

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В САПР

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
6-05-0714-02 «Технология машиностроения,
металлорежущие станки и инструменты»
дневной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 621.9
ББК 34.96
А40

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»
«23» декабря 2025 г., протокол № 6

Составители: канд. техн. наук, доц. Д. С. Галюжин;
И. А. Тарадейко

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко

Методические рекомендации к лабораторным работам предназначены для студентов специальности 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» дневной формы обучения.

Учебное издание

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В САПР

Ответственный за выпуск	С. Н. Хатетовский
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 06.03.2026. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75. Тираж 26 экз. Заказ № 176.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Введение	4
Меры безопасности при проведении лабораторных работ	6
1 Лабораторная работа № 1. Кинематический анализ многозвенного механизма	7
2 Лабораторная работа № 2. Определение угловых скоростей и угловых ускорений звеньев механизма манипулятора по заданному движению рабочей точки	9
3 Лабораторная работа № 3. Моделирование работы планетарного механизма	13
4 Лабораторная работа № 4. Моделирование свободных колебаний (затухающих и незатухающих)	15
5 Лабораторная работа № 5. Решение задачи на растяжение-сжатие....	17
6 Лабораторная работа № 6. Расчет вала на кручение	20
7 Лабораторная работа № 7. Прямой поперечный изгиб балки	22
8 Лабораторная работа № 8. Расчет шпиндельного узла на жесткость, тепловые деформации и определение частот собственных колебаний	24
Список литературы	28

Введение

Ускорение темпов научно-технического прогресса является решающим условием повышения качества продукции и должно обеспечиваться разработкой, производством и массовым применением высокоэффективных машин, оборудования, приборов и технологических процессов. Объективным препятствием повышению качества проектов и сокращению сроков их разработки выступает несоответствие между сложностью объектов строительства и устаревшими методами и средствами их проектирования. Применение математических методов и ЭВМ при проектировании способствует повышению технического уровня и качества проектируемых объектов, сокращению сроков разработки и освоения их в производстве. Автоматизация проектирования особенно эффективна, когда от автоматизации выполнения отдельных инженерных расчетов переходят к комплексной автоматизации, создавая для этой цели системы автоматизированного проектирования (САПР).

При создании САПР различают два существенно разных подхода:

- 1) создание САПР в крупных, ведущих проектных и конструкторских организациях;
- 2) широкое распространение типовых расчетов, алгоритмов и программ в средних и заводских проектно-конструкторских организациях.

Возможность широко распространять в проектных организациях наиболее прогрессивные, а также типовые и стандартные методы расчетов, различные нормативные и справочные данные предопределяет высокую эффективность САПР. Даже небольшая проектная организация может применять самые современные и эффективные методы инженерных расчетов, заимствуя их у организаций-разработчиков САПР.

Как и другие типы автоматизированных систем, САПР является развивающейся системой. Технический прогресс в соответствующей отрасли должен сопровождаться непрерывным обновлением в САПР математических моделей, нормативов, данных о материалах комплектующих изделий.

САПР создается и функционирует в проектной организации как самостоятельная система. Она может быть связана с подсистемами и банками данных других автоматизированных систем. Системы автоматизированного проектирования имеют свои специфические особенности, принципы создания и развития.

САПР создаются в проектных, конструкторских, технологических организациях в целях:

- повышения качества и технико-экономического уровня проектируемой и выпускаемой продукции;
- повышения эффективности и надежности объектов проектирования, уменьшения затрат на их создание и эксплуатацию;
- сокращения сроков, уменьшения трудоемкости проектирования и повышения качества проектной документации.

Достижение целей создания САПР обеспечивается путем:

- совершенствования систематизации и унификации процессов проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- комплексной автоматизации проектных работ в проектной организации с необходимой перестройкой ее структуры и кадрового состава;
- повышения качества управления проектированием;
- применения эффективных математических моделей проектируемых объектов, комплектующих изделий и материалов;
- использования методов многовариантного проектирования и оптимизации;
- автоматизации трудоемких и рутинных проектных работ;
- замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием.

Меры безопасности при проведении лабораторных работ

Не работайте за компьютером при наличии внешних повреждений корпуса или изоляции силовых кабелей.

Не кладите на корпус системного блока и не храните на нем разные предметы, особенно тяжелые, т. к. в этом случае может возникнуть вибрация, которая может вызвать нарушения работы компьютера.

Не рекомендуется включать компьютер в розетки без заземления. Розетки и вилки должны быть цельными, без повреждений.

Не включайте компьютер в помещении с высокой влажностью.

Не оставляйте работающий ПК без присмотра длительное время.

Провода и силовые кабеля компьютера должны быть расположены так, чтобы исключить возможность наступить на них или поставить что-то тяжелое.

Нельзя работать с компьютером при открытом корпусе системного блока.

1 Лабораторная работа № 1. Кинематический анализ многозвенного механизма

Цель работы: научиться моделировать работу и производить анализ многозвенного механизма.

1.1 Кинематический анализ

Кинематический анализ механизма проводят без учета сил, вызывающих его движение, аналитическим или графическим методом. При этом решают в основном три задачи:

- 1) определение перемещений звеньев и траекторий заданных точек;
- 2) определение скоростей точек звеньев и угловых скоростей звеньев;
- 3) определение ускорений точек звеньев и угловых ускорений звеньев.

Аналитический метод позволяет установить в виде математического уравнения зависимость кинематических параметров механизма от размеров звеньев. Для многих механизмов он характеризуется сложностью расчетных зависимостей и трудоемкостью вычислений. С развитием вычислительных машин значение этого метода выросло. Вместе с тем аналитические методы не отличаются наглядностью, что затрудняет проверку получаемых результатов в самом процессе вычислений. На современном этапе развития компьютерных методов моделирования данный способ имеет как высокую наглядность, так и быстрое получение результатов.

1.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

1.3 Порядок выполнения работы

Смоделировать отдельные звенья механизма, собрать сборку при помощи механических сопряжений. Для заданного положения механизма, схемы которого представлены на рисунке 1.1, определить величины, указанные в последнем столбце таблицы 1.1. Необходимые размеры стержней и кинематические характеристики приведены в таблице 1.1. На всех схемах механизмов $BD = DE$. Определить также ускорение точки A , если угловое ускорение стержня O_1A в заданный момент времени имеет значение $e_1 = 8 \text{ рад/с}^2$. Оформить отчет, сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

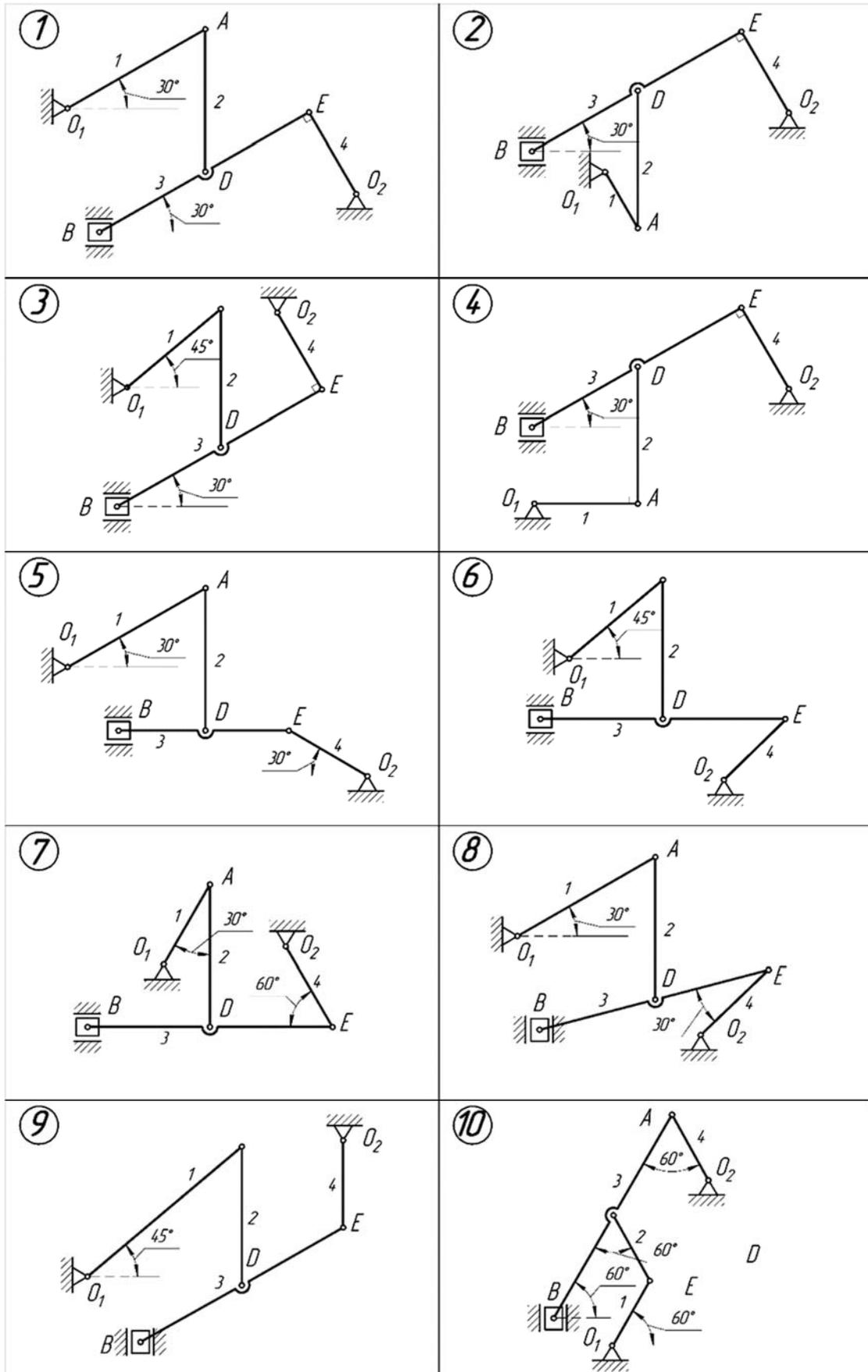


Рисунок 1.1 – Схемы механизмов для кинематического анализа

Таблица 1.1 – Геометрические параметры схем

Номер варианта	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	l_4 , м	ω_1 , рад/с	V_B , м/с	ω_4 , рад/с	Искомая величина
1	0,6		1,2	0,8	–	–	–	V_D, V_E, ω_3
2	0,8	1,2	1,4	–	1,5	–	–	V_D, V_E, ω_3
3	–	1,4	1,6	1,2	–	–	–	V_D, V_E, ω_3
4	1,2	1,6	1,8	1,4	2,5	–	–	V_D, V_E, ω_3
5	1,4	1,8	–	1,6	–	–	–	V_A, V_D, ω_2
6	1,6	–	2,2	1,8	–	–	–	V_A, V_D, ω_2
7	1,8	2,2	2,4	–	–	–	–	V_A, V_D, ω_2
8	–	2,4	2,6	2,2	–	–	–	V_A, V_B, ω_2
9	2,2	2,6	2,8	2,4	–	–	2,5	V_A, V_B, ω_2
10	2,4	2,8	3,0	2,6	–	–	–	V_A, V_B, ω_2

1.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, назначения взаимосвязей.
- 3 Снятие результатов работы модели, построение графических зависимостей.
- 4 Аналитическое решение модели.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое кинематический анализ?
- 2 Какие методы кинематического анализа вы знаете?
- 3 Какие задачи решают при кинематическом анализе?
- 4 Чем отличается метод компьютерного моделирования от остальных методов?

2 Лабораторная работа № 2. Определение угловых скоростей и угловых ускорений звеньев механизма манипулятора по заданному движению рабочей точки

Цель работы: провести структурный анализ и ознакомиться с основными свойствами кинематических цепей копирующего манипулятора и промышленных роботов; проанализировать механизм манипулятора с определением его кинематических характеристик.

2.1 Манипулятор

Промышленный робот – программируемая автоматическая машина, состоящая из манипулятора и устройства программного управления его движением, предназначенная для замены человека при выполнении основных и вспомогательных операций в производственных процессах.

Манипулятор – совокупность пространственного рычажного механизма и системы приводов, осуществляющая под управлением программируемого автоматического устройства или человека-оператора действия (манипуляции), аналогичные действиям руки человека.

Промышленные роботы предназначены для замены человека при выполнении основных и вспомогательных технологических операций в процессе промышленного производства. При этом решается важная социальная задача – освобождение человека от работ, связанных с опасностями для здоровья или с тяжелым физическим трудом, а также от простых монотонных операций, не требующих высокой квалификации. Гибкие автоматизированные производства, создаваемые на базе промышленных роботов, позволяют решать задачи автоматизации на предприятиях с широкой номенклатурой продукции при мелкосерийном и единичном производстве. Копирующие манипуляторы, управляемые человеком-оператором, необходимы при выполнении различных работ с радиоактивными материалами. Кроме того, эти устройства незаменимы при проведении работ в космосе, под водой, в химически активных средах. Таким образом, промышленные роботы и копирующие манипуляторы являются важными составными частями современного промышленного производства.

Промышленные роботы классифицируются по следующим признакам:

- по характеру выполняемых технологических операций: основные, вспомогательные, универсальные;
- по виду производства: литейные, сварочные, кузнечно-прессовые, для механической обработки, сборочные, окрасочные, транспортно-складские;
- по системе координат руки манипулятора: прямоугольная, цилиндрическая, сферическая, сферическая угловая (ангулярная) и др.;
- по числу подвижностей манипулятора;
- по грузоподъемности: сверхлегкие (до 10 Н), легкие (до 100 Н), средние (до 2000 Н), тяжелые (до 10000 Н), сверхтяжелые (свыше 10000 Н);
- по типу силового привода: электромеханический, пневматический, гидравлический, комбинированный;
- по подвижности основания: мобильные, стационарные;
- по виду программы: с жесткой программой, перепрограммируемые, адаптивные, с элементами искусственного интеллекта;
- по характеру программирования: позиционное, контурное, комбинированное.

2.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

2.3 Порядок выполнения работы

Смоделировать отдельные звенья механизма, провести сборку при помощи механических сопряжений. В заданной системе координат известны уравнения движения рабочей точки *A* (захвата). Движение точки *A* длится 1 с. Требуется

определить в этом интервале времени углы φ , ψ , θ и расстояние s . Вычислить угловые скорости, угловые ускорения звеньев и относительные скорости s' и ускорения s'' точки B . Все вычисления произвести для промежутка времени от 0 до 1 с с шагом $\Delta t = 0,2$ с. Положительные направления отсчета углов φ , ψ , θ и расстояния s показаны на рисунках вариантов. Считать, что начальные значения углов $\varphi = \varphi_0$, $\psi = \psi_0$ известны. Необходимые для расчета данные и схемы механизмов манипуляторов приведены в таблице 2.1 и на рисунке 2.1. Оформить отчет, сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

Таблица 2.1 – Исходные данные для механизмов манипуляторов

Номер варианта	a , м	b , м	c , м	φ_0 , град	ψ_0 , град	Уравнение движения	
						x_A	y_A
1	0,5	1,2	0,4	60	15	1,4091	$0,7436 - 0,3t$
2	0,4	0,7	0,24	80	25	0,7712	$0,0800 + 0,2t$
3	0,4	1,2	–	115	25	$0,6466 + 0,2t$	0,7429
4	0,4	0,7	–	45	10	0,9722	$0,4044 - 0,2t$
5	0,3	0,8	0,4	115	25	0,4715	$0,8819 + 0,3t$
6	0,8	0,6	0,6	30	25	1,2366	$0,1464 + 0,2t$
7	0,9	0,24	0,64	40	25	$1,559 - 0,24t$	0,1728
8	0,3	0,66	–	38	25	1,071	$0,0947 + 0,3t$
9	0,74	0,8	0,32	35	15	$1,3789 - 0,3t$	0,6315
10	0,3	0,36	–	80	5	1,128	$0,3896 - 0,3t$

2.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, назначения взаимосвязей.
- 3 Снятие результатов работы модели, построение графических зависимостей.
- 4 Аналитическое решение модели.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое промышленный робот?
- 2 Что такое манипулятор?
- 3 Какие классификации промышленных роботов существуют?
- 4 Каким образом роботы применяются в станочном оборудовании и на производстве?

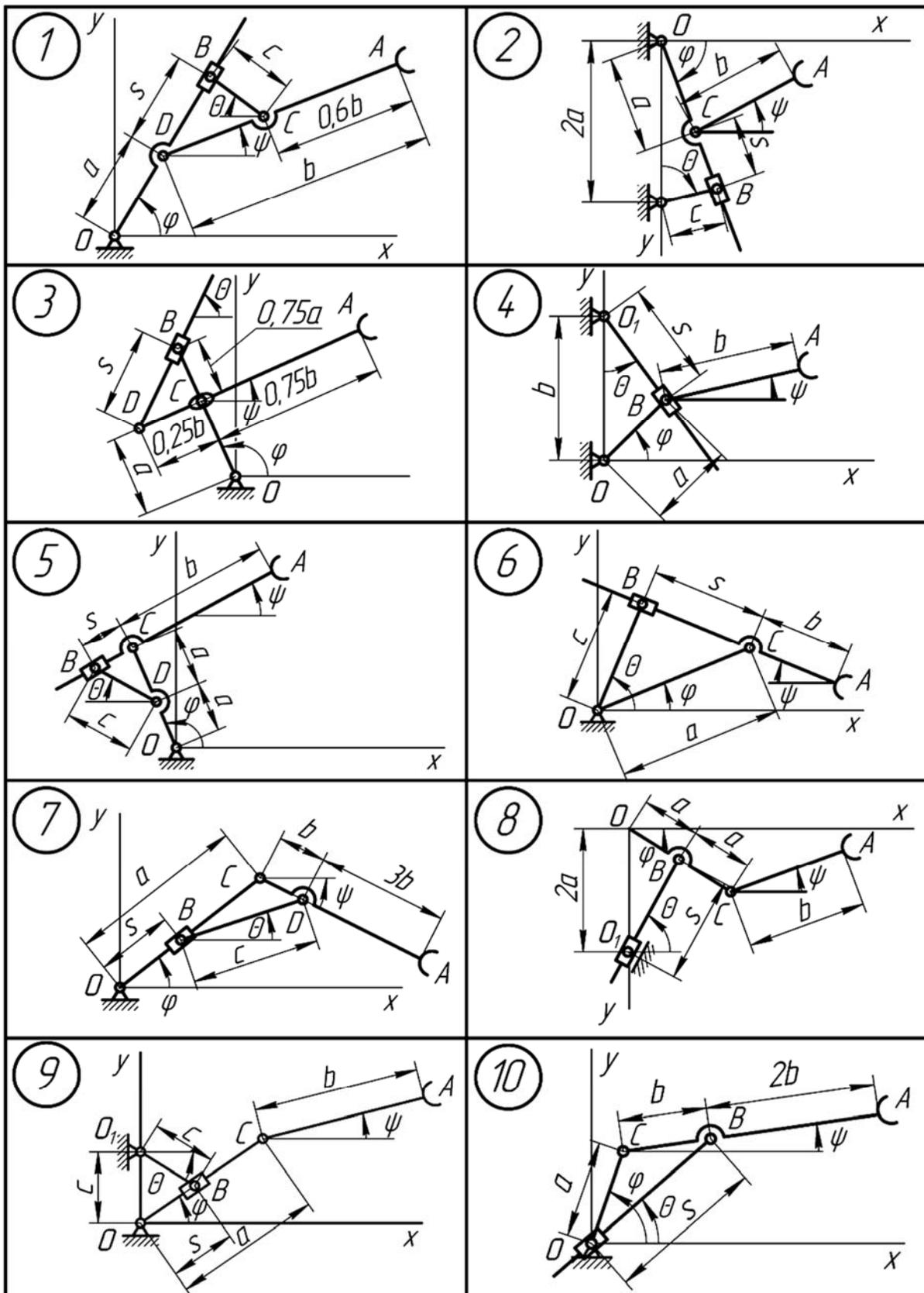


Рисунок 2.1 – Схемы механизмов манипуляторов

3 Лабораторная работа № 3. Моделирование работы планетарного механизма

Цель работы: научиться моделировать работу планетарного зубчатого механизма и получать кинематические и силовые показатели при его работе.

3.1 Общие сведения о планетарных зубчатых механизмах

Планетарной зубчатой передачей называют механизм для передачи и преобразования вращательного движения, содержащий зубчатые колеса с перемещающейся осью вращения хотя бы одного из них. Основными звеньями планетарной зубчатой передачи являются центральные зубчатые колеса, оси которых неподвижны, сателлиты – зубчатые колеса с перемещаемыми осями вращения – и водило – звено, в котором установлены оси сателлитов. Ось вращения водила H , совпадающая с осью O центральных колес, – главная ось механизма.

Планетарные механизмы обладают ценными свойствами: они имеют меньшие радиальные габариты и массу, высокий коэффициент полезного действия, работают с меньшим шумом, чем соответствующие зубчатые передачи с неподвижными осями, могут осуществлять значительные передаточные отношения. Поэтому они получили весьма широкое распространение в подъемно-транспортных машинах, станках, металлургическом оборудовании, гусеничных и колесных машинах, в авиации, в приводах многих машинных агрегатов и в разнообразных приборах.

Проектирование планетарных механизмов включает три этапа:

- 1) выбор схемы механизма;
- 2) определение чисел зубьев колес для обеспечения заданного передаточного отношения;
- 3) расчет на прочность.

Выбор схемы механизма – инженерная задача, решение которой требует комплексного учета целого ряда факторов: условий работы механизма, приемлемых КПД, габаритов, массы, величины передаточного отношения, распределения его по ступеням и др.

Очень важно выбрать оптимальную схему механизма, т. к. одно и то же заданное передаточное отношение можно обеспечить различными схемами, которые будут значительно отличаться по КПД, массе, габаритам и другим дополнительным условиям.

3.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

3.3 Порядок выполнения работы

В соответствии с вариантом выбрать схему планетарного механизма (рисунок 3.1). Далее построить составляющие звенья механизма по данным, согла-

сованным с преподавателем, и создать сборку в исходном положении. Зубчатые колеса построить при помощи программного модуля GearTrax или Gearteq. Наложить соответствующие механические взаимосвязи на звенья механизма и назначить время моделирования (время моделирования должно равняться времени одного оборота выходного вала). Запустить расчет для составленной модели, обработать полученные данные, построить графики (в Microsoft Excel). Определить передаточное отношение планетарного механизма и его колебание от времени, найти абсолютные (и относительные при их наличии) угловые скорости всех зубчатых колес, колебания крутящего момента на входе механизма в приложении динамического анализа SolidWorks. Результаты моделирования проверить аналитическим путем, используя методы дисциплины «Теория машин и механизмов». Оформить отчет, сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

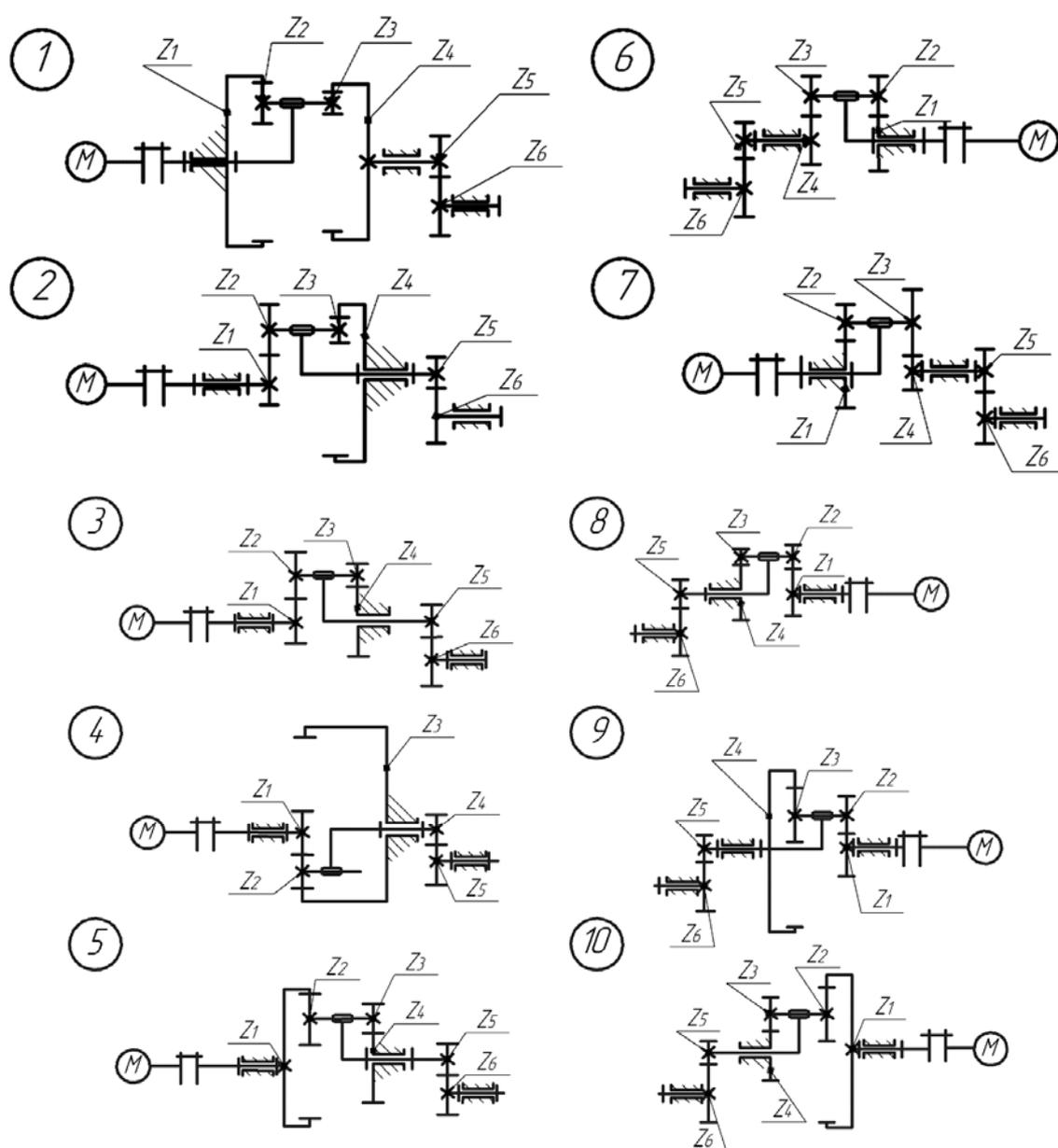


Рисунок 3.1 – Исходные схемы планетарных механизмов

3.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, назначения взаимосвязей.
- 3 Снятие результатов работы модели, построение графических зависимостей.
- 4 Аналитическое решение модели при помощи формулы Виллиса.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое планетарная зубчатая передача?
- 2 Назовите основные звенья планетарной зубчатой передачи.
- 3 Какими свойствами обладают планетарные зубчатые передачи по сравнению с обычными передачами?
- 4 Этапы проектирования планетарной зубчатой передачи.

4 Лабораторная работа № 4. Моделирование свободных колебаний (затухающих и незатухающих)

Цель работы: научиться моделировать инженерные технические задачи с учетом пружин и демпферов.

4.1 Общие сведения о свободных колебаниях

Колебания – движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени. Свободные колебания – колебания в системе под действием внутренних тел после того, как система выведена из положения равновесия. Колебания груза, подвешенного на нити, или груза, прикрепленного к пружине, – это примеры свободных колебаний. После выведения этих систем из положения равновесия создаются условия, при которых тела колеблются без воздействия внешних сил. Система – группа тел, движение которых мы изучаем. Внутренние силы – силы, действующие между телами системы. Внешние силы – силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

Условия возникновения свободных колебаний.

При выведении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, направленная к положению равновесия и, следовательно, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия.

Трение в системе должно быть достаточно мало. Иначе колебания быстро затухнут или вовсе не возникнут. Незатухающие колебания возможны лишь при отсутствии трения.

4.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

4.3 Порядок выполнения работы

Построить тело произвольной массы. Наложить на него механические взаимосвязи. Пружина AB (рисунок 4.1), закрепленная одним концом в точке A , такова, что для ее удлинения на 1 м необходимо приложить в точке B при статической нагрузке силу F , Н. В некоторый момент к нижнему концу подвешивают гирию C массой m и отпускают ее без начальной скорости. Пренебрегая массой пружины, написать уравнение дальнейшего движения гири и указать амплитуду и период ее колебаний, отнеся движение к оси, проведенной вертикально вниз из положения статического равновесия гири. Далее аналогично решить данную задачу, но уже с учетом сил сопротивления, приняв самостоятельно коэффициент трения тела C со средой для возникновения затухающих колебаний. Оформить отчет, сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

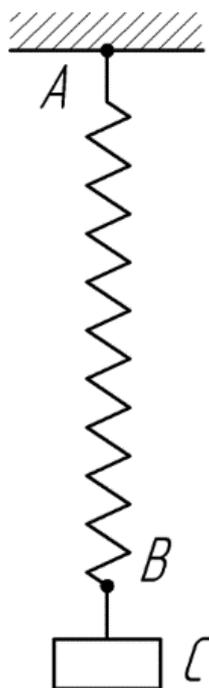


Рисунок 4.1 – Расчетная схема

4.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, назначения взаимосвязей.
- 3 Снятие результатов работы модели, построение графических зависимостей.
- 4 Аналитическое решение задач.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое колебания?
- 2 Какие колебания вы знаете?
- 3 Назовите причины возникновения колебаний.
- 4 Назовите условия возникновения колебаний.

5 Лабораторная работа № 5. Решение задачи на растяжение-сжатие

Цель работы: произвести анализ напряженно-деформированного состояния стального бруса; полученные результаты моделирования проверить аналитическим путем.

5.1 Общие сведения о растяжении-сжатии

Растяжение-сжатие (в сопротивлении материалов) – вид продольной деформации стержня или бруса, возникающий в том случае, если нагрузка к нему прикладывается по его продольной оси (равнодействующая сил, воздействующих на него, нормальна поперечному сечению стержня и проходит через его центр масс). Называется также одноосным или линейным напряжённым состоянием. Является одним из основных видов напряжённого состояния параллелепипеда. Может быть также двух- и трёхосным. Вызывается как силами, приложенными к концам стержня, так и силами, распределёнными по объёму (силы инерции и тяготения).

Растяжение вызывает удлинение стержня (также возможны разрыв и остаточная деформация), сжатие – укорочение (возможны потеря устойчивости и возникновение продольного изгиба).

В поперечных сечениях бруса возникает один внутренний силовой фактор – нормальная сила. Если растягивающая или сжимающая сила параллельна продольной оси бруса, но не проходит через неё, то стержень испытывает так называемое внецентренное растяжение (сжатие). В этом случае за счёт эксцентриситета приложения нагрузки в стержне, кроме растягивающих (сжимающих) напряжений, возникают ещё и изгибные.

Напряжение вдоль оси прямо пропорционально растягивающей или сжимающей силе и обратно пропорционально площади поперечного сечения. При упругой деформации зависимость между напряжением и относительной деформацией определяется законом Гука, при этом поперечные относительные деформации выводятся из продольных путём умножения их на коэффициент Пуассона. Пластическая деформация, предшествующая разрушению части материала, описывается нелинейными законами.

Нередко в инженерных задачах необходимо производить расчет на прочность несущих конструкций. Наиболее частым элементом конструкции является брус, т. е. тело, у которого два размера малы по сравнению с третьим. Под действием приложенных нагрузок тело бруса деформируется.

5.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

5.3 Порядок выполнения работы

По заданному варианту выбрать расчетную схему (рисунок 5.1) и исходные данные (таблица 5.1). Создать компьютерную модель бруса. Наложить нагрузки на вал согласно расчетной схеме, назначить физико-механические свойства материала. Собственным весом системы не пренебрегать. Разбить систему на конечное число элементов. Оценить качественно разбиение. Произвести расчет системы с получением напряженно-деформированного состояния. Оценить напряжения и перемещения в системе. Аналитически проверить полученные результаты. Сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

Таблица 5.1 – Исходные данные

Номер варианта	Тип сечения	A , см ²	F , кН	a , м	b , м	c , м	Материал
1	Окружность	20	5	0,2	0,25	0,12	Сталь Ст3
2	Квадрат	25	7	0,3	0,22	0,13	Сталь Ст5
3	Окружность	30	10	0,4	0,15	0,2	Сталь 10
4	Квадрат	35	13	0,5	0,18	0,19	Сталь 15
5	Окружность	40	15	0,1	0,24	0,22	Сталь 20
6	Квадрат	45	17	0,2	0,4	0,23	Сталь 45
7	Окружность	50	19	0,3	0,3	0,24	Сталь 12ГС
8	Квадрат	55	22	0,4	0,1	0,25	Сталь 65Г
9	Окружность	60	25	0,5	0,5	0,26	Сталь 40Х
10	Квадрат	65	27	0,3	0,4	0,27	Сталь У10

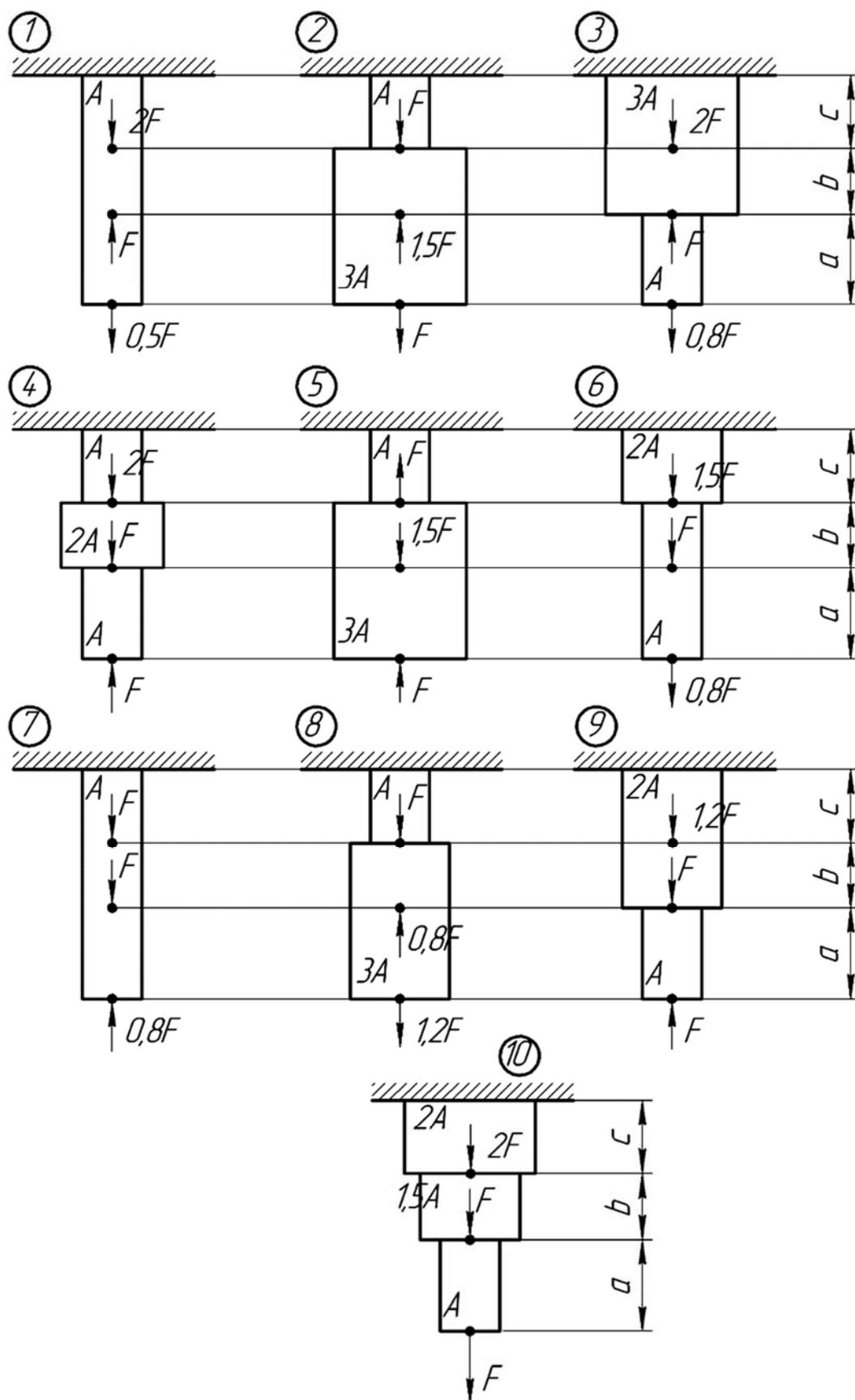


Рисунок 5.1 – Расчетные схемы брусов

5.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, наложение нагрузок и ограничений.
- 3 Снятие результатов работы модели, вывод результатов. Формирование автоматического отчета.
- 4 Аналитическое решение модели.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под растяжением-сжатием?
- 2 Чем оно может быть вызвано?
- 3 Какие законы используются при расчете бруса на растяжение-сжатие?

6 Лабораторная работа № 6. Расчет вала на кручение

Цель работы: определить напряжения, возникающие при действии пары сил, расположенной в плоскости, перпендикулярной к оси вала.

6.1 Общие сведения о кручении

Расчет вала на кручение является достаточно распространенной задачей при расчете механизмов станков. При кручении поперечные сечения вала поворачиваются относительно друг друга, вращаясь вокруг его оси. Вал испытывает деформацию кручения, если на него действуют пары сил, расположенные в плоскостях, перпендикулярных его продольной оси x . В инженерной практике с кручением приходится встречаться очень часто: оси машин и механизмов, пролетные строения мостов, пружины (совместно с изгибом) и т. п. – это примеры стержней, испытывающих кручение. При кручении внутренние силы в поперечных сечениях стержня приводятся к крутящему моменту, а деформация характеризуется поворотом вокруг оси поперечных сечений на углы, называемые углами закручивания. Сечения круглых и кольцевых профилей при повороте остаются плоскими, некруглых – искривляются из своей плоскости по некоторой поверхности (это явление называется депланацией). Различают два типа кручения валов: свободное и стесненное. При свободном кручении (нет препятствий депланациям) в поперечных сечениях возникают только касательные напряжения. При стесненном кручении (имеются различного рода факторы, препятствующие депланациям) наряду с касательными напряжениями появляются и нормальные, распределенные неравномерно по площади сечения и длине стержня.

6.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

6.3 Порядок выполнения работы

По заданному варианту выбрать расчетную схему (рисунок 6.1) и исходные данные (таблица 6.1). Построить модель вала в соответствии с вариантом. Наложить нагрузки на вал согласно расчетной схеме, назначить физико-механические свойства материала. Разбить систему на конечное число элементов. Оценить качество разбиения. Произвести расчет системы с получением напряженно-деформированного состояния. Оценить напряжения и перемещения в системе. Аналитически проверить результаты. Оформить отчет, сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

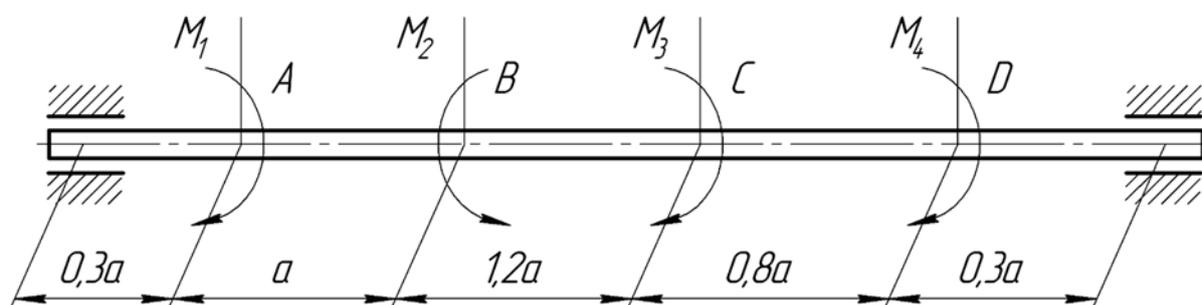


Рисунок 6.1 – Исходная схема для расчета

Таблица 6.1 – Исходные данные

Номер варианта	M_1 , кН·м	M_2 , кН·м	M_3 , кН·м	M_4 , кН·м	a , м	Q_{adm} , град/м	Материал
1	2	4	1,5	0,5	0,5	0,5	Сталь Ст 3
2	3,5	6	1,5	1	0,6	0,6	Сталь Ст 5
3	4	7	2	0,5	0,7	0,3	Сталь 10
4	4	8	3	1,5	0,8	0,25	Сталь 15
5	5	9	3,5	1	0,9	0,4	Сталь 20
6	3	7,5	2	2	0,5	0,5	Сталь 45
7	4	7	1,5	0,5	0,6	0,8	Сталь 12ГС
8	2	4,5	2,5	1,5	0,7	0,7	Сталь 65Г
9	3	5	1	1	0,8	0,9	Сталь 40Х
10	3	6,5	4	1,5	0,9	1,0	Сталь У10

6.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, наложение нагрузок и ограничений.
- 3 Снятие результатов работы модели, вывод результатов. Формирование автоматического отчета.

4 Аналитическая проверка полученных результатов. Выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

5 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Что такое кручение?

2 Какое явление называют депланацией?

3 Приведите пример использования в станках данного расчета.

4 Какие типы кручений валов вы знаете?

7 Лабораторная работа № 7. Прямой поперечный изгиб балки

Цель работы: определить напряжения при прямом поперечном изгибе, возникающие в балке сплошного сечения и в полый балке; произвести сравнение результатов.

7.1 Общие сведения об изгибе

Изгиб (в сопротивлении материалов) – вид деформации, при котором происходит искривление осей прямых брусьев или изменение кривизны осей кривых брусьев. Изгиб связан с возникновением в поперечных сечениях бруса изгибающих моментов. Прямой изгиб возникает в случае, когда изгибающий момент в данном поперечном сечении бруса действует в плоскости, проходящей через одну из главных центральных осей инерции этого сечения. В случае, когда плоскость действия изгибающего момента в данном поперечном сечении бруса не проходит ни через одну из главных осей инерции этого сечения, изгиб называется косым.

Если при прямом или косом изгибе в поперечном сечении бруса действует только изгибающий момент, то имеется соответственно чистый прямой или чистый косой изгиб. Если в поперечном сечении действует также и поперечная сила, то имеется поперечный прямой или поперечный косой изгиб.

Часто термин «прямой» в названии прямого чистого и прямого поперечного изгибов не употребляют и их называют соответственно чистым изгибом и поперечным изгибом.

При прямом поперечном изгибе балки в ее поперечных сечениях возникают нормальные и касательные напряжения. Оценка прочности балки производится по нормальным напряжениям, возникающим в опасном сечении.

7.2 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

7.3 Порядок выполнения работы

По заданному варианту выбрать схему механизма (рисунок 7.1) и исходные данные (таблица 7.1). Построить модель балки в соответствии с вариантом. Наложить нагрузки на балку согласно расчетной схеме, назначить физико-механические свойства материала. Разбить систему на конечное число элементов. Оценить качественно разбиение. Произвести расчет системы с получением напряженно-деформированного состояния. Оценить напряжения и перемещения в системе.

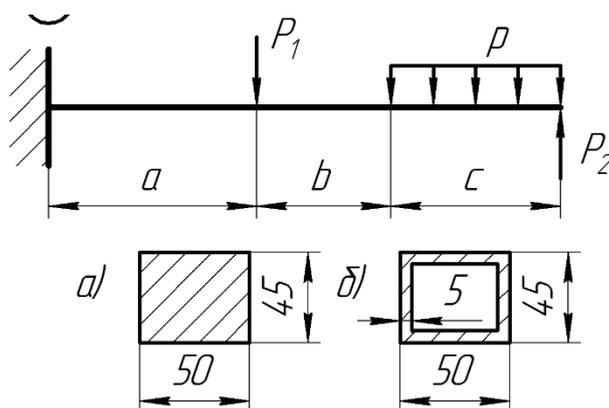


Рисунок 7.1 – Исходные схемы для расчета

Таблица 7.1 – Исходные данные для работы

Номер варианта	a , м	b , м	c , м	P_1 , кН	P_2 , кН	p , МПа	Материал
1	1	0,5	0,5	3	5	4	Сталь Ст 3
2	0,5	1	0,6	10	6	6	Сталь Ст 5
3	0,6	0,4	1	2	5	5	Сталь 10
4	0,8	0,6	0,4	4	3	8	Сталь 15
5	1	0,2	0,7	6	5	7	Сталь 20
6	0,2	0,4	0,6	8	7	4	Сталь 45
7	0,6	0,8	0,2	6	9	10	Сталь 12ГС
8	0,4	1	0,6	8	2	5	Сталь 65Г
9	0,8	0,4	0,2	7	5	2	Сталь 40Х
10	0,3	0,7	1	2	6	3	Сталь У10

Аналитически проверить результаты. Сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

7.4 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, наложение нагрузок и ограничений.

3 Снятие результатов работы модели, вывод результатов. Формирование автоматического отчета. Сравнение полученных результатов по балке сплошного сечения и полый балке.

4 Аналитическая проверка полученных результатов. Выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

5 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Что такое изгиб?

2 Назовите условия возникновения поперечного изгиба.

3 Назовите условия возникновения прямого изгиба.

4 Каким образом производится оценка прочности балки?

8 Лабораторная работа № 8. Расчет шпиндельного узла на жесткость, тепловые деформации и определение частот собственных колебаний

Цель работы: определить жесткость шпиндельного узла по результатам моделирования, влияние на него тепловых деформаций и ряд частот собственных колебаний.

8.1 Общие сведения о шпиндельном узле

Шпиндель, являющийся конечным звеном привода главного движения, оказывает существенное, часто лимитирующее влияние на точность, производительность и надежность всего станка. Шпиндельные узлы станков в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями должны обеспечить следующее:

- жесткость;
- точность вращения;
- передачу на заготовку или инструмент расчетных режимов резания для заданных технологических операций;
- виброустойчивость;
- минимальные тепловыделения и температурные деформации;
- долговечность;
- быстрое и точное закрепление инструмента или обрабатываемой детали;
- минимальные затраты на изготовление, сборку и эксплуатацию.

Шпиндельные узлы являются наиболее ответственными механизмами станков. От совершенства конструкции, а также от качества изготовления и сборки шпиндельного узла во многом зависит точность обработки. В последние годы в практике станкостроения наметилась тенденция к созданию жестких конструкций шпинделей относительно небольшой длины. Повышение жесткости шпинделей достигается за счет увеличения диаметра или площади поперечного сечения, применения дополнительных опор, повышения жесткости опор качения за

счет создания предварительного натяга и т. д. Для приводов вращения скоростных и точных станков шпиндели выполняют разгруженными от действия изгибающего момента шкивов приводных ремней или шестерен. Весьма важным является выбор типа последней передачи на шпиндель. Межопорное расстояние для шпинделей станков нормальной точности принимают равным 4–5 диаметрам шпинделя в передней опоре. Жесткость j шпинделей легких и средних станков нормальной точности, условно рассматриваемых в виде балки на шарнирных опорах с силой по середине, должна быть не менее 50 Н/мкм. Для станков повышенной точности принимают жесткость около 50 Н/мкм. Приводные шестерни шпинделей должны выполняться по 6–7 степени точности, иметь плотные посадки и располагаться непосредственно у опор.

8.2 Требования, предъявляемые к шпиндельным узлам

Основными критериями работоспособности шпиндельных узлов являются геометрическая точность, жесткость, быстроходность, долговечность, динамические характеристики. Точность вращения шпинделя оценивается величиной радиального или торцевого биения его базовых поверхностей. Величина этого биения зависит от класса точности станка и регламентируется соответствующим ГОСТом. Так, например, для токарных станков нормальной точности допуск радиального и торцевого биения составляет 5...8 мкм. Жесткость шпиндельного узла определяется упругими перемещениями переднего конца шпинделя под действием сил резания и также регламентируется ГОСТом. Нормативное значение жесткости для станков классов Н и П составляет 50...70 Н/мкм. Максимальное значение жесткости шпиндельного узла в основном определяется податливостью его опор. Быстроходность шпинделей оценивается произведением диаметра шпинделя d в передней опоре на частоту вращения n . Для шпиндельных узлов на подшипниках качения показатель быстроходности составляет $(2,5...3) \cdot 10^6$ мм·об/мин. Долговечность шпиндельных узлов оценивается ресурсом работы в часах без потери первоначальной геометрической точности; динамические характеристики шпинделей – амплитудами вибраций на потенциально неустойчивых формах колебаний. Устойчивость динамической системы шпиндельного узла тем выше, чем выше первая собственная частота колебаний. Частоты собственных колебаний шпинделей изменяются в широких пределах 100...600 Гц и приводят к возбуждению автоколебаний при резании. Поэтому для обеспечения устойчивого резания приходится умышленно снижать режимы и производительность резания.

8.3 Перечень используемого программного обеспечения

Графические редакторы и САПР: Компас, SolidWorks, NX.

8.4 Порядок выполнения работы

По заданному варианту выбрать расчетную схему шпиндельного узла (рисунок 8.1).

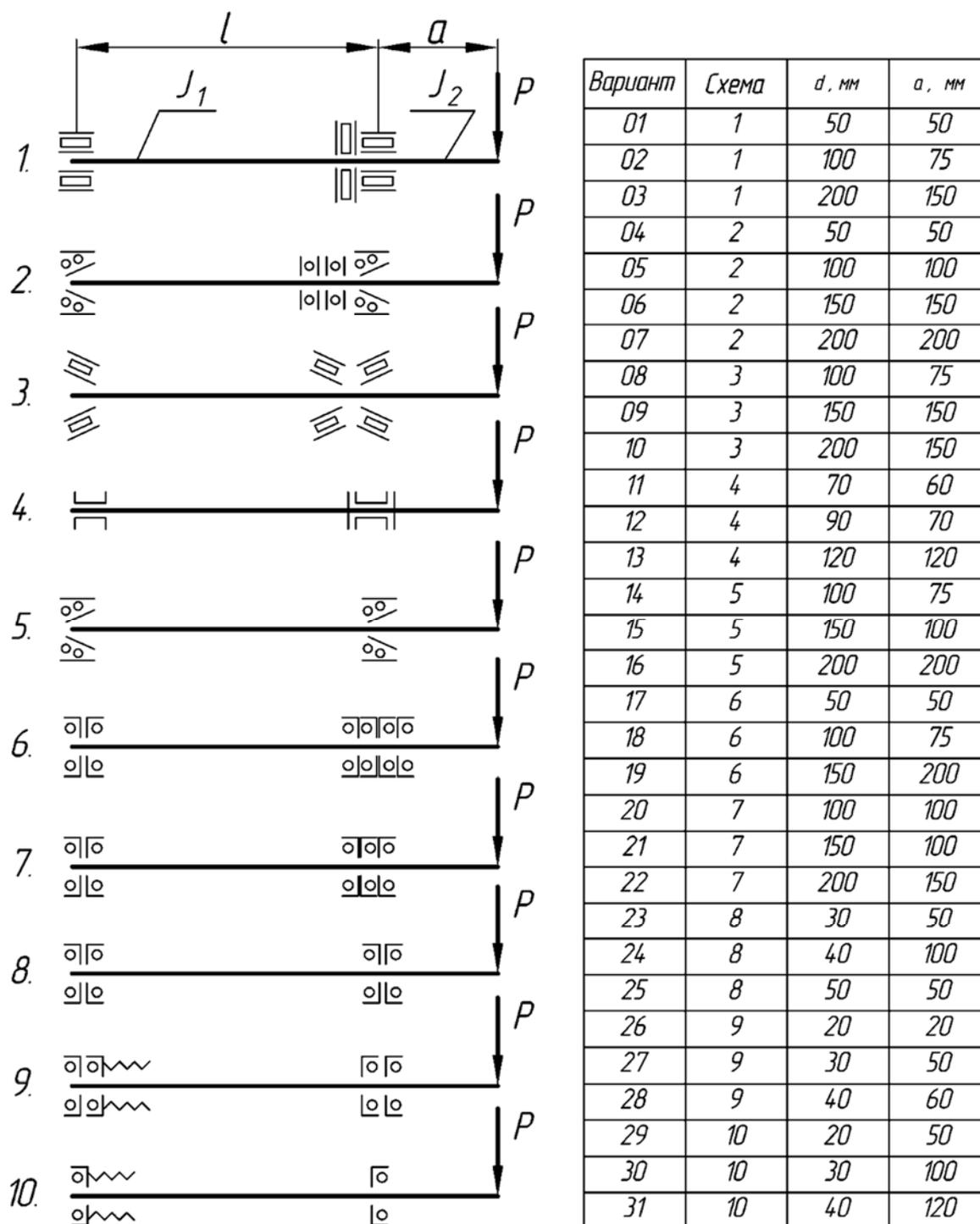


Рисунок 8.1 – Исходные схемы для расчета

Построить компьютерную модель шпиндельного узла в соответствии с вариантом. Наложить нагрузки на модель согласно расчетной схеме, назначить физико-механические свойства материала. Разбить систему на конечное число элементов. Оценить качественно разбиение. Произвести расчет системы с получением напряженно-деформированного состояния. Оценить напряжения и перемещения в системе. Произвести расчет жесткости шпиндельного узла. Аналитически проверить полученные результаты. Далее приложить в местах опор и на конце шпинделя тепловые нагрузки по согласованию с преподавателем. Оценить результаты полученной тепловой деформации, после чего сформировать задачу по определению частот собственных колебаний. Для анализа взять первых пять частот собственных колебаний в ряду. Оценить виброустойчивость шпинделя. Оформить отчет. Сделать выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.

8.5 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание построения модели, наложение нагрузок и ограничений.
- 3 Снятие результатов работы модели, вывод результатов. Формирование автоматического отчета. Оценка полученной жесткости. Сравнение полученной жесткости со станками нормальной точности (со станками-аналогами).
- 4 Аналитическая проверка полученных результатов. Выводы о результатах моделирования и данных, полученных аналитическим путем.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие требования предъявляются к шпиндельному узлу?
- 2 Назовите критерии работоспособности шпиндельного узла.
- 3 Влияние тепловых деформаций на работу шпиндельного узла.
- 4 Размерность жесткости шпиндельного узла. Каковы ее значения в зависимости от класса точности станка?
- 5 Для чего определяются частоты собственных колебаний?
- 6 Объясните явление резонанса.

Список литературы

- 1 **Акулович, Л. М.** Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие / Л. М. Акулович, В. К. Шелег. – М.: ИНФРА-М; Новое знание, 2020. – 488 с.
- 2 **Берлинер, Э. М.** САПР технолога машиностроителя: учебник / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов. – М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2022. – 336 с.
- 3 **Мюррей, Д.** SolidWorks 2003 / Д. Мюррей. – М.: Лори, 2005. – 712 с.
- 4 **Шам, Т.** Эффективная работа: SolidWorks 2004 SolidWorks for Designers / Т. Шам. – СПб.: Питер, 2005. – 768 с.
- 5 **Прохоренко, В. П.** SolidWorks. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. – М.: Бином-Пресс, 2004. – 448 с.
- 6 **Дударева, Н. Ю.** SolidWorks 2009 на примерах / Н. Ю. Дударева. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 554 с.
- 7 **SolidWorks 2007/2008.** Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
- 8 **Подскробко, М. Д.** Сопротивление материалов / М. Д. Подскробко. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 592 с.
- 9 **Александров, А. В.** Сопротивление материалов: учеб. пособие / А. В. Александров. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000. – 560 с.
- 10 **Жолобов, А. А.** Практикум по технологии машиностроения: учеб. пособие / А. А. Жолобов, И. Д. Камчицкая, А. М. Федоренко; под ред. А. А. Жолобова. – Мн.: РИВШ, 2020. – 316 с.
- 11 **Попковский, В. А.** Компьютерное моделирование и инженерный анализ: лабораторный практикум / В. А. Попковский. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. – 291 с.