструментов в программе KissSoft с учетом особенностей ОАО «БелАЗ».

7. Оптимизация элементов высоконагруженного ведущего проходного моста в составе самоходного колесного шасси 8x8

Проект 2012 года

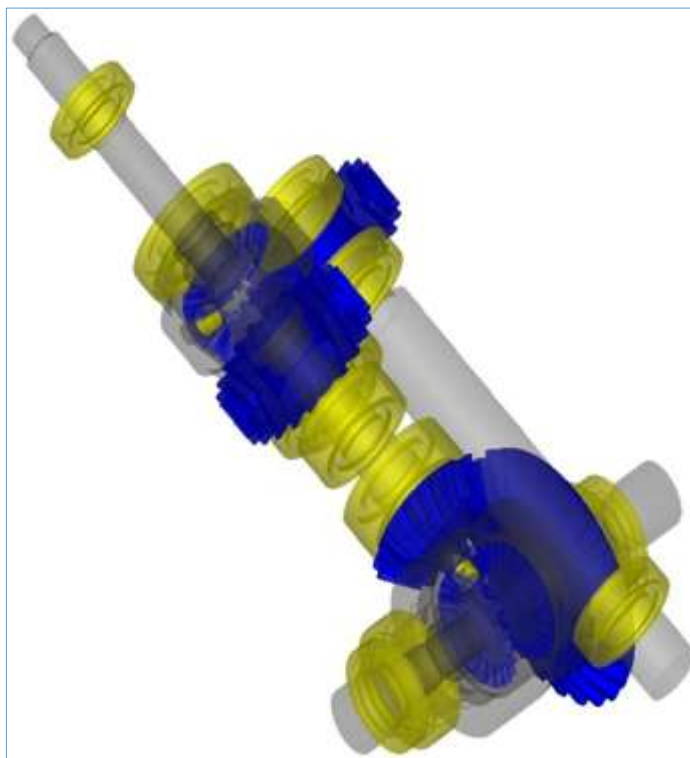
Постановка задачи

Была поставлена задача перепроектирования трансмиссии шасси МЗКТ с учетом новых технологических возможностей, возникших в результате смены станочного парка. В ТЗ были заданы довольно жесткие требования по долговечности (40000 моточасов) и снижению массы (до 20%).

Реализация

Проект включал в себя следующие этапы:

- a) Создание кинематической и трехмерной модели проходного моста средствами программы KissSys;
- b) Расчёт модели проходного моста средствами программного комплекса KissSoft/KissSys;
- c) Оптимизация модели проходного моста средствами программного комплекса KissSoft/KissSys,
- d) Анализ результатов оптимизации модели проходного моста.



Результаты

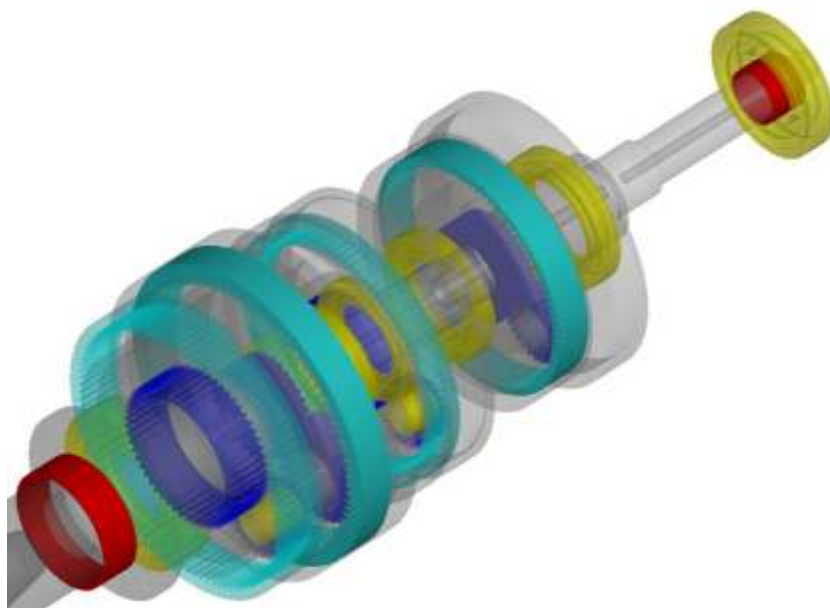
Главная передача проходного моста шасси после оптимизации обладает меньшей на 12 % материалоемкостью, меньшим шумом и при этом не имеет проблемы связанной с заеданием, выявленной проблемой на стадии анализа исходной конструкции. Масса ЗК раздающего редуктора проходного моста шасси после оптимизации снизилась на 27,5%, что означает снижение энергоемкости их производства на аналогичную величину. При этом мгновенное значение температуры масла в пятне контакта снизилось с 560⁰С до 360⁰С, а удельное скольжение снизилось втрое. Аналогичным образом снизилась неравномерность контактной жесткости зацепления, а следовательно и индуцируемые им шум и вибрация. Оптимизированный вариант отличается от исходного на 23% большими коэффициентами запаса на контактную выносливость. Решена проблема питтинга, характерная для исходного варианта конструкции (K_3 по контакту < 1).

8. Оптимизация планетарной коробки передач карьерного самосвала ОАО «БелАЗ» грузоподъемностью 60 тонн

Проект 2010 года

Постановка задачи

На предприятии было принято решение о переходе на новый уровень долговечности зубчатых колес (40000 часов) в коробках передач, что позволяет обеспечить их конкурентоспособность. Для обеспечения гарантированного запаса долговечности необходимо выполнить оптимизацию элементов трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн. Оптимизация конструкции с целью достижения требуемых коэффициентов запаса



должна быть произведена за счет подбора оптимальных геометрических параметров шестерен, свойств материалов и технологии изготовления. Дополнительное требование оптимизации - максимальное снижение массы зубчатых колес трансмиссии. В процессе проведения оптимизации использовался программный комплекс KISSsoft/KISSsys.

Реализация

Проект включал в себя следующие этапы:

- Создание кинематической и трехмерной модели коробки передач средствами программы KissSys;
- Расчет модели коробки передач средствами программного комплекса KissSoft/KissSys;
- Оптимизация модели коробки передач средствами программного комплекса KissSoft/KissSys,
- Анализ результатов оптимизации модели проходного моста.

Расчет зубчатых передач проведен согласно последней редакции стандарта ISO 6336 (метод «В»), с учетом спектра нагружения, полученного в реальных условиях эксплуатации карьерного самосвала.

Результаты

В процессе работы над проектом была разработана концептуальная модель, а также предложена и обоснована бочкообразная модификация формы зуба для всех сателлитов. Параметры модификации индивидуальны для каждого планетарного ряда. Введение модификации позволило снизить потери мощности на трение в зацеплении на 7% и увеличить запасы выносливости на 4% по изгибу и на 3% по контакту.

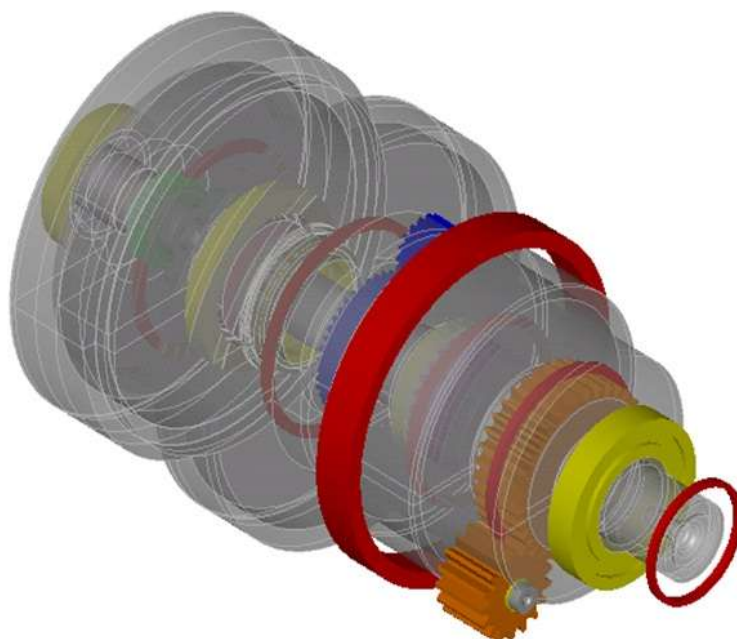
Проектирование в программном комплексе KissSoft/KissSys позволило разработать равнопрочную конструкцию, имеющую сбалансированные запасы выносливости планетарных рядов, достаточные для выхода на заданный уровень долговечности. При этом масса зубчатых колес снизилась на 45% по сравнению с вариантом конструкции, полученной традиционными методиками проектирования специалистами заказчика. Пропорционально этой величине снизилась энергоемкость ТО/ХТО.

9. Оптимизация редукторной части планетарной коробки передач карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн ОАО «БелАЗ» в среде KISSsys/KISSsoft

Проект 2009 года

Постановка задачи

Расчет долговечности по нагрузочному спектру показал, что исходный вариант ПКП, находящийся в опытной эксплуатации, имеет несбалансированную конструкцию. Необходимо оптимизировать конструкцию с целью достижения максимальных коэффициентов запаса за счет подбора оптимальных геометрических параметров шестерен, свойств материалов и технологии изготовления, а также добиться снижения массы шестерён.



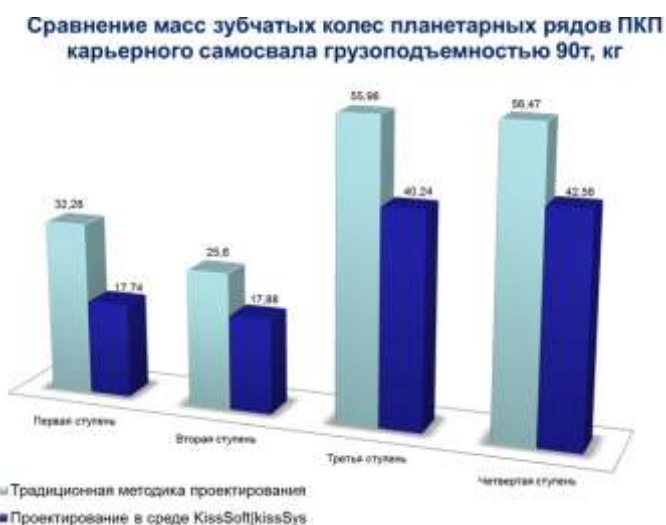
Реализация

Проект включал в себя следующие этапы:

- Создание кинематической и трехмерной модели коробки передач средствами программы KissSys;
- Расчёт модели коробки передач средствами программного комплекса KissSoft/KissSys;
- Оптимизация модели коробки передач средствами программного комплекса KissSoft/KissSys,
- Анализ результатов оптимизации модели проходного моста.

Расчет зубчатых передач проведен согласно последней редакции стандарта ISO 6336 (метод «В»), с учетом спектра нагружения, полученного в реальных условиях эксплуатации карьерного самосвала.

Результаты



Оптимизация позволила сбалансировать коэффициенты запаса выносливости зубчатых колес ПКП (при этом их общая материалоемкость снизилась на 31%). Был предложен другой способ включения передачи заднего хода, при этом перераспределение потоков мощности позволило добиться большей долговечности, как для зубчатых колес, так и для подшипников. Все планетарные ряды оптимизированной модели имеют необходимую и достаточную долговечность при минимальной материалоемкости.

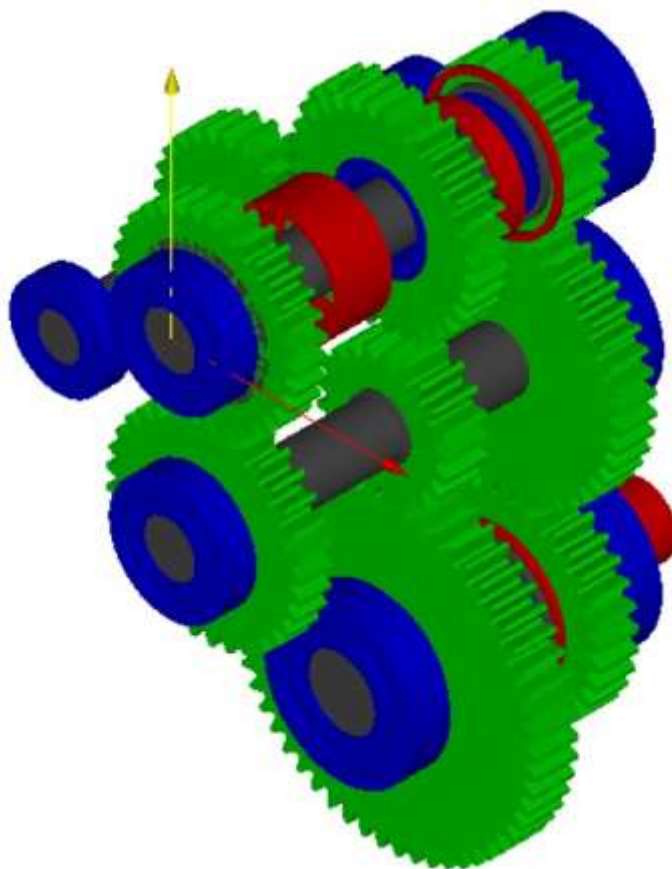
Постановка задачи

Произвести расчет коробки передач фронтального погрузчика в соответствии с методикой ISO6636 методом В с учетом заданного спектра нагружения и выполнить оптимизацию конструкции с целью минимизации шума и вибрации.

Реализация

Средствами программного комплекса KissSoft/KissSys был выполнен расчёт конструкции коробки передач, а также была выполнена оптимизация, за критерий которой были приняты параметры трансмиссии, которые являются основными причинами возникновения шума в трансмиссии:

- неравномерность зубчатого зацепления (с учетом степени точности и формы производящего контура);
- изменение жесткости зацепления в пятне контакта зубьев (с учетом механических свойств материала, степени точности и формы производящего контура);
- изменение нормальной нагрузки в пятне контакта зубьев (с учетом механических свойств материала, степени точности и формы производящего контура).



Результаты

Оптимизация элементов трансмиссии фронтального погрузчика в среде KissSoft/KissSys позволила достичь снижения амплитуды погрешности зубчатого зацепления:

- с сохранением стандартного производящего контура в 2,23 раза;
- с использованием модифицированного производящего контура – в 2 раза;
- с переходом к косозубому зацеплению и сохранением стандартного производящего контура – в 268 раз;

Вместе с этим значительно сглажены кривые изменения жесткости зацепления и изменение нормальной силы в зацеплении.

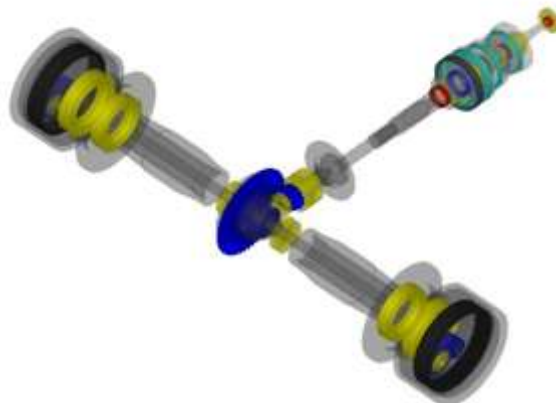
В результате были улучшены следующие тактико-технические характеристики коробки передач: снизился шум и вибрация; уменьшилась вероятность возникновения резонансных явлений; повысился КПД зубчатых зацеплений.

11. Оптимизация элементов трансмиссии карьерного самосвала ОАО «БелАЗ» грузоподъемностью 60 тонн

Проект 2012 года

Постановка задачи

У существующих трансмиссий не обеспечиваются конкурентоспособные требования для полного расчетного срока службы в 40000 часов. Поэтому для обеспечения гарантированного запаса долговечности в случае, если эксплуатационные нагрузки будут отличаться в большую сторону, необходимо выполнить оптимизацию элементов трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн. Оптимизация конструкции с целью достижения требуемых коэффициентов запаса должна быть произведена за счет подбора оптимальных геометрических параметров шестерен, свойств материалов и технологии изготовления. В процессе проведения оптимизации используется программный комплекс KISSsoft/KISSsys.



Реализация

Проект включал в себя следующие этапы:

- Оптимизация макро геометрии планетарного колесного редуктора заднего моста
- Оптимизация подшипников планетарного ряда колесного редуктора карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн
- Оптимизация главной передачи заднего моста карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн
- Оптимизация подшипников корпуса дифференциала карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн
- Оптимизация зубчатых колес дифференциала заднего моста карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн
- Оптимизация подшипников ведущей шестерни главной передачи заднего моста карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн

Результаты

В результате проведенной оптимизации нагрузочная способность колесного редуктора по номинальному крутящему моменту возросла на 25% (с 4326 Нм до 5406Нм), что соответствует увеличению долговечности в 18 раз при увеличении массы около 1%. Исходное пятно контакта под нагрузкой смещено на кромку зуба. С применением предложенных параметров модификаций пятно контакта имеет оптимальные характеристики в критичных условиях нагружения. Рекомендуемый компанией Micro Express вариант позволяет добиться большего срока службы (с $\approx 6'000$ ч до $\approx 40'000$ ч) при минимальных затратах.

Исследования, выполненные компанией Micro Express показывают, что путем изменения только положения ведомого зубчатого колеса главной передачи относительно оси сателлитов дифференциала, можно получить большую (приблизительно на 25%) долговечность подшипников. Также показано, как можно выйти на требуемый уровень долговечности при меньшей на 36% массе данных подшипников. Кроме того, показана возможность увеличить прочностные характеристики конических зубчатых колес, входящих в состав дифференциала, на 25% по сравнению с исходным вариантом исполнения. Также исследования показывают, что путем изменении конструкции можно добиться увеличения долговечности подшипниковых узлов приблизительно в 3 раза.

12. Проведение виртуальных ресурсных испытаний коробки передач производства Тутаевского моторного завода в среде KISSsoft/KISSsys

Проект 2011 года

Постановка задачи

Для коробки передач ТМЗ стояла задача выполнить верификацию полного комплекта конструкторско-технологической документации на этапе ее передачи для запуска в серийное производство с целью предотвращения переделок, как документации, так и зуборезного инструмента.

Реализация

В результате верификации КД был выявлен высокий уровень несбалансированности конструкции.

Для получения сбалансированной конструкции по коэффициентам запаса, а также снижения себестоимости было рекомендовано применения оптимизации геометрии зубчатых колес с сохранением заданных межосевых расстояний. На примере анализа пятна контакта под нагрузкой были даны рекомендации по оптимальным параметрам модификаций. Проект включал в себя следующие этапы:

- Подготовка исходных данных для проведения виртуальных ресурсных испытаний модели KISSsoft/KISSsys;
- Составление модели на основании предоставленной кинематической схемы и ввод исходных данных;
- Подготовка сравнительной таблицы и графиков, отражающих картину распределения коэффициентов запаса и погрешность расчета, которая может возникнуть при некорректном с технологической точки зрения задании параметров исходного контура колеса.
- Верификация КД для зубчатых колес коробки передач в среде KISSsoft.
- Сравнение параметров КД и скорректированных параметров профиля зубчатых колес.
- Разработка профиля червячной фрезы для изготовления зубчатого колеса заданного профиля с учетом припуска под шлифование.
- Расчет пятна контакта под нагрузкой.

Результаты

В результате исследований, проведенных компанией Micro Express, было установлено, что в данной конструкции КП присутствуют явные дисбалансы по массе и коэффициентам запаса. При этом лимитирующим фактором разрушения является контактная выносливость. При всех присутствующих дисбалансах есть возможность их компенсации, повышения недостаточных коэффициентов запаса путем изменения операции окончательно обработки и добавления модификаций зубьев колёс.

Также анализ конструкции показал, что при оптимизации пятна контакта проблемных зубчатых зацеплений возможно снижение массы зубчатых пар с чрезмерными коэффициентами запаса с целью снижения себестоимости конструкции.

Установлено, что оптимизация себестоимости конструкции возможна за счет перехода на более дешевую сталь, с более стабильными свойствами ТО/ХТО. Добиться этого можно путем проведения дополнительных виртуальных ресурсных испытаний КП в KISSsoft с различными вариантами материалов валов и ЗК.

