МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Университет ИТМО

Факультет СУиР

**Курсовая работа**

на тему: «Расчет редуктора с электродвигателем»

Вариант 16-19

Выполнил

Студент гр. № R3325

Потапов А. О.

Проверил

Преподаватель ФСУиР

к.т.н. Абрамчук М.В.

Санкт-Петербург

2020

Оглавление

[Дано: 3](#_Toc44109359)

[1. Выбор электродвигателя: 3](#_Toc44109360)

[2. Кинематический расчет редуктора: 5](#_Toc44109361)

[3. Проектировочный расчет модуля зацепления: 6](#_Toc44109362)

[4. Геометрический расчет зубчатой передачи 8](#_Toc44109363)

[5. Выбор показателя точности зубчатых передач 11](#_Toc44109364)

[6. Расчёт вращательных моментов на валах 12](#_Toc44109365)

[7. Расчет валов на статическую прочность 13](#_Toc44109366)

[8. Выбор посадок для сопрягаемых деталей. 16](#_Toc44109367)

[9. Проверочные расчеты: 17](#_Toc44109368)

[9.1 Расчет цилиндрической зубчатой передачи на контактную прочность /выносливость 17](#_Toc44109369)

[9.2 Расчет цилиндрической зубчатой передачи на изгибную прочность. 20](#_Toc44109370)

[9.3 Проверочный расчет на прочность выходного вала: 21](#_Toc44109371)

[9.4 Расчет валов и осей на усталостную прочность: 24](#_Toc44109372)

[10. Собственный момент трения механизма. 26](#_Toc44109373)

[11. Расчет на прочность штифтового соединения: 27](#_Toc44109374)

[12. Расчет шпонки на прочность: 27](#_Toc44109375)

[13. Расчет на прочность винтового соединения: 28](#_Toc44109376)

[14. Расчет фрикционной муфты: 30](#_Toc44109377)

[15. Расчет приведенного момента инерции. 33](#_Toc44109378)

[16. Расчет времени разгона механизма: 37](#_Toc44109379)

[17. Кинематическая погрешность передачи. 38](#_Toc44109380)

[18. Кинематический мертвый ход зубчатой передачи. 40](#_Toc44109381)

[19. Расчет упругого мертвого хода: 43](#_Toc44109382)

[20. Выбор материалов, покрытия и смазки 44](#_Toc44109383)

[21. Расчет размерной цепи. 45](#_Toc44109384)

## Дано:

Вид компоновки:

S1 - на одной плате, перпендикулярной оси двигателя;

Условие определения числа ступеней:

K1 - минимизация приведенного момента инерции;

На выходном валу располагается предохранительная фрикционная муфта

На выходе располагается двухпальцевый поводок.

## 1. Выбор электродвигателя:

Число оборотов выходного вала:

Угловая скорость вращения выходного вала:

Момент нагрузки статический:

Момент инерции нагрузки:

Угловое ускорение:

Динамический момент нагрузки:

Статическая мощность

Динамическая мощность

Суммарная нагрузка на выходе механизма:

Коэффициент запаса:

Мощность двигателя:

Двигатель:

Ссылка на сайт производителя:

<https://eandc.ru/catalog/index.php?SECTION_ID=227&ELEMENT_ID=18585>

Полезная мощность:

Частота вращения вала двигателя:

Пусковой момент:

Номинальный момент:

Гарантийная наработка:

Момент инерции ротора:

Масса:

## 2. Кинематический расчет редуктора:

Передаточные числа ступеней:

Числа зубьев шестерен и колес:

Действительные передаточные отношения каждой пары:

Действительное передаточное

отношение механизма:

Расчетное значение скорости выходного вала:

## 3. Проектировочный расчет модуля зацепления:

Исходные данные из проектировочного расчета пятого семестра:

Допускаемый угол закручивания

вала на единицу длины:

Для ЗК используется материал СТАЛЬ 15Х

Допускаемая стрела изгиба на единицу длины вала:

Термообработка:

объемная закалка

Коэффициент запаса прочности материала вала:

Вариант марки материала вала:

Механические характеристики:

Предел текучести:

Твердость

Вариант марки материала ЗК:

Долговечность работы зубчатой передачи:

Степень точности и вид сопряжения ЗК:

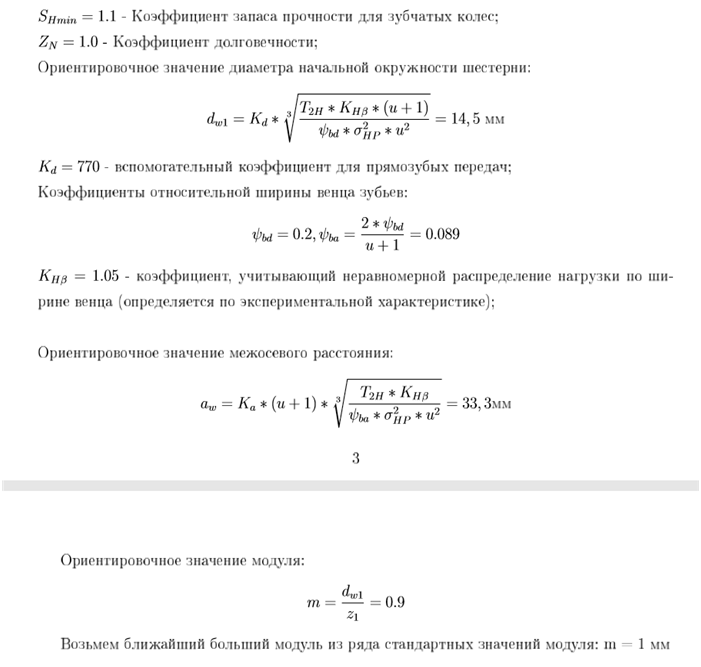
Расчет

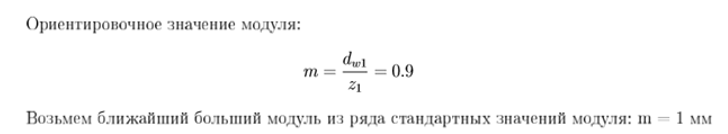
Так как по условию твердость материала ЗК HB=179<350, габариты

эвольвентной передачи определяются только контактной прочностью зубьев.

Предел контактной выносливости при объемной закалке:

Допускаемое контактное напряжение:





Модуль:

мм

## 4. Геометрический расчет зубчатой передачи

Таблица 1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр зацепления | Обозначение | Результаты расчета | | | | | | | | | | | |
| 1 пара | | | 2 пара | | | | 3 пара | | | 4 пара | |
| Число зубьев |  | 16 | | 26 | 16 | | 30  Продолжение таблицы 1. | | 6 | 44 | | 6 | 63 |
| Модуль расчетный |  | 1 | | | | | | | | | | | |
| Угол наклона зубьев |  | 0 | | | | | | | | | | | |
| Угол профиля |  | 20 ̊ | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент высоты  головки |  | 1 | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент  радиального зазора |  | 0,25 | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент  граничной высоты |  | 2 | | | | | | | | | | | |
| Передаточное число |  | 1,625 | | | 1,875 | | | | 2,75 | | | 3,94 | |
| Диаметр делительной  окружности |  | 16 | | 26 | 16 | | 30 | | 16 | 44 | | 16 | 63 |
| Угол профиля  Торцовый |  | 20 ̊ | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент смещения |  | 0,07 | -0,07 | | | 0,07 | -0,07 | 0,07 | | | -0,07 | 0,07 | -0,07 |
| Угол зацепления |  | 20 ̊ | | | | | | | | | | | |
| Межосевое расстояние делительное |  | 21 | | | 23 | | | | 30 | | | 39,5 | |
| Межосевое  расстояние |  | 21 | | | 23 | | | | 30 | | | 39,5 | |
| Высота ножки  зуба |  | 1,2 | 1,3 | | | 1,2 | 1,3 | 1,2  Продолжение таблицы 1. | | | 1,3 | 1,2 | 1,3 |
| Коэффициент  воспринимаемого  смещения |  | 0 | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент  уравнительного  смещения |  | 0 | | | | | | | | | | | |
| Высота головки  зуба |  | 1,1 | 0,9 | | | 1,1 | 0,9 | 1,1 | | | 0,9 | 1,1 | 0,9 |
| Диаметр окружности  впадин |  | 13,6 | | 23,4 | 13,6 | | 27,4 | | 13,6 | 41,4 | | 13,6 | 60,4 |
| Диаметр окружности  вершин |  | 18,1 | | 27,9 | 18,1 | | 31,9 | | 18,1 | 45,9 | | 18,1 | 64,9 |
| Минимальное число зубьев, свободное от подрезания |  | 15,9 | 18,3 | | | 15,9 | 18,3 | 15,9 | | | 18,3 | 15,9 | 18,3 |
| Коэффициент минимального смещения |  | -0,46 | | -1,46 | -0,46 | | -1,92 | | -0,46 | -3,04 | | -0,46 | -6,49 |
| Диаметр измерительных  роликов |  | 1,732 | | | | | | | | | | | |
| Угол развернутости  эвольвенты в точке касания измерительных роликов |  |  | |  |  | |  | |  |  | |  |  |
| Размер по роликам |  | 18,3 | | 28 | 18,3 | | 32,1 | | 18,3 | 46,2 | | 18,3 | 65,2 |

Продолжение таблицы 1.

## 5. Выбор показателя точности зубчатых передач

отклонения размеров по роликам М:

Таблица 2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер ЗК | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|  | 58 | 70 | 58 | 70 | 58 | 70 | 58 | 85 |
|  | 32 | 36 | 32 | 36 | 32 | 36 | 32 | 40 |
|  | -58 | -70 | -58 | -70 | -58 | -70 | -58 | -85 |
|  | -90 | -106 | -90 | -106 | -90 | -106 | -90 | -125 |

## 

## 6. Расчёт вращательных моментов на валах

Суммарный момент нагрузки:

Для данной схемы:

Для заданной степени точности зубчатых колес

коэффициент трения скольжения стальных ЗК:

На IV валу:

Нормальное усилие в зацеплении:

Поправочный коэффициент:

На III валу:

Нормальное усилие в зацеплении:

Поправочный коэффициент:

На II валу:

Нормальное усилие в зацеплении:

Поправочный коэффициент:

На I валу:

Нормальное усилие в зацеплении:

Поправочный коэффициент:

## 7. Расчет валов на статическую прочность

Механические характеристики конструкционной стали, используемой для изготовления вала

Упругие константы углеродистых сталей:

E = 1.95..2.05 \*10^5 МПа - модуль упругости первого рода;

G = 0.80..0.81 \*10^5 МПа - модуль упругости второго рода;

ν = 0.024..0.028 - коэффициент Пуассона;

Марки стали: Сталь 35;

Допускаемое напряжение при кручении:

С учетом того, что при проектировочном расчете валов допускаемые напряжения обычно занижают:

По условию статической прочности вала на кручение:

мм

По условию крутильной жесткости вала:

Радиальная составляющая силы резания:

Длина вала, округленная до ближайшего целого:

Допускаемая деформация изгиба вала:

Модуль первого рода:

**Диаметры валов:**

мм

## 8. Выбор посадок для сопрягаемых деталей.

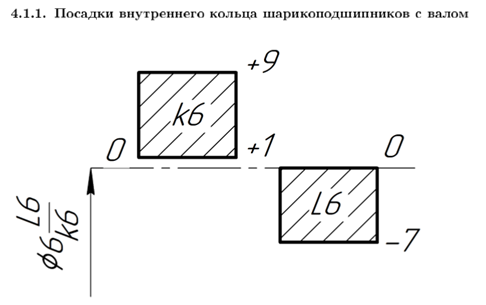


Рис. 1. Посадки внутреннего кольца шарикоподшипников с валом.

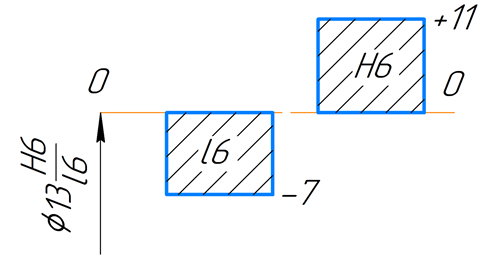


Рис. 2. Посадка вешнего кольца шарикоподшипников с подшипниковой втулкой.

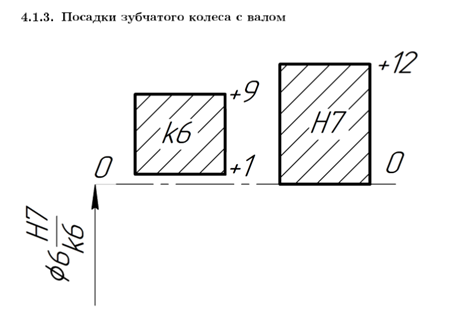


Рис. 3. Посадка зубчатого колеса с валом.

## 9. Проверочные расчеты:

### 9.1 Расчет цилиндрической зубчатой передачи на контактную прочность /выносливость

Окружная сила на делительном цилиндре:

Коэффициент внешней динамической нагрузки

Коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями

Коэффициент ширины зубчатого венца:

Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по длине

контактных линий:

Коэффициент влияния погрешности зацепления на динамическую нагрузку:

Коэффициент влияния разности шагов шестерни и колеса:

Окружная скорость на делительном радиусе:

Удельная окружная динамическая сила:

Коэффициент, учитывающий механические свойства зубьев:

Коэффициент рмы сопряженных поверхностей зубьев в полюсе зацепления:

Коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий:

Коэффициент наклона зуба:

Расчетное контактное напряжение:

Предельная контактная выносливость повеврхностей зубьев при базовом числе циклов перемены напряжений:

Базовое число циклов перемены напряжений:

Эквивалентное число циклов перемены напряжений:

Так как ZN > 2.6

Допускаемое контактное напряжение:

### 9.2 Расчет цилиндрической зубчатой передачи на изгибную прочность.

Удельная окружная динамическая сила:

Коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку, возникающую в зацеплении:

Коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями:

Коэффициент нагрузки:

Коэффициенты, учитывающие форму зуба и концентрацию напряжений:

Коэффициенты наклона зуба и учитывающий перекрытие зубьев соответственно:

Так как YFS2 <YFS1, а материал колеса и шестерни один и тот же, рассчитывается напряжение на изгиб только для шестерни.

Расчетное действующее напряжение:

Предел выносливости зубьев на изгиб:

Коэффициент безопасности:

### 9.3 Проверочный расчет на прочность выходного вала:

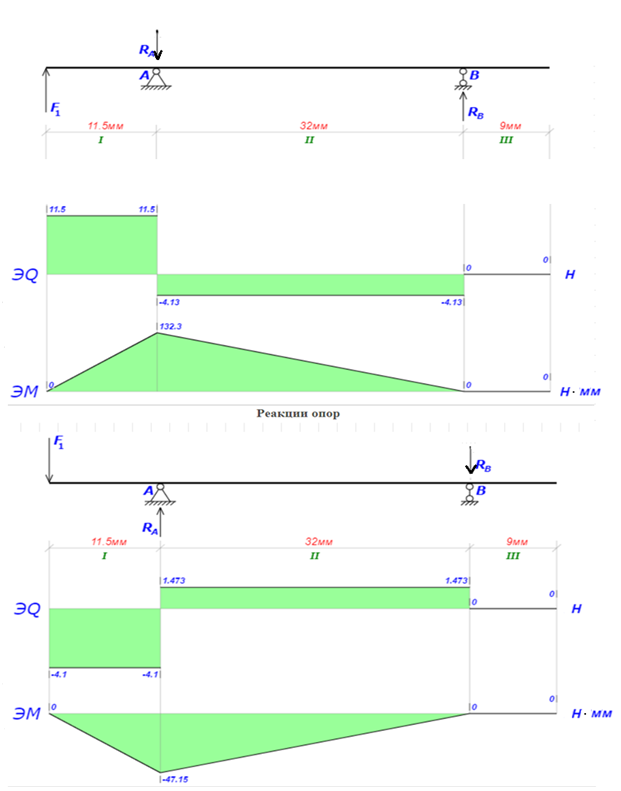


Рис. 4. Эпюры напряжений на выходном валу.

### 9.4 Расчет валов и осей на усталостную прочность:

При симметричном цикле:

При отнулевом цикле:

Масштабный коэффициент:

Коэффициенты концентрации напряжений по изгибу и кручению соответственно:

Технологический коэффициент:

Коэффициент, учитывающий неточность в выборе расчетной схемы нагрузок:

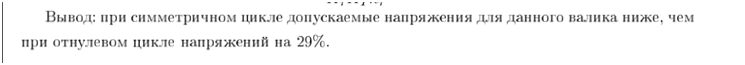
Поправка на отклонения, принимаемые в расчете на прочность механических характеристик материала, , от действительных.

Степень ответственности детали и ее влияние на общею работу ПМ:

Запасы прочности по нормальным и касательным напряжениям:

Допускаемые нормальные и касательные напряжения соответственно при симметричном цикле:

Допускаемые нормальные и касательные напряжения соответственно при отнулевом цикле:



Расчет радиальных подшипников на динамическую грузоподъемность:

Базовая динамическая грузоподъемность:

В качестве радиальной нагрузки принимается наибольшая из результирующий реакций в опорах RA и RB

Коэффициент вращения, при вращении внутреннего кольца подшипника:

Коэффициент безопасности:

Температурный коэффициент:

Эквивалентная нагрузка:

Расчетное значение динамической грузоподъемности:

## 10. Собственный момент трения механизма.

Коэффициент трения скольжения:

## 11. Расчет на прочность штифтового соединения:

Условие прочности штифта:

Усилие, отнесенное к одной поверхности среза штифта:

Площадь поперечного сечения штифта:

Напряжение среза:

Условие прочности штифтового соединения на срез выполняется!

## 12. Расчет шпонки на прочность:

Сегментная шпонка для вала диаметром 6мм

Сегментная шпонка для вала диаметром 4мм

## 13. Расчет на прочность винтового соединения:

Условия прочности:

Для разрыва стержня:

Для среза витков:

Для смятия поверхности витков:

Q - усилие затяжки резьбового соединения

F - площадь поперечного сечения винта

Определение приведенного напряжения в стержне винта:

Длина свинчивания:

Определение напряжения среза:

Срез витков винта происходит по цилиндру диаметра d, а гайки по внутреннему диаметру d1

Для винта:

Для гайки:

Диаметр винта без высоты резьбы:

(ГОСТ 24705-2004)

0,75 и 0,88 - коэффициенты полноты резьбы, учитывающие отношение толщины витка на цилиндре, по которому происходит срез витков, к шагу резьбы

Определение напряжения смятия:

Шаг резьбы:

В расчетах на смятие и на срез витков условно предполагают, что общая нагрузка Q распределяется поровну между всеми рабочими витками. Неточность такого предположения компенсируется уменьшением допускаемых напряжений.

Определение допускаемых напряжений:

Предел текучести винтов:

Коэффициент запаса:

## 14. Расчет фрикционной муфты:

Режим работы 1 - постоянная нагрузка

Крутящий момент, при котором начинается проскальзывание одной полумуфты относительно другой:

Число поверхностей трения:

Коэффициент трения скольжения пары материалов:

сталь по стали

Средний радиус площадки контакта:

Сила пружины при рабочей деформации:

площадь кольца, по которому контактируют детали муфты

Допускаемое давление:

Удельное давление, возникающее на поверхностях трения:

Расчет пружины:

1. Сила пружины при максимальной деформации:

Средний диаметр пружины ( подбирается по эскизу ):

2. Выбираем предварительное значение индекса пружины iпр:

(ГОСТ 13765-86)

3. предварительное значение диаметра проволоки:

4. Выбираем ближайшее значение диаметра проволоки d по таблице ГОСТ 9389-75

5. Действительное значение индекса пружины:

6. Коэффициент, учитывающий кривизну витка пружины k

7. Допускаемое касательное напряжение для выбранного диаметра проволоки:

предел прочности:

8. Минимально возможный по условию прочности диаметр проволоки:

9. Проверяем выбранное значение диаметра проволоки по условию прочности

Если условие не выполняется, уменьшаем значение iпр и повторяем расчет с пункта 2

10. Определяем число рабочих витков n

S2 – рабочая деформация пружины, назначается в пределах 4…6 мм

11. Округлить число витков до ближайшего необходимого значения.

12. Для принятого числа витков рассчитываем уточнённое значение рабочей деформации

модуль сдвига, для стальной пружинной проволоки

13. Длина пружины при полностью поджатых витках

14. Жёсткость пружины

## 15. Расчет приведенного момента инерции.

Приведенный момент инерции ротора двигателя:

Диаметры ступиц зубчатых колес:

Ширина венцов зубчатых колес:

Диаметры отвертстий:

Длины ступиц:

Массы зубчатых колес:

Моменты инерции зубчатых колес:

Приведенный к первому колесу момент инерции редуктора

Приведенный момент инерции механизма рассчитывается по формуле:

## 16. Расчет времени разгона механизма:

Скорость вращения вала двигателя:

Жесткость механической характеристики электродвигателя:

Костанта времени разгона:

Время разгона:

## 17. Кинематическая погрешность передачи.

мкм

мкм

мкм

Минимальная погрешность :

Максимальная кинематическая погрешность передачи:

Максимальная кинематическая погрешность в угловых единицах:



## 18. Кинематический мертвый ход зубчатой передачи.

Наименьшие дополнительные смещения исходного контура:

мкм

мкм

мкм

мкм

мкм

мкм

мкм

мкм

Допуск на смещение исходного контура:

мкм

Гарантированный боковой зазор:

мкм

мкм

мкм

мкм

Минимальный кинематический мертвый ход передачи:

мкм

мкм

мкм

Предельные отклонения межосевого расстояния:

мкм

мкм

мкм

мкм

Максимальный кинематический мертвый ход передачи:

мкм

мкм

мкм

Кинематический мертвый ход многозвенного механизма, приведенный к выходному звену:



## 19. Расчет упругого мертвого хода:

Полярные моменты инерции валов:

Длины участков валов, на которые действует крутящий момент:

мм

мм

мм

мм

мм

Деформации кручения валов:

## 20. Выбор материалов, покрытия и смазки

Подвижные соединения смазать смазкой ЦИАТИМ-201 ГОСТ 6267-74.

Таблица 3.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование  детали | Материал детали | Защитно-декоративные  покрытия | Количе  ство |
| Вал | Сталь 35 ГОСТ 1050-2013 | Хим.Окс.прм. | 4 |
| Втулка | БрОЦС5-5-5 ГОСТ 613-79 | - | 1 |
| Втулка подшипниковая | Д16Т ГОСТ 4784-2019 | Ан. Окс. черный | 4 |
| Втулка прижимная | Д16Т ГОСТ 4784-97 | Ан. Окс. черный | 1 |
| Колесо зубчатое | Сталь 15Х  ГОСТ 4543-71 | Хим.Окс.прм. | 8 |
| Кольцо установочное | Сталь 20 ГОСТ 1050-2013 | Хим.Окс.прм. | 1 |
| Плата | Д16Т ГОСТ 4784-2019 | Ан. Окс. черный | 1 |
| Полумуфта фрикционная | Сталь 35Х ГОСТ4543-16 | Хим. Окс. прм | 2 |
| Пружина | Сталь 65Г ГОСТ 14959-79 | Хим. Окс. прм | 1 |
| Стакан для двигателя | Д16Т ГОСТ 4784-2019 | Ан. Окс. черный | 1 |
| Поводок | Сталь 20 ГОСТ 1050-2013 | Хим. Окс. прм | 1 |
| Палец | Сталь 20 ГОСТ 1050-2013 | Хим. Окс. прм | 2 |
| Винт | Сталь 35 ГОСТ 1050-2013 | Хим.Окс.прм. | 20 |
| Шайба | Сталь 20 ГОСТ 1050-2013 | Хим. Окс. прм | 8 |
| Шпонка | Сталь 45 ГОСТ 1050-2013 | Хим. Окс. прм | 2 |
| Штифт | Сталь 45 ГОСТ 1050-2013 | Хим. Окс. прм | 10 |

## 21. Расчет размерной цепи.

Продолжение таблицы 3.

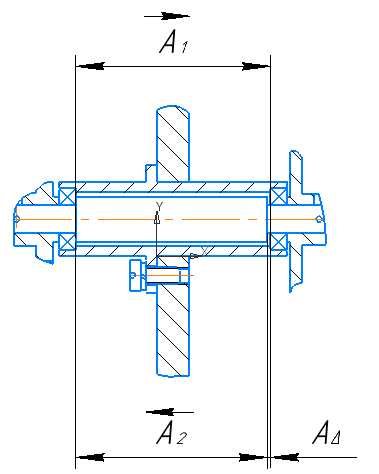
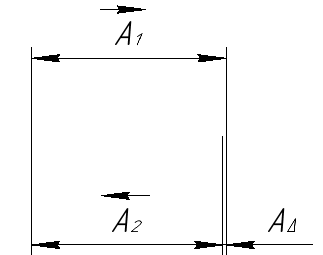
 

Рис. 5. Изображение размерной цепи.

Номинальный размер замыкающего звена:

Верхнее отклонение замыкающего звена:

Нижнее отклонение замыкающего звена:

Размер замыкающего звена (зазора):

, допуск T=32 мкм