

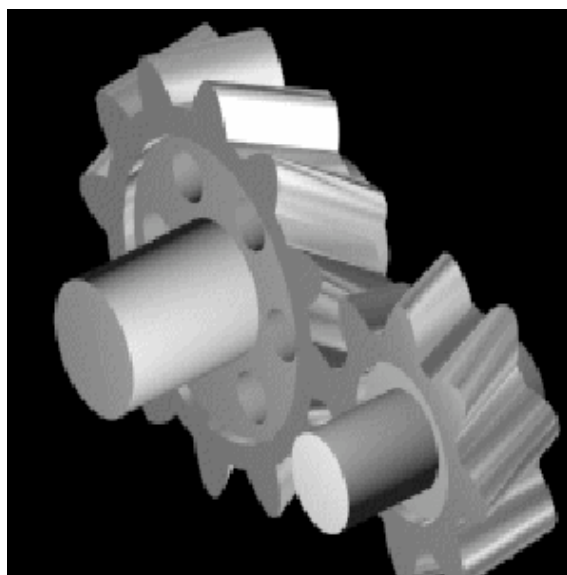
Министерство сельского хозяйства РФ

ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

Кафедра технического сервиса

# **Автоматизированное проектирование машин на примере расчёта редуктора**

Учебно-методическое пособие  
для студентов, обучающихся по специальностям:  
35.03.06 Агроинженерия: 01 Технические системы в агробизнесе  
35.03.06 Агроинженерия: 04 Технический сервис в АПК  
23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы  
(Издание второе переработанное и дополненное)



Брянск 2021

УДК 62-5 (076)  
ББК 34.42  
Б 39

Безик, Д. А. Автоматизированное проектирование машин на примере расчёта редуктора: учебно-методическое пособие для студентов направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия: 01 Технические системы в агробизнесе, 35.03.06 Агроинженерия: 04 Технический сервис в АПК, 23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы / Д. А. Безик, Н. А. Романеев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. – 40 с.

Учебно-методическое пособие «Автоматизированное проектирование машин на примере расчёта редуктора: учебно-методическое пособие для студентов направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия: 01 Технические системы в агробизнесе, 35.03.06 Агроинженерия: 04 Технический сервис в АПК, 23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы.

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Безик В.А.

*Рекомендовано методической комиссией инженерно-технологического института Брянского ГАУ, протокол № 9 от 26.05. 2021 года.*

© Брянский ГАУ, 2021

© Безик Д.А., 2021

© Романеев Н.А., 2021

## Содержание

1.	Введение.	3
2.	Краткое описание АРМ WinMachine	4
2.1.	АРМ WinJoint	5
2.2.	АРМ WinShaft	6
2.3.	АРМ WinBear	6
2.4.	АРМ WinTrans	8
2.5.	АРМ Graph	9
3.	Пример использования АРМ WinMachine.	10
3.1.	РАСЧЁТ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ.	10
3.2.	Расчёт передач с помощью АРМ WinMachine.	12
3.3.	РАСЧЁТ ЦЕПНОЙ ПЕРЕДАЧИ.	16
3.4.	РАСЧЁТ СОЕДИНЕНИЙ.	17
3.5.	РАСЧЁТ ВАЛОВ.	20
3.6.	РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ.	20
4.	Задания для индивидуальной работы.	23
5.	Расчет в модуле Drive	29
	ЛИТЕРАТУРА	39

# 1. Введение

Современное развитие средств вычислительной техники позволяет значительно ускорить темпы проектирования и повысить его качество. В последнее время все чаще используют математическое моделирование с широким использованием автоматизированных расчётов. Среди программного обеспечения систем автоматизированного проектирования следует отметить отечественный пакет программ АРМ WinMachine, предназначенный для решения многих машиностроительных задач. Эти программы позволяют быстро произвести необходимые расчёты, а также подготовить соответствующую конструкторскую документацию. Программа позволяет производить многовариантное проектирование, оптимизировать конструкцию и давать новые решения. Этот пакет имеет обширную справочную базу данных, где содержатся сведения по большинству стандартных элементов машиностроительных узлов и механизмов.

Проектирование механического оборудования и конструкций – процесс, который требует от разработчика фундаментальных знаний и опыта практической работы. В основе методов расчета лежат законы механики, математики и прикладных инженерных дисциплин. Использование этих знаний и опыта в сочетании с применением современных компьютерных программ позволяет проектировщикам создавать механическое оборудование на уровне лучших мировых аналогов.

При проектировании машин необходимо выполнить анализ условий, в которых находится проектируемый узел, и найти наиболее рациональное конструктивное решение с учетом эксплуатационных, рабочих и монтажных требований, предъявляемых к конструкции, решить вопросы выбора материалов, определить нагрузки, действующие на детали, произвести расчеты на прочность. Существующие экспериментальные и теоретические методы расчета требуют больших затрат средств и времени. При теоретическом расчете в формулах приходится учитывать допущения в виде коэффициентов запаса прочности, поэтому при разработке конструкции детали эту задачу решают методом повторных приближений, затем делают проверочные расчеты. Конструктор должен участвовать в разработке проектной и рабочей технической документации новых или модернизируемых технических объектов, обладать готовностью к самостоятельной работе, принятию и обоснованию технических решений в рамках профессиональной компетенции; использовать информационные технологии в своей предметной области; приобретать новые знания с использованием современных образовательных и информационных технологий; проектировать и обеспечивать моделирование технических объектов с использованием стандартных средств автоматизации проектирования. строить виртуальную модель детали, узла. Профессиональное техническое образование является основой совершенствования производства, поэтому в настоящее время особенно актуальны вопросы модернизации системы инженерного образования. Современный этап реформирования профессионального образования характеризуется поиском и внедрением путей, позволяющих обеспечивать повышение профессиональной компетентности будущих специалистов технической сферы, максимальное приближение к реальному производству, надежное сочетание фундаментальных знаний с использованием инновационных технологий. Меняется не только технологический, но и весь уклад жизни, меняются и представления об инженерной деятельности, растут требования к этой профессии.

Использование программы АРМ для расчёта деталей и механизмов позволяет обеспечить решение поставленных задач проектирования с наименьшими затратами материалов и средств, с высокой производительностью и надежностью.

## 2. Краткое описание APM WinMachine

APM WinMachine – это пакет прикладных программ, созданный для автоматизированного расчёта и проектирования в машиностроении и строительстве, разработанная с учетом последних достижений в вычислительной математике, области численных методов и программирования, а также теоретических и экспериментальных инженерных решений. Он состоит из отдельных модулей, предназначенных для решения отдельных классов задач.

APM WinMachine содержит:

- APM WinJoint – модуль расчёта и проектирования соединений элементов машин;
- APM WinShaft – модуль расчёта и проектирования валов и осей;
- APM WinBear – модуль расчёта и проектирования неидеальных подшипников качения;
- APM WinPlain – модуль расчёта подшипников скольжения;
- APM WinScrew – модуль расчёта неидеальных винтовых передач;
- APM WinTrans – модуль расчёта и проектирования механических передач вращения;
- APM WinSpring – модуль расчёта и проектирования упругих элементов машин;
- APM WinCam – модуль расчёта и проектирования кулачковых механизмов;
- APM WinSlider – модуль расчёта и проектирования рычажных механизмов произвольной структуры;
- APM WinFEM2D – модуль конечно-элементного анализа плоских деталей;
- APM WinBaem – модуль расчёта и проектирования балочных конструкций;
- APM WinTruss – модуль расчёта ферменных конструкций;
- APM WinFrame3D – модуль расчёта и проектирования трёхмерных рамных конструкций;
- APM WinStructure3D – модуль расчёта и проектирования стержневых, пластинчатых, оболочечных конструкций и их произвольных комбинаций;
- APM WinDrive – модуль расчёта и проектирования редукторов.

Ниже приводится краткое описание модулей, предлагаемых для использования в курсовом проектировании по курсу "Детали машин".

### 2.1. APM WINJOINT

APM WinJoint - это модуль расчета и проектирования соединений. Он позволяет выполнить комплексный расчет и анализ соединений, которые наиболее часто используются в машиностроении и строительстве.

Модуль позволяет рассчитать:

- групповые резьбовые соединения, поставленные в отверстие с зазором и без него, установленные в произвольном порядке и предназначенные для соединения различных поверхностей. При этом в качестве элементов крепления могут быть рассчитаны болты, винты и шпильки, работающие при произвольном внешнем нагружении;
- сварные соединения при произвольной внешней нагрузке и произвольном размещении сварных швов следующих типов:
  - \* стыковые;
  - \* тавровые;
  - \* нахлесточные;
  - \* соединения, выполненные точечной сваркой;
- заклепочные соединения произвольного размещения при плоском нагружении;
- соединения деталей вращения, конструктивно выполненные как:
  - \* соединения с натягом цилиндрической или конической форм;
  - \* шлицевые или шпоночные соединения разных типов;
  - \* штифтовые радиальные и осевые соединения;
  - \* соединения коническими кольцами;
  - \* клеммовые соединения различного конструктивного выполнения;
  - \* профильные соединения различных модификаций.

APM WinJoint позволяет выполнить все необходимые для выбранного типа соединения расчеты (в форме проверочного и проектировочного). При проектировочном расчёте производится комплекс вычислений по определению основных геометрических размеров соединения, а при проверочном - находятся значения коэффициентов запаса. При этом критериями расчета резьбовых соединений являются: условие отсутствия сдвига и раскрытия сопряженных поверхностей, а также статическая и усталостная прочность элементов соединения. Сварные швы рассчитываются из условия статической и усталостной прочности, а заклепочные - из условия прочности при постоянной нагрузке. Критерием расчета соединений деталей вращения может быть: условие отсутствия сдвига; условие появления зазоров в сопряженных поверхностях; статическая и усталостная прочность элементов соединения, а также совокупность этих критериев.

## 2.2. APM WINSHAFT

Модуль APM WinShaft представляет собой программу для расчета и проектирования валов. Валы предназначены для передачи крутящего момента и поддержания вращающихся вместе с ним деталей. Они относятся к числу наиболее ответственных деталей машин, поэтому к ним предъявляются высокие требования по точности изготовления, прочности, жесткости, устойчивости и характеру колебаний. Модуль APM WinShaft позволяет выполнить весь цикл проектирования валов и осей, начиная от разработки конструкции и заканчивая полным статическим и динамическим расчетом.

С помощью APM WinShaft можно рассчитать и построить:

- реакции в опорах валов;
- эпюры моментов изгиба и углов изгиба;
- эпюры моментов кручения и углов закручивания;
- деформированное состояние вала;
- напряженное состояние при статическом нагружении;
- коэффициент запаса по усталостной прочности;
- эпюры распределения поперечных сил;
- собственные частоты и собственные формы вала.

Модуль APM WinShaft имеет специализированный графический редактор для задания геометрии валов и осей. Редактор обеспечивает:

- задание конструкции вала;
- ввод нагрузок, действующих на вал;
- размещение опор, на которых установлен вал.

Примитивы APM WinShaft - это основные элементы конструкции вала (цилиндрические и конические участки, фаски, галтели, канавки, отверстия, участки с резьбой, шпонки, шлицы и т. д.), а также нагрузки, которые могут действовать на вал или опору.

Напряженное и деформированное состояния вала рассчитываются методами сопротивления материалов. Так, деформированное состояние описывается методом Мора, а раскрытие статической неопределимости выполняется методом сил. Статическая прочность оценивается по эквивалентным напряжениям, полученным энергетическим методом. Динамические характеристики, такие как собственные частоты и собственные формы, определяются методом начальных параметров. Расчет усталостной прочности сводится к нахождению коэффициента запаса в текущем сечении по длине вала, причем как при постоянной внешней нагрузке, так и в случае, когда известен закон ее изменения во времени. В состав APM WinMachine входит единая база. Все необходимые параметры материалов, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность и т. п., берутся из нее.

## 2.3. APM WINBEAR

APM WinBear выполняет комплексный анализ подшипников качения, представляющих собой основной тип опор для вращающихся деталей машин. Используя этот модуль,

можно рассчитать основные характеристики подшипников и выбрать оптимальные конструкции подшипниковых узлов.

С помощью APM WinBear можно рассчитать:

- перемещения (жесткость);
- долговечность;
- наибольшие контактные напряжения;
- потери мощности;
- силы, действующие на тела качения;
- тепловыделение;
- момент трения.

В APM WinBear выполняется весь комплекс проверочных расчетов, когда по известной геометрии подшипника рассчитываются его выходные характеристики. Весь комплекс полученных решений предоставляет пользователю возможность наглядно как качественно, так и количественно оценить пригодность подшипника (или пары подшипников) и в случае необходимости наметить пути для подбора параметров более эффективных опор.

В APM WinBear могут быть рассчитаны подшипники восьми наиболее распространенных типов:

- шариковые радиальные;
- шариковые сферические;
- шариковые радиально-упорные;
- шариковые упорные;
- роликовые радиальные;
- роликовые сферические;
- роликовые радиально-упорные;
- роликовые упорные.

Результаты расчета нагрузок позволяют также определить серию энергетических характеристик, от которых зависит потребление энергии и рабочая температура подшипника: коэффициент полезного действия, моменты трения, потери мощности при трении, тепловыделение и т. д.

Результаты расчета представляются в виде:

- **таблиц** со статистическими характеристиками;
- **гистограмм** компонент перемещений;
- **пространственного поля** положений центра подшипника;
- **анимации** движения подшипника;
- **графиков**, описывающих изменения параметра по углу поворота подшипника.

Так как важным параметром расчета является информация о нагрузках, действующих на тела качения, в модуле APM WinBear предусмотрен наглядный вывод этой информации на экран. Кроме этого можно также вращать подшипник качения и наблюдать за изменением этих нагрузок.

Все геометрические размеры подшипника задаются вручную, но можно воспользоваться единой базой данных, которая входит в состав APM WinMachine. Нагрузки на подшипник вводятся с экрана в зависимости от типа установки подшипника. Параметры точности по желанию пользователя выбираются с помощью базы данных по заданному классу точности.

Для случая, если действующие на вал внешние нагрузки изменяются во времени, имеется специализированный графический редактор с полным набором необходимых для ввода переменных параметров функций.

Нагрузки, действующие на подшипник, могут быть произвольными, при этом в качестве внешней нагрузки можно рассматривать также и силу предварительного натяга. Величина натяга в зависимости от типа подшипника задается либо в виде приложенной осевой (радиальной) нагрузки, либо в виде радиальных (осевых) перемещений.

## 2.4. APM WINTRANS

Модуль APM WinTrans производит расчет передач и подготавливает конструкторскую документацию, включая рабочие чертежи. Процесс проектирования с использованием APM WinTrans сводится к заданию исходных данных и анализу полученного результата. С помощью модуля APM WinTrans можно выполнить весь комплекс конструкторских и технологических расчетов (как проектировочных, так и проверочных) передач вращательного движения, а также выполнить рабочие чертежи основных деталей этих передач в автоматическом режиме. В качестве объектов для расчетов выбраны передачи, широко используемые в практике проектирования.

С помощью APM WinTrans Вы можете проектировать следующие типы передач:

- цилиндрические с прямым зубом как внешнего, так и внутреннего зацепления;
- цилиндрические с косым зубом внешнего зацепления;
- шевронные;
- конические с прямыми и круговыми зубьями;
- червячные;
- цепные;
- ремённые.

При проектировочном типе расчета известными считаются выходные кинематические и энергетические параметры, а результатом является определение геометрических размеров передачи при выбранных материалах и термообработке. Для выполнения расчета необходимо указать следующие исходные параметры передачи: передаваемый момент, ресурс, условия работы, передаточное отношение и т.д. Опираясь на эти данные, модуль APM WinTrans рассчитывает все геометрические параметры передачи [1,2].

Все расчеты проводятся как в условиях постоянного, так и переменного режимов реального нагружения. Учет переменного характера нагружения в APM WinTrans осуществляется либо в виде нормального переменного режима, либо с помощью специального инструмента для ручного задания таких режимов.

В основу проектировочного и проверочного расчетов положены следующие критерии:

- усталостная, контактная прочность и усталостная прочность на изгиб для цилиндрических, конических и червячных передач;
- износостойкость шарниров цепи для расчета цепных передач;
- нагрузочная способность и долговечность ремня при проектировании ременных передач.

Можно наложить дополнительные ограничения на рассчитываемую передачу. Например, рассчитать передачу с требуемым межосевым расстоянием или другим каким-либо параметром.

Результатом расчета зубчатой передачи с помощью APM WinTrans является полный перечень параметров, необходимых при проектировании, а именно:

- геометрические параметры элементов передач;
- силы, действующие на валы от передач;
- действующие напряжения и величины допускаемых напряжений;
- весь спектр параметров контроля качества изготовления;
- параметры качества передачи;
- рабочие чертежи ведущего и ведомого элементов передачи.

С помощью APM WinTrans можно проверить несущую способность известной передачи (то есть, передачи с заданными геометрическими параметрами, условиями работы, термообработкой колёс и т.д.). Несущая способность оценивается по двум критериям:

- ресурс работы передачи при заданном передаваемом моменте;
- максимальный передаваемый момент при заданном ресурсе.

APM WinTrans предоставляет пользователю все необходимые данные для проверки качества изготовления элементов передачи. Для цилиндрических передач параметры контроля делятся на:



- параметры торцевого профиля зубьев;
- параметры постоянной хорды;
- параметры общей нормали;
- параметры по толщине хорды;
- параметры контроля по роликам;
- параметры проверки положения разноименных профилей зубьев;
- параметры качества зацепления.

В модуле APM WinTrans можно создать рабочий чертёж элемента рассчитываемой передачи. Чертеж сохраняется в формате DXF. При подготовке чертежа в модуле есть возможность:

- изменять, в известных пределах, конструкцию передачи и уточнять конфигурацию изображаемой детали и других элементов чертежа;
- проставлять предельные отклонения размеров и указывать технические требования;
- заполнять главную надпись чертежа и т.д.

Все это задается в зависимости от нормативных параметров и требований действующих российских стандартов и нормалей. Для выполнения этих операций в APM WinTrans имеется полный набор простых и удобных средств. Если в компьютере пользователя установлен AutoCAD™, то его можно вызывать непосредственно из модуля WinTrans для окончательного редактирования чертежа и дальнейшей распечатки на бумаге.

## 2.5. APM GRAPH

Модуль APM Graph предназначен для выполнения графической части компьютерной подготовки конструкторской документации (возможно, из полученной в результате расчётов заготовки чертежа спроектированной детали). APM Graph представляет собой плоский графический редактор, который можно использовать для оформления графической части конструкторской документации. Он может использоваться для подготовки исходных данных при работе отдельных модулей системы APM WinMachine. С этой целью в каждой из прикладных расчетных программ имеется возможность импорта графической информации.

Для отрисовки объектов имеется набор примитивов (простейших объектов чертежа), таких как линия, окружность, дуга, точка, сплайн. Причем объекты можно рисовать как в свободном режиме, так и связанными с другими объектами: параллельно, перпендикулярно, касательно и др. Для каждого примитива существует несколько способов задания. В зависимости от установленных параметров геометрические связи между объектами могут закрепляться и отслеживаться при редактировании. Точные числовые параметры примитивов можно ввести в диалоговом окне ручного ввода.

В модуле *APM Graph* имеются команды, которые можно использовать для нанесения линейных и угловых размеров. Размеры проставляются как в автоматическом, так и ручном режиме. Они легко редактируются. Имеется возможность простановки допусков линейных и угловых величин. Величины допусков можно взять из библиотеки APM Data. Для рисования объектов различными типами линий имеется встроенный редактор. Разработанные типы линий можно записывать в файл и использовать их в дальнейшем в других чертежах.

При вводе текста имеется возможность форматирования абзаца: задание отступов; интервалов; выравнивания; угла наклона. Штриховка создается нескольких типов: сплошная заливка; градиентная заливка; наклонными линиями; предопределенная штриховка и текстурная, когда в качестве образца используется *bmp* или *wfn* файл. Для нанесения размеров на чертеж используются следующие типы: линейные, угловые и радиальные. Имеется возможность простановки различных специальных символов: допусков, знаков базы, шероховатости, выносок и специальных знаков. Для соединения линий и дуг можно создать скругления или фаски по различным типам параметров.

В чертежно-графическом редакторе есть возможность нанесения графических символов, выполненных согласно существующим ГОСТам на оформление графической документации. Эти символы используются в качестве условных обозначений чистоты обработки по-

верхности детали, технических требований на эти поверхности, а также некоторых специальных элементов, таких как сварные швы и т. д. Следует отметить, что дополнительно с редактором поставляется набор библиотек стандартных элементов.

Удобным инструментом оформления конструкторской документации является редактор таблиц, использование которого существенно облегчает работу по оформлению технических документов, включающих таблицы различных форм и размеров. С помощью этого редактора можно сформировать таблицу произвольного содержания, выбрать подходящий тип линий и заполнить поля текстовой информацией. Удобно организованы операции редактирования.

Для более удобной работы с чертежом предусмотрена работа с блоками. Блок - это совокупность объектов, с которой можно работать как с одним объектом. Возможно создавать блоки как из отдельных примитивов, так и использовать вложения блоков друг в друга. Их можно сохранять в отдельном файле для организации библиотек конструкций.

При работе над чертежом предусмотрена возможность размещения объектов по различным слоям. Слоями можно управлять с помощью *менеджера слоев*, где можно управлять включением/отключением и блокировкой/разблокировкой слоев.

Объекты чертежа можно редактировать различными способами: перемещать, создавать копии, вращать, масштабировать, зеркально отображать, создавать прямоугольный и круговой массивы, смещать объекты. Можно производить разрыв линий, дуг, окружностей или сплайнов в точке или между двумя точками. В чертежном редакторе существует буфер на 200 команд отменить/повторить. Имеется возможность предварительного просмотра чертежа и его печати на принтер или плоттер.

В чертежно-графическом редакторе есть возможность *параметрического задания графического объекта*. Под этим понимается создание чертежа с помощью *параметризованных блоков*, которые представляют собой блоки с заданными параметрами. Например, можно создать параметризованный блок "фланец" с параметрами внутренний и внешний диаметр, количество и диаметр отверстий и т. д.. После этого блок "фланец" можно использовать во многих чертежах, не создавая его каждый раз заново, а лишь задавая его новые параметры.

Крайне важен тот факт, что любая машина наполовину состоит из типовых деталей и узлов, и в этой связи параметризация позволяет автоматически рисовать геометрические объекты, если после выполнения необходимых расчетов последние были заданы параметрически. При работе в этом режиме автоматически сохраняется последовательность выполняемых команд и их атрибутов. Этим атрибутам можно присваивать соответствующие имена и задавать необходимые числовые и функциональные соотношения. Функциональные соотношения могут быть совершенно произвольными, т. е. описанными любыми аналитическими функциями. Для задания таких функций имеется специальный редактор анализа и преобразования аналитических данных. Стандартные конструктивные графические элементы, оформленные в виде параметрических объектов в среде *APM Graph*, включены в состав единой базы и функционируют вместе с ней как в режиме расчета, так и в режиме прорисовки.

В случае параметризованного блока появляется возможность хранения библиотек стандартных конструкций.

### 3. Пример использования APM WinMachine

Рассмотрим использование пакета прикладных программ APM WinMachine на примере следующего задания курсового проекта [2, 3].

Требуется спроектировать двухступенчатый цилиндрический косозубый редуктор с заданными данными:

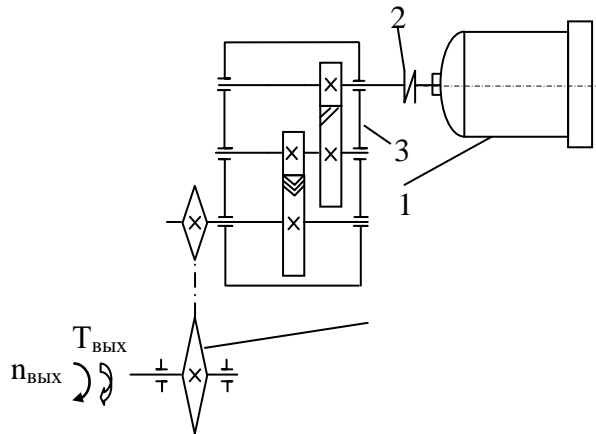
выходной момент  $T_{\text{вых}}=610 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;

частота вращения выходного вала  $n_{\text{вых}}=38 \text{ мин}^{-1}$ ;

долговечность  $t=14000 \text{ ч}$ ;

вероятность обеспечения заданного срока службы  $\varphi=0,89$ .

Схема редуктора:



1 - электродвигатель

2 - муфта

3 - редуктор 2-х ступенчатый цилиндрический

4 - цепная передача

При выполнении расчётов курсового проекта мы будем использовать следующие программы:

1. APM WinTrans (для расчёта зубчатой и цепной передачи);
2. APM WinBear (для расчёта подшипников);
3. APM WinShaft (для расчёта валов);
4. APM WinJoint (для расчёта соединений).

#### 3.1. РАСЧЁТ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Привод содержит следующие ступени:

- быстроходная ступень;
- тихоходная ступень редуктора;
- цепная передача.

Для примера рассмотрим расчёт быстроходной ступени данного редуктора, тихоходная рассчитывается аналогично.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

3.1.1. Производим кинематический и силовой расчёт привода<sup>1</sup>.

Определим общий КПД привода:

$$\eta = \eta_m \eta_n^3 \eta_{з.п.}^2 \eta_{ц.п.},$$

где  $\eta$  - общий КПД;

<sup>1</sup> Расчёты в этом пункте производятся вручную или с использованием простейших вычислительных средств компьютера.

$\eta_m$  – КПД муфты (0,99...0,98);  
 $\eta_n$  – КПД подшипников (0,99...0,995);  
 $\eta_{з.п.}$  – КПД зубчатой передачи (0,96);  
 $\eta_{ц.п.}$  – КПД цепной передачи (0,95...0,97 – закрытая передача).

$$\eta = 0,98 \cdot 0,995^3 \cdot 0,96^2 \cdot 0,96 = 0,85$$

3.1.2. Определим потребную мощность электродвигателя по формуле:

$$P = T_4 \omega_4 / \eta,$$

где  $P$  – потребная мощность электродвигателя;  
 $T_4$  – момент на выходном валу привода;  $T_4 = 610 \text{ Нм}$ ,  
 $\omega_4$  – угловая скорость выходного вала привода;  
 $\omega_4 = \pi n_4 / 30 = 3,14 \cdot 38 / 30 = 3,98 \text{ с}^{-1}$ ;

$$P = 610 \cdot 3,98 / 0,85 = 2,86 \text{ кВт}.$$

Выбираем электродвигатель типа 4АМ100S4У3 [3].

$n_{ном.} = 1435 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_{ном.} = 3,0 \text{ кВт}$ .

3.1.3. Разбиваем передаточное отношение по ступеням.

Определим общее передаточное число:

$$U_{общ.} = n_1 / n_4,$$

$$U_{общ.} = 1435 / 38 = 37,74$$

Определим передаточное отношение редуктора:

$$U_{ред.} = U_{общ.} / U_{ц.п.},$$

где  $U_{ц.п.}$  - передаточное отношение цепной передачи,  $U_{ц.п.} = 2 \dots 4$ , принимаем  $U_{ц.п.} = 3$ .

$$U_{ред.} = 37,74 / 3 = 12,6$$

Согласно рекомендациям [3, 4] принимаем передаточное число быстроходной ступени редуктора  $U_{б.} = 4,5$ , а передаточное число тихоходной передачи  $U_m = 2,8$ .

Определим уточнённое общее передаточное число привода:

$$U_{общ.} = U_{ред.} \cdot U_{ц.п.},$$

$$U_{общ.} = 4,5 \cdot 2,8 \cdot 3 = 37,5$$

Отклонение передаточного числа:

$$\Delta U = [(37,74 - 37,5) / 37,74] \cdot 100\% = 0,64\% < \pm 4\%$$

Следовательно, выбранный электродвигатель и выбранные передаточные отношения удовлетворяют данному приводу [4,5]. Следует заметить, что полученные данные могут быть скорректированы при расчёте передач.

3.1.4. Определим угловые скорости вращения валов привода:

$$n_1 = n_{дв} = 1435 \text{ об/мин};$$

$$\omega_1 = \pi n_1 / 30 = 3,14 \cdot 1435 / 30 = 151,0 \text{ с}^{-1};$$

$$n_2 = n_1 / U_б = 1435 / 4,5 = 318,9 \text{ мин}^{-1};$$

$$\omega_2 = \pi n_2 / 30 = 3,14 \cdot 318,9 / 30 = 33,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n_3 = n_2 / U_m = 318,9 / 2,8 = 114,0 \text{ мин}^{-1};$$

$$\omega_3 = \pi n_3 / 30 = 3,14 \cdot 114 / 30 = 11,98 \text{ с}^{-1};$$

$$n_4 = n_3 / U_{ц.н.} = 114 / 3 = 38,0 \text{ мин}^{-1};$$

$$\omega_4 = \pi n_4 / 30 = 3,14 \cdot 38 / 30 = 4,0 \text{ с}^{-1};$$

3.1.5. Определим вращающие моменты, передаваемые валами привода:

$$T_4 = T_{вых} = 610 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$T_3 = T_4 \eta_{ц.н.} / U_{ц.н.} = 610 \cdot 0,96 / 3 = 213,07 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

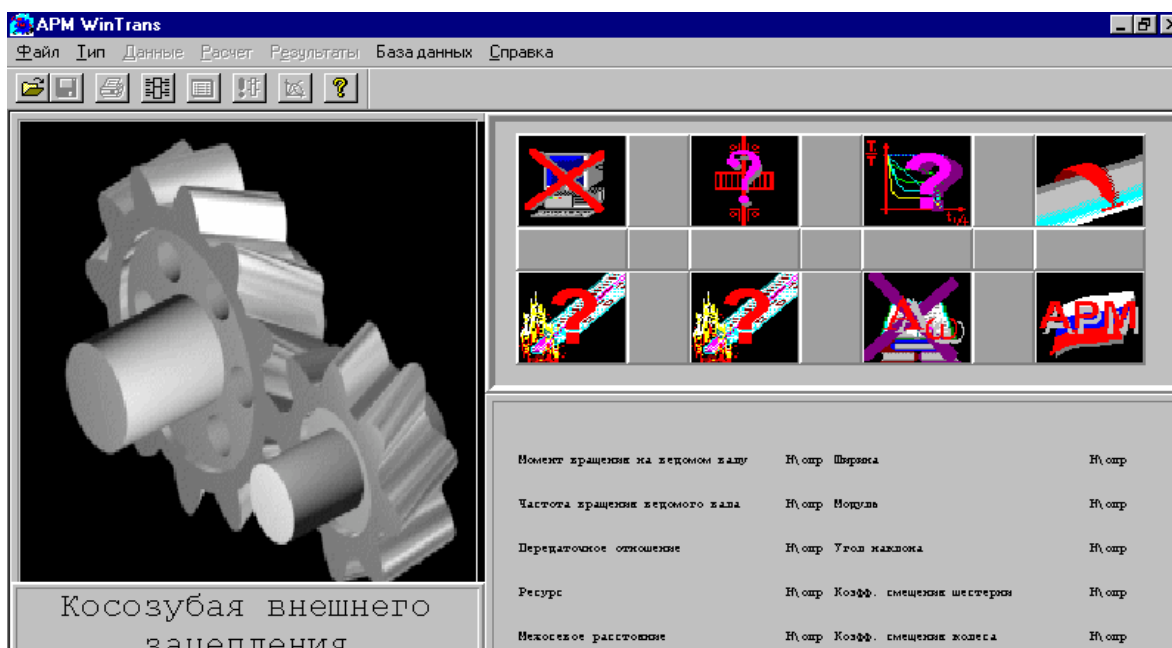
$$T_2 = T_3 \eta_{з.н.} \eta_n / U_m = 213,07 \cdot 0,96 \cdot 0,995 / 2,8 = 80 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$T_1 = T_2 \eta_{з.н.} \eta_n / U_б = 80,1 \cdot 0,96 \cdot 0,995 / 4,5 = 18,94 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

### 3.2. РАСЧЁТ ПЕРЕДАЧ С ПОМОЩЬЮ APM WINMACHINE.

Из пакета прикладных программ APM WinMachine 2021 надо выбрать программу APM WinTrans (расчёт передач) [6,7]<sup>2</sup>.

Появится диалоговое окно этой программы, в котором в меню **Тип** необходимо выбрать тип передачи, в нашем случае, - это **цилиндрическая косозубая передача внешнего зацепления**, а затем в этом же пункте меню **Тип расчёта**, в нашем случае, - это **Проектный расчёт**. Диалоговое окно программы APM WinTrans для расчёта цилиндрических косозубых передач выглядит следующим образом:



<sup>2</sup> Далее расчеты производятся в автоматизированном режиме с использованием компьютера и пакета программ APM WinMachine.

3.2.1. Выбираем меню *Данные* и в открывшемся диалоговом окне *Основные данные* вводим следующее: момент на выходе, обороты на выходе, передаточное отношение, требуемый ресурс, число зацеплений шестерни и колеса, термообработку шестерни и колеса, режим работы и крепление шестерни на валу.

В нашем случае используем данные по заданию, а также данные, полученные в предыдущих расчётах:

Момент на выходе – 80,0 Нм;  
 Обороты на выходе – 318,9 об/мин;  
 Передаточное отношение – 4,5;  
 Требуемый ресурс – 12460 часов;  
 Число зацеплений шестерни и колеса – 1;  
 Режим работы – средненормальный.  
 Термообработка шестерни и колеса – улучшение;  
 Крепление шестерни на валу – несимметрично.

3.2.2. Если этих данных недостаточно, то в диалоговом окне нужно нажать кнопку *Ещё* и в открывшемся диалоговом окне *Дополнительные данные* ввести данные, которые запросит программа, а именно: межосевое расстояние; коэффициент ширины колеса; модуль; угол наклона зубьев; коэффициент смещения шестерни и колеса; твёрдость поверхности зубьев шестерни и колеса; число зубьев шестерни и колеса, а также указать, возможен ли реверс в данном редукторе и применять ли в расчёте стандартное межосевое расстояние.

3.2.3. Далее нажимаем на кнопку *Продолжить*, и, если все данные введены верно, то в меню APM WinTrans нужно нажать кнопку *Расчёт*, а затем кнопку *Результаты*. Появится диалоговое окно, которое выглядит следующим образом:

В этом диалоговом окне можно выбрать для вывода следующие результаты: основные результаты; параметры материала; силы в зацеплении, а также параметры контроля: торцевого контура; по хорде; по общей нормали; по толщине хорды; по роликам; расположение зубьев; качество передачи; профиль зубьев и рабочий чертёж шестерни и колеса. В данном курсовом проекте нам необходимы для дальнейших расчётов следующие данные: основные результаты, параметры материала, силы в зацеплении. Нужные пункты надо пометить и нажать кнопку *Продолжить*.

3.2.4. Результаты расчёта быстроходной ступени цилиндрического косозубого редуктора выглядят следующим образом (вывод результатов в любом месте можно остановить, для этого нужно нажать кнопку *Прервать*):

The image shows three screenshots of a software interface for gear design calculations.

**Скриншот 1: Основные данные**  
 This dialog box contains input fields for:
 

- Момент на выходе [Нм]: 80
- Обороты на выходе [об/мин]: 318.9
- Передаточное отношение [-]: 4.5
- Требуемый ресурс [час]: 12460
- Число зацеплений: Шестерня 1, Колесо 1
- Термообработка: Шестерня Улучшение, Колесо Улучшение
- Режим работы: Средненормальный
- Крепление шестерни на валу: Несимметрично

 Buttons: Продолжить, Прервать, Помощь, Еще...

**Скриншот 2: Дополнительные данные**  
 This dialog box contains input fields for:
 

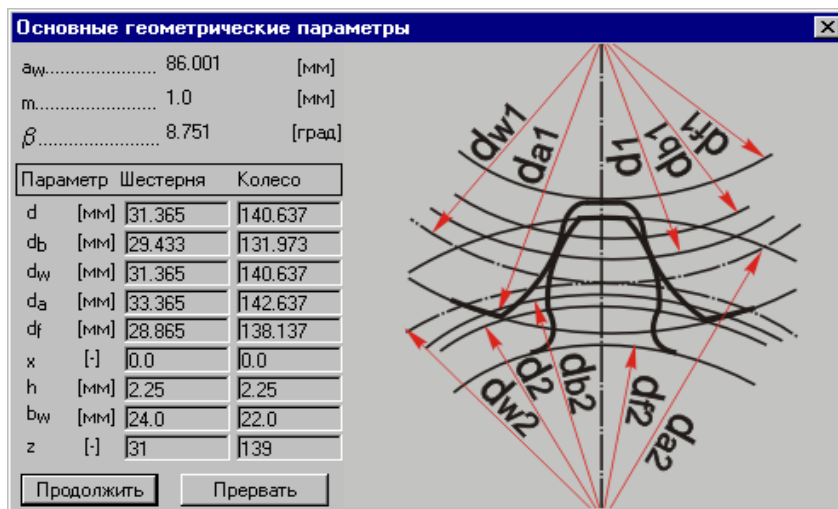
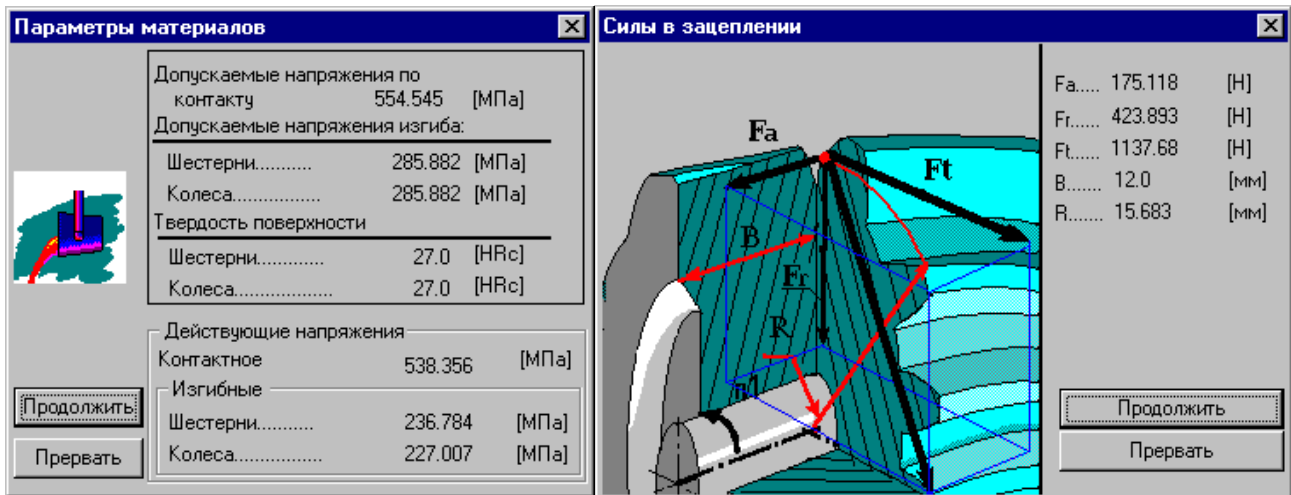
- Межосевое расстояние [мм]: 0.0
- Коэффициент ширины колеса [-]: 0.0
- Модуль [мм]: 0.0
- Угол наклона зубьев [град]: 0.0
- Коэффициент смещения: Шестерня 0.0, Колесо 0.0
- Твердость поверхности зубьев: Шестерня 0.0, Колесо 0.0
- Число зубьев: Шестерня 0, Колесо 0

 Buttons: Продолжить, Прервать, Помощь, Еще...

**Скриншот 3: Результаты**  
 This dialog box has two sections:
 

- Проверочный расчет:
  - Ресурс
  - Максимальный момент
  - Основные результаты
  - Параметры материала
  - Силы в зацеплении
  - Параметры инструмента
  - Чертеж...
- Параметры контроля:
  - Торцевого контура
  - По хорде
  - По общей нормали
  - По толщине хорды
  - По роликам
  - Расположение зубьев
  - Качество передачи

 Buttons: Продолжить, Выделить все, Помощь, Прервать, Отменить все, Профиль зубьев



3.2.5. Результаты расчёта зубчатой передачи с помощью APM WinMachine представлены в таблице 1:

Таблица 1

Параметры	Ед. изм.	WinMachine	В ручную
Межосевое расстояние	мм	86,001	89,8
Модуль зацепления	мм	1	2
Угол наклона зубьев	град	8,751	14,3
Делительный диаметр шестерни колеса	мм	31,365	33
	мм	140,637	147
Допускаемые контактные напряжения	МПа	554,545	506
Допускаемые напряжения изгиба шестерни колеса	МПа	285,882	246,86
	МПа	285,882	213
Окружная сила в зацеплении	Н	1137,68	1089,8
Радиальная сила в зацеплении	Н	423,893	410,28
Осевая сила в зацеплении	Н	175,118	288,65

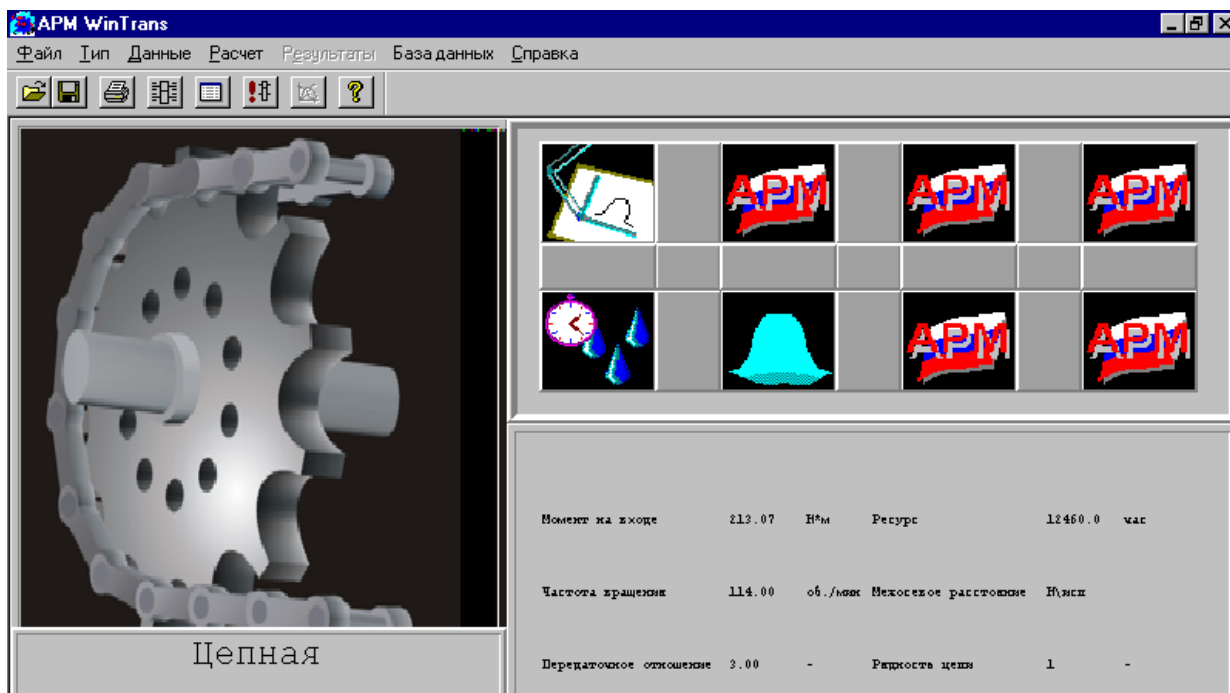
Они несколько отличаются от результатов полученных при расчёте в ручную, так как при расчётах, выполняемых программой APM WinTrans был выбран другой модуль зацепления [8].

### 3.3. РАСЧЁТ ЦЕПНОЙ ПЕРЕДАЧИ.

3.3.1. Выбираем из пакета прикладных программ APM WinMachine 2021 программу APM WinTrans (расчёт передач).

3.3.2. Появится диалоговое окно этой программы, в котором в меню *Тип* необходимо выбрать тип передачи, в нашем случае, - это *цепная передача*, а затем в этом же пункте *Тип расчёта*, в нашем случае, - это *Проектировочный расчёт*.

3.3.3. Появится диалоговое окно программы APM WinTrans, которое для расчёта цепной передачи выглядит следующим образом:



3.3.4. Выберите меню *Данные* и в открывшемся диалоговом окне *Данные цепной передачи* введите следующие основные данные: момент на ведущей звёздочке, обороты ведущей звёздочки, передаточное отношение, требуемый ресурс, рядность цепи, тип звёздочки, тип смазки, тип цепи и режим работы.

В нашем случае используем данные по заданию, а также данные, полученные в предыдущих расчётах:

момент на ведущей звёздочке – 213,07 Н·м;

обороты ведущей звёздочки – 114 мин<sup>-1</sup>;

передаточное отношение – 3;

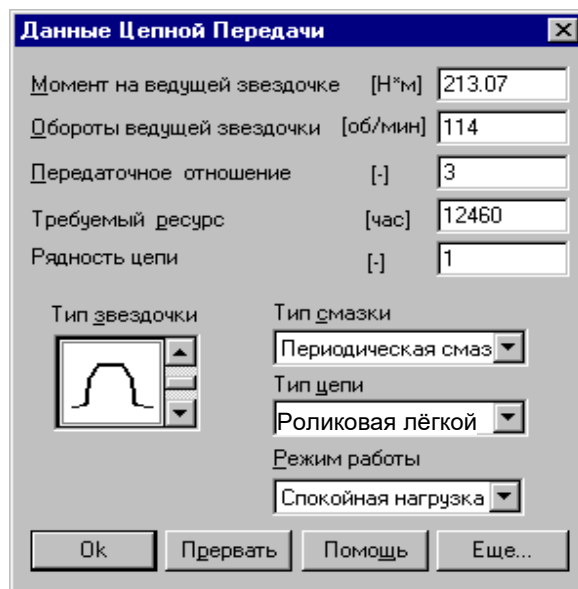
требуемый ресурс - 12460;

рядность цепи – 1;

тип смазки – периодическая смазка;

тип цепи – роликовая лёгкой серии;

режим работы – спокойная нагрузка.

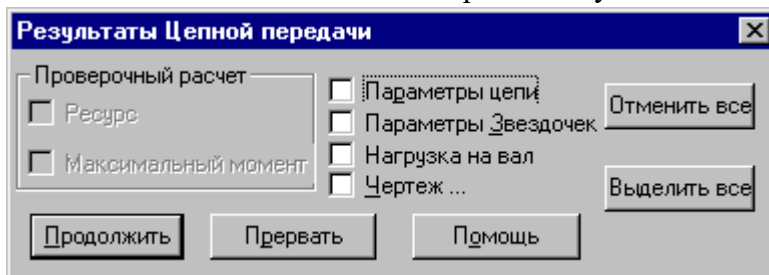


3.3.5. Если этих данных недостаточно, то в диалоговом окне нужно нажать кнопку *Ещё* и в открывшемся диалоговом окне *Дополнительные данные* ввести данные, которые запросит программа, а именно: число зубьев малой и большой звёздочек и межосевое расстояние.

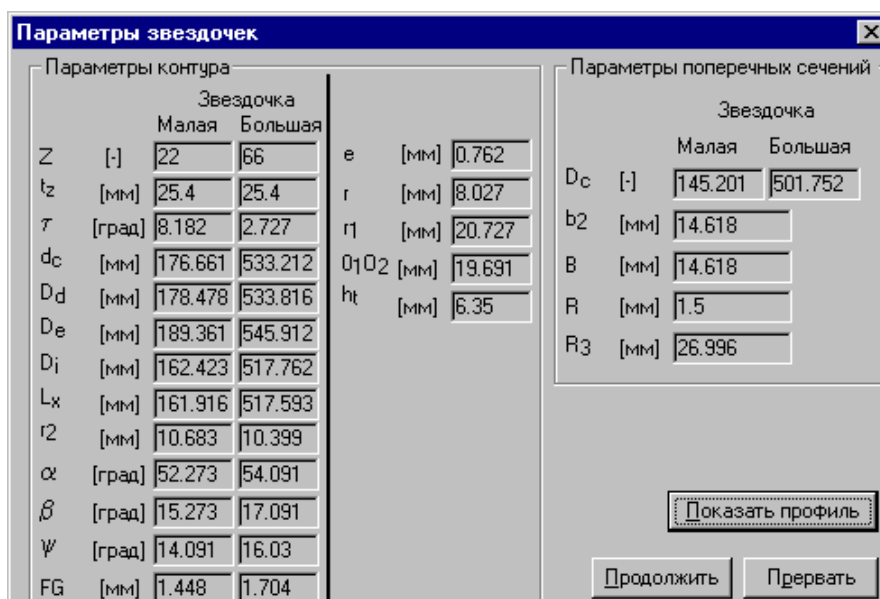
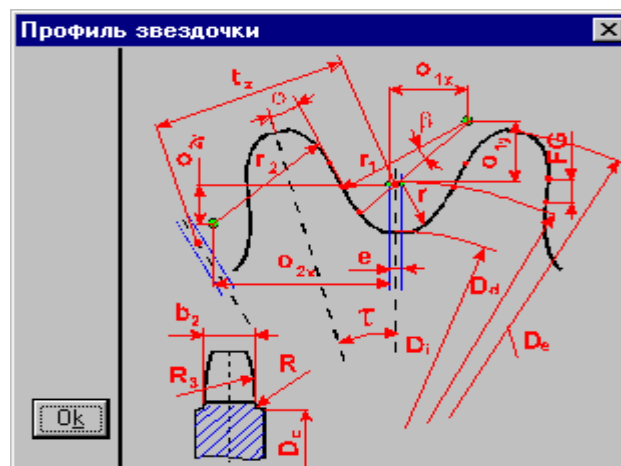
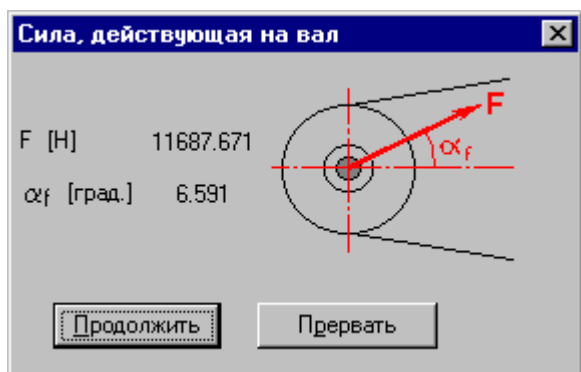


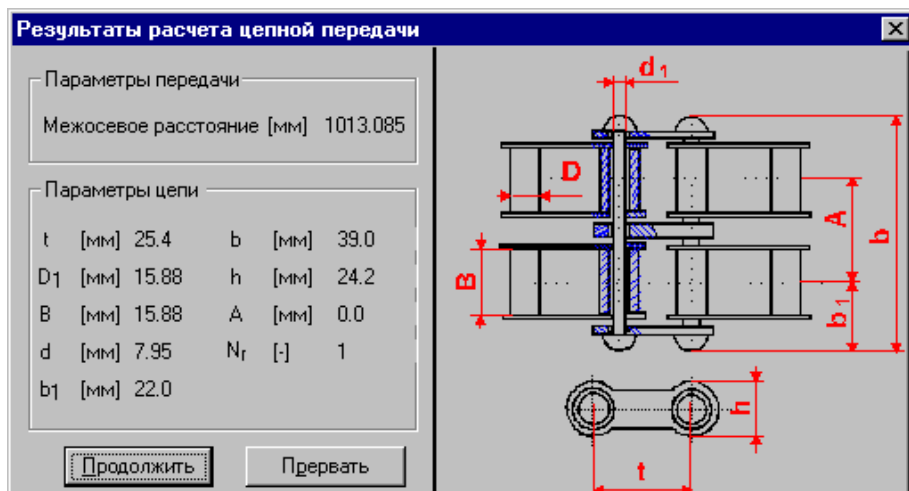
3.3.6. Далее нажимаем на кнопку **Продолжить, Ok** и, если все данные введены верно, то в меню APM WinTrans нужно выбрать пункт **Расчёт**, а затем - **Результаты**. Появится диалоговое окно **Результаты цепной передачи**.

3.3.7. В этом диалоговом окне можно выбрать следующие элементы: параметры це-



пи, параметры звездочек, нагрузка на вал и чертёж. В данном курсовом проекте нам необходимы для дальнейших расчётов следующие данные: параметры цепи; параметры звездочек и нагрузка на вал. Соответствующие поля необходимо пометить и нажать кнопку **Продолжить**. Результаты будут последовательно появляться в соответствующих диалоговых окнах. Вывод результатов в любом месте выполнения можно остановить, для этого нужно нажать кнопку **Прервать**.





3.3.8. При расчёте цепной передачи с помощью APM WinMachine 2021 были получены следующие результаты:

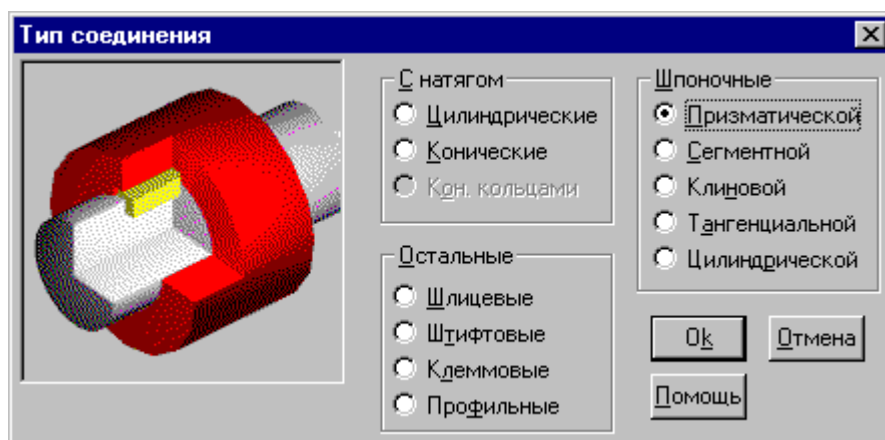
Параметры	Ед. изм.	APM WinTrans	Вручную
Число зубьев звёздочки ведущей	-	22	23
ведомой	-	66	69
Шаг цепи	мм	25,4	25,4
Межосевое расстояние	мм	1178,8	1013,085

Они несколько отличаются от результатов полученных при расчёте в ручную, так как из-за большого крутящего момента программа выбрала двухрядную цепь.

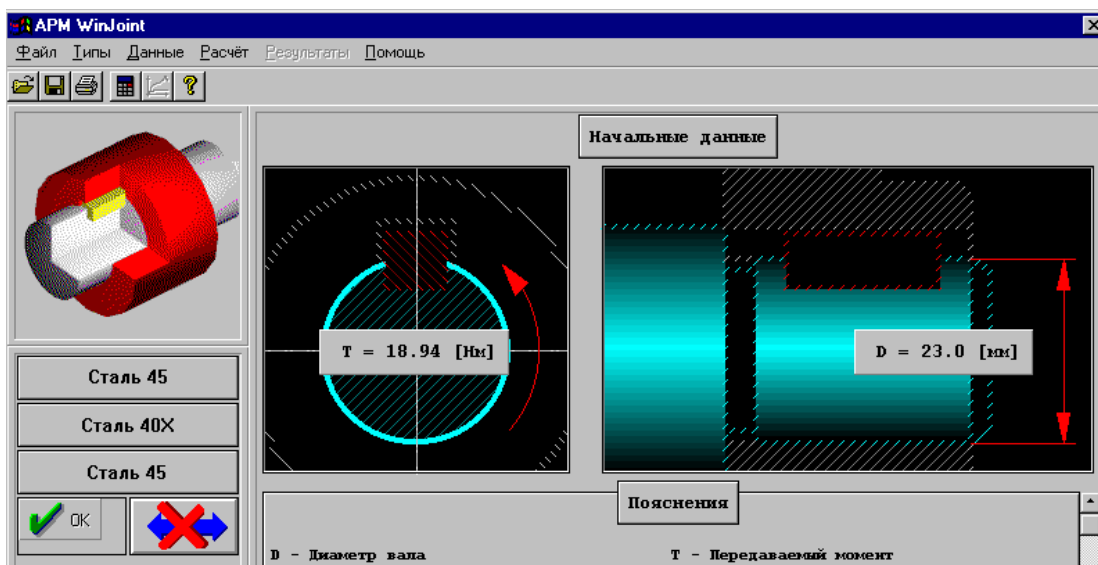
### 3.4. РАСЧЁТ СОЕДИНЕНИЙ.

В данном курсовом проекте необходимо произвести расчёт только шпоночных соединений. Для примера рассмотрим расчёт шпоночного соединения входного вала редуктора и полумуфты.

3.4.1. Из пакета прикладных программ APM WinMachine выбираем программу APM WinJoint. Появится диалоговое окно этой программы. В меню **Тип** выбираем тип соединения, в нашем случае – это **шпоночное соединение**.

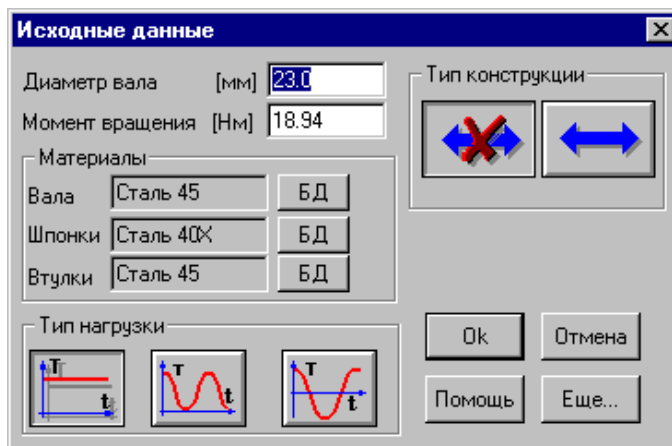


Диалоговое окно программы APM WinJoint для расчёта шпоночных соединений примет следующий вид:

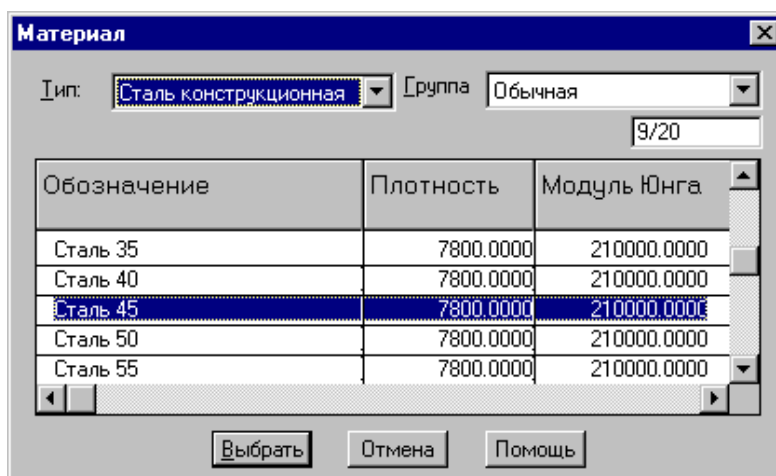


3.4.2. Выберите пункт меню **Данные** и в открывшемся диалоговом окне **Исходные данные** введите следующие основные данные: диаметр вала; момент вращения; материалы вала; шпонки и втулки; тип конструкции и тип нагрузки.

В нашем случае используем данные по заданию, а также данные, полученные в предыдущих расчётах: диаметр вала – 23,0 мм; момент вращения – 18,94 Н·м; тип конструкции – нереверсивное соединение; тип нагрузки – постоянная.



3.4.3. Для выбора материалов вала, шпонки и втулки воспользуемся справочной базой данных, для этого в диалоговом окне **Исходные данные** нужно напротив каждого элемента (вала, шпонки и втулки) нажать кнопку **БД** (база данных). В появившемся диалоговом окне **Материал** надо выбрать необходимый тип материала, его группу и марку, после выбора нужно нажимать кнопку **Выбрать**. В нашем случае материал вала и втулки – сталь конструкционная Сталь 45, а материал шпонки – Сталь 40X.



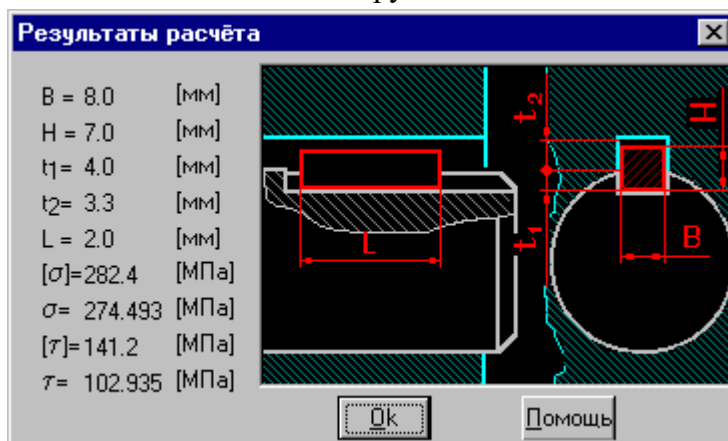
3.4.4. Далее нажимаем на кнопку **Продолжить**, и, если все данные введены верно, то в меню APM WinJoint нужно выбрать **Расчет**, а затем - **Результаты**. Появится диалоговое окно **Результаты расчёта**. Из него мы можем определить ширину шпонки, высоту шпонки, глубину паза вала и паза втулки, длину шпонки, а также напряжения смятия и кручения, как рабочие, так и допустимые.

Анализируя данные расчётов, мы видим, что расчёт по основным размерам шпоночного соединения полностью совпал с расчётами вручную, за исключением длины шпонки и из-за этого получились различные значения напряжений кручения и смятия [9].

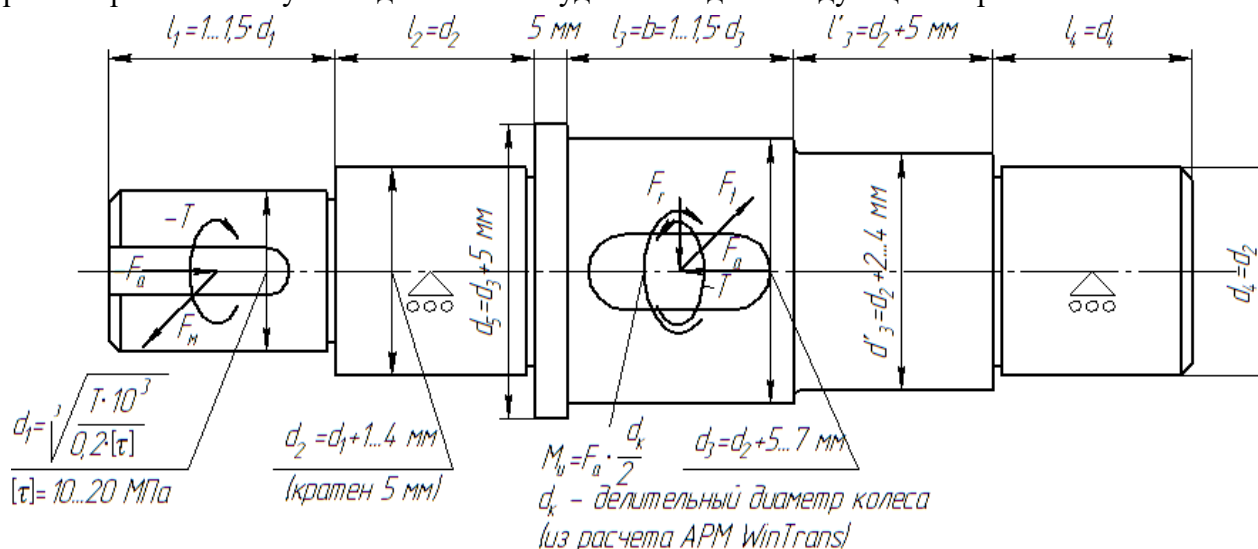
### 3.5. РАСЧЁТ ВАЛОВ

В заданном курсовом проекте редуктор имеет три вала: быстроходный, тихоходный и промежуточный. Для примера рассмотрим расчёт быстроходного вала.

3.5.1. Из пакета прикладных программ APM WinMachine необходимо выбрать программу APM WinShaft (расчёт валов). Появится диалоговое окно этой программы. Для расчёта надо изобразить вал, его опоры и действующие силы с моментами. Это можно сделать с помощью пунктов меню, но можно и с помощью панелей инструментов с кнопками. С их помощью нужно нарисовать вал, предварительно оценив его диаметр по известному крутящему моменту и допустимому напряжению кручения. Затем необходимо изобразить посадочные места для подшипников, положение и размер шпонок, обозначить его опоры (в местах расположения подшипников). Далее указываются силы и моменты, действующие на вал (их проекции, направление действия и числовое значение), учитывая, что осевые силы и крутящие моменты должны быть скомпенсированы.

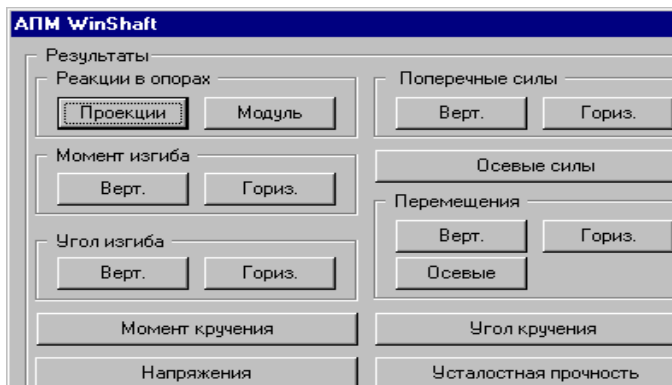
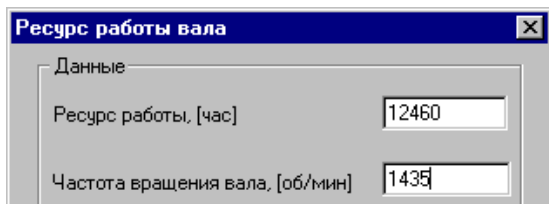


В рассматриваемом случае заданный вал будет выглядеть следующим образом:

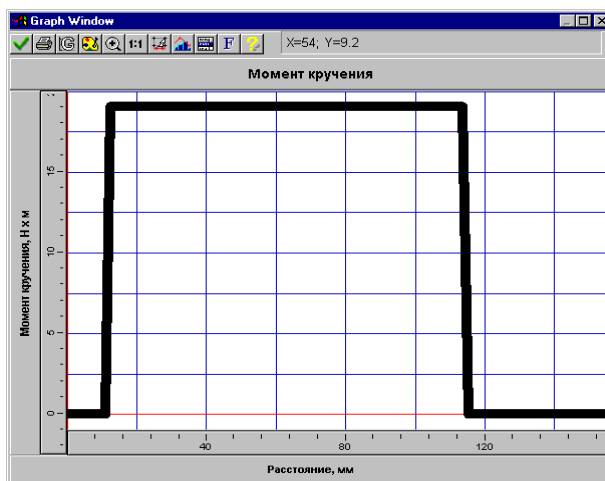
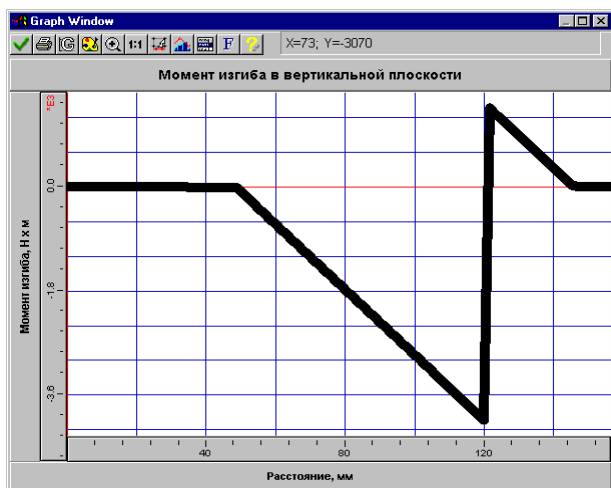


3.5.2. Далее в меню APM WinShaft нужно выбрать пункт **Рассчитать** и в открывшемся диалоговом окне выбрать необходимый пункт расчёта (общий расчёт вала или расчёт динамических характеристик), в нашем случае - общий расчёт вала. Затем нужно выбрать пункт **Результаты**, и если все данные введены верно, то появится диалоговое окно резуль-

татов расчёта. Предварительно программа запросит дополнительные данные: время работы вала и его обороты.



3.5.3. Из данного диалогового окна для дальнейших расчётов нам понадобятся следующие данные: реакции опор, момент изгиба, момент кручения и напряжения. Результаты расчётов могут быть выведены в табличном и графическом виде. Для их вывода надо нажать соответствующую кнопку. Приведём некоторые результаты нашего примера:



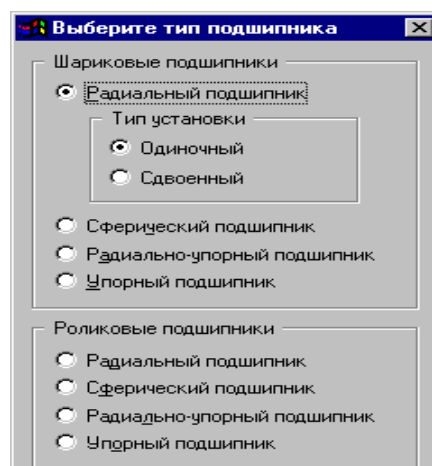
Полученные результаты дают о величине напряжений в валах, и позволяют судить о пригодности выбранной конструкции вала и необходимости её корректировки. Рассчитанные реакции опор необходимы в дальнейших расчётах (расчёт подшипников).

### 3.6. РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ

При выполнении данного курсового проекта мы выбрали следующие типы подшипников: №306 и №309 по ГОСТ8338-75. Это обусловлено тем, что нагрузочная способность этих подшипников средней серии удовлетворяет рассчитываемой косозубой передаче. Для примера произведем расчет подшипника №306, расположенного на входном валу.

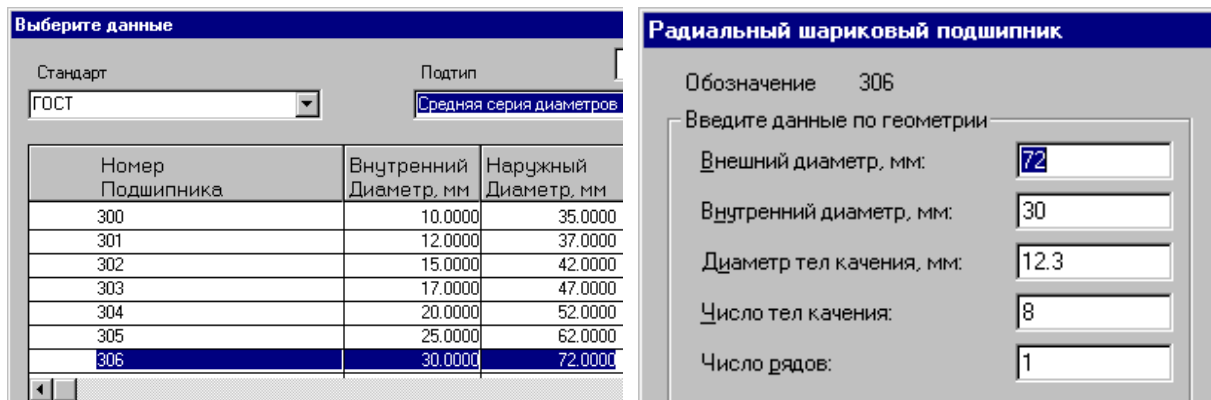
3.6.1. Из пакета прикладных программ выбираем программу APM WinBear (расчет подшипников качения).

3.6.2. Появится диалоговое окно этой программы, в котором надо выбрать пункт меню *Данные* и в диалоговом окне *Выберите тип подшипника* необходимо выбрать тип подшипника, в нашем случае, - это радиальный одиночный подшипник.



3.6.3. Далее в меню *Данные* APM WinBear необходимо выбрать данные подшипника по геометрии. Это можно сделать как вручную, с использованием справочных таблиц ГОСТа

8338-75, или с помощью базы данных пакета прикладных программ APM WinMachine. Для того, чтобы воспользоваться базой данных, необходимо в диалоговом нажать на кнопку **База данных**. При этом появится диалоговое окно базы данных, где нужно выбрать тип подшипника, в нашем случае, - это средняя серия диаметров 3; номер подшипника (№306) и нажать на кнопку **Выбрать**. При этом все необходимые для расчета данные будут автоматически введены в программу [10].

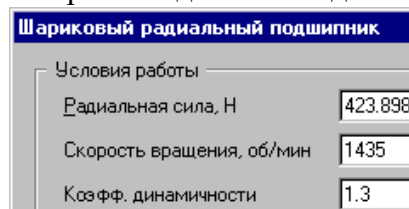


3.6.4. Далее в меню **Данные** необходимо выбрать условия работы данного подшипника, т.е.: радиальную силу, скорость вращения, коэффициент динамичности и тип нагрузки. В нашем случае имеем следующие данные:

радиальная сила – 423,898 Н;

скорость вращения – 1435 мин<sup>-1</sup>;

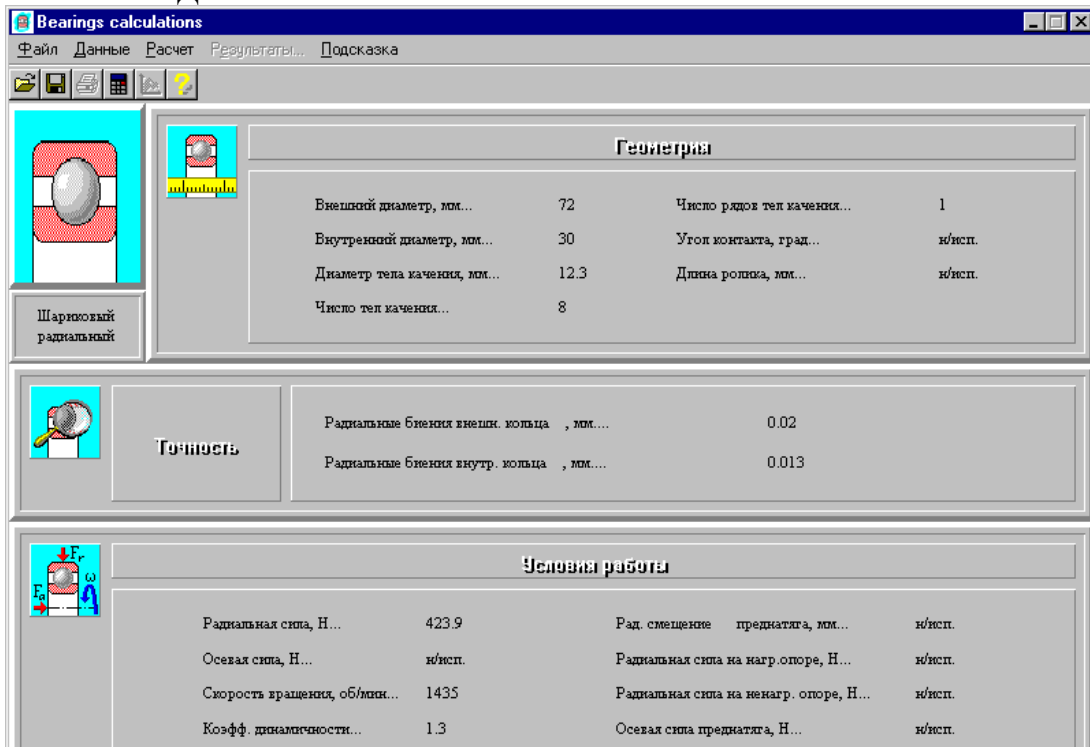
коэфф. динамичности – 1,3; тип нагрузки – постоянная.



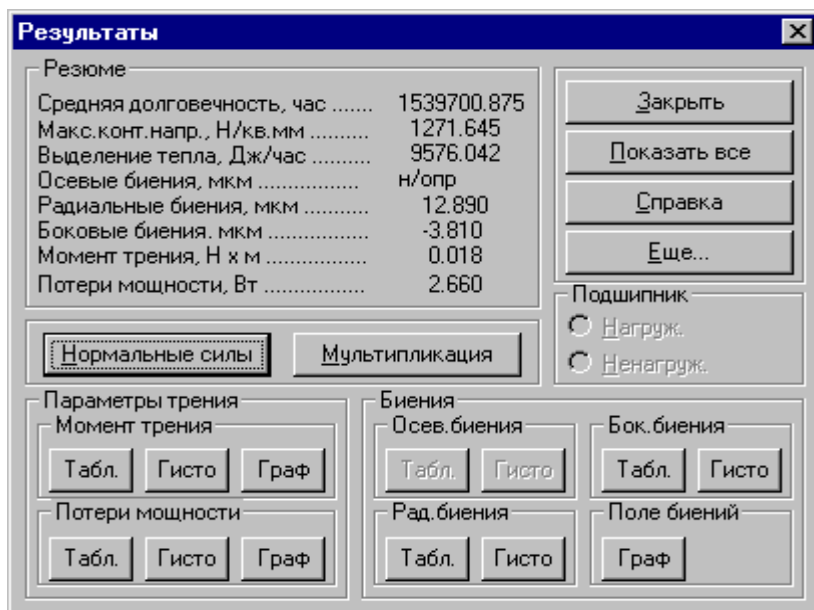
3.6.5. Далее в меню **Данные** необходимо выбрать точность изготовления колец подшипника. Для этого можно воспользоваться базой данных: в диалоговом окне **Точность изготовления** напротив каждого значения (биения внешнего и внутреннего колец) нужно нажать кнопку **БД** и для каждого для этих колец в зависимости от класса точности, максимального и минимального диаметров находим отклонения диаметра. Нажимаем кнопку **Ok** и данные по отклонению диаметра будут автоматически введены в программу для дальнейшего расчета.



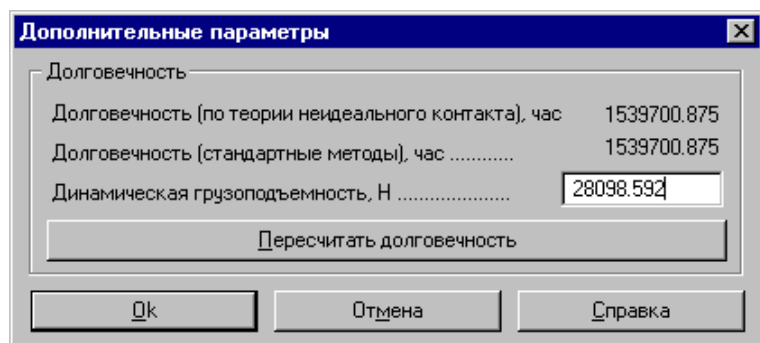
### 3.6.6. Диалоговое окно APM WinBear



3.6.7. Далее в меню программы для расчета подшипников качения необходимо выбрать пункт меню **Расчет**, а затем **Результаты**. Появится диалоговое окно **Результаты**.



3.6.8. Из этого окна мы видим следующие параметры: средняя долговечность; максимальные контактные напряжения; выделение тепла; осевые биения; радиальные биения; боковые биения; момент трения; потери мощности. Также из этого окна мы можем вывести следующие данные: нормальные силы; мультипликация; параметры трения: момент трения и потери мощности. Параметры биения: осевые; боковые; радиальные и поле биений могут быть выведены в виде таблицы или гистограммы. Также

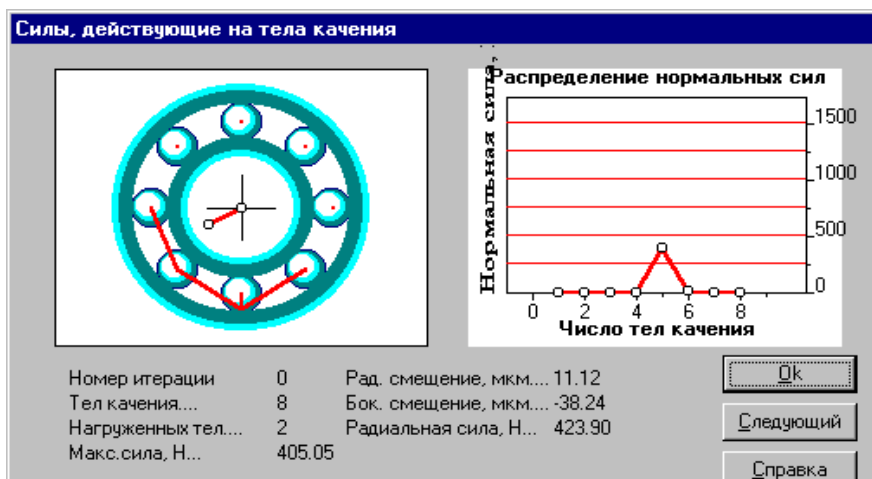




можно определить дополнительные параметры: долговечность подшипника и динамическую грузоподъемность. Для этого нужно нажать на кнопку **Ещё**.

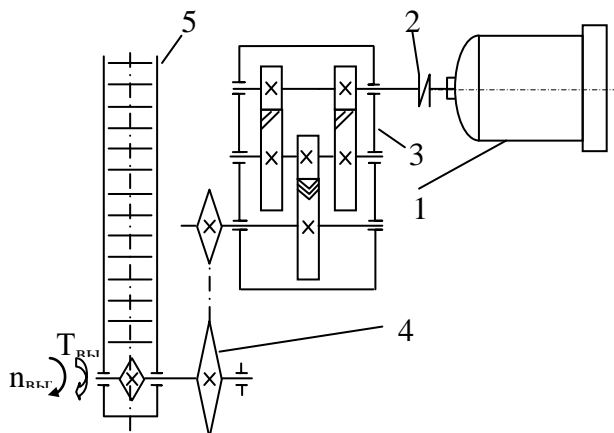
Для примера покажем силы, действующие на тела качения, долговечность и динамическую грузоподъемность.

3.6.9. Из данных расчетов следует, что выбранный подшипник №306 удовлетворяет по долговечности и динамической грузоподъемности требованиям, предъявляемым к рассчитываемому подшипнику. Если расчётная долговечность много больше заданной, то следует выбрать подшипник серии №206.



## 4. Задания для индивидуальной работы

Задание № 1. Спроектировать привод к транспортёру-раздатчику кормов



Срок службы принять равным  $t=14\ 500$  ч

Вероятность обеспечения заданного срока службы редуктора – 0.79

1- электродвигатель

4- цепная передача

2- муфта

5- раздатчик кормов

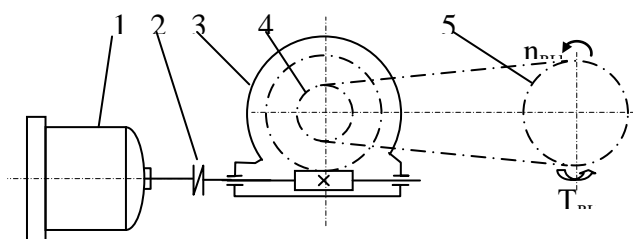
3- редуктор

Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Двухступенчатый цилиндрический редуктор с расположением осей в плоскости разъёма, с раздвоенной быстроходной ступенью, тихоходная ступень с шевронными колёсами, с выходом валов в разные стороны.										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	160	188	187	337	246	397	360	314	324	259
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	78	90	100	45	52	30	40	60	50	48



Задание № 2. Спроектировать привод к клеточной батарее для группового содержания кур.



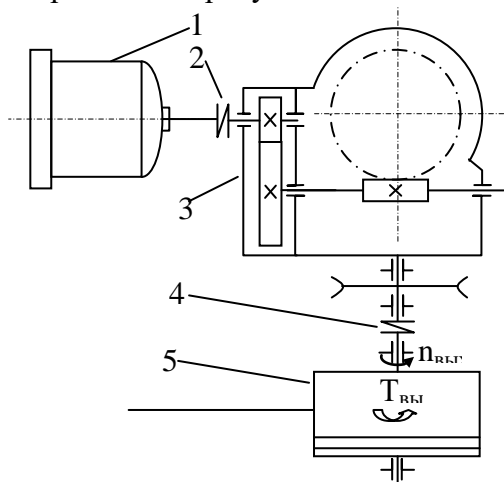
Срок службы принять равным  $t=8\ 500$  ч

- 1- электродвигатель
- 2- муфта
- 3- редуктор
- 4- ведущая звёздочка
- 5- ведомая звёздочка

Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Редуктор червячный универсальный с разгруженным тихоходным валом.										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	340	486	370	666	515	595	226	323	254	345
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	48	33	26	18	13	16	72	50	38	27

Задание № 3. Спроектировать привод к тяговой лебёдке для транспортировки тракторов в мастерскую



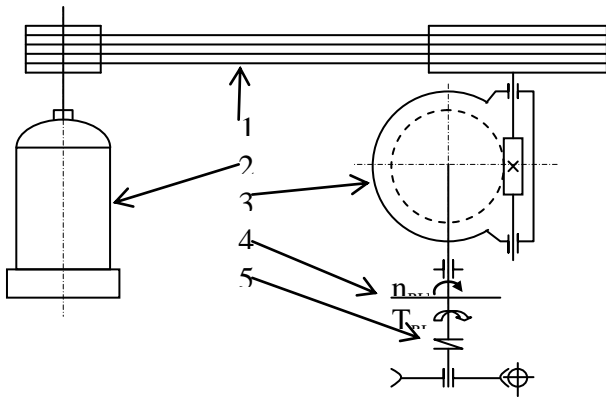
Срок службы принять равным  $t=11\ 500$  ч

- 1- электродвигатель
- 2- муфта
- 3- редуктор
- 4- муфта
- 5- барабан тяговой лебёдки

Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Редуктор с цилиндрической быстроходной и червячной тихоходной ступенями..										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	418	415	294	536	590	905	405	478	300	350
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	36	25	26	51	26	34	36	26	32	25

Задание №4. Спроектировать привод к поворотному стенду для разборки агрегатов.

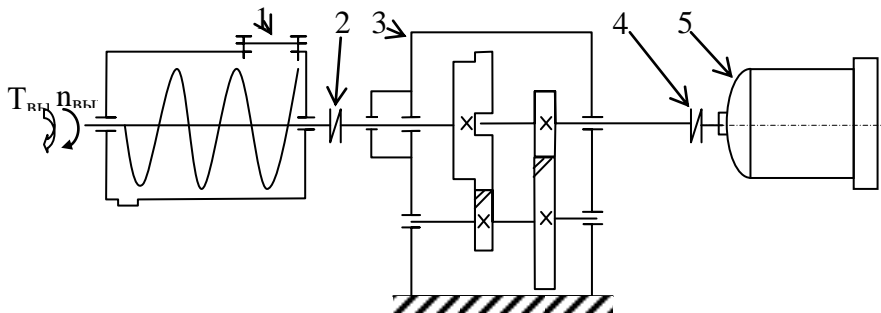


Срок службы принять равным  $t=10\ 000$  ч

- 1- плоскоременная передача
  - 2- электродвигатель
  - 3- редуктор
  - 4- поворотный стол
  - 5- муфта
- Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Редуктор червячный одноступенчатый с вертикальным валом червячного колеса										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	493	404	795	588	850	416	416	294	538	538
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	32	36	35	26	30	37	25	25	26	52

Задание № 5. Спроектировать привод к шнековой мойке мелких деталей

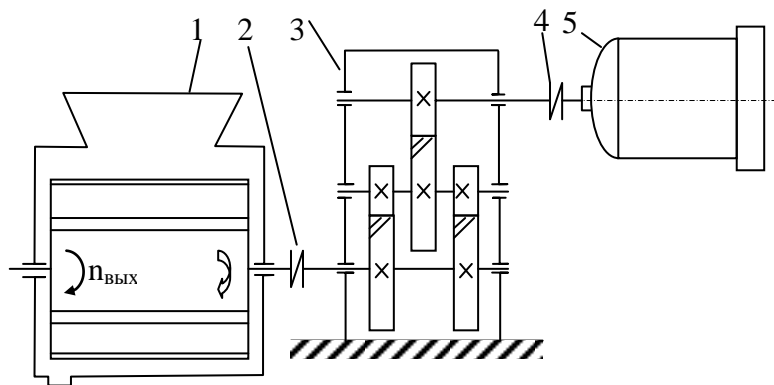


Срок службы принять равным  $t=15\ 500$  ч

- 1- шнековая машина
  - 2- муфта
  - 3- редуктор
  - 4- муфта
  - 5- электродвигатель
- Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Двухступенчатый соосный цилиндрический редуктор, выполненный по вертикальной схеме, с боковым разъемом и опорой быстроходного вала, установленной в тихоходном вале.										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	324	259	160	188	187	337	248	397	360	314
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	59	48	78	102	128	40	50	30	35	76

Задание № 6. Спроектировать привод к измельчителю кормов



1- измельчитель кормов

4- муфта

2- муфта

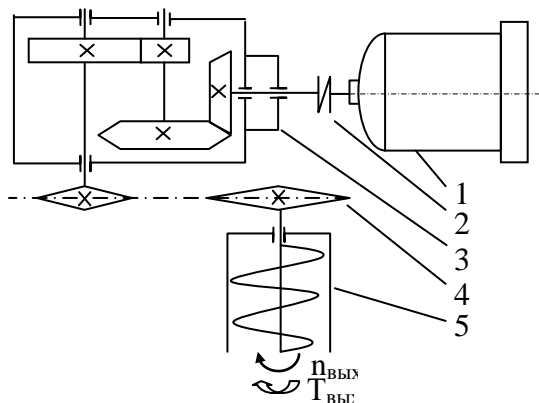
5- электродвигатель

3- редуктор

Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Двухступенчатый цилиндрический редуктор с расположением осей в плоскости разъёма, с выходом валов в разные стороны, с раздвоенной тихоходной ступенью.										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	373	246	397	360	314	324	259	160	188	181
$n_{\text{вых}}, \text{МИН}^{-1}$	40	45	50	55	76	59	48	78	102	128

Задание № 7. Спроектировать привод к шнеку измельчителя кормов



Срок службы принять равным  $t=18\ 000$  ч

1- электродвигатель

4- цепная передача

2- муфта

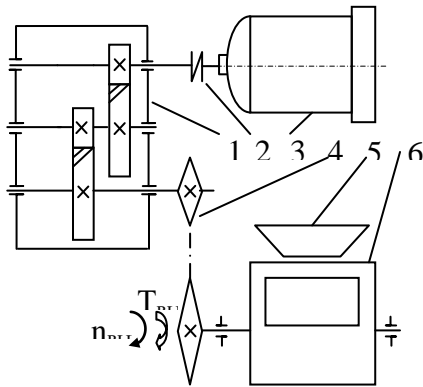
5- шнек измельчителя кормов

3- редуктор

Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Редуктор коническо-цилиндрический с консольным расположением вала конической шестерни.										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	250	330	324	245	205	365	315	485	450	376
$n_{\text{вых}}, \text{МИН}^{-1}$	45	52	72	90	114	77	60	48	38	30

Задание № 8. Спроектировать привод к смесителю кормов по нижеприведённой схеме



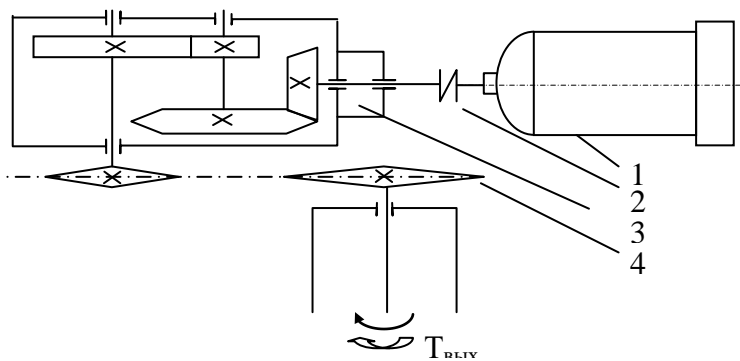
Срок службы принять равным  $t=18\ 000$  ч

- 1- редуктор
  - 2- муфта
  - 3- электродвигатель
  - 4- цепная передача
  - 5- бункер
  - 6- смеситель
- Разработать:

1. Общий вид привода										
2. Двухступенчатый цилиндрический редуктор с расположением осей в плоскости разъёма, с выходом валов по одну сторону.										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	717	552	610	507	465	286	339	363	388	425
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	60	47	38	29	24	39	51	64	80	101

Задание № 9

Спроектировать привод к транспортеру питателю



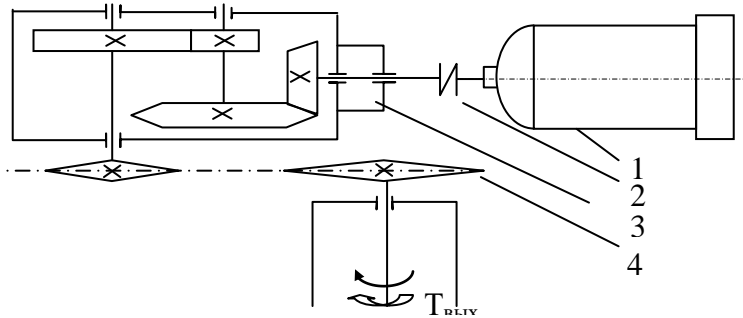
Срок службы принять равным  $t=15000$  ч

- 1- электродвигатель
- 2- муфта
- 3- редуктор
- 4- цепная передача

Вариант										
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	1250	1330	924	845	1205	1365	2315	1485	950	2370
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	145	152	72	90	84	77	160	140	135	130

## Задание № 10

Спроектировать привод к транспортеру питателю



1- электродвигатель

2- муфта

3- редуктор

4- цепная передача

Вариант										
$T_{\text{вых}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	1450	1730	1924	1845	1305	1365	2315	1785	950	1370
$n_{\text{вых}}, \text{мин}^{-1}$	145	150	75	95	85	80	120	508	120	150

Приложение 1. Типы и мощности двигателей при нормальной нагрузке серии 4АМ

Мощность, кВт	Тип двигателя	Ном. част., $n, \text{мин}^{-1}$	Тип двигателя	Ном. част., $n, \text{мин}^{-1}$	Тип двигателя	Ном. част., $n, \text{мин}^{-1}$	Тип двигателя	Ном. част., $n, \text{мин}^{-1}$
0,75	71А2У3	2840	71В4У3	1390	80А6У3	915	90LА8У3	700
1,1	71В2У3	2810	80А4У3	1420	80В6У3	920	90LВ8У3	700
1,5	80А2У3	2850	80В4У3	1420	90L6У3	935	100L8У3	700
2,2	80В2У3	2850	90L4У3	1425	100L6У3	950	112А8У3	700
3,0	90L2У3	2840	100S4У3	1435	112А6У3	955	112В8У3	700
4,0	100S2У3	2880	100L4У3	1435	112В6У3	955	132S8У3	700
5,5	100L2У3	2880	112М4У3	1445	132S6У3	965	132М8У3	720
7,5	132М2У3	2900	132S4У3	1455	132М6У3	970	160S8У3	730
11,0	160М2У3	2910	132М4У3	1460	160S6У3	975	160М8У3	730

Приложение 2. Передаточные числа двухступенчатых цилиндрических редукторов

U <sub>общ.</sub>	7.1	8.0	10.0	12,5	14,0	18,0	20,0	25,0	29,0	36,0
U <sub>б</sub>	2.8	3.15	3,55	4,0	4,5	5,0	5,6	6,3	7,1	8,0
U <sub>т</sub>	2,5	2,5	2,8	3,15	3,15	3,55	3,55	4,0	4,0	4,5

Передаточные числа двухступенчатых коническо-цилиндрических редукторов

U <sub>общ.</sub>	7,1	8.0	10,0	12.5	16,0	20,0	22,5	32,0
U <sub>б</sub>	2,24	2.5	2,8	3,15	3,55	4,0	4.5	5,0
U <sub>т</sub>	3,15	3,15	3,55	4,0	4.5	5.0	5,0	6,15

Приложение 3. Рекомендации по выбору подшипников

Отношение $F_a/F_r$	Тип подшипника, серия	Осевая составляющая радиальной нагрузки S от $F_r$	Примечание
Менее 0,35	Шариковый радиальный	Менее 0,3	
0,35...0,8	Шариковый радиально-упорный	0,3	Легкая и сверхлегкая серия
0,8...1,2	Шариковый радиально-упорный	0,6	При высоких скоростях - легкая серия
Более 1,2	Роликовый конический	0,9	

## Часть 2

### Выполнение расчета исходного варианта редуктора в модуле Drive.

Выполнить проектировочный расчет двухступенчатого цилиндрического редуктора со следующими параметрами, рассчитанными ранее [5, 6, 11]:

- момент на выходе – 213 Н·м;
- частота вращения выходного вала – 114 мин<sup>-1</sup>;
- передаточное число – 12;
- ресурс работы — 14000 часов;
- типы зубчатых передач – косозубая и шевронная внешнего зацепления;
- термообработка зубчатых колес – закалка ТВЧ до твердости 50 HRC;
- расположение шестерни относительно опор вала – несимметричное;
- материал валов – Сталь 40;
- тип подшипников – шариковые радиальные;
- схема установки подшипников – схема «О»;
- режим работы – постоянный.

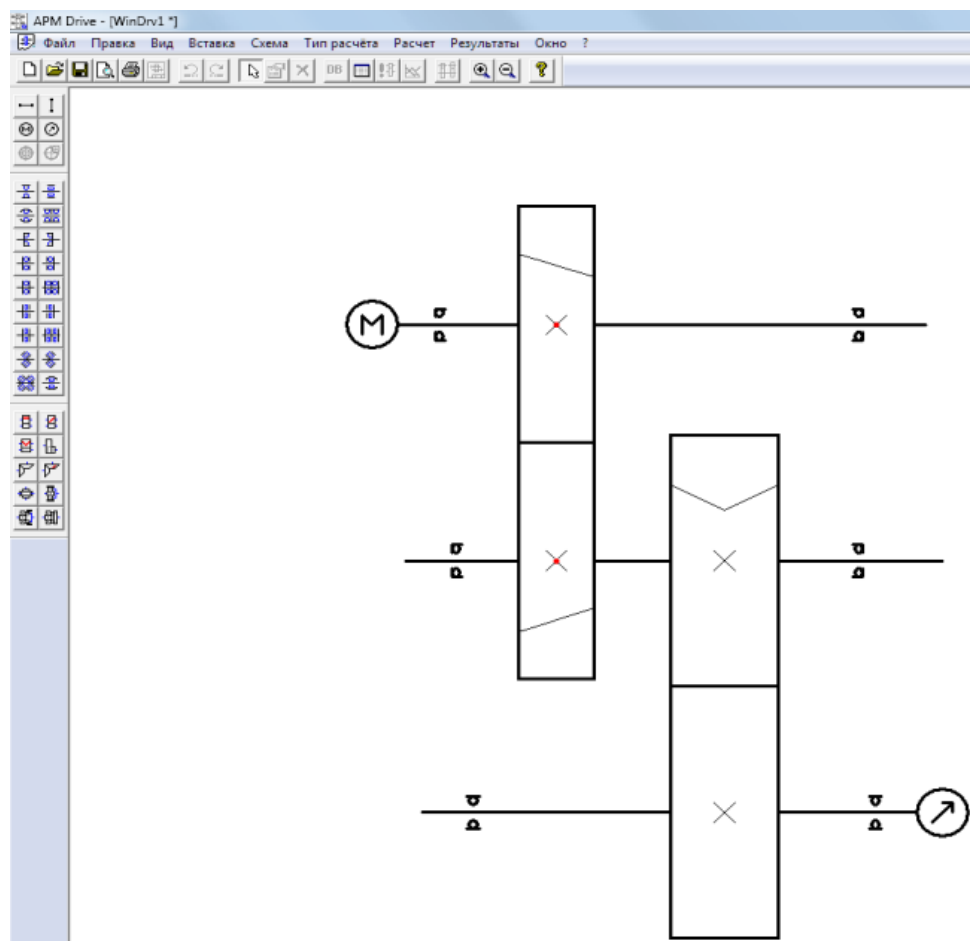



Рисунок 1. Схема редуктора

## Решение

1. **Выбор типа расчета редуктора.** Перед началом расчета необходимо выбрать тип расчета – проектировочный или проверочный. Для этого, открываем меню **Тип расчета** и ставим флажок - **Проектировочный**.

### 2. Создание кинематической схемы редуктора.

Кинематическая схема редуктора состоит из передающих элементов (зубчатых передач), валов и подшипников. Программный модуль APM Drive, предназначенный для расчета элементов кинематических схем, объединяющий модули APM Trans, APM Shaft и APM Bear и использующий все их возможности по заданию параметров и выводу результатов расчета соответствующих элементов схемы.

2.1. **Создание валов.** Задание кинематической схемы начинаем с создания валов. Пусть для примера это будут «горизонтальные» валы. Нажимаем кнопку **«Горизонтальный вал»**  на инструментальной панели **«Валы»** (меню **Вставка/Вал/ Горизонтальный**), а затем, нажав левую кнопку мыши, изображаем вал «вытягиванием» линии в вертикальном направлении. Вытягивать линию можно или сверху вниз, или снизу вверх. Таким способом создаем три горизонтальных вала: входной, промежуточный и выходной.

2.2. **Моделирование зубчатых передач.** После построения валов размещаем на них зубчатые передачи. В рассматриваемой задаче необходимо использовать косозубые передачи внешнего зацепления, следовательно, нажимаем



на инструментальной панели «**Передачи**» кнопку «**Косозубая внешнего зацепления**». Затем, нажав левую кнопку мыши, «вытягиваем» штриховую линию до другого вала до тех пор, пока не появится динамический объект в виде прямоугольника. Далее щелкаем левой кнопкой мыши, и появляется схематическое изображение зубчатой передачи. Аналогично создаем вторую шевронную передачу.

2.3. **Размещение подшипников.** На каждом из валов кинематической схемы необходимо расположить как минимум два подшипника. Для задания шарикового радиального подшипника, нажимаем на инструментальной панели



«**Подшипники**» кнопку «**Радиальный**» и перемещаем курсор в то место, где на валу будет установлен подшипник – до появления динамического объекта в виде небольшого прямоугольника. Для фиксации места установки подшипника щелкаем левой кнопкой мыши. Если устанавливаем роликовые или шариковые радиально-упорные подшипники, то на одной стороне вала следует установить левые подшипники, а на другой стороне — правые, в зависимости от схемы установки «Схема «О» или «Схема «Х»».

2.4. **Указание входа и выхода схемы.** На входе кинематической схемы (на одном из концов входного вала) устанавливаем значок с условным обозначением двигателя (мотора). Для этого на инструментальной панели «**Валы**»



нажимаем кнопку «**Входной вал**», затем подводим курсор к одному из концов входного вала и, после появления на конце вала объекта в виде небольшого квадратика, щелкаем левой кнопкой мыши для его установки. Аналогичным способом устанавливаем значок с условным обозначением нагрузки на выходном валу редуктора. Для этого нажимаем на инструментальной панели «**Валы**» кнопку «**Выходной вал**». На этом задание кинематической схемы редуктора завершено (рис. 1).

2.5. **Редактирование элементов кинематической схемы.** Если возникает необходимость в изменении местоположения отдельных элементов кинематической схемы, а также их удалении, то предварительно такие элементы следует выделить. Для выделения нажимаем на инструментальной панели «**Основная**» кнопку «**Выделить**», а затем щелкаем на выделяемом элементе левой кнопкой мыши — этот элемент выделится.

С выделенными элементами возможно проведение следующих действий:

- Удаление. Для удаления выделенных элементов нужно нажать на панели инструментов «**Основная**» кнопку «**Удалить**» (меню **Правка/Удалить**).

- Изменение положения выделенного элемента. Подводим курсор к выделенному элементу, и, как только курсор приобретает вид, нажимаем левую кнопку мыши и, не отпуская ее, перемещаем этот элемент схемы. Данная операция применима к передачам и подшипникам — она позволяет сместить их




вдоль вала, а также к отдельному валу – его можно переместить в любом направлении.

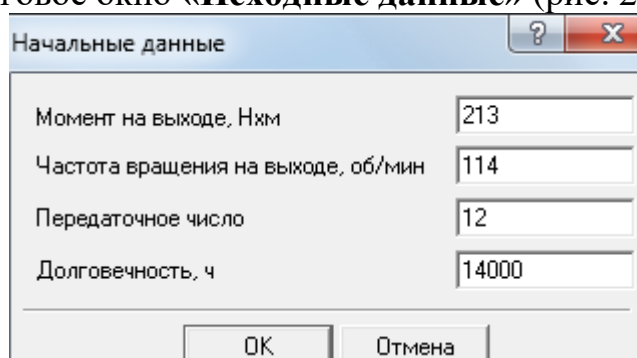
*Замечание 1. После выполнения этой операции все установленные на валу подшипники сместятся вместе с валом. Передачи останутся на месте.*

- Изменение размеров валов. При выделении вала его левый конец отмечается белым квадратиком, а правый – черным. Пользователь имеет возможность изменить положение правого конца вала в направлении его оси. Для изменения размера вала подводим курсор к черному концу выделенного вала, и, когда курсор приобретает вид двунаправленной стрелки, нажимаем левую кнопку мыши и, не отпуская ее, перемещаем конец вала.

### 3. Ввод исходных параметров редуктора.

Нажимаем на панели инструментов «Основная» кнопку «Начальные данные»  (меню **Схема/Начальные данные**) и в соответствующие поля ввода появившегося диалогового окна «Начальные данные» записываем исходные данные проектируемого редуктора:

Этих данных достаточно для проведения проекторочного расчета редуктора. Разбиение общего передаточного отношения по ступеням произойдет автоматически. Но у пользователя есть возможность просмотреть результаты разбиения и скорректировать его. Для перехода в режим корректировки разбиения по ступеням нужно нажать кнопку «**Ручное разбиение**», после чего откроется диалоговое окно «**Исходные данные**» (рис. 2).




Параметр	Значение
Момент на выходе, Нхм	213
Частота вращения на выходе, об/мин	114
Передаточное число	12
Долговечность, ч	14000

Рисунок 2. Исходные параметры расчета

В верхней части этого окна показываются те параметры элементов схемы, которые предлагаются программой. Пользователь может изменить любой из них. Для этого необходимо, во-первых, в группе параметров **Условия разбиения** отметить строку **Ручная**, а во-вторых, из выпадающего списка **Параметр ручного разбиения** выбрать тот параметр, который нужно изменить.

### 4. Выполнение расчета базового варианта редуктора.

Расчет производится после нажатия на панели инструментов «Основная» кнопки «Расчет»  (меню **Схема/Расчет**).

Процесс расчета происходит следующим образом: вначале рассчитываются передачи выбранного пользователем типа, затем на основе полученных результатов конфигурируются состоящие из цилиндрических секций валы, ко-

эффицент запаса по усталостной прочности каждого из которых не ниже 1,5. Наконец, по рассчитанным диаметрам участков вала, на которых по условию должны стоять подшипники, из базы данных автоматически подбираются подшипники указанного типа различных серий, причем с проверкой их по долговечности. В том случае, если по диаметру вала не удалось найти подшипник из базы данных, или найденный подшипник не обеспечивает заданную долговечность, пользователю выдается соответствующее сообщение с перечнем тех подшипников, с которыми возникли подобные проблемы.

Если после проведения расчета программа выдает сообщение «*Не все подшипники выбраны из базы данных или имеют требуемую долговечность...*», то это означает одно из двух:

- под предложенный диаметр вала в базе данных не нашлось подходящего подшипника с таким же внутренним диаметром;
- подшипник найден, но полученная в результате его расчета долговечность ниже той, которая задана в исходных данных для всего редуктора.

В обоих случаях необходимо изменить в сторону увеличения диаметр секции вала на том участке, где будет установлен подшипник. Под больший диаметр вала программа подберет подшипник с бóльшей грузоподъемностью, который в результате будет иметь бóльшую долговечность. После внесения всех изменений следует обязательно произвести повторный расчет редуктора. Кнопка «**Результаты**» (меню **Схема/Результаты расчета**) на панели инструментов «**Основная**» становится активной после окончания расчета только при выборе пользователем определенного элемента схемы.

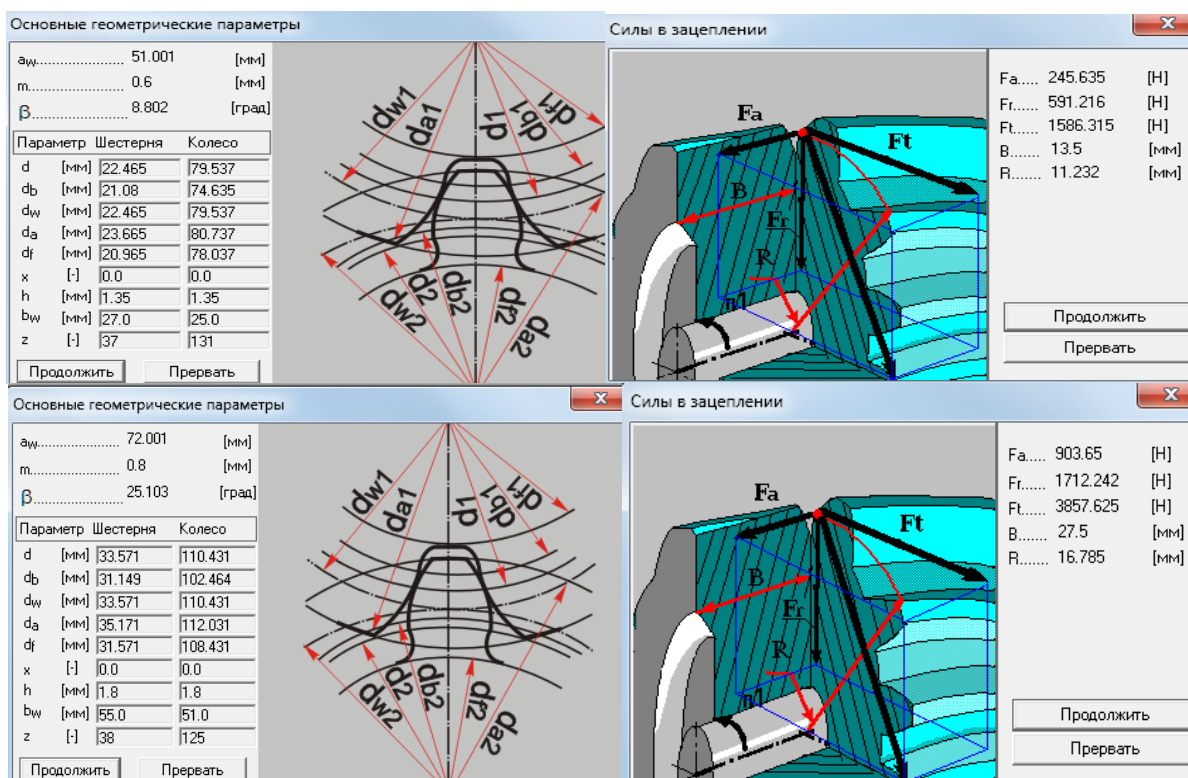


Рисунок 3. Результаты расчета быстроходной и тихоходной передачи

## 5. Просмотр результатов расчета.

Выделяем тот элемент схемы, результаты расчета которого необходимо просмотреть. Для просмотра результатов удобнее использовать контекстное меню, вызываемое щелчком правой кнопкой мыши на каком-либо элементе.

В зависимости от элемента схемы из контекстного меню могут быть выбраны следующие пункты:

**Параметры...** – при этом открывается окно задания исходных данных:

- в модуле АРМ Trans – диалоговое окно «**Основные параметры**»;
- в модуле АРМ Shaft – окно редактора с геометрией вала;
- в модуле АРМ Bear – окно задания геометрии подшипника.

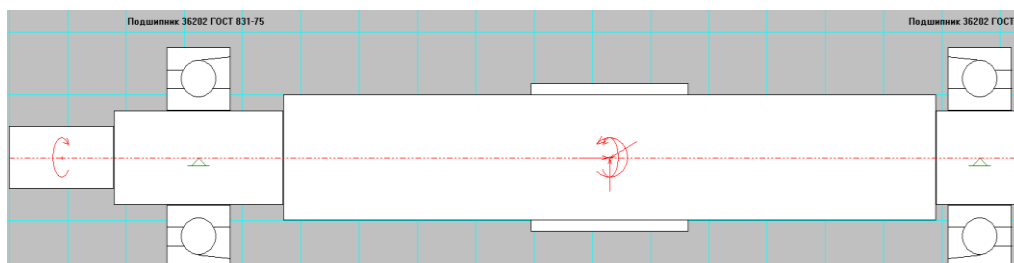
**Данные пользователя** – этот пункт становится активным (и отмечается по умолчанию флажком) в том случае, если были изменены какие-либо данные, устанавливаемые по умолчанию.

- **Результаты расчета...** – при этом открывается окно результатов расчета выбранного элемента схемы.

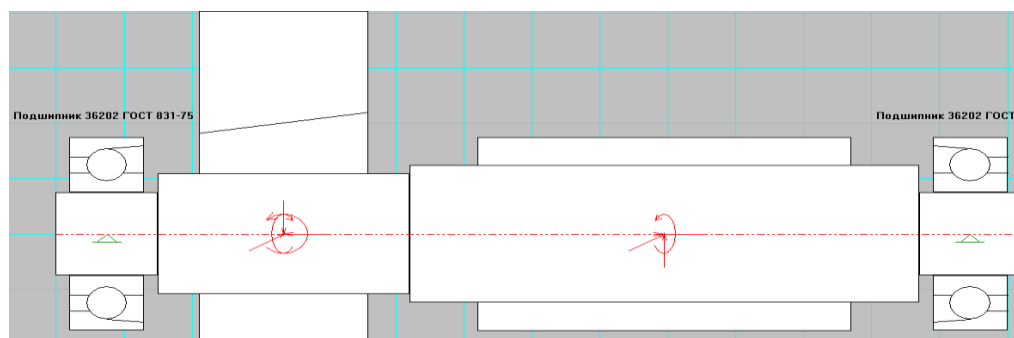
- **Точность...** – данный пункт меню будет активным, если вызов контекстного меню происходит при позиционировании курсора на подшипнике; при этом открывается диалоговое окно «**Точность изготовления**», с помощью которого можно задать/изменить параметры точности подшипника.

- **Условия работы...** – этот пункт меню также относится только к подшипникам. Его выбор вызывает открытие диалогового окна «**Условия работы**», позволяющего задать/изменить параметры нагрузки подшипника.

### Быстроходный



### Промежуточный



### Тихоходный

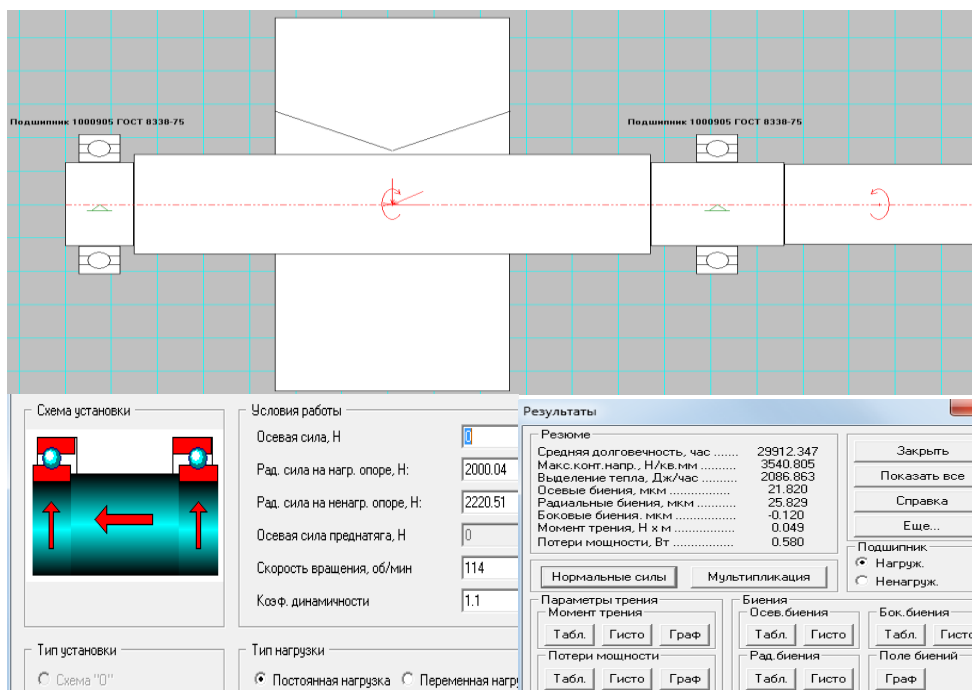


Рисунок 4. Результаты расчета валов и подшипников редуктора

- **Печать...** – открывает стандартное окно задания параметров печати в модуле APM Shaft или окно выбора данных в модулях APM Trans и APM Bear.

- **Печать в RTF...** – открывает стандартное окно сохранения файла в формате \*.rtf в модуле APM Shaft или окно выбора данных для печати и сохранения в файл формата \*.rtf в модулях APM Trans и APM Bear.

- **Материал вала...** – этот пункт меню становится активным, если вызов меню происходит при позиционировании курсора на валу, и вызывает открытие диалогового окна «Материал вала», позволяющего задать/изменить параметры материала вала или выбрать материал из базы данных.

#### 6. **Корректировка конструктивных параметров элементов редуктора.**

После проведения расчета базового варианта редуктора следует внести в конструкцию элементов некоторые коррективы. Так, обязательно нужно добавить концентраторы в виде галтелей или канавок для выхода шлифовального круга в местах перехода от одного диаметра сегмента вала к другому, иначе эти концентраторы не будут учитываться при расчете.

Для перехода в режим редактирования вала (напомним, что вначале нужно выделить тот вал, который необходимо отредактировать) следует либо нажать кнопку «**Параметры выделенного элемента**» на панели инструментов «Основная» (меню Вид/Параметры), либо выбрать строку **Параметры...** В результате откроется основное окно модуля APM Shaft, с помощью которого в конструкцию вала можно внести необходимые изменения и дополнения.

#### 7. **Расчет откорректированного варианта редуктора.**

После корректировки конструктивных параметров элементов редуктора расчет необходимо повторить.

#### 8. **Генерация чертежей отдельных элементов.**

Пользователь имеет возможность получить чертежи отдельных элементов редуктора – зубчатых колес и валов.

8.1. **Генерация чертежа зубчатого колеса.** Выбираем соответствующую передачу и либо нажимаем на панели инструментов «Основная» кнопку «Результаты», либо выбираем в контекстном меню передачи строку **Результаты расчета....** В открывшемся диалоговом окне модуля APM Trans нужно выбрать пункт *Чертеж* (поставить возле него флажок) и нажать кнопку «Продолжить». Далее поступаем в соответствии с процессом генерации чертежа зубчатого колеса в APM Trans.

8.2. **Генерация чертежа вала.** Выбираем соответствующий вал и либо нажимаем на панели инструментов «Основная» кнопку «**Параметры выделенного элемента**» (меню **Вид/Параметры**), либо выбираем в контекстном меню передачи строку **Параметры....** В открывшемся основном окне модуля **APM Shaft** в меню **Файл** выбираем строку *Экспорт....* Далее поступаем обычным путем в соответствии с процессом генерации вала в APM Shaft.

### 9. Генерация чертежей спроектированного редуктора.

Для генерации чертежа спроектированного редуктора вала нужно на панели инструментов «Основная» основного окна модуля APM Drive нажать кнопку «Экспорт» (меню **Файл/Экспорт**), а затем сохранить чертеж как файл с расширением \*.agr. После этого произойдет запуск плоского чертежного редактора **APM Graph**, в окне которого будет показана заготовка сборочного чертежа рассчитанного редуктора (вместе с корпусом), а также различные виды корпуса (рис. 5).

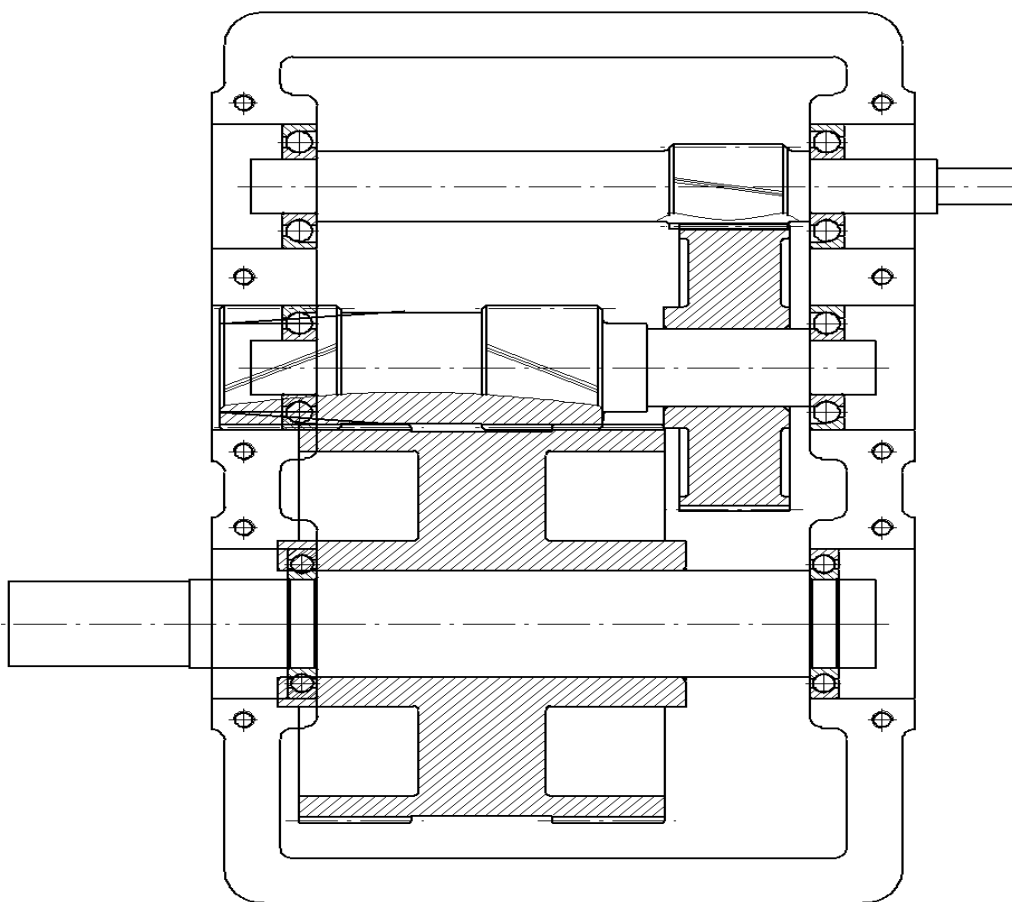


Рисунок 5. Сборочный чертеж

По сравнительному анализу расчетов установлено, что полученные результаты двух вариантов отличаются. Это вызвано тем, что при расчете зубчатой передачи аналитически: передаточные числа определены и взяты из стандартного ряда  $U_6 = 4,5$ ,  $U_m = 2,8$ . В модуле Drive разбивка передаточного числа редуктора произведена автоматизировано:  $U_6 = 3,54$ ,  $U_m = 3,3$ . Это привело к увеличению нагрузок на передачи, но при этом уменьшились межосевые расстояния и размеры редуктора. Он стал компактнее.

В целом можно сказать, что расчеты, проведенные аналитически и в АРМ, отличаются в пределах 1...5%. Это позволяет значительно сократить время проектирования и повысить точность расчета. Расчеты, проведенные в АРМ Drive показали, что редуктор получается компактнее, хотя используются нестандартные размеры: передаточные числа, межосевые расстояния и т.д. Кроме того можно получить заготовку сборочного чертежа рассчитанного редуктора.

## Литература

1. Детали машин: атлас конструкций / под ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1979. 367 с.
2. Проектирование механических передач: учебно-справочное пособие для вузов / С.А. Чернавский, Г.А. Снесаревич, Б.С. Козинцев и др. М.: Машиностроение, 1984. 560 с.
3. Шейнблит А.Е. Курсовое проектирование деталей машин. М.: Высшая школа, 2005. 432 с.
4. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. М.: Изд-во АПМ, 2005. 472 с.
5. Детали машин и основы конструирования / под ред. М.Н. Ерохина. М.: КолосС, 2004. 462 с.
6. Безик Д.А., Романеев Н.А. Автоматизированное проектирование машин на примере расчета редуктора: учеб. пособие. Брянск: Изд-во БГСХА, 2002. 31 с.
7. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде АРМ Structure 3D: учеб. пособие. М.: АПМ, 2006. 288 с.
8. Варывдин В.В., Романеев Н.А., Кожухова Н.Ю. Механические передачи и соединения: проектирование и расчет. Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2009. 183 с.
9. Варывдин В.В., Романеев Н.А., Кожухова Н.Ю. Проектирование механических передач: уч. пособие. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2010. 103 с.
10. Лабораторный практикум по деталям машин: учеб. пособие / В.В. Варывдин, Н.Ю. Кожухова, Н.А. Романеев, В.В. Никитин. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2014. 134 с.
11. Курсовое проектирование по деталям машин: учеб. пособие / В.В. Варывдин, В.В. Никитин, Н.Ю. Кожухова, Н.А. Романеев. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2016. 189 с.

Учебное-методическое пособие

Безик Дмитрий Александрович,  
Романеев Николай Александрович

**Автоматизированное проектирование  
машин  
на примере расчёта редуктора**

Учебно-методическое пособие  
для студентов, обучающихся по специальностям:  
35.03.06 Агроинженерия: 01 Технические системы в агробизнесе  
35.03.06 Агроинженерия: 04 Технический сервис в АПК  
23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы  
(Издание второе переработанное и дополненное)

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 03.06.2021 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,32. Тираж 25 экз. Изд. № 6962.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ