

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра систем автоматического управления

Утверждено на заседании кафедры  
«Системы автоматического управления»  
«28» апреля 2017 г., протокол № 12

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ О.В.Горячев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

по дисциплине  
**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СУЛА**

основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы специалитета

по направлению подготовки  
**24.05.06 Системы управления летательными аппаратами**

с направленностью (профилем)  
**Системы управления движением летательных аппаратов**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 240506-01-22

Тула 2022

**Разработчик(и) методических указаний**

Илюхина Наталья Сергеевна, проф. каф. САУ, к.т.н., доц.

---

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические системы относятся к большому классу устройств, которые широко используются в различных автоматических системах и средствах автоматики. При проектировании электромеханических систем (ЭМС) и входящих в них исполнительных устройств разработчики сталкиваются со значительными трудностями, связанными, главным образом, с отсутствием литературы, обобщающей накопленный опыт проектирования и достаточно простых методов расчета и проектирования подобных устройств.

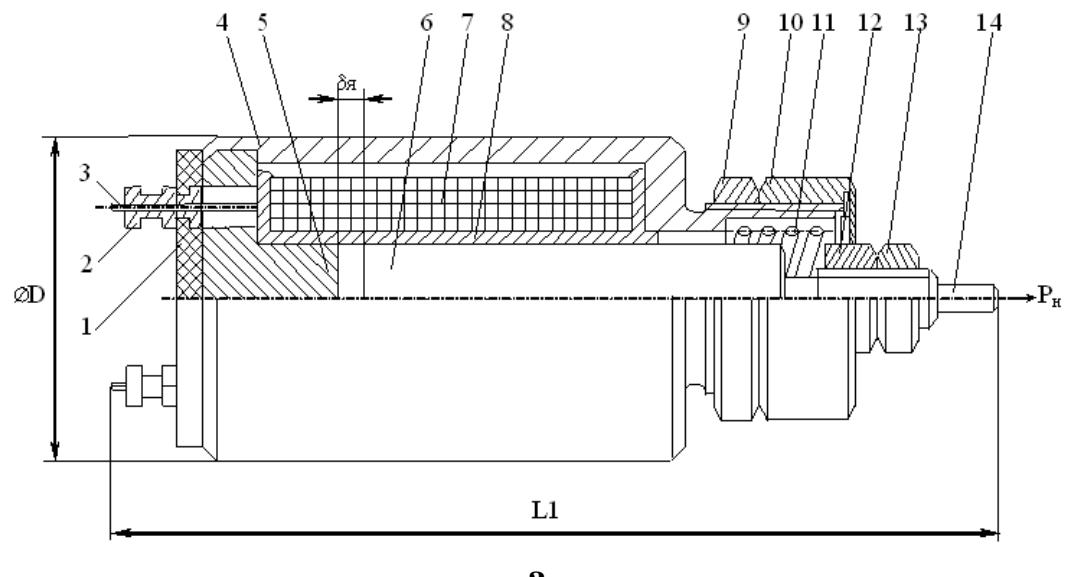
Цель настоящего учебного пособия дать краткое описание типовых конструкций ЭМС и их элементов, изложить основы проектирования и инженерные методы расчета электромеханических систем, квазиоптимальных по выполняемой работе.

Основные типовые конструкции исполнительных устройств ЭМС с поступательным перемещением подвижных частей приведены на рис. 1.

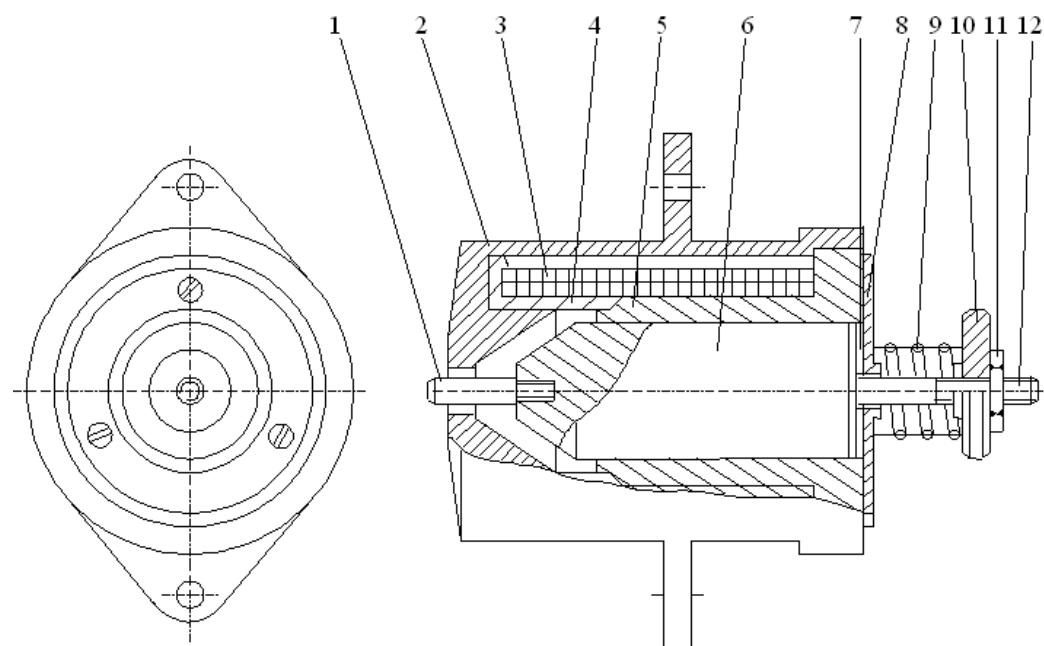
На рис. 1а представлено исполнительное устройство втяжного типа с независимой регулировкой хода якоря и возвратной пружины. Электромагнит имеет плоский стоп и состоит из корпуса 4, стопа 5, якоря 6, обмотки 7, намотанной на немагнитный каркас 8, возвратной пружины 11, выходного штока 14. Позиции 9, 10, 12, 13 помечают специальные крепежные детали (гайки и контргайки). Колодка 1 с контактами 2 предназначена для подпайки выводов 3 обмотки. В качестве габаритных размеров приведены: наружный диаметр корпуса D, полная длина исполнительного устройства L1 и максимальный ход якоря  $\delta_y$ . Начальное усилие  $P_n$  указывается без учета силы пружины.

На рис. 1б изображен электромагнит тянувшего и толкающего действия с неизменным рабочим ходом и регулируемой силой возвратной пружины. Он имеет усеченный конический стоп ( $\alpha = 60^\circ$ ) и состоит из корпуса 2, обмотки 3, намотанной на составной каркас (жестко соединенные фланец 5 и втулка 4), якоря 6, возвратной пружины 9. В якоре с обеих сторон жестко закреплены тянущий 12 и толкающий 1 штоки. Рабочий ход выставляется посредством прокладки 7 и ограничивается крышкой 8. Позициями 10, 11 помечены регулировочная и крепежные детали.

Электромагнит тянущего и толкающего действия с постоянным рабочим ходом, без возвратной пружины (рис. 1в) имеет стоп 1 и якорь 2, которые в области рабочего зазора выполнены в виде ферромагнитного щунта (ФМШ). Позицией 3 помечен фланец слабо развитый в осевом направлении. ФМШ обеспечивает электромагниту сравнительно пологую тяговую характеристику.



a.



6

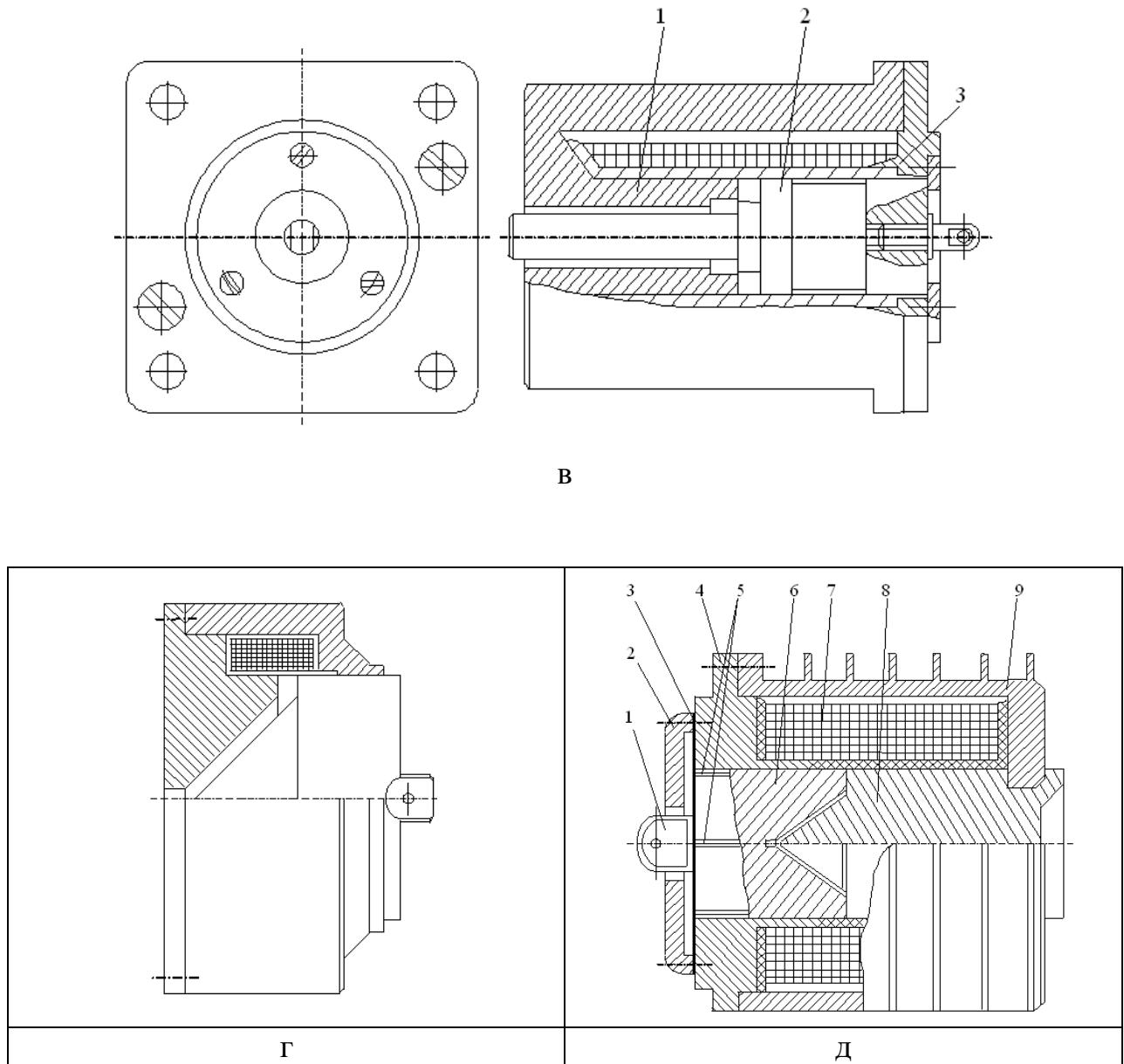


Рис. 1. Конструкция типовых исполнительных устройств ЭМС.

Электромагнит втяжного типа с коническим якорем (рис. 1г) не имеет возвратной пружины. Характерная особенность электромагнита: соприкосновение стопа и якоря в конце хода происходит не по конической поверхности, а по плоским торцевым поверхностям стопа и якоря.

Электромагнит (рис. 1д) с постоянным рабочим ходом не имеет возвратной пружины и отличается комбинированной формой рабочего зазора (сочетание плоского стопа с коническим). Электромагнит включает якорь 6 с внутренним конусом (для уменьшения массы) и наружными продольными пазами 5 (уменьшение вихревых токов, увеличение быстродействия), стоп 8, корпус 9, катушку 7. Поступательное движение якоря осуществляется в направляющей развитого фланца 4, ход якоря ограничивается упором 2 и ре-

гулируется прокладкой 3. Серьга 1 служит для сопряжения электромагнита с нагрузкой. Тяговая характеристика объединяет достоинства конического и плоского стопов: повышенное начальное усилие и достаточно высокое усилие отрыва.

## 2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Цель курсовой работы - закрепление и углубление студентами теоретических знаний, приобретение практических навыков по проектированию электромеханических систем. Указанная цель определила следующие задачи курсового проектирования [2]:

- овладение методиками проектировочного расчета электромеханических систем;
- получение практического опыта применения ЭВМ для решения инженерных задач;
- получение начальных навыков разработки и оформления конструкторской документации;
- изучение требований ЕСКД, ЕСТД, и др.;
- приобретение навыков инженерного творчества.

## 3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

### 3.1. Тематика курсовой работы

Тематика курсовой работы посвящена разработке электромеханических систем, используемых в качестве исполнительных устройств в мехатронных системах и системах управления.

Основными объектами курсового проектирования являются электромеханические системы с электромагнитами постоянного тока, имеющими поступательное перемещение подвижных частей (с дисковым якорем, с втяжным якорем различной формы стопа, с ферромагнитным шунтом).

При определении тематики курсовой работы руководитель должен учитывать индивидуальные наклонности студентов, используя результаты работ, выполненных ими в рамках НИРС и УИРС.

### 3.2. Исходные данные к курсовой работе

Исходные данные к курсовой работе выдаются преподавателем и включают:

- требования к статическим и динамическим характеристикам системы;
- параметры, характеризующие источник питания;

- условия эксплуатации.

Помимо перечисленных данных, оговаривается режим работы электромеханической системы.

### 3.3. Задание на курсовую работу

В большинстве случаев задание должно быть типовым, основанным на методиках проектирования, приведенных в лекционном курсе и учебных пособиях. Наиболее способным и хорошо подготовленным студентам целесообразно выдавать индивидуальные задания, содержащие элементы научного исследования.

Типовое задание на проектирование предусматривает проработку следующих вопросов:

- выбор типа конструкции электромагнита;
- проектный расчет электромагнита, включающий определение параметров магнитопровода, обмотки и составление эскиза магнитной цепи;
- поверочный расчет электромагнита;
- выбор схемы и расчет усилителя мощности;
- разработка программы расчета статических и динамических характеристик;
- анализ статических и динамических характеристик электромеханической системы;
- расчет источника питания.

### 3.4. Объем курсовой работы

Курсовая работа должна включать пояснительную записку объемом 20-25 листов (формата А4) рукописного текста и графическую часть объемом 5-6 листов формата А3 или А4.

Графическая часть курсовой работы должна содержать:

- сборочный чертеж спроектированной системы (формат А3);
- рабочие чертежи деталей (формат А4).

### 3.5. Организация выполнения курсовой работы

Курсовая работа выполняется студентами направления подготовки: Специальность подготовки: 24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами» в 6-ом семестре. Выполнение курсовой работы строится в соответствии с планом-графиком, согласно которому предусмотрено выполнение следующих этапов:

- выбор типа конструкции электромагнита, проектный расчет размеров магнитопровода и параметров обмотки;
- поверочный расчет электромагнита;

- разработка программ расчета и анализ статических характеристик системы;
- выбор схемы и расчет усилителя мощности;
- разработка программ расчета и анализ статических характеристик системы;
- расчет источника питания;
- разработка конструкции электромеханической системы;
- разработка рабочих чертежей 4...5 деталей (по указанию руководителя);
- оформление пояснительной записки и графической части курсовой работы.

План-график выполнения индивидуального задания разрабатывается студентом и утверждается руководителем работы. Студент обязан регулярно регистрировать выполнение каждого этапа работы у руководителя.

Курсовая работа считается законченной, если выполнены все пункты задания, пояснительная записка и чертежи подписаны студентом и руководителем. Срок защиты работы указывается в специальной граfe задания на проектирование.

В процессе выполнения курсовой работы руководитель проводит групповые и индивидуальные консультации со студентами. Тематика групповых консультаций регламентируется рабочей программой дисциплины "Электромеханические системы СУЛА". На индивидуальных консультациях руководитель контролирует ход выполнения курсовой работы, делает замечания по проделанной работе и дает рекомендации по решению конкретных вопросов.

### 3.6. Защита курсовой работы

Защита курсовой работы представляет собой форму проверки степени овладения студентом методами проектирования электромеханических систем и уровня приобретенных им практических инженерных навыков.

Защита курсовой работы состоит в устном сообщении студента (5...6 минут) по существу проделанной им работы и ответах на вопросы. В своем сообщении студент должен осветить постановку задачи проектирования, методы ее решения и полученные результаты. Студент должен сопровождать устный рассказ обращением к графическим материалам, поясняя сказанное.

Защита работы проводится перед комиссией из преподавателей кафедры САУ с участием руководителя работы. Вопросы, задаваемые студенту членами комиссии, как правило, относятся к содержанию работы, но могут касаться и смежных дисциплин.

## 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 4.1. План построения и содержание разделов пояснительной записки к курсовой работе

Рубрикация и содержание разделов расчетно-пояснительной записки должны соответствовать ГОСТ 7.32-81, в соответствии с которым записка должна иметь:

- титульный лист;
- задание на курсовое проектирование;
- реферат;
- содержание;
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- библиографический список;
- приложения.

Образец оформления титульного листа приведен в приложении 1.

Задание на курсовую работу оформляется в соответствии с образцом, приведенным в приложении 2.

Реферат должен содержать: сведения об объеме, количестве иллюстраций, таблиц, библиографических источников, перечень ключевых слов, текст реферата.

Введение расчетно-пояснительной записки должно содержать краткую характеристику объекта проектирования, формулировку цели и задач работы, обоснование принятого в работе метода решения.

В основной части расчетно-пояснительной записки должны помещаться сведения, отражающие существование, методику и основные результаты выполненной разработки. Расчеты, приводимые в записке, должны содержать эскизы, расчетные схемы, иллюстрирующие физический смысл выполняемого расчета.

## 5. МЕТОДИКИ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ.

При проектировании втяжных электромагнитов (ЭМ) можно выделить два основных типа расчетов: проектный и поверочный. В зависимости от технического задания проектный расчет проводится по двум методикам:

- по заданному усилию, ходу якоря, тепловому режиму рассчитываются размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие заданные параметры при минимальных габаритах;

- по заданным габаритам, ходу якоря, тепловому режиму рассчитываются размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие максимально возможное тяговое усилие при заданных параметрах.

Проверочный расчет позволяет по известным размерам магнитопровода, параметрам катушки, ходу якоря определить тяговое усилие электромагнита, его тепловой режим, потребление тока, степень насыщенности магнитопровода.

### 5.1. Выбор конструктивного типа и формы стопа.

В инженерной практике широкое распространение получил способ выбора типа электромагнита и формы стопа по конструктивному фактору (КФ) [1]

$$K\Phi = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{\delta} \quad (1)$$

где Р – тяговое усилие, δ – ход якоря.

Для количественного сопоставления экономичности основных типов электромагнитов (с дисковым якорем, втяжным якорем с различной формой стопа, ферромагнитным шунтом) с различными конструктивными факторами и выбора соответствующего типа электромагнита можно пользоваться табл. 1, или диаграммой (рис. 2).

Таблица 1

Параметр	Конструктивный вид электромагнита		
	Втяжной с плоским стопом	Втяжной с коническим стопом	С дисковым якорем
Тип ЭМ, форма стопа	6,5...11 < КФ < 31,3...47	0,15...1,5 < КФ < 6,5...11	КФ > 31,3...47

Из всего многообразия конструктивных исполнений ЭМ с помощью рис.2а по значению конструктивного фактора (1), известному в начале проектирования , выбирается оптимальный тип ЭМ (по максимальным значениям критериев A/Q, A/V, A/N, A/F – здесь A – номинальная мощность, Q – масса ЭМ, V – скорость перемещения подвижных частей, N – мощность, F – мдс катушки). На стыках областей применения (не заштрихованные области на рис. 2) возможно использование обоих смежных типов ЭМ.

При выборе электромагнита с втяжным якорем рациональная форма стопа определяется по значению коэффициента формы и усеченности конуса

$h$  как отношение малого диаметра конуса к большому, равному диаметру якоря.

Применение стопов с  $\alpha > 120^\circ$  нерационально, так как тяговая характеристика при этом близка к характеристике плоского стопа и выигрыш по усилию незначителен. Конические стопы с  $\alpha < 30^\circ$  целесообразны для сравнительно больших ходов якоря и для получения пологой тяговой характеристики, когда нельзя применять магниты с ФМШ.

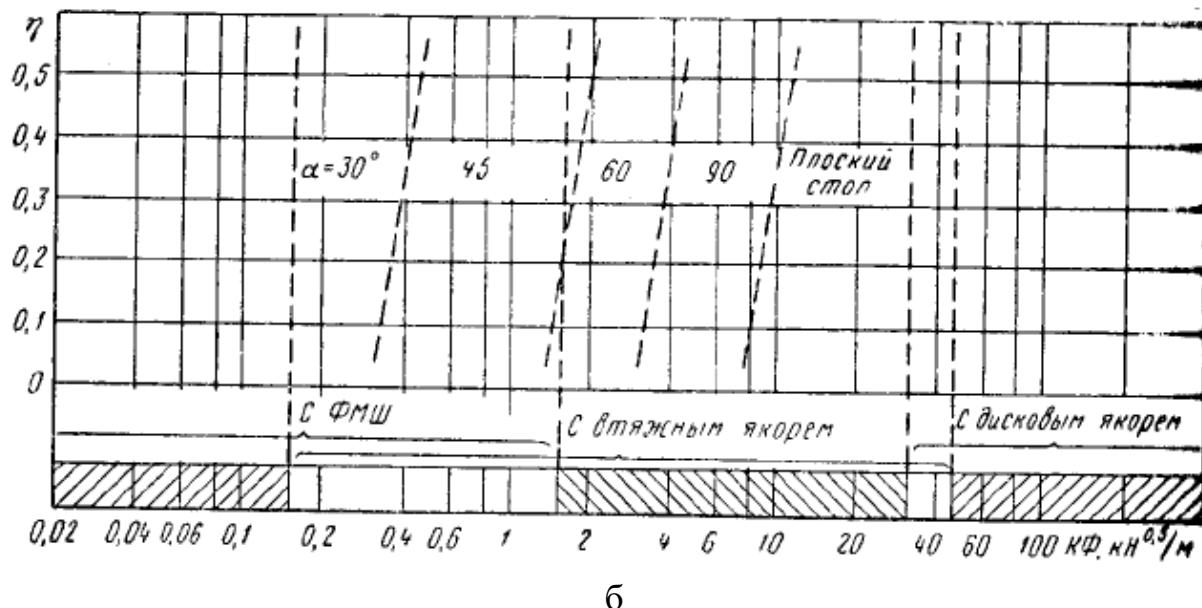


Рис. 2. Области применения: а) рациональных типов электромагнитов;  
б) рациональных форм стопов электромагнитов с втяжным якорем.

## 5.2. Аналитический метод расчета электромагнитов

Электромагниты с коническим и плоским стопами конструктивно различаются только формой исполнения стопа. Различие в их расчете обусловлено разными выражениями тяговых сил, которые достаточно сложны, особенно для усеченно-конического стопа. Поэтому на этапе синтеза применяются упрощенные выражения для тяговых сил:

- для плоского стопа

$$P_{пл} = \frac{B^2 \delta S}{2\mu_0}$$

- для конического стопа

$$P_{кон} = \frac{B^2 \delta S}{2\mu_0} \sin^2 0,5\alpha$$

где  $\alpha$  – угол конуса при вершине

При этом электромагнит с плоским стопом можно рассматривать как частный случай электромагнита с коническим стопом.

Расчет электромагнитов с дисковым якорем проводится аналогично расчетам электромагнитов с плоским стопом.

Расчетные формулы для электромагнитов втяжного типа с плоским стопом не имеют пометки, для электромагнитов с коническим стопом помечены литерой "а", для электромагнитов с дисковым якорем – литерой "б".

### Проектный расчет 1-го типа

Допустим, заданы следующие основные параметры проектируемого электромагнита: Р – тяговое усилие, которое должен развивать электромагнит в начале хода якоря, Н;  $H$  – ход якоря, м; U – напряжение источника питания, В;  $\theta_{don}$  – допустимое превышение температуры электромагнита при продолжительном режиме работы, °С.

Требуется определить размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие заданные характеристики при минимальных габаритах.

Расчет электромагнитов производится в следующей последовательности.

1. Уточнение формы стопа. Форма стопа уточняется по значению конструктивного параметра КФ в соответствии с графиками рис. 2б.

$$K\Phi = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{\delta}$$

где  $\delta = \delta_a + \delta_{nn}$  – рабочий зазор, м; – толщина немагнитной прокладки, м; обычно  $\delta_{nn} = (0,05...0,1)\delta_a$ , причем большему ходу соответствует меньшее значение коэффициента и наоборот. В некоторых случаях немагнитная прокладка может отсутствовать  $\delta_{nn} = 0$

2. Определение основных размеров электромагнита:

а) диаметр якоря электромагнита

$$d = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{B\delta} \quad (2)$$

$$d = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{B\delta \sin 0,5\alpha} \quad (2a)$$

$$d = 1,265 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{B\delta} \quad (2b)$$

где  $B_\delta$  – магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл.

Для получения минимальных габаритов, объема, массы, потерь магнитодвижущей силы значение  $B_\delta$  необходимо принимать 0,7...1,1 Тл (для электротехнических сталей марки 29895)[3].

б) наружный диаметр электромагнита  $D = 2d$ ;

в) длина электромагнита

$$L = 8,7 \cdot 10^3 (\delta + \delta_n) \sqrt{P \rho / n_{yo} D^3} \quad (3)$$

$$L = 8,7 \cdot 10^3 (\delta \sin 0,5\alpha + \delta_n) \sqrt{P \rho / n_{yo} D^3} \quad (3a)$$

$$L = 12,3 \cdot 10^3 \delta \sqrt{P \rho / n_{yo} D^3} \quad (3b)$$

где  $\delta_p$  – паразитный зазор,  $\delta_p = (4...5)e$ ;  $e$  – эксцентрикитет якоря по отношению к фланцу (равен половине разности диаметров направляющей втулки и якоря с учетом предельных отклонений их размеров); обычно  $\delta_p = (0,015...0,05) \cdot 10^{-2}$  м (в случае применения развитого воротничка  $\delta_p \approx 0$ );  $\rho$  – удельное сопротивление провода, Ом.м; определяется для заданного превышения температуры  $Q$  по формуле  $\rho = \rho_0(1+\alpha_0 Q)$ ;  $\rho_0$  – удельное сопротивление провода при  $20^\circ C$ , для медного провода  $\rho_0 = 1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом.м;  $\alpha_0$  – температурный коэффициент металла провода, для медного провода  $\alpha_0 = 0,004 1/^\circ C$ ;  $n_{уд}$  – удельная мощность рассеяния, Вт/м<sup>2</sup>; определяется по графику  $\theta = f(n_{уд})$  (рис.3);

г) отношение габаритных размеров электромагнита  $L/D$  и их оценка. Наиболее удачное конструктивное оформление втяжных электромагнитов обеспечивается при  $L/D = 0,7...1,8$ , электромагнитов с дисковым якорем - при  $L/D = 0,4...0,8$ . Если полученное отношение габаритных размеров электромагнитов не соответствует желаемому, то расчет повторяют с п.2а, задаваясь при этом другим значением магнитной индукции;

д) по принятому диаметру якоря уточняется значение магнитной индукции

$$B_\delta = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{d} \quad (4)$$

$$B_\delta = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{d \sin 0,5\alpha} \quad (4a)$$

$$B_\delta = 1,265 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{d} \quad (4b)$$

е) по графику  $\Phi = f_l(B_\delta)$  (рис. 3) определяется значение поправочного коэффициента относительного падения магнитодвижущей силы  $\Phi$ ;

ж) максимальное значение магнитной индукции  $B = B_\delta / \Phi$ ;

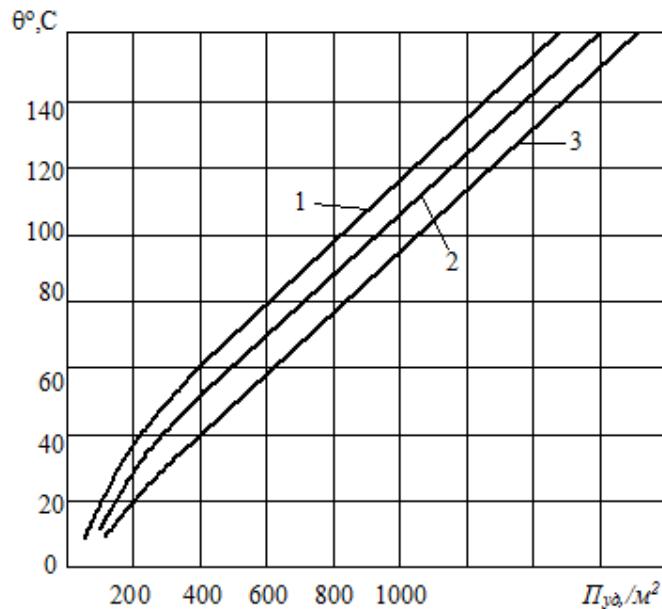


Рис. 3. Зависимость между превышением температуры и удельной мощностью рассеяния при различных условиях теплопередачи:  
1 - плохие, 2 - средние, 3 - хорошие.

3. Определение остальных размеров магнитопровода:

а) внутренний диаметр магнитопровода

$$D_i = 0.87D$$

б) толщина фланца; для дискового якоря - толщина якоря и толщина фланца

$$C = 0.12D \quad (5;5a)$$

$$C = 0.12D \quad (5b)$$

в) толщина фланца на периферии

$$C_1 = 0.06D$$

г) длина окна магнитопровода под катушку

$$l = L - 2C$$

д) длина стопа  $l_{cm} = (0,3...0,55)L$

Конструктивные схемы магнитных цепей электромагнитов представлены на рис. 4а

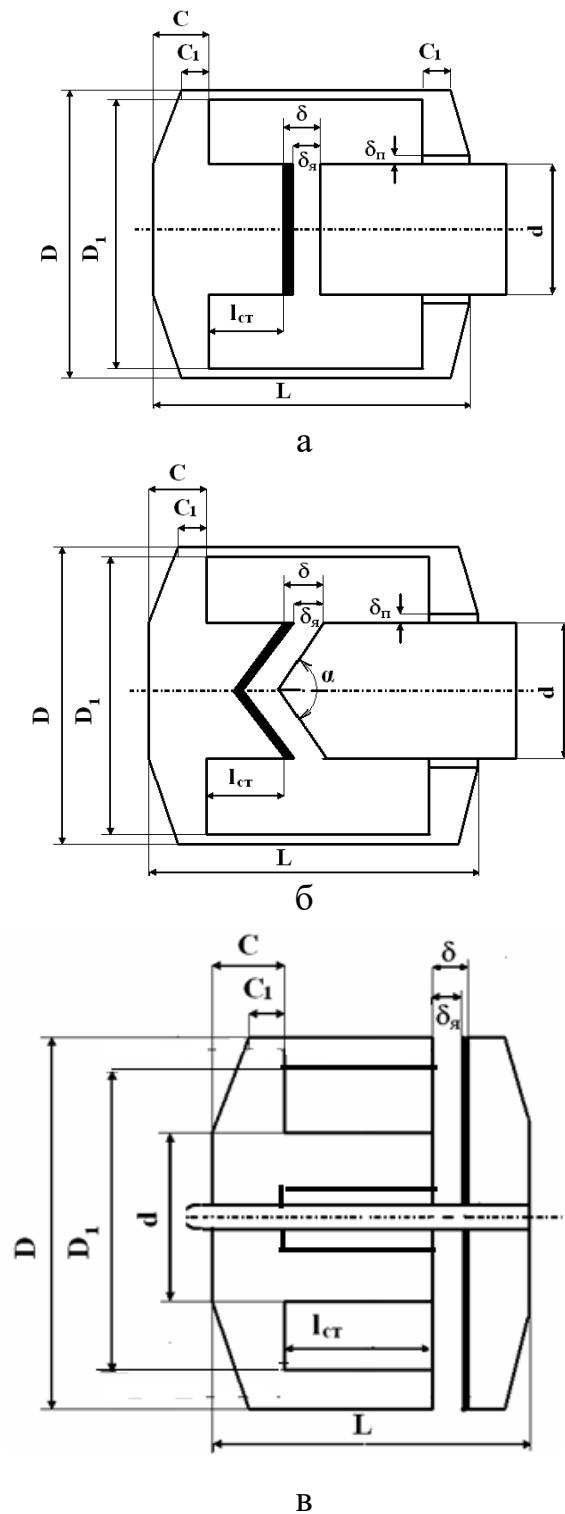


Рис. 4а. Конструктивные схемы магнитных цепей электромагнитов  
а – с плоским стопом, б – с коническим стопом, в – с дисковым якорем.

Необходимо отметить, что рассчитанные параметры магнитопровода обеспечивают приблизительно одинаковую площадь его поперечного сечения пути прохождения магнитного потока, созданного магнитодвижущей силой обмотки управления.

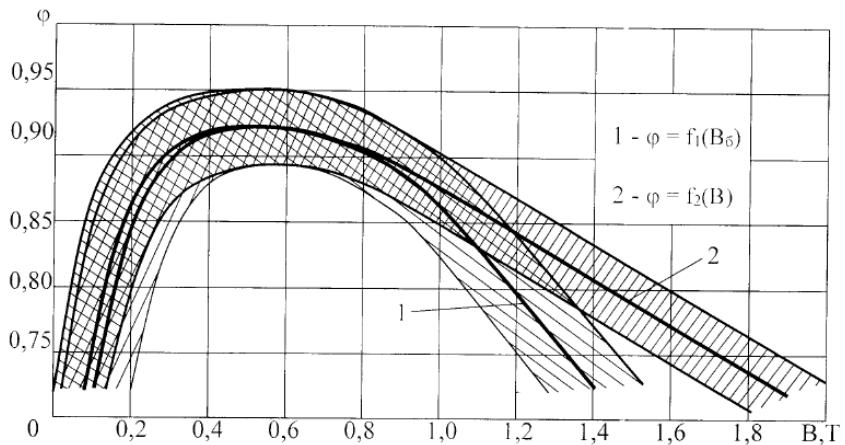


Рис. 4. Области разброса и усредненные зависимости поправочного коэффициента от магнитной индукции: 1 - в рабочем зазоре; 2 - максимальной.

#### 4. Определение параметров катушки:

а) средний диаметр катушки

$D_{cp} = 0,5(D_h + d_{bh}) = 0,5[(D_1 - 2\delta_{kk}) + (d + 2b)]$  где  $b$  – толщина каркаса, м (обычно  $b = (0,05...0,25)10^{-2}$  м;  $\delta_{kk}$  – зазор между катушкой и корпусом, м (для низковольтных электромагнитов  $\delta_{kk} = (0,025...0,2)10^{-2}$  м);

б) диаметр провода

$$d_{np} = 1,78 \cdot 10^3 \sqrt{\rho D_{cp} B (\delta + \delta_n) / U} \quad (6)$$

$$d_{np} = 1,78 \cdot 10^3 \sqrt{\rho D_{cp} B (\delta \sin 0,5\alpha - \delta_n) / U} \quad (6a)$$

$$d_{np} = 1,78 \cdot 10^3 \sqrt{\rho D_{cp} B 2\delta / U} \quad (6b)$$

в) диаметр провода округляется до стандартного значения в соответствии с таблицей проводов и для принятой марки провода находится его диаметр в изоляции  $d_{uz}$ ;

г) высота намотки катушки

$$h_k = 0,5(D_h - d_{bh}) = 0,5[(D_1 - 2\delta_{kk}) - (d + 2b)]$$

д) длина катушки

$$l_k = L - 2(b_1 + C)$$

е) число витков катушки

$$W = 0,865 l_k h_k / d_{uz}^2$$

ж) сопротивление катушки при нормальных условиях ( $+20^\circ \text{C}$ )

$$R_0 = \pi \rho_0 D_{cp} W / (\pi d_{np}^2 / 4) = 7 \cdot 10^{-8} D_{cp} W / d_{np}^2$$

з) длина намоточного провода

$$L_{np} = \pi D_{cp} W$$

и) сопротивление катушки в рабочем состоянии, т.е. нагретой до температуры  $t = (t_0 + \Theta)$

$$R_t = \pi \rho D_{cp} W / (\pi d_{np}^2 / 4)$$

## Проектный расчет 2-го типа

Пусть заданы:  $D$  – наружный диаметр электромагнита, м;  $L$  – длина электромагнита, м;  $\delta_y$  – ход якоря, м;  $U$  – напряжение источника питания (расчетное напряжение), В;  $\theta_{aii}$  – допустимое превышение температуры электромагнита при продолжительном режиме работы,  $^{\circ}\text{C}$ .

Требуется определить размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие максимально возможное тяговое усилие при заданных параметрах.

Расчет электромагнита производится в следующей последовательности.

1. Оценка тягового усилия:

а) тяговое усилие, которое может быть получено при заданных исходных данных:

$$P = L^2 D_{nyo}^3 / 76 \cdot 10^6 (\delta + \delta_p)^2 p \quad (7)$$

$$P = L^2 D_{nyo}^3 / 76 \cdot 10^6 (\delta \sin 0,5\alpha + \delta_p)^2 p \quad (7a)$$

$$P = L^2 D_{nyo}^3 / 152 \cdot 10^6 \delta^2 p \quad (7b)$$

Здесь величины  $n_{yd}$ ,  $\delta$ ,  $\delta_p$ ,  $p$  определяются аналогично проектному расчету 1-го типа, приведенному выше;

б) для втяжного электромагнита форма стопа уточняется по значению конструктивного фактора в соответствии с рис. 2б.

$$K\Phi = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{\delta}$$

для электромагнита с дисковым якорем тип электромагнита также уточняется по значению конструктивного фактора в соответствии с рис. 2а.

2. Определение конструктивных размеров магнитопровода:

а) внутренний диаметр магнитопровода втяжных электромагнитов

$$D_i = 0.87D$$

б) диаметр якоря

$$d = 0,5D \quad (8; 8a)$$

Диаметр сердечника дискового электромагнита

$$d = 0,5D \quad (8b)$$

в) толщина фланца втяжных электромагнитов

$$C = 0.12D \quad (9; 9a)$$

Толщина дискового якоря и толщина фланца дискового электромагнита

$$C = 0.12D \quad (9b)$$

г) толщина фланца на периферии

$$C_1 = 0,06D$$

д) сечение якоря

$$S = \pi d^2 / 4$$

е) длина окна магнитопровода под катушку

$$l = L - 2C$$

ж) длина стопа  $l_{cm} = (0,3...0,55)L +$ .

3. Определение размеров и параметров катушки:

а) средний диаметр катушки

$$D_{cp} = 0,5(D_h + d_{bh}) = 0,5[(D_1 - 2\delta_{kk}) + (d + 2b)]$$

где  $D_h$  – наружный диаметр катушки, м;  $d_{bh}$  – внутренний диаметр катушки, м;  $\delta_{kk}$  – зазор между катушкой и корпусом, м;  $b$  – толщина каркаса, м;

б) высота намотки

$$h_k = 0,5(D_h - d_{bh}) = 0,5[(D_1 - 2\delta_{kk}) - (d + 2b)]$$

в) длина намотки  $l_k = L - 2(b_1 + C)$  ;

г) сопротивление катушки, необходимое для обеспечения заданного теплового режима:

$$R_{ai} = U^2 / \pi D(L + 0,5D)n_{ai}$$

д) диаметр провода

$$d_{np} = 1,2854 \sqrt{pD_{cp}l_k h_k / R_{don}}$$

е) диаметр провода округляется до стандартного значения в соответствии с таблицей проводов и для принятой марки провода находится его диаметр в изоляции  $d_{iz}$ ;

ж) число витков катушки  $W = 0,865l_k h_k / d_{iz}^2$

з) сопротивление при нормальных условиях ( $+20^\circ C$ )

$$R_0 = 7 \cdot 10^{-8} D_{np} W / d_{id}^2$$

и) длина намоточного провода  $L_{np} = \pi D_{cp} W$

4. Уточнение значения тягового усилия, развиваемого электромагнитом при расчетном напряжении:

а) полная магнитодвижущая сила  $F = WU / R$ ;

б) максимальная магнитная индукция

$$B = \mu_0 F / (\delta + \delta_n) \quad (10)$$

$$B = \mu_0 F / (\delta \sin 0,5\alpha + \delta_n) \quad (10a)$$

$$B = B = \mu_0 F / 2\delta \quad (10b)$$

в) по графику  $\varphi = f(B_\delta)$  (рис. 4) находится значение поправочного коэффициента  $\varphi$  ;

г) тяговое усилие, развиваемое электромагнитом:

$$P = \mu_0 \varphi^2 F^2 S / 2(\delta + \delta_n)^2$$

$$P = \mu_0 \varphi^2 F^2 S / 2(\delta \sin 0,5\alpha + \delta_n)^2$$

$$P = \mu_0 \varphi^2 F^2 S / 4\delta^2$$

## Проверочный расчет

Проверочный расчет производится при известных конструкции, размерах и параметрах электромагнита:

- а) размерах магнитопровода  $D, D_1, d, C, C_1, L, l, l_{cm}, \alpha$ ;
- б) размерах и параметрах катушки  $D_h, d_{bh}, l_k, d_{np}, d_{us}, W, R$ ;
- в) других параметрах  $\delta_a, \delta_{nh}, \delta_n, U$ .

Требуется определить тяговое усилие электромагнита, его тепловой режим, потребление тока, степень насыщенности магнитопровода.

Расчет электромагнита производится в следующей последовательности.

1. Проверка размеров магнитопровода и параметров катушки:

- а)  $D_1 = 0.87D$ ;
- б)  $d = 0.5D$ ;
- в)  $C = 0.12D$ ;
- г)  $C_1 = 0.06D$ ;
- д)  $l = L - 2C$ ;
- е)  $l_{cm} = (0.3...0.55)L$ ;
- ж) сечение якоря  $S = \pi d^2 / 4$ ;
- з) средний диаметр катушки  $D_{cp} = 0.5(D_h + d_{bh})$ ;
- и) высота намотки  $h_k = 0.5(D_h - d_{bh})$ ;
- к) число витков катушки  $W = 0.865l_k h_k / d_{us}^2$ ;
- л) сопротивление катушки  $R_0 = 7 \cdot 10^{-8} D_{cp} W / d_{np}^2$ ;
- м) значение потребляемого тока  $I = U / R$ .

2. Определение тягового усилия, развиваемого электромагнитом при расчетном напряжении:

- а) полная магнитодвижущая сила  $F = WU / R$ ;
- б) максимальная магнитная индукция:

$$B = \mu_0 F / (\delta + \delta_n) \quad (11)$$

$$B = \mu_0 F / (\delta \sin 0.5\alpha + \delta_n) \quad (11a)$$

$$B = \mu_0 F / 2\delta \quad (11b)$$

в) по графику  $\varphi = f(B_\delta)$  (рис. 4) находится значение поправочного коэффициента  $\varphi$ ;

г) тяговое усилие, развиваемое электромагнитом:

$$P = \mu_0 \varphi^2 F^2 S / 2(\delta + \delta_n)^2 \quad (12)$$

$$P = \mu_0 \varphi^2 F^2 S / 2(\delta \sin 0,5\alpha + \delta_n)^2 \quad (12a)$$

$$P = \mu_0 \varphi^2 F^2 S / 4\delta^2 \quad (12b)$$

3. Проверка правильности выбора формы стопа или типа электромагнита в соответствии с рис. 2

$$K\Phi = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{\delta}$$

4. Определение превышения температуры электромагнита:

а) удельная мощность рассеяния

$$n_{yo} = U^2 / \pi D(L+0,5D)R$$

б) по графику  $\theta = f(n_{yo})$  (рис. 3) для найденной удельной мощности рассеяния определяется превышение температуры электромагнита  $\theta$ .

### 5.3. Расчет винтовой пружины

Проектирование винтовых пружин растяжения - сжатия состоит в выборе материала проволоки и определении размеров пружины: среднего диаметра  $D$ , диаметра проволоки  $d$ , числа рабочих витков  $i_p$  и длины  $H_0$  пружины в свободном состоянии. Решение задачи проектирования винтовой пружины неоднозначно, так как заданным свойствам могут удовлетворять пружины различной геометрии и из разных материалов. Поэтому при проектировании обычно находят размеры нескольких пружин, удовлетворяющих заданным условиям, и из них выбирают ту, которая лучше других подходит к механизму прибора. Для выбранного материала необходимо назначить величину допускаемого касательного напряжения при кручении [Т]. Свойства пружинных материалов приведены в [4, прил. 43].

Наиболее удобно расчет размеров пружины вести по требуемой жесткости пружины  $k$  и максимальной растягивающей или сжимающей силе  $P_{max}$ . Жесткость пружины связана с максимальной силой соотношением

$$\kappa = \frac{P_{max}}{X_{max}}$$

где  $X_{max}$  - максимальное перемещение подвижных частей.

Подбор среднего диаметра пружины  $D$ , диаметра проволоки  $d$  и числа рабочих витков  $i_p$  производят, используя уравнения прочности и жесткости преобразовав их к виду

$$d = \sqrt{8P_{max}ck_r / (\pi[\tau])} \quad (14)$$

$$l_p = \frac{Gd}{8kc^3} \quad (15)$$

где  $c$  – индекс пружины;  $k_r$  – коэффициент увеличения напряжения у внутренней стороны витка (сравнительно с напряжением, возникающим при кручении прямого стержня). Его величина зависит от индекса пружины и может быть найдена по приближенной формуле

$$k_r = (4c + 2)/(4c - 3) \quad (16)$$

Для упрощения расчетов целесообразно вначале вычислить значения  $8P_{\max}ck_r/(\pi[\tau])$  и  $G/(8k)$ . Затем следует задаться несколькими значениями индекса пружины  $c = D/d$  в пределах от 4...6 до 16...20. Пружины меньших индексов применяют редко. Редко используются пружины и с большим значением индекса. При индексе выше 16...20 существенно увеличивается диаметр пружины, резко уменьшается их изгибная прочность. Если нет каких-либо специальных требований, следует выбирать среднее значение индекса  $c = 8...12$ .

Задавшись рядом значений индекса и найдя отвечающие им значения коэффициента  $k_r$ , определяют по (14) диаметры проволоки, соответствующие выбранным значениям индекса  $c$ . Выбрав из сортамента пружинной проволоки [4, прил.3] ближайшие большие значения диаметров, подставляют их в формулу (15) и определяют рабочее число витков пружин при каждом значении индекса. По значениям  $c$  и  $d$  определяют средний диаметр пружины  $D = d \cdot c$ , наружный  $D_i = d \cdot (c+1)$  или внутренний  $D_{ai} = d \cdot (c-1)$  диаметры пружины. Величины  $d$  и  $i_p$  используют для определения начальной длины (высоты) пружины  $H_0$ . Для пружин сжатия

$$H_0 = (\xi i_p + i_k) d + X_{\max} \quad (17)$$

Коэффициент  $\xi$  определяется зазором между витками в ее наиболее сжатом состоянии, т.е. когда она сжата силой  $P_{\max}$ . Зазор необходим для компенсации погрешности шага витков. Величину  $\xi$  обычно выбирают в пределах 1,2...1,5;  $i_k$  – число опорных, концевых витков. Величина  $i_k$  зависит от конструкции пружины, ее назначения. Для неответственных пружин  $i_k = 1,5$ . При повышенных требованиях к точности характеристики пружины число концевых витков увеличивают до  $i_k = 3$  (по 1,5 витка с каждой стороны).

Для пружин растяжения, навиваемых обычно без зазора между витками высота пружины

$$H_0 = i_p d + \psi D \quad (18)$$

Коэффициент  $\psi$  учитывает размеры зацепов [5] и в зависимости от их конструкции принимается в пределах от 0,5 до 2.

В результате такого проектирования получают ряд пружин с соответствующими значениями  $d$ ,  $D$  и  $H_0$ , из этого ряда выбирают пружину, наилучшим образом подходящую к разрабатываемой конструкции.

#### 5.4. Разработка программ расчета и анализ статических характеристик системы

Расчет статических и динамических характеристик электромеханической системы рассматриваемого класса основан на применении методик, изложенных в [5], и использует нелинейную математическую модель.

К основным статическим характеристикам относятся: уравнения связи  $\Phi = f(i, \alpha)$ , внешняя характеристика  $\alpha = f(i)$ , механическая характеристика  $F_{\text{дв}} = f(i, \alpha)$ . Для получения выражений, позволяющих рассчитать статические характеристики, необходимо составить схему замещения магнитной цепи исполнительного устройства и записать нелинейное алгебраическое уравнение (уравнение Кирхгофа для магнитной цепи). Решение этого уравнения требует использования соответствующих численных методов и применения ЭВМ.

Пользуясь методикой и алгоритмами, изложенными в [5], составить схему замещения магнитной цепи, записать уравнения связи и нелинейное алгебраическое уравнение магнитной цепи, составить программы расчета и рассчитать механическую характеристику разработанной системы для максимального тока нагнетенного электромагнита.

#### 5.5. Выбор жесткости возвратной пружины и элементов ключевого усилителя мощности

Для выбора возвратной пружины и элементов ключевого усилителя мощности необходимо провести анализ влияния их параметров на динамические характеристики системы.

При включении электромагнита якорь преодолевает сопротивление возвратной пружины  $F_{\text{пр}} = K_{\text{пр}} \cdot \delta$  и внешней силы нагрузки  $F_h$ , причем чем больше жесткость пружины, тем больше сила сопротивления и время срабатывания электромагнита.

При отключении электромагнита (при подаче на базу транзистора усилителя мощности запирающего напряжения) ток в обмотке начинает уменьшаться, сила, прижимающая якорь к упору, также уменьшается и, когда ее величина становится меньше силы пружины, якорь начинает возвратное движение. Причем, чем быстрее в цепи обмотки спадает ток и чем больше жесткость возвратной пружины, тем быстрее якорь возвращается в исходное состояние.

При отключении обмотки на ней появляется напряжение самоиндукции, направленное в одну сторону с напряжением источника питания, что может привести к выходу из строя транзистора. Для защиты транзистора от пробоя используются стабилитроны, ограничивающие

напряжение на коллекторе транзистора. Спад тока при отключении будет тем быстрее, чем больше предельно допустимое напряжение на коллекторе транзистора, защищенного от пробоя стабилитроном. Таким образом, для обеспечения быстрого спада тока необходимо использовать высоковольтные транзисторы.

Для определения жесткости пружины и элементов выходного каскада усилителя мощности можно рекомендовать следующую методику:

- повторяя несколько раз процесс расчета динамических характеристик электромагнита подобрать величину жесткости пружины так, чтобы время срабатывания было на 5...10 % меньше требуемого по заданию;

- задать предельно допустимое напряжение на транзисторе на два порядка больше напряжения источника питания и для выбранной величины жесткости пружины рассчитать время возврата якоря электромагнита в исходное положение. Если это время на 10...15 % меньше требуемого, то величина жесткости пружины выбрана правильно;

- повторяя несколько раз процесс расчета динамических характеристик,

определить предельно допустимое напряжение, при котором время возврата якоря электромагнита исходное положение будет равно заданному;

- по предельно допустимому напряжению и требуемому току коллектора транзистора  $i_k = (1,2...1,4)i_{max}$  выбрать типы транзистора и стабилитрона.

## 5.6. Разработка программ расчета и анализ динамических характеристик системы

Основными динамическими характеристиками электромеханической системы являются переходные характеристики по току в обмотке и перемещению якоря электромагнита. Расчет этих характеристик сводится к решению нелинейной математической модели [5]:

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= x_c \\
\frac{dx_c}{dt} &= (F_d - Cx - hx_c - F_n) / m \\
\frac{di}{dt} &= (E - U_y - ir + i_e Wr_e) / W^2 G_p \\
\frac{dB}{dt} &= -\frac{i_e r_e}{S_{\min}} \\
U_y &= \begin{cases} ir_T & r_T = r_{To} \\ ir_T & \text{при } r_T = r_{T_3}, |ir_{T_3} - E_k| \leq U_{co} \\ 0 & r_T = r_{T_3}, |ir_{T_3} - E_k| > U_{co} \end{cases} \\
E &= \begin{cases} E_k & r_T = r_{To}, r_T = r_{T_3}, |ir_{T_3} - E_k| \leq U_{co} \\ -U_{co} & \text{при } r_T = r_{T_3}, |ir_{T_3} - E_k| > U_{co} \end{cases}
\end{aligned} \tag{19}$$

В математической модели (19) используются следующие обозначения:  $x$ ,  $x_c$  – координата и скорость якоря;  $F_d$  – движущая сила;  $F_n$  – сила нагрузки,  $E_k$  – коллекторная эдс;  $i$  – ток в обмотке;  $B$  – индукция в минимальном сечении магнитопровода  $S_{\min}$ ;  $m$  – масса подвижных частей;  $C$  – жесткость пружины;  $h$  – коэффициент вязкого трения;  $i_b$  – вихревой ток;  $r$ ,  $r_b$  – сопротивление обмотки и эквивалентное сопротивление путей вихревых токов;  $G_p$  – проводимость рассеяния;  $U_{co}$  – напряжение стабилизации стабилитрона;  $r_{To}$ ,  $r_{T_3}$  – сопротивление открытого и закрытого транзистора.

Для получения динамических характеристик необходимо, пользуясь методикой и алгоритмами, приведенными в [5], составить программу и рассчитать переходные процессы по току в обмотке электромагнита, перемещению якоря, скорости перемещения якоря, индукции в минимальном сечении и движущей силе в зависимости от времени переключения транзистора выходного каскада усилителя мощности.

Используя полученные данные и при необходимости повторяя потребное число раз расчет динамических характеристик, подобрать пружину, используя методику, изложенную выше.

### 5.7. Расчет источника питания

Расчет источника питания постоянного тока включает выбор трансформатора, выбор схемы, элементов и расчет параметров выпрямителя, выбор типа фильтра.

Режим выпрямителя в значительной степени определяется типом фильтра, включенного на его выходе. В маломощных выпрямителях, питающихся от однофазной сети переменного тока, применяются емкостные фильтры Г-образные LC, RC и П-образные CLC и CRC фильтры.

Емкостный фильтр характерен для выпрямителей, рассчитанных на малые токи нагрузки. На выходе выпрямителя параллельно нагрузке включается конденсатор для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения. Реакция нагрузки на выпрямитель зависит от емкости конденсатора, сопротивление которого для переменной составляющей много меньше сопротивления нагрузки.

Если фильтр выпрямителя начинается с дросселя, обладающего большой индуктивностью, то нагрузка выпрямителя - индуктивная.

Выпрямитель характеризуется: выходными параметрами; параметрами, характеризующими режим диодов, и параметрами трансформатора.

Наиболее распространенный вентиль в маломощных устройствах - полупроводниковый диод.

К выходным параметрам выпрямителя относятся: номинальное среднее выпрямленное напряжение  $U_0$ ; номинальный средний выпрямленный ток  $I_0$ ; коэффициент пульсации выпрямленного напряжения  $k_{\text{п}01}$ ; частота пульсации выпрямленного напряжения  $f_{\text{п}}$ ; внутреннее сопротивление выпрямителя  $r_0$ .

Коэффициентом пульсации  $k_{\text{п}01}$  называется отношение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения  $U_{01}$  к среднему значению выпрямленного напряжения  $U_0$ .

Диоды в выпрямителях характеризуются средним значением прямого тока  $I_{\text{пр сп}}$ ; действующим значением тока  $I_{\text{пр}}$ ; амплитудой тока  $I_{\text{пр max}}$ ; амплитудой обратного напряжения  $U_{\text{обр max}}$ ; средней мощностью  $P_{\text{пр сп}}$ .

Для трансформаторов, работающих в выпрямителях, определяются действующие значения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  и токов  $I_1$ ,  $I_2$  первичной и вторичной обмоток; мощности первичной и вторичной обмоток  $S_1$ ,  $S_2$ ; габаритная мощность трансформатора  $S_r$ .

В выпрямителях для питания аппаратуры от однофазной сети переменного тока применяются однополупериодная схема выпрямления, двухполупериодная схема выпрямления с выводом средней точки, мостовая схема.

Однофазный выпрямитель по мостовой схеме рис. 5. среди прочих вариантов двухполупериодных выпрямителей обладает лучшими технико-экономическими показателями. Применяется в основном с емкостным, Г-образным и П-образным RC и LC фильтрами. Достоинства такого выпрямителя - повышенная частота пульсации, относительно небольшое обратное напряжение, хорошее использование трансформатора, возможность работы от сети переменного тока без трансформатора. К недостаткам выпрямителя относятся повышенное падение напряжения в диодном комплекте, невозможность установки однотипных полупроводниковых вентилей на одном радиаторе без изолирующих прокладок.

Пример расчета выпрямителя приведен в [6].

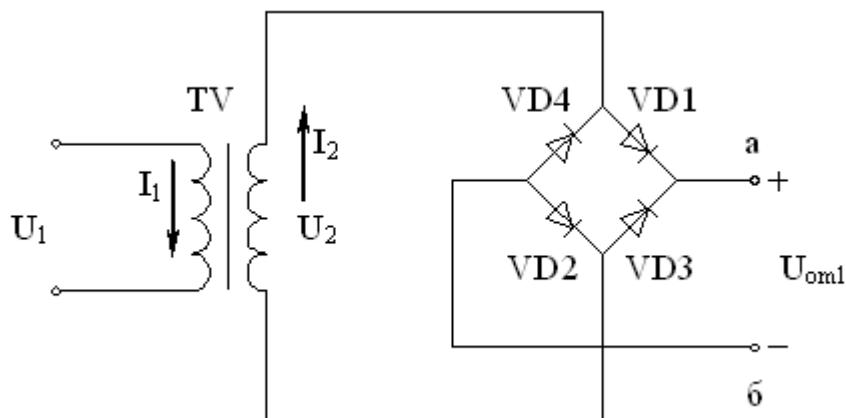


Рис. 5. Схема однофазного выпрямителя

### 5.8. Разработка конструкции электромеханической системы

**Конструктивное исполнение магнитопровода.** При конструкторской проработке и назначении технологии изготовления деталей магнитопровода следует по возможности строго выдерживать следующие требования: рабочие воздушные зазоры в собранном электромагните должны быть возможно ближе к расчетным, а паразитные - возможно меньшими; магнитные характеристики материалов должны быть близкими к расчетным; шихтованные детали магнитопроводов не должны иметь заусенцев во избежание замыкания соседних пластин.

Детали магнитопровода изготавливают из прутков, полос, листов или отливают. При этом в основном используют обработку на металлорежущих станках и холодную штамповку. После механической обработки детали магнитопровода должны подвергаться термической обработке - отжигу, который необходим для восстановления магнитных свойств, нарушенных в процессе изготовления деталей.

**Конструктивное исполнение катушек.** В зависимости от конструктивного исполнения различают каркасные и бескаркасные. Каркасные катушки могут собираться на металлических или изоляционных каркасах. Металлические каркасы обычно выполняют в виде латунной или

стальной трубы, на краях которой устанавливаются металлические шайбы, укрепляемые либо развальцовкой трубы либо пайкой. Такие катушки отличаются хорошим теплоотводом, однако требуют надежной изоляции обмотки от каркаса, что делает их недостаточно технологичными. Каркасы из изоляционных материалов могут быть прессованными или сборными. Прессованные каркасы наиболее просты, технологичны и

обладают хорошими изоляционными свойствами. Сборные каркасы более сложны и выполняются kleеными.

Бескаркасные катушки по сравнению с каркасными значительно проще в производстве, поскольку не требуют каркаса, имеют лучший теплоотвод и изоляционные свойства, но допуски на их размеры больше, их неудобно крепить на сердечнике.

Обмотки бескаркасных катушек, а также каркасных в случае металлических каркасов изолируются от сердечника или каркаса пленкой из фторопластика, стеклотканью, триацетатной пленкой и т.д. Снаружи обмотки защищаются обычно кабельной бумагой, шелковой или стеклянной лакотканью, лакированной бумагой.

Низковольтные обмотки выполняются лишь с наружной изоляцией, а в высоковольтных отдельные слои изолируются друг от друга. Толщину и количество слоев изоляции выбирают в зависимости от величины рабочего напряжения обмотки.

**Обмоточные провода.** Для электромагнитов приборных устройств обычно применяются медные обмоточные провода круглого сечения. Рекомендуется избегать проводов очень малого диаметра (менее 0.1 мм), так как из-за малого сечения такой провод будет иметь низкую прочность и рваться при намотке.

В зависимости от выполнения изоляции различают обмоточные провода трех видов: с эмалевой изоляцией (ПЭВ, ПЭЛ, ПЭТВ), с волокнистой изоляцией (ПЭЛШО) и комбинированной изоляцией.

Основные характеристики обмоточных проводов приведены в [7].

**Квалитеты точности, допуски, посадки, классы шероховатости.** В электромагнитах целесообразно использовать только часть квалитетов точности допусков и посадок. Их применение можно проиллюстрировать таблицей, приведенной в приложении 3[4].

Наиболее распространенные в электромагнитах допусками и посадками сопрягаемых деталей являются допуски и посадки, выполненные по 8...13-му квалитетам точности. По 8, 9-му квалитетам точности рекомендуется изготавливать сопрягаемые детали, у которых зазоры в месте должны выдерживаться небольшими. В некоторых случаях применяются 6, 7-й квалитеты. Сопряжение деталей, не требующее точности, следует выполнять по 11...13-му квалитетам точности. Применение посадок с большими допусками особенно большое значение имеет в условиях массового производства.

Допуски и посадки деталей электромагнитов, сопрягаемых с шарико- и роликоподшипниками, выполняются в основном по 7-му квалитету точности. Резьбовые крепежные соединения, к которым не предъявляют особых требований, обычно выполняются по 6...8-му квалитету точности.

Свободные размеры механически обрабатываемых деталей выполняются, как правило, по 14-му и 15-му, реже по 16-му квалитетам точности.

Допуски и посадки сопрягаемых плоских деталей принимаются такими же, как и для цилиндрических деталей при условии, что поверхность сопрягаемой площади не превышает величину  $5r^2$  ( $r$  - сопрягаемый размер). Если же сопрягаемые плоскости велики, то необходимо принимать посадки более свободные для компенсации неизбежных температурных и прочих деформаций плоскостей.

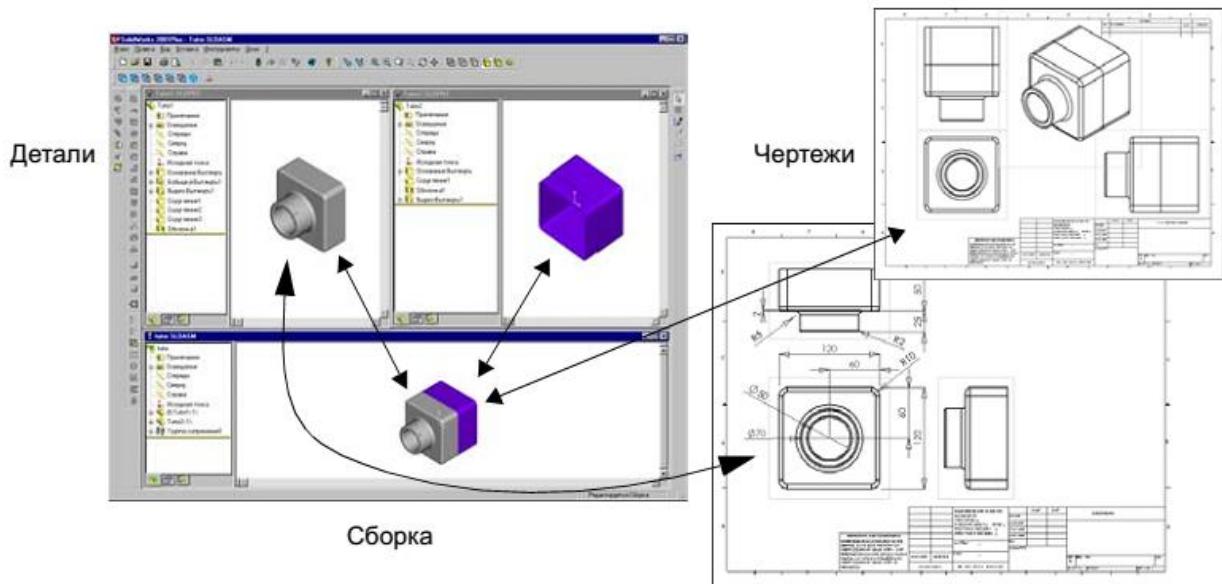
При выборе класса шероховатости поверхности деталей электромагнита следует пользоваться рекомендациями, характерными для общего приборостроения. Для свободных несопряженных обработанных поверхностей можно ограничиться 4-м и даже 3-м классом шероховатости. Для подвижных сопряжений с линейными перемещениями при невысоких скоростях и нагрузке рекомендуется 5-й класс шероховатости. Для деталей, вращающихся при небольших нагрузках и скоростях, следует применять 7-й класс шероховатости, а при более тяжелых условиях работы - 8-й класс.

## 5.9. Теоретические сведения по созданию 3D-моделей и чертежей на основе таких моделей в SolidWorks.

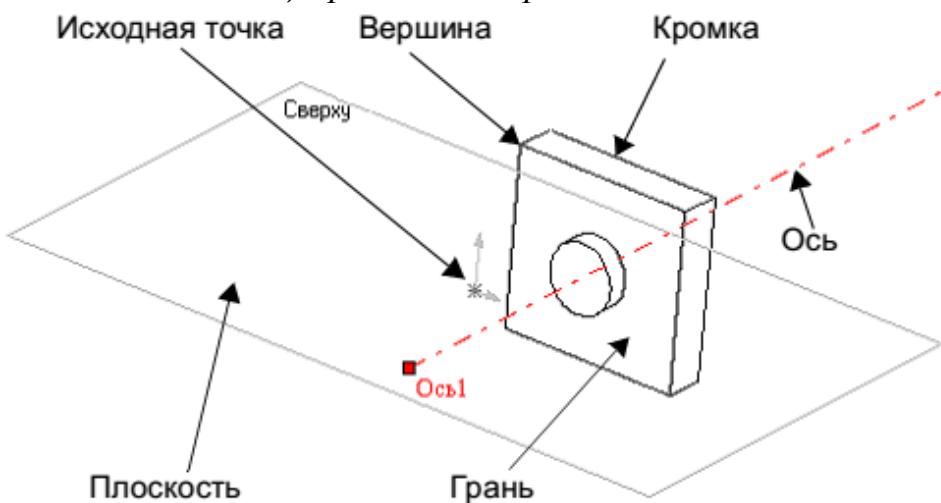
SolidWorks – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Это легкое в освоении средство позволяет инженерам-проектировщикам быстро отображать свои идеи в эскизе, экспериментировать с элементами и размерами, а также создавать модели и подробные чертежи.

С помощью SolidWorks можно создавать **трехмерные модели**, а не только двухмерные чертежи. Эти трехмерные детали можно использовать для создания двухмерных чертежей и трехмерных сборок. SolidWorks – это система, работающая по принципу задания размеров. Можно задать размеры и геометрические взаимосвязи между элементами. При изменении размеров изменяются размер и форма детали, но сохраняется общий замысел проекта.

Трехмерная модель SolidWorks состоит из **деталей, сборок и чертежей**. Детали, сборки и чертежи отображают одну и ту же модель в различных документах. Любые изменения, которые вносятся в модель в одном документе, распространяются на другие документы, содержащие эту модель.

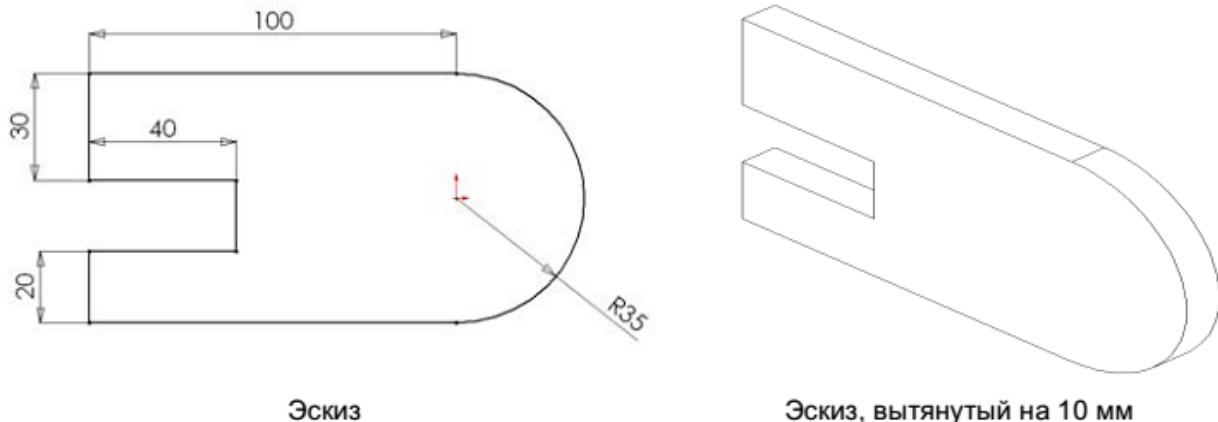


### Общепринятые термины в моделях



Для построения большинства элементов используются **эскиз**. Для создания элементов эскизы могут быть вытянуты, повернуты, рассечены сложным образом или смещены по контуру. Эскиз является важнейшим понятием SolidWorks и представляет собой основу создаваемой твердотельной модели детали. Эскиз является двумерным наброском, содержащим вначале лишь примерные размеры и форму, предваряющие создание трехмерной детали. Важность эскиза в конструировании детали (и сборки в целом) состоит в том, что он содержит не только геометрию детали, сколько принцип ее построения. Размеры, определяющие форму детали, в любой момент могут быть изменены, но при этом взаимосвязи

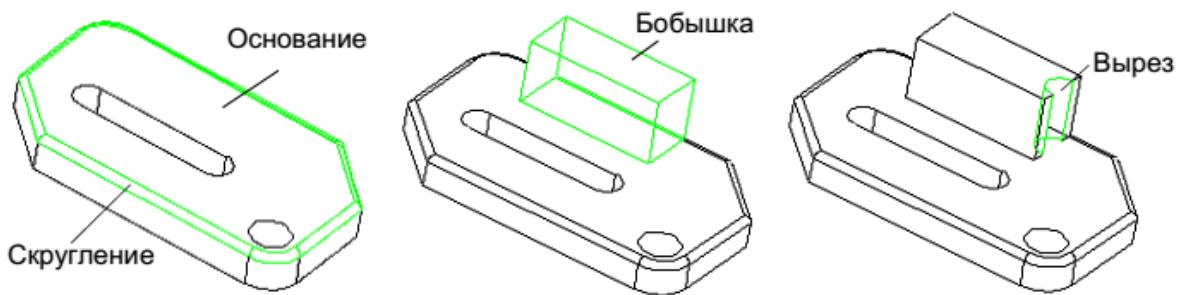
(касательность, параллельность, совпадение, концентричность и др.) сохраняются. Изменение размеров приводит к изменению формы – в этом существе параметрического метода построения моделей. В случае если внесенные изменения порождают ошибки, всегда существует возможность отката (т.е. возврата на некоторый ранний этап создания детали). Таким образом, эскиз – это идея построения, которая, впрочем, может уточняться в процессе разработки.



**Полная определенность эскиза** связана с замкнутостью размерной цепи. Это значит, что для объектов эскиза должны быть установлены размеры, единственным образом определяющие форму детали. Для разрабатываемой детали полностью определяющими ее **размерами** являются следующие: расстояние между центрами двух окружностей и их радиусы. Устанавливаем эти размеры, выбрав инструмент Размер. Черный цвет линий эскиза свидетельствует о его полной определенности. Добавление других размеров сделает эскиз переопределенным, и будет сопровождаться сообщением об ошибке (при этом линии объекты эскиза окрашиваются красным цветом). Переопределенность эскиза говорит о неоднозначности размерной цепи и существовании зависимых размеров.

Отметим, что недоопределенность эскиза ошибкой не является. Еще раз напомним, что эскиз – это принципы построения детали. Присущая SolidWorks параметризация позволяет в любой момент или установить размеры, или изменить установленные ранее.

Для построения деталей используются различные **элементы**. Элементами могут быть формы (бобышки, вырезы, отверстия) и операции (скругления, фаски, оболочки и т.д.), которые комбинируются для построения деталей.



Средства автоматизации проектирования, включающие возможности объемного параметрического моделирования и создания конструкторской документации (КД), все активнее входят в нашу повседневную жизнь. Когда-то, на заре автоматизации, считалось большим достижением начертить чертеж на компьютере (в 2D-системе — на электронном кульмане) — это обеспечивало сокращение сроков внесения изменений в документацию. Однако сейчас необходимость вычерчивания проекций и сечений в CAD-системе можно отнести, скорее, к ее недостаткам, поскольку прогресс шагнул далеко вперед и чертежи теперь создаются на основе 3D-моделей, автоматически обмериваются, масштабируются по листу и обновляются при изменении исходной модели.

### *Чертежные виды*

**Временные оси.** Очень часто линии сечения должны проходить точно по центру отверстия или тел вращения. Нет необходимости создавать дополнительную геометрию. Просто привязывайтесь при построении линии сечения к временным осям (осям отверстий и других элементов вращения). Для этого необходимо включить их. В меню *Вид* выберите *Временные оси* и отобразите их.

**Скрытие кромок.** При отображении ступенчатых разрезов по ГОСТу кромки, лежащие на границе секущих плоскостей, должны быть скрыты. Для этого, удерживая нажатой клавишу *Ctrl*, выберите кромки, которые нужно скрыть, затем нажмите правую клавишу мыши и в контекстном меню выберите *Скрыть кромку*.

**Создание вида, перпендикулярного кромке.** Для создания вида, перпендикулярного кромке, выберите кромку как показано на рис. 1 а и нажмите *Вспомогательный вид* панели инструментов *Чертеж*. Вид, перпендикулярный кромке, стрелка и метка вида «Б» создаются автоматически. Если при этом удерживать нажатой клавишу *Ctrl*, то новый вид можно сразу же разместить в произвольном месте чертежа. Для того чтобы повернуть вид «Б», выберите на нем кромку цилиндрической бобышки (рис. 1б), затем выберите *Инструменты => Расстановка видов чертежа => По вертикали*. Вид повернется (рис. 1 в).

**Тонкие линии, ограничивающие вырывы.** Кромки, ограничивающие вырывы, в соответствии с ГОСТом должны быть отображены тонкими линиями. Удерживая нажатой клавишу *Ctrl*, выберите цепочку кромок, нажмите кнопку *Толщина линии* инструментов *Формат линии* и сделайте линии тонкими (*S/2...S/3*).

**Касательные кромки.** Для отображения касательных кромок (кромок скруглений) тонкими линиями по ГОСТу выделите вид, нажмите правую клавишу мыши и выберите *Касательная кромка => Линии перехода по стандарту*.

**Освобождение вида, выровненного относительно родительского.** При создании нового вида удерживайте нажатой клавишу *Ctrl*. Если вид уже создан, выделите его лист в дереве, нажмите правую клавишу мыши и выберите *Выровнять => Освободить перемещение видов*.

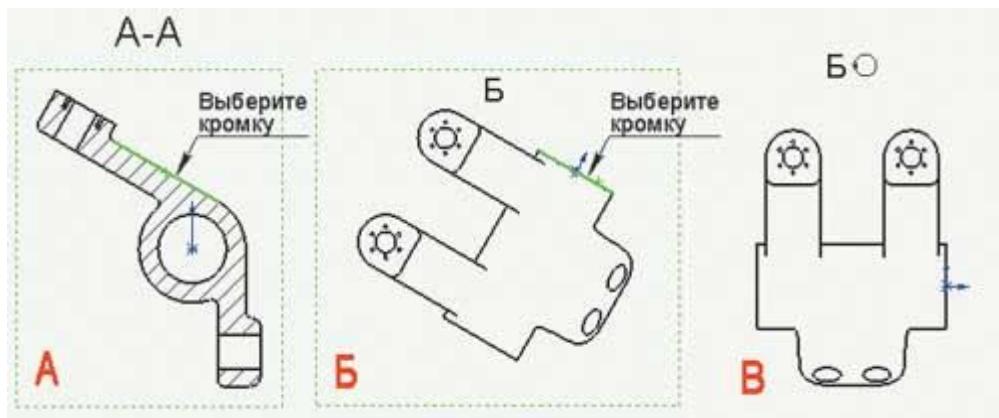


Рис. 1. Создание повернутого вида: а — выбор кромки на исходном виде; б — подготовка созданного вида к выравниванию по вертикали; в — результат операции

**Слои.** С помощью слоев можно управлять видимостью объектов, цветом, типом линий и толщиной линий, созданных на чертеже. Слои применяются для скрытия импортированных, но неиспользуемых размеров, размеров, используемых для параметрической связи, а также вспомогательной геометрии. Кроме того, цвет слоя наследуют компоненты сборки, перенесенные на этот слой. Для изменения типа и толщины линии на чертеже отдельных компонентов сборки выделите в дереве компонент, нажмите правую клавишу мыши и выберите *Толщина линии компонента*. Снимите флажок с пункта *Использовать параметры по умолчанию*, а затем назначьте необходимые параметры.

### Размеры

SolidWorks – система параметрического моделирования, поэтому все модели и чертежи в ней управляются размерами. Существует два типа размеров:

- управляющие размеры, или размеры, по которым была построена модель. Значения управляющих размеров можно изменять как находясь в документе модели, так и непосредственно в чертеже. Для отображения управляющих размеров на чертеже выберите *Вставка=>Элементы модели*;

- справочные, или управляемые, размеры. Значения справочных размеров зависят от управляющих размеров и пересчитываются автоматически. Для добавления справочных, или управляемых, размеров в чертеж нажмите кнопку *Автоматическое нанесение размеров* панели инструментов *Размеры и взаимосвязи* и проставьте необходимые размеры.

По умолчанию после добавления в чертеж все размеры отображаются в соответствии с настройками, заданными в шаблоне документа. Отображение управляющих размеров модели на чертеже имеет ряд преимуществ. Изменяя в чертеже значение управляющего размера, можно управлять моделью. Если в чертеже назначить допуски и посадки, то они будут переданы в модель. Ряд утилит для пересчета допусков и расчета размерных цепочек берут именно из модели. При отображении размеров модели можно указывать, в каких видах каких элементов какие типы размеров и примечаний отображать.

**Отображение размера.** На стадии 3D-моделирования можно указать, что размер не будет отображен на чертеже. Для этого измените выбранную по умолчанию настройку *Пометить размер для импорта в чертеж* окна ввода значения (рис. 2).

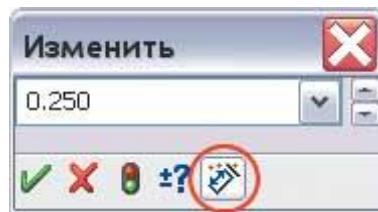


Рис. 2. Пометить размер для импорта в чертеж

**Размер на выносной полке.** Начинающие пользователи часто спрашивают, как оформить размер на выносной полке, например для градусных измерений малых углов. Для этого выделите размер, нажмите правую клавишу мыши и выберите *Параметры отображения=>Сместить текст* (рис. 3).

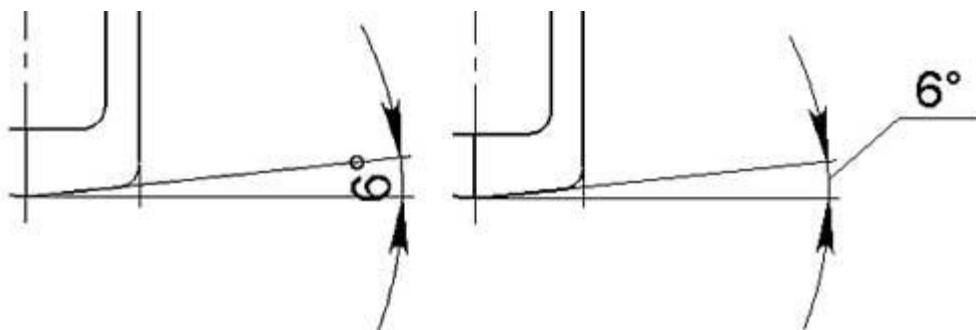


Рис. 3. Размер на выносной полке

**Отображение точек виртуального пересечения и привязка к ним выносных линий (линий удлинения) размеров.** На поле чертежа также могут быть показаны точки и линии виртуального пересечения кромок модели. Для настройки их отображения в текущем документе выберите *Инструменты=>Параметры* и в открывшемся диалоговом окне перейдите на вкладку *Свойства документа*, где проверьте, чтобы в разделе *Виртуальная резкость* была нажата кнопка *Выносная линия*(точки виртуального пересечения будут при этом отображаться как точки пересечения выносных линий).

**Отображение точки пересечения кромок.** Для того чтобы отобразить точку виртуального пересечения кромок модели, выберите при нажатой клавише *Ctrl* необходимые (скрещивающиеся) кромки и нажмите кнопку *Точечный* панели инструментов Эскиз. На чертеже появится изображение точки виртуального пересечения в соответствии с заданными настройками. Точку можно выбирать, осуществлять привязку к ней выносных линий размеров и т.д.

**Простановка размеров по точкам виртуальной резкости.** Размер «60» на чертежном виде (рис. 4) задан до точек виртуального пересечения кромок модели.

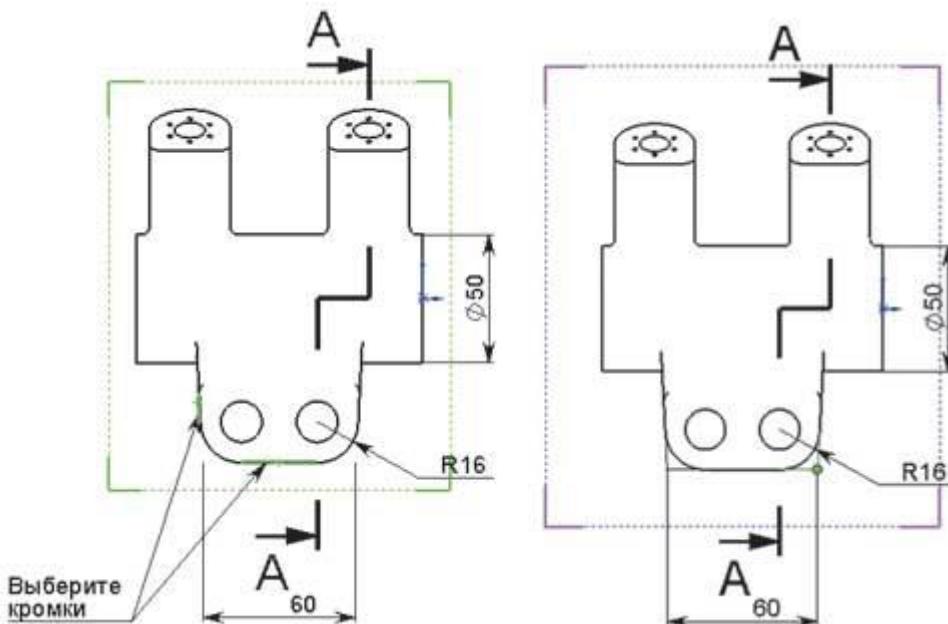


Рис. 4. Работа с точками виртуальной резкости

**Простановка допусков и посадок.** В SolidWorks имеется встроенная библиотека допусков и посадок по ГОСТу. При назначении размеру типов допусков *Посадка*, *Посадка с допуском* или *Только допуск* и выборе обозначения поля допуска из списка стандартных значений изменение размера (переход его в другой размерный интервал в пределах вышеуказанного поля допуска) повлечет за собой изменение предельных отклонений в соответствии с используемым стандартом. Иными словами, каждому значению размера соответствует табулированное значение допуска (рис. 5).

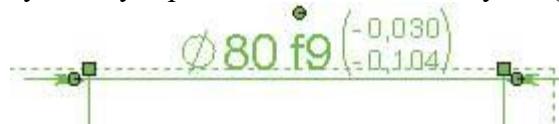


Рис. 5. Обозначение поля допуска

В силу вышесказанного, назначение размерам типов допусков: *Посадка*, *Посадка с допуском* или *Только допуск* и использование списка стандартных значений полей допусков являются более предпочтительными, так как помогают предотвратить возможные ошибки в случае изменения модели. При назначении допусков «вручную» или с помощью команды *Заметка* конструктор должен будет сам контролировать изменение предельных отклонений при изменении размеров модели.

**Создание обозначения допуска в случае равенства нулю одного из предельных отклонений.** Зададим для размера значение допуска в соответствии с полем допуска «Н8», при этом отобразим только верхнее, не равное «0» предельное отклонение. Выделите размер в графической области. В окне *РазмерМенеджера* свойств нажмите кнопку *Дополнительные свойства* и в открывшемся диалоговом окне *Свойства размера* нажмите кнопку *Допуск*. Появится диалоговое окно *Допуск размера* (рис. 8). В поле *Тип допуска* выберите *Посадка*; в поле *Посадка отверстия* выберите требуемое обозначение поля допуска «Н8». В полях *Максимальная* и *Минимальная вариация* при этом отобразятся стандартные значения «+0,046» и «0» верхнего и нижнего предельных отклонений, соответствующие данному полю допуска. Введите значение верхнего поля допуска – «+0,046». В разделе *Шрифт допуска* отключите параметр *Использовать шрифт размера* и задайте значение коэффициента «0,6» (или «0,5») для высоты шрифта обозначения поля допуска. В разделе *Отобразить допуск* нажмите кнопку *Группа без линии*. Нажмите *OK* и

закройте диалоговые окна. Это способ задания допуска «вручную». Результат операции показан на рис. 6.

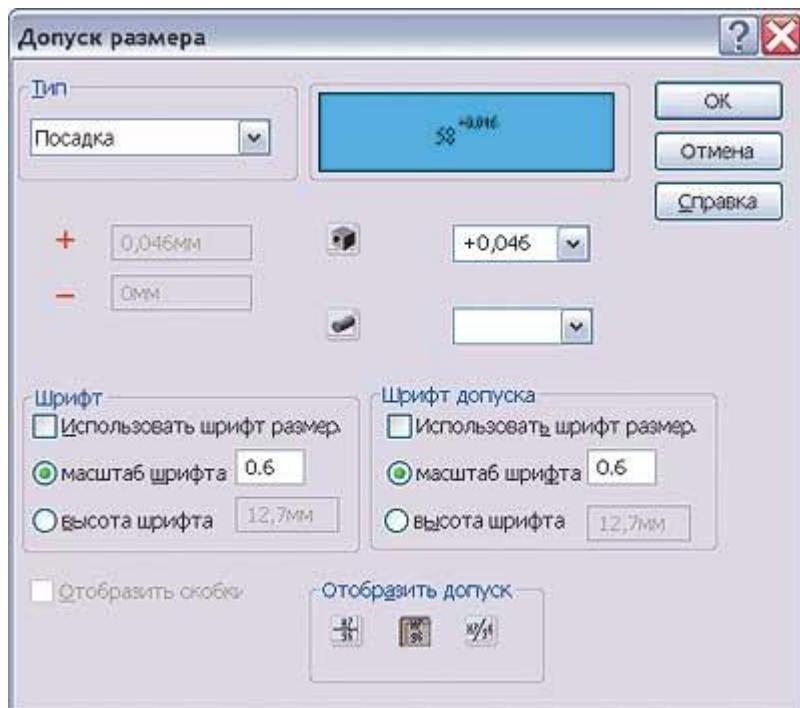


Рис. 6. Настройка параметров допуска размера

**Создание укороченных диаметров и радиусов.** В документах чертежей можно создавать укороченные диаметры и радиусы, задавая их размеры. При указании такого размера отображается зигзагообразная линия (рис. 7).

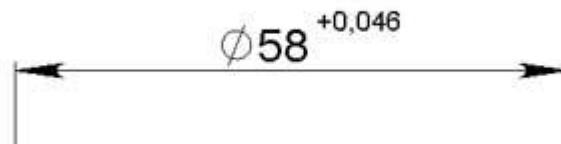


Рис. 7. Результат назначения допуска с нулевым предельным отклонением

### Примечания

Важным средством оформления чертежей являются примечания, функциональный набор которых собран на одноименной панели инструментов. К примечаниям относятся: заметка, отклонение формы, шероховатость, позиция, база, обозначение сварного шва, блок, штриховка, указатель центра, осевая линия, условное изображение резьбы и др.

Одним из наиболее часто используемых инструментов при оформлении чертежей является **Заметка**, которая может отображаться с выносной, указывающей на элемент (грань, кромку или вершину) документа, и содержать простой текст, символы, параметрический текст или гиперссылки. Выноска может быть прямой, изогнутой или с изогнутыми указателями. При оформлении технических требований в заметку можно добавить другие примечания, например символы шероховатости.

**Шероховатость на выносной полке.** При вставке примечания в заметку можно либо выбрать примечание, уже существующее в чертеже (если щелкнуть по нему, то сохранится ассоциативная связь), либо создать новое примечание в окне **Заметка Менеджера свойств**. С помощью этого способа можно оформить отображение

шероховатости по ГОСТу в случае, когда шероховатость располагается на выносной полке (рис. 8).

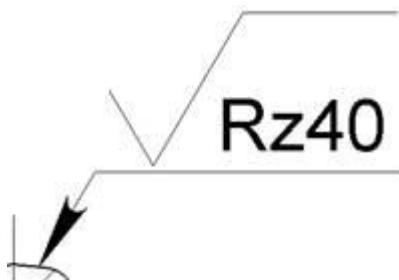


Рис. 8. Шероховатость на выносной полке

**Отображение в примечании значения размера, связанного с параметром модели.** Для этого, находясь в режиме редактирования заметки, щелкните по размеру на чертеже. В заметку добавится параметрический текст вида  $R''D1@Скругление2@Шкив-Часть детали-1-1@Чертежный вид1$ . После выхода из режима редактирования заметки отобразится значение размера.

**Простановка размеров с множественными указателями.** Чтобы добавить несколько выносных линий (рис. 9), во время перетаскивания заметки и перед ее размещением нажмите клавишу *Ctrl*. Перемещение заметки остановится, и появится вторая выноска. Не отпуская клавишу *Ctrl*, нажмите указатель мыши там, где необходимо разместить выноску. Нажмите нужное число раз для размещения дополнительных выносок. Отпустите клавишу *Ctrl* и нажмите указатель в том месте, где необходимо разместить заметку. Затем, находясь в режиме редактирования заметки, наберите *R* и выберите в графической области существующий размер *R0,5*. Выйдите из редактирования заметки. После этого скройте существующий размер с единичной выноской.

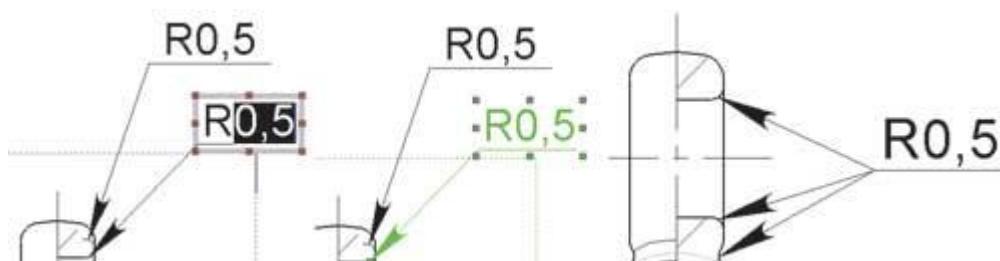


Рис. 9. Простановка размеров с множественными указателями

Для часто используемых элементов чертежа можно создавать, сохранять, редактировать и вставлять блоки, например стандартные заметки, блоки заголовков, расположений меток и т.д. Блоки могут содержать текст и любые объекты эскиза, позиции, импортированные объекты и текст, а также штриховку. Блоки можно прикреплять к геометрии или к чертежным видам, а также вставлять их в основные надписи. Если на вашем предприятии используются специфические условные знаки, вы всегда можете создать блоки, содержащие нужные графические и текстовые элементы.

**Создание знака неуказанной шероховатости.** Рассмотрим применение блоков на примере создания знака неуказанной шероховатости (рис. 10). Откройте редактор блоков с помощью *Инструменты => Блок => Создать*. Начертите тонкими линиями с помощью дуг и отрезков внутренний значок в соответствии с чертежом. Затем начертите утолщенными линиями с помощью отрезков внешний значок в соответствии с чертежом. Задайте для точки, помеченной зеленым цветом (см. рис. 10), координаты  $[-10, -10]$  и зафиксируйте ее. Дополните значение параметра обработки заметкой *Rz40*. Создайте два

слоя: геометрия шероховатости и размеры шероховатости. Размеры поместите на слой «размеры шероховатости» и скройте его. Геометрию и значение Rz40 поместите на слой «геометрия шероховатости». Сохраните блок. Он автоматически попадет в папку *Блоки* в дереве конструирования. Добавьте его на поле чертежа. Сохраните блок в *Библиотеке проектирования* для дальнейшего использования.

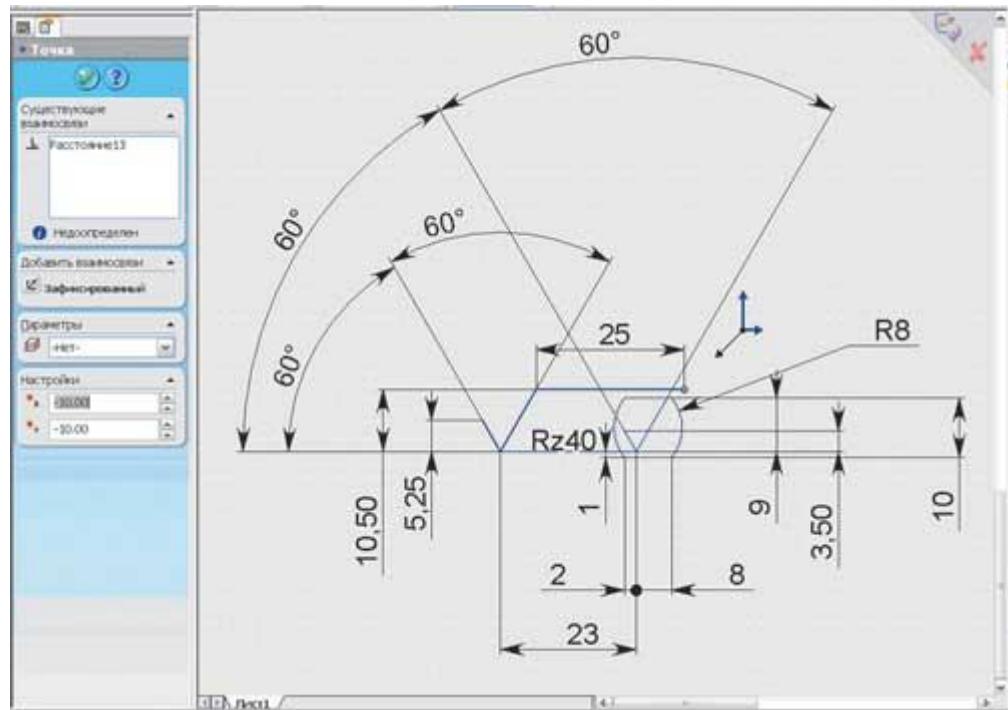


Рис. 10. Создание знака неуказанной шероховатости

## 6. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по проектированию систем автоматического управления: Учеб. пособие для студ. спец. "Автоматика и телемеханика"./ под ред. Бессекерского В.А. - М.: Высшая школа, 1983. - 236 с.
2. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: Справочник. - М.: Радио и связь, 1991. - 352 с.
3. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - Л.: Энергоатомиздат, 1988. - том 3, 728 с.
4. Элементы приборных устройств: Курсовое проектирование. Учебное пособие для вузов. В 2-х частях / Под ред О.Ф. Тищенко. - М.: Высшая школа, 1978. - 328 с, 232 с.
5. Илюхина Н.С., Елецкая Г.П., Панков А.П. Электромеханические системы.: Учебное пособие. - Тула, 1990. - 104 с.
6. Справочная книга радиолюбителя-конструктора / под ред. Н.И. Чистякова. - М.: Радио и связь, 1990. - 624 с.
7. Витенберг М.И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. - М.: Энергия, 1966. - 724 с.
8. Елецкая Г.П., Илюхина, А. П. Панков Электромеханические устройства мехатронных систем: учеб. пособие / Г. П. Елецкая, Н. С. Илюхина, А. П. Панков ; ТулГУ .— Тула : Изд-во ТулГУ, 2018 .— 224 с.

**Приложение 1**

Министерство науки и высшего образования РФ

Государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра "Системы автоматического управления"

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Пояснительная записка  
к курсовой работе

по дисциплине «ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СУДА»

"

Студент гр. 131791  
Руководитель: проф., к. т. н.

Я.Э. Авдеев  
Н.С. Илюхина

Тула – 2022

## Приложение 2

Министерство науки и высшего образования РФ

Государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра "Системы автоматического управления"

**ЗАДАНИЕ**  
по курсовой работе  
по дисциплине "ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СУЛА "

студенту \_\_\_\_\_  
индекс группы \_\_\_\_\_ Фамилия, инициалы \_\_\_\_\_

**Исходные данные**

1. Напряжение источника питания системы:  $220 \pm 10\%$  В, 50 Гц
2. Напряжение питания электромагнита: 27 В
3. Требуемые характеристики системы:
  - а) ход якоря - 0.007 м
  - б) начальное усилие без учета действия пружины - 100 Н
  - в) начальное поджатие пружины - 10 Н
  - г) время срабатывания - 0.09 с
  - д) время отпускания - 0.06 с
  - ж) режим работы - длительный
  - з) температура перегрева –  $60^\circ$  С
4. Условия эксплуатации:
  - а) температура окружающей среды –  $20^\circ$  С
  - б) требуемый ресурс -  $1 \cdot 10^6$  циклов

**Вопросы, подлежащие разработке**

1. Выбор типа конструкции электромагнита
2. Расчет размеров магнитопровода, параметров обмотки и составление эскиза магнитной цепи
3. Проверочный расчет электромагнита
4. Выбор схемы и расчет усилителя мощности
5. Расчет характеристик системы
6. Расчет источника питания

**Чертежи**

1. Сборочный чертеж исполнительной части системы
2. Деталировки (4-5 основные детали)

## Приложение 3

**Общие рекомендации по выбору полей допусков  
для типовых соединений деталей**

Характер соединения	Рекомендуемые посадки ( система отверстия )
Медленные перемещения и повороты деталей для установки, регулировки, центрирования и т.п.	С зазором
точные	H7 H7 H8 H9 H8 h6 g6 h8 h9 h7
грубые	H11 H12 h11 h12
Вращение валов в опорах скольжения со смазкой; соединения, в которых требуется относительно большой зазор	H7 H7 H8 H8 f7 e7 e8 d9 H9 H11 H11 H11 H12 H7 d9 c11 d11 b11 d12 e8
Неподвижные соединения с применением фиксирующих устройств, разбираемые для осмотра, ремонта, замены деталей и т.п.	Переходные H6 H6 H6 H6 H7 H7 k5 js5 m5 n5 js6 k6 H7 H7 m6 n6
Соединения для обеспечения хорошего центрирования деталей	H8 H8 H8 H8 js7 k7 m7 n7
Неподвижные соединения, не подлежащие разъему	С натягами H6 H6 H7 H7 H7 H8 H7 p5 r5 p6 r6 s6 u7 u8 s7

## Приложение 4

Проволока из красной меди с эмалевой изоляцией марок ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭТВ

d мм	d <sub>I</sub> мм	w <sub>0</sub>	C <sub>o</sub>	k <sub>3</sub>	r ом/м	g г/м	G <sub>1</sub> г/ом
0,02	0,033	690	120,05	0,218	55,7		
0,03	0,040	500	38,80	0,352	24,76	0,012	0,00049
0,04	0,050	327	14,30	0,410	13,93	0,015	0,00108
0,05	0,065	200	5,57	0,390	8,92	0,019	,0,00209
0,06	0,075	145	2,50	0,420	6,19	0,027	0,00429
0,07	0,085	122	1,74	0,468	4,55	0,036	0,0079
0,08	0,095	99	1,08	0,497	3,48	0,047	0,0134
0,09	0,105	82,2	0,710	0,522	2,75	0,059	0,0214
0,10	0,120	69,1.	0,484	0,543	2,23	0,073	0,0327
0,11	0,130	59,0	0,342	0,561	1,84	0,088	0,0478
0,12	0,140	51,0	0,248	0,576	1,55	0,104	0,0675
0,13	0,150	44,4	0,185	0,589	1,32	0,122	0,093
0,14	0,160	39,1	0,140	0,601	1,14	0,141	0,125
0,15	0,170	34,5	0,108	0,611	0,99	0,162	0,1638
0,16	0,180	30,7	0,0839	0,617	0,87	0,184	0,212
0,17	0,190	27,4	0,0668	0,621	0,772	0,208	0,269
0,18	0,200	24,5	0,0531	0,624	0,688	0,233	0,338
0,19	0,210	22,1	0,0430	0,626	0,616	0,259	0,419
0,20	0,225	20,0'	0,0350	0,628	0,557	0,287	0,519
0,21	0,235	18,2	0,0290	0,630	0,506	0,316	0,629
0,23	0,255	15,25	0,0202	0,634	0,421	0,378	0,901
0,25	0,275	12,96	0,0145	0,636	0,357	0,446	1,26
0,27	0,305	10,76	0,01033	0,639	0,310	0,522	1,72
0,29	0,325	9,46	0,00787	0,642	0,265	0,601	2,28
0,31	0,350	8,53	0,00623	0,644	0,236	0,689	2,98
0,33	0,370	7,56	0,00486	0,646	0,205	0,780	3,84
0,35	0,390	6,74	0,00386	0,648	0,182	0,876	4,85
0,38	6,420	5,73	0,00278	0,650	0,154	1,03	6,7
0,41	0,450	4,95	0,00206	0,653	0,132	1,202	9,4
0,44	0,485	4,25	0,00154	0,655	0,115	1,382	12,1
0,47	0,515	3,77	0,00120	0,657	0,101	1,574	15,7
0,49	0,535	3,49	0,001015	0,658	0,0926	1,713	18,5
0,51	0,56	3,23	0,000871	0,660	0,086	1,856	21,8
0,55	0,60	2,79	0,000647	0,663	0,074	2,15	26,3
0,59	0,64	2,44	0,000491	0,666	0,0642	2,47	38,5
0,84	0,69	2,08	0,000356	0,670	0,0544	2,91	53,5
0,09	0,74	1,80	0,000265	0,673	0,0470	3,42	72,9
0,74	0,80	1,57	0,000201	0,676	0,0407	3,89	95,6
0,80	0,86	1,35	0,000148	0,680	0,0348	4,49	129
0,93	0,99	1,02	0,0000825	0,687	0,0258	6,12	237
1,00	1,07	0,881	0,0000618	0,692	0,0223	7,07	314

	Марки ПЭВ-1					Марки ПЭВ-2					Марки ПЭТВ			
<i>d</i> <i>мм</i>	<i>d<sub>I</sub></i> ,	<b>w<sub>0</sub></b>	<b>Co</b>	k <sub>3</sub>	<i>d<sub>I</sub></i> ,	<b>w<sub>0</sub></b>	<b>Co</b>	k <sub>3</sub>	<i>d<sub>I</sub></i> ,	<b>w<sub>0</sub></b>	<b>Co</b>	k <sub>3</sub>		
0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	0,045	400	30,8	0,278		
0,04	—	—	—	—	—	—	—	—	0,055	268	11,9	0,342		
0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	0,065	197	5,54	0,390		
0,06	0,085	113	2,200	0,319	0,09	100,5	1,955	0,284	0,085	120	2,32	0,336		
0,07	0,095	97,6	1,392	0,376	0,10	88,2	1,173	0,339	0,105	82	1,142	0,307		
0,08	0,105	81,0	0,887	0,408	0,11	73,3	0,803	0,370	0,115	67,4	0,738	0,340		
0,09	0,115	68,6	0,593	0,436	0,12	62,9	0,543	0,399	0,125	57,9	0,501	0,369		
0,10	0,125	63,8	0,447	0,501	0,13	58,9	0,412	0,462	0,14	50,8	0,356	0,398		
0,11	0,135	54,9	0,317	0,520	—	—	—	—	—	—	—	—		
0,12	0,145	47,6	0,231	0,538	0,15	44,4	0,308	0,501	0,16	39,0	0,1895	0,442		
0,14	0,165	36,7	0,131	0,565	0,17	34,5	0,1232	0,529	—	—	—	—		
0,15	0,18	30,9	0,096	0,545	0,19	27,7	0,086	0,490	0,19	27,7	0,0864	0,489		
0,16	0,19	27,7	0,0759	0,571	0,20	25,0	0,0684	0,502	0,20	25,0	0,0684	0,502		
0,18	0,21	22,7	0,0491	0,578	0,22	20,65	0,0446	0,526	0,22	20,6	0,0446	0,526		
0,20	0,23	18,9	0,0331	0,594	0,24	17,39	0,0304	0,546	0,24	17,38	0,0304	0,546		
0,23	0,27	13,7	0,0182	0,571	0,28	12,76	0,01688	0,530	0,28	12,75	0,0168	0,530		
0,25	0,29	11,9	0,0133	0,584	0,30	11,11	0,01246	0,545	0,30	11,1	0,0124	0,545		
0,27	0,31	10,4	0,00999	0,597	0,32	9,75	0,00935	0,557	0,33	9,20	0,0088	0,524		
0,29	0,33	9,2	0,00766	0,607	0,34	8,65	0,00721	0,573	—	—	—	—		
0,31	0,35	8,17	0,00595	0,616	0,36	7,72	0,00562	5,588	0,37	7,32	0	0,550		

		Марки ПЭВ-1					Марки ПЭВ-2					Марки ПЭТВ		
<i>d</i> мм	<i>d<sub>1</sub></i> ,	<b>w<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<i>k<sub>3</sub></i>	<i>d<sub>1</sub></i> ,	<b>w<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<i>k<sub>3</sub></i>	<i>d<sub>1</sub></i> ,	<b>w<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<i>k<sub>3</sub></i>		
0,33	0,37	7,32	0,00470	0,625	0,38	6,93	0,00445	0,593	—	-	—	—	—	—
0,35	0,39	6,57	0,00375	0,632	0,41	5,96	0,0034	0,573	0,41	5,96	0,0034	0,573	—	—
0,38	0,42	5,68	0,00276	0,643	0,44	5,17	0,0025	0,586	0,44	5,17	0,0025	0,586	—	—
0,41	0,45	4,94	0,00205	0,653	0,47	4,53	0,00188	0,597	0,47	4,54	0,0018	0,597	—	—
0,44	0,48	4,34	0,00157	0,660	0,50	4,00	0,00150	0,608	0,51	3,85	0,0013	0,584	—	—
0,47	0,51	3,85	0,00122	0,667	0,53	3,57	0,00113	0,618	0,54	3,44	0,0010	0,596	—	—
0,49	0,53	3,56	0,00103	0,668	0,55	3,31	0,00096	0,623	—	—	—	—	—	—
0,51	0,56	3,19	0,00086	0,653	0,58	2,97	0,0080	0,607	0,58	2,98	0,008	0,607	—	—
0,53	0,58	2,98	0,00074	0,656	0,60	2,78	0,00069	0,613	—	—	—	—	—	—
0,55	0,60	2,78	0,00064	0,659	0,62	2,60	0,00060	0,617	—	—	—	—	—	—
0,59	0,64	2,45	0,00049	0,666	0,66	2,30	0,00046	0,627	—	—	—	—	—	—
0,64	0,69	2,10	0,00035	0,675	0,72	1,93	0,00033	0,620	—	—	—	—	—	—
0,69	0,74	1,83	0,00026	0,681	0,77	1,63	0,00024	0,632	—	—	—	—	—	—
0,74	0,80	1,56	0,00020	0,673	0,83	1,45	0,00018	0,625	—	—	—	—	—	—
0,80	0,86	1,35	0,00014	0,678	0,89	1,26	0,00013	0,636	—	—	—	—	—	—
0,86	0,92	1,18	0,00011	0,687	0,95	1,10	0,00010	0,646	—	—	—	—	—	—
0,93	0,99	1,02	0,00008	0,693	1,02	0,96	0,00007	0,653	—	—	—	—	—	—
1,00	1,08	0,860	0,00006	0,673	1,11	0,812	0,00005	0,638	—	—	—	—	—	—
1,06	1,16	0,744	0,00004	0,678	1,19	0,707	0,00004	0Д45	—	—	—	—	—	—
1,16	1,24	0,652	0,00003	0,687	1,27	0,620	0,00003	0,656	—	—	—	—	—	—
1,25	1,33	0,565	0,00002	0,692	1,36	0,542	0,00002	0,663	—	—	—	—	—	—

Здесь:

*d* – диаметр меди проволоки,

*d<sub>1</sub>* - диаметр проволоки с изоляцией,

*w<sub>0</sub>* – число витков, приходящееся на 1  $\text{мм}^2$  сечения окна катушки,

*k<sub>3</sub>* – коэффициент заполнения,

$c_0 = (4\rho/d^2)w_0 10^{-3}$ .