

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

# КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОБОТОВ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов специальности 15.03.06  
«Мехатроника и робототехника»*



Могилев 2017

УДК 621.01:519.6  
ББК 34.5:22.18  
К 34

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «10» октября 2017 г.,  
протокол № 2

Составители: канд. техн. наук, доц. А. В. Капитонов;  
канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменков

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

В методических рекомендациях изложены требования к объему, содержанию и оформлению курсовой работы по дисциплине «Конструирование механизмов роботов». Даны рекомендации по выполнению всех разделов курсовой работы.

Учебно-методическое издание

## КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОБОТОВ

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Технический редактор	А. В. Капитонов
Компьютерная верстка	А. В. Капитонов

Подписано в печать 29.11.2017. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,04. Тираж 50 экз. Заказ № 2324.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2017



## Содержание

Введение.....	4
1 Объем и содержание курсовой работы.....	5
2 Основное содержание работы.....	6
2.1 Захватные устройства. Общие сведения.....	6
2.2 Классификация захватных устройств.....	6
2.3 Анализ сил, действующих на перемещаемый объект.....	13
2.4 Конструктивно-технологические особенности ЗУ.....	13
2.5 Расчет механических захватных устройств.....	13
2.5.1 Кинематические схемы стержневых механизмов ЗУ.....	14
2.5.2. Расчет усилий привода.....	16
2.5.3. Определение усилия захвата ЗУ.....	18
2.5.4 Определение сил, действующих в местах контакта заготовки и элементов ЗУ.....	19
2.5.5 Определение напряжений на поверхностях контакта ЗУ с объектом манипулирования.....	21
2.5.6 Расчет эксцентрикового захватного устройства.....	22
2.5.7 Клиновые захватные устройства.....	23
2.5.8 Крепление захватных устройств.....	24
Список литературы.....	26
Приложение А (справочное).....	27



## Введение

Курсовая работа по дисциплине «Конструирование механизмов роботов» призвана закрепить теоретические знания студентов в области робототехники, способствовать получению студентами практических навыков применения этих знаний при конструкторско-технологическом проектировании. Данная работа – это первый этап освоения методов проектирования промышленных роботов, а именно их механизмов – захватных устройств для специальности 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

В машиностроении затраты на средства технологического обеспечения составляют существенную часть себестоимости изделий. В этих затратах большое значение имеет уровень автоматизации производства и использование промышленных роботов.

Разнообразие форм и типов деталей машин, сложность построения технологических процессов обуславливают разнообразие конструкций роботизированных производств и высокий уровень предъявляемых к ним требований. Недостаточно продуманные конструктивные и технологические решения при создании РТК, выборе промышленных роботов, конструировании их механизмов приводят к увеличению сроков подготовки производства и удорожанию продукции.

Поэтому, инженерно-технические работники, занимающиеся разработкой средств конструкторско-технологического обеспечения автоматизированного производства, должны знать теоретические основы робототехники, а также обладать соответствующими навыками расчета и проектирования основных механизмов роботизированного производства.

Выполнение курсовой работы, в соответствии с приведенными ниже методическими рекомендациями, позволит будущему специалисту освоить последовательность разработки таких механизмов промышленных роботов, как захватные устройства и приобрести навыки их проектирования.

## 1 Объем и содержание курсовой работы

Исходным заданием к курсовой работе является чертеж детали, обрабатываемой на роботизированном технологическом комплексе (РТК), выдаваемый студенту преподавателем. Курсовая работа – конструкторско-технологический документ, который содержит расчетно-пояснительную записку и графическую часть.

### **Пояснительная записка должна содержать:**

- титульный лист;
- задание на курсовое проектирование, утвержденное заведующим кафедрой;
- содержание;
- введение;
- технологический маршрут обработки детали с разработкой операционных эскизов для каждой операции, с выбором станочного оборудования;
- обзор и анализ конструкций захватных устройств промышленных роботов (ПР);
- обоснование выбора конструкции и модели ПР в зависимости от массогабаритных характеристик детали и технологического маршрута обработки;
- обоснование выбора конструкции захватного устройства для данной детали;
- построение кинематической схемы и силовой анализ ЗУ, который включает:
  - расчет сил захвата заготовок на каждой технологической операции;
  - расчет привода захватного устройства;
  - расчет элементов захватного устройства на прочность;
- расчет захватного устройства на точность позиционирования;
- заключение;
- список литературы;
- приложение (спецификация к сборочному чертежу).

Расчетно-пояснительная записка должна соответствовать требованиям ГОСТ 2.105-95, содержать 20 – 25 страниц формата А4, выполняться шрифтом – 12 pt, межстрочным интервалом – одинарным.

Графическая часть проекта представляется в виде чертежей, которые должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД.

### **Графическая часть работы включает:**

- чертеж детали – формат А3 (пример – рисунок А.1);
- сборочный чертеж захватного устройства – формат А1 (пример – рисунок А.2);
- рабочие чертежи деталей захватного устройства – форматы А4, А3

(на листе формата А1).

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

<http://e.biblio.bru.by/>



## 2 Основное содержание работы

### 2.1 Захватные устройства. Общие сведения

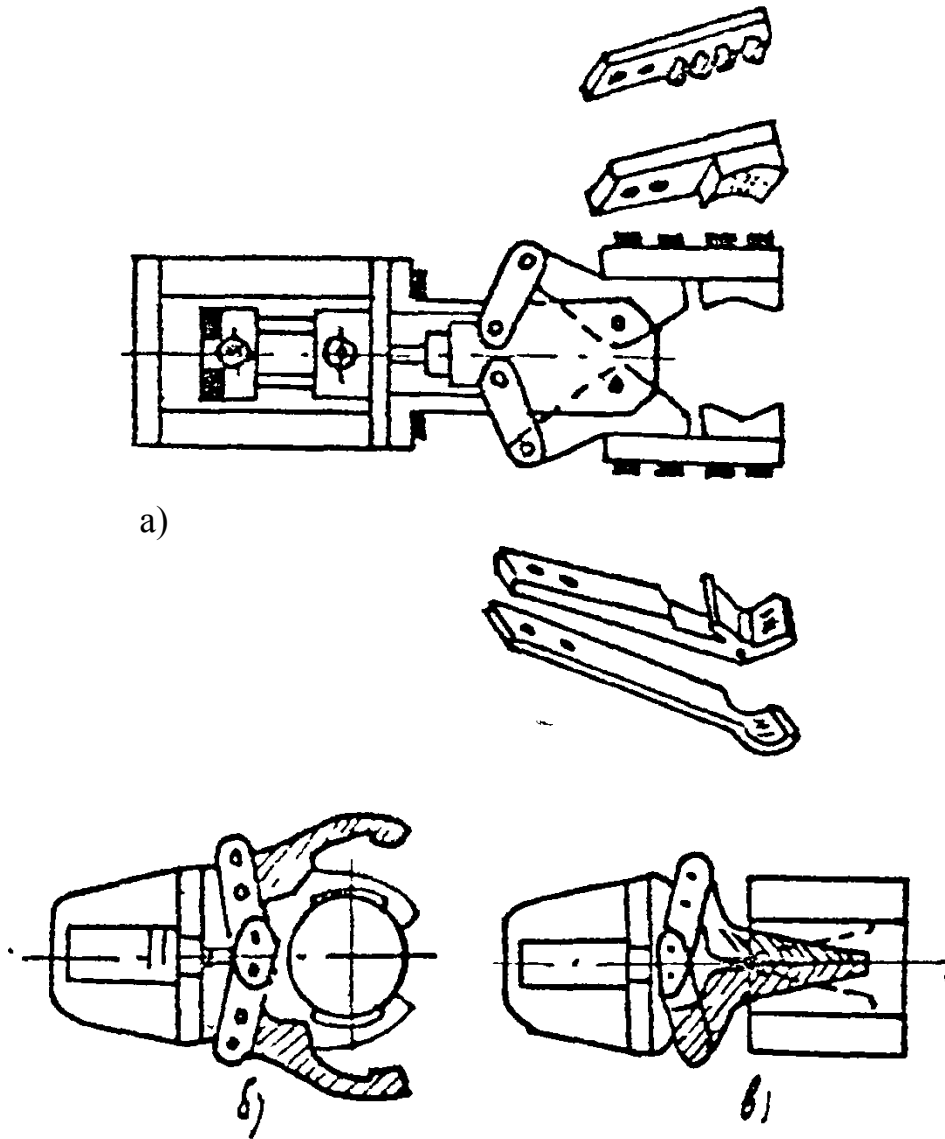
Захватные устройства (ЗУ) промышленных роботов (ПР) и манипуляторов (М) служат для захватывания и удержания в определенном положении объектов манипулирования [1-6]. Эти объекты могут иметь различные размеры, форму, массу и обладать разнообразными физическими свойствами, поэтому ЗУ относятся к числу сменных элементов ПР. Как правило, ПР и М комплектуют набором типовых (для данной модели) ЗУ, которые можно менять в зависимости от требований конкретного рабочего задания. Иногда на типовой захват устанавливают сменные рабочие элементы (губки, присоски и т.п.). При необходимости ПР оснащают специальными ЗУ, предназначенными для выполнения определенных операций. К ЗУ предъявляются требования общего характера и специальные, связанные с конкретными условиями работы. К числу обязательных требований относятся надежность захватывания и удержания объекта, стабильность базирования, недопустимость повреждений или разрушения объектов. Прочность ЗУ должна быть высокой при малых габаритных размерах и массе. При обслуживании одним ПР нескольких единиц оборудования применение широкодиапазонных ЗУ или их автоматическая смена может оказаться единственно возможным решением, если одновременно обрабатываются детали различных конфигураций и массы. Поэтому к ЗУ для ПР, работающих в условиях серийного производства, предъявляются дополнительные требования: широкодиапазонность (возможность захватывания и базирования деталей в широком диапазоне массы, размеров и формы), обеспечение захватывания близко расположенных деталей, легкость и быстрота замены (вплоть до автоматической смены ЗУ). В ряде случаев необходимо автоматическое изменение усилия удержания объекта в зависимости от массы детали.

В последнее время ведутся разработки конструкций ЗУ, способных захватывать и базировать не ориентированно расположенные объекты.

### 2.2 Классификация захватных устройств

По принципу действия различают пять групп ЗУ [5,6]. Самой разнообразной и часто применяемой является группа механических захватов. Они отличаются по типу передаточного механизма: рычажно-стержневые (рисунок 1); кулисно-стержневые, зубчатые (рисунок 2); эксцентриковые (рисунок 3); клиновые (рисунок 4). Детали в клиновых, цанговых, эксцентриковых ЗУ, удерживаемые силами трения без приводов, мало применяют в робототехнике из-за большого допуска на положение детали в ЗУ и усложнения процесса удаления детали из ЗУ. Однако они обладают рядом

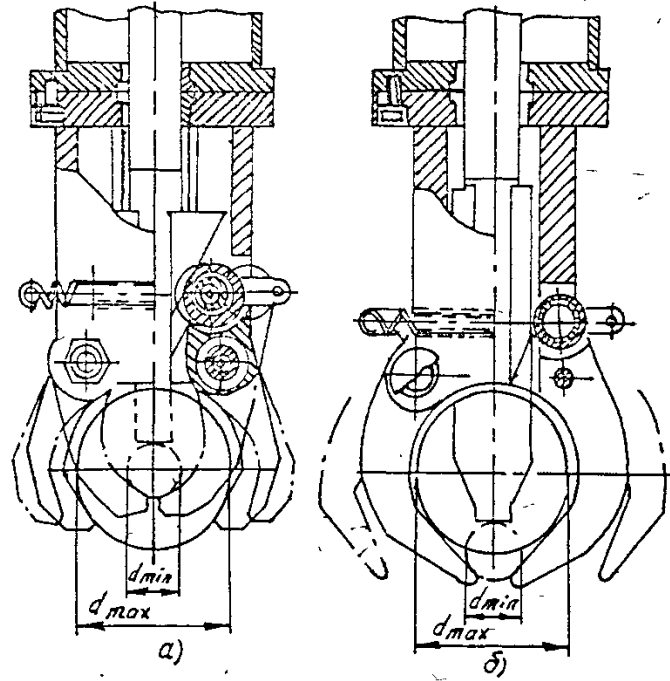
достоинств: автоматическая регулировка удерживающей, минимально необходимой силы захвата по реальному коэффициенту трения; простота и надежность, что при определенной доработке ЗУ, сопряженного станочно-го приспособления и тары гарантирует перспективу использования подобных ЗУ в определенных случаях.



а) стандартный; б) для захвата по наружной поверхности;  
в) для захвата по внутренней поверхности

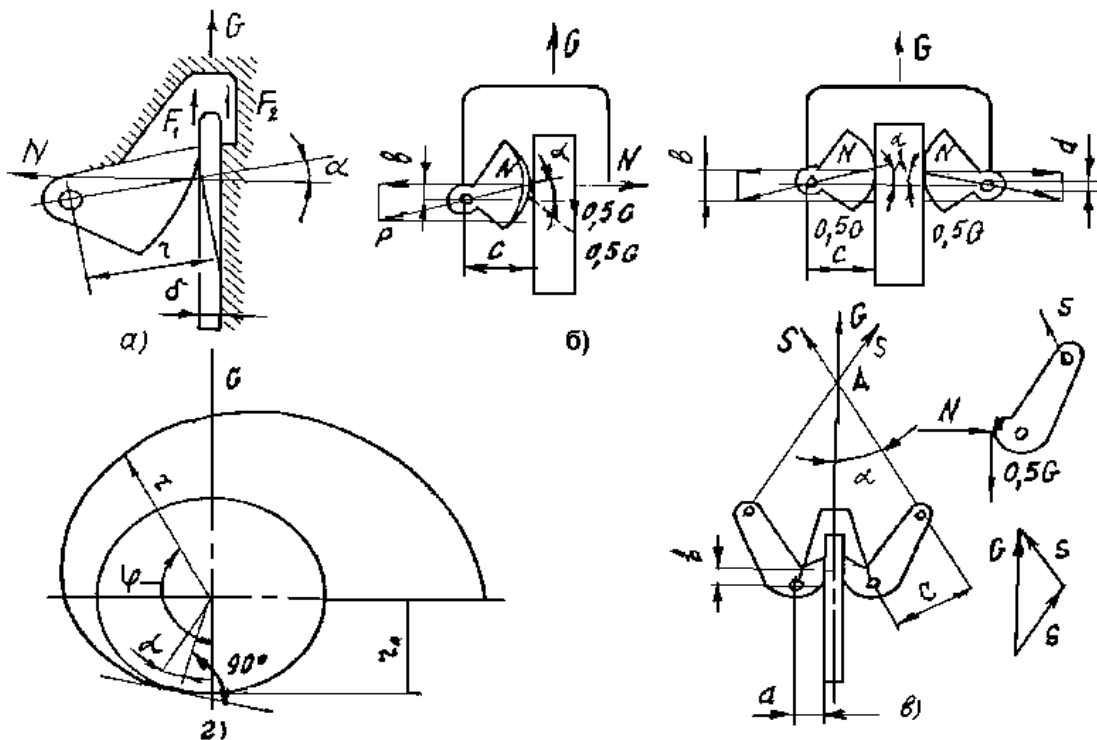
Рисунок 1 – Универсальные двухпальцевые рычажно-стержневые ЗУ со сменными губками





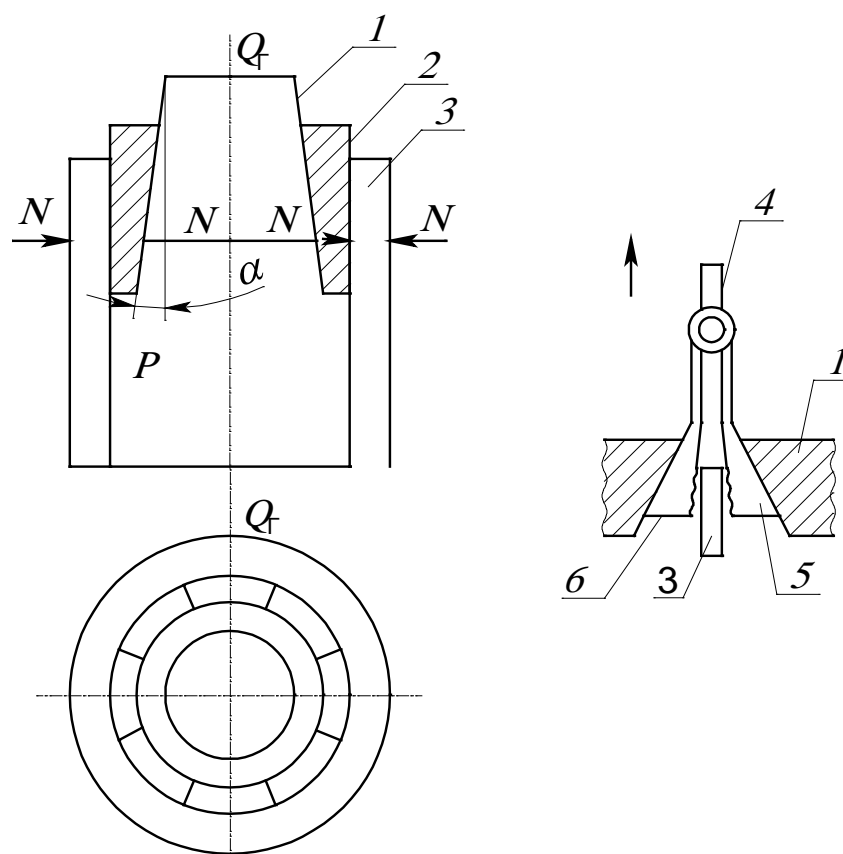
а) с сохранением положения оси; б) с сохранением базисуемых поверхностей

Рисунок 2 – ЗУ кулисно-стержневые, зубчатые для цилиндрических изделий различных диаметров



а) для определения удерживающей силы; б) для определения основных параметров; в) расчетная схема рычажно-эксцентрикового ЗУ; г) построение логарифмической спирали профиля эксцентрика

Рисунок 3 – Схемы эксцентрикового ЗУ



1 – конусообразный клин; 2 – конический сегмент; 3 – деталь; 4 – подъемное звено; 5, 6 – распорные элементы

Рисунок 4 – Схемы клинового ЗУ

По типу привода ЗУ подразделяют на конструкции с пневмо-, гидро-, магнито- и электроприводом [2, 5, 6]. Пневмопривод удобен простым подводом энергии к ЗУ (один шланг), при этом легко регулируется усилие захвата, ЗУ имеют возможность работать в агрессивных средах и в зоне высоких температур. Существенный недостаток пневмопривода — большие габаритные размеры при сравнительно небольшом усилии захвата. Гидравлический привод обеспечивает большие усилия захвата, он компактен и легко регулируется, что предопределяет широкое его распространение. Электрический привод требует специальных малогабаритных двигателей постоянного тока, разработка которых для робототехники пока только ведется.

По числу рабочих позиций захваты всех типов разделяют на однопозиционные (имеющие одну рабочую позицию) и многопозиционные (имеющие несколько рабочих позиций) (рисунок 5).

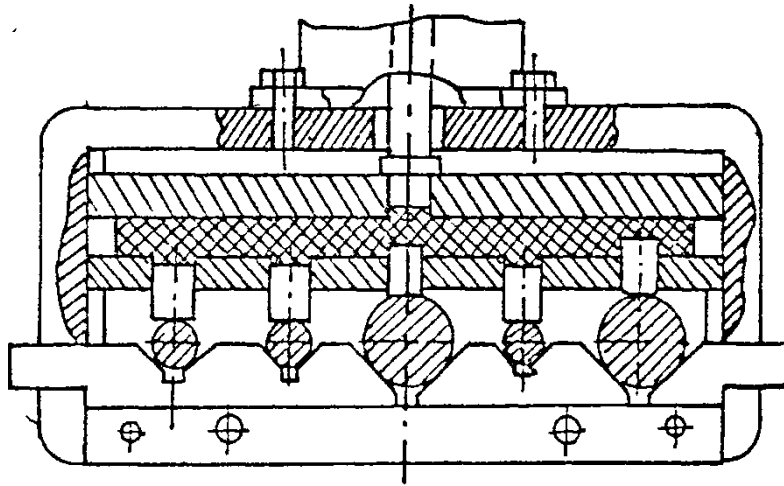
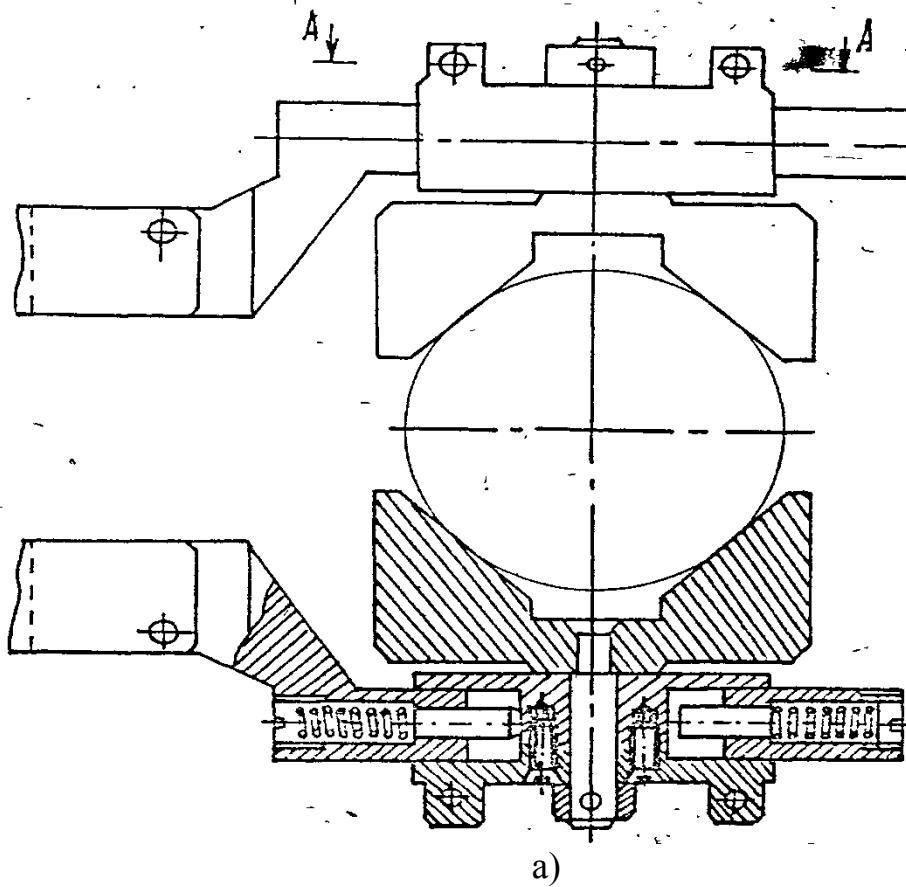
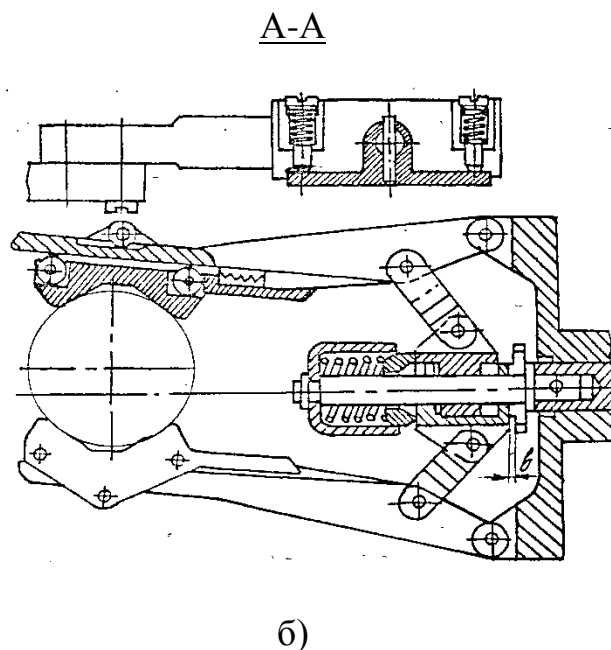


Рисунок 5 – Групповое ЗУ с базовыми отверстиями и упругим элементом

Наличие в ЗУ элементов компенсации погрешности позиционирования значительно расширяет технологические возможности ЗУ и сферу применения оборудованных ими ПР (рисунок 6).





а) вариант 1; б) вариант 2

Рисунок 6 – Различные варианты ЗУ с активно-компенсирующими элементами

По виду управления ЗУ подразделяются на четыре группы [2, 5, 6]. Неуправляемые ЗУ — устройства с постоянными магнитными, вакуумными присосками, без принудительного разрезания или бесприводные механические ЗУ. Для снятия объекта с таких ЗУ требуется усилие большее, чем усилие его удержания. Командные ЗУ управляются только командами на захватывание или отпускание объекта. Разжимаются и зажимаются губки за счет взаимодействия их с объектом манипулирования или элементами внешнего оборудования. Жестко программируемые ЗУ управляются системой управления ПР. Величина перемещения губок, взаимное расположение рабочих элементов, усилие зажима меняются в зависимости от заданной программы ПР, которая может управлять и действием вспомогательных технологических приспособлений. Адаптивные ЗУ — программируемые устройства, оснащенные различными датчиками внешней информации (для определения формы поверхности и массы объекта, усилия зажима, наличия проскальзывания объекта относительно рабочих элементов ЗУ и т.д.).

По характеру крепления к руке ПР все ЗУ делятся на четыре группы. Несменяемые ЗУ — устройства, являющиеся неотъемлемой частью конструкции ПР, замена которых не предусматривается. Сменные ЗУ — самостоятельные узлы с базовыми поверхностями для крепления к руке ПР, не предусматривающие быстрой замены (например, установка на фланце с помощью нескольких винтов, рисунок 7). Быстросменные ЗУ — конструк-

ция базовых поверхностей для крепления ЗУ к ПР обеспечивает их быструю смену (например, исполнение в виде байонетного замка, рисунок 8). Пригодные для автоматической смены ЗУ – конструкция базовых поверхностей обеспечивает возможность их автоматического закрепления на руке ПР.

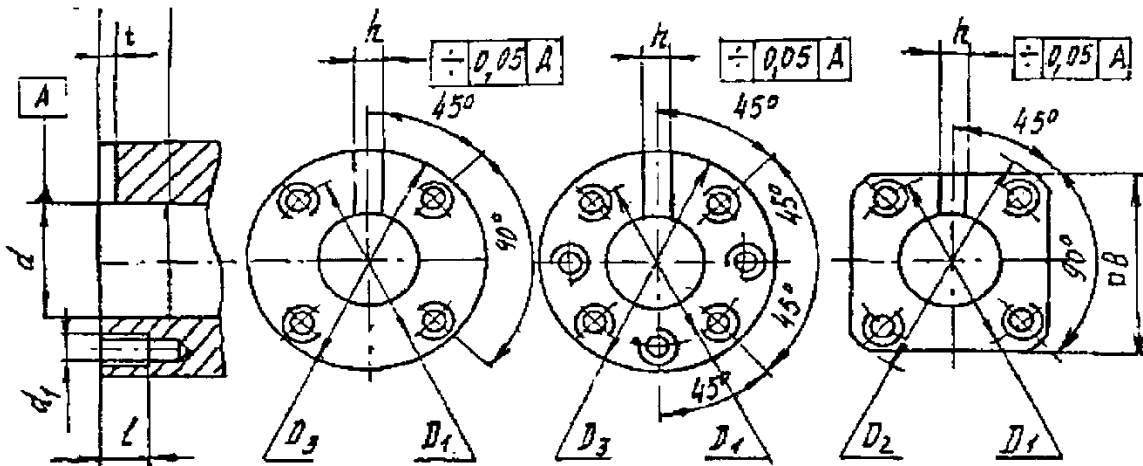
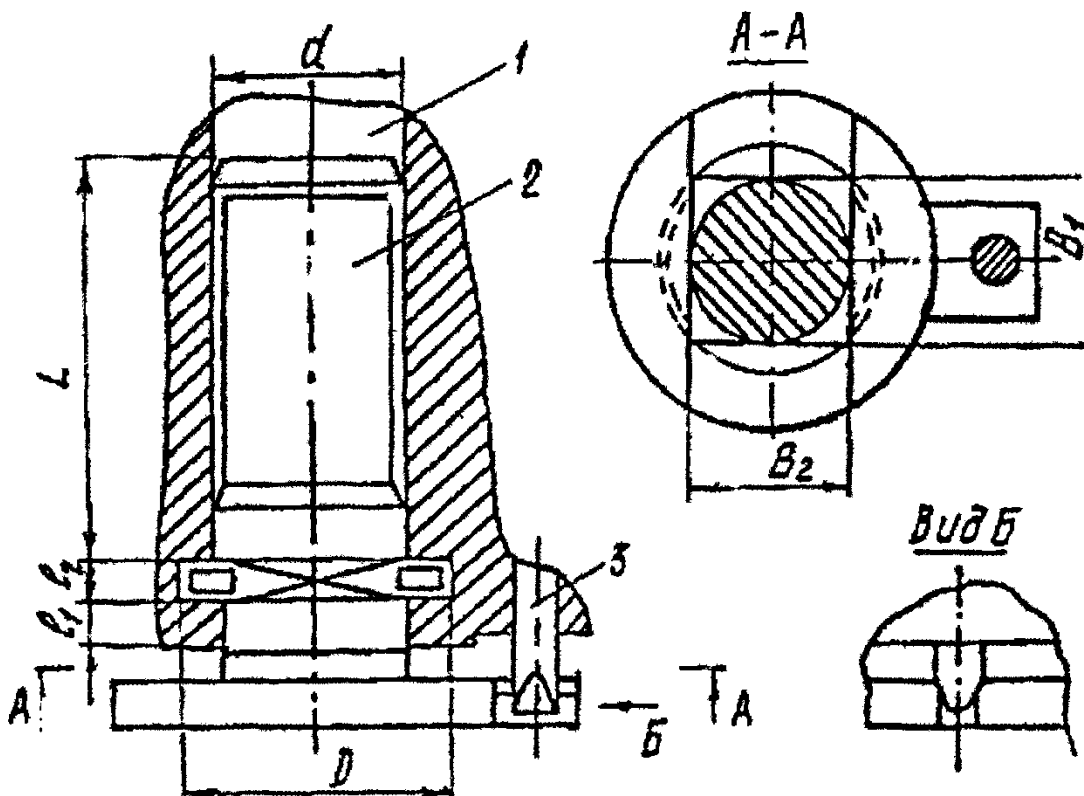


Рисунок 7 – Места крепления сменных ЗУ (таблица 10)



1—гнездо, выполненное в руке ПР; 2—хвостовик ЗУ; 3—приспособление угловой фиксации ЗУ относительно руки ПР

Рисунок 8 – Места крепления быстросменных ЗУ (таблица 10)

### **2.3 Анализ сил, действующих на перемещаемый объект**

Для обеспечения надежности захвата детали жестким ЗУ (т.е. не оснащенным упругими элементами) необходимо, чтобы удерживающая сила на губках была больше векторной суммы всех сил, действующих на перемещаемый предмет [5]. Результирующая сдвигающая сила  $R$  складывается из:

- 1) силы веса  $G = mg$  (где  $m$  – масса перемещаемой детали, кг;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения), постоянной по величине и направленной вертикально вниз;
- 2) силы инерции  $P_{и} = ma$  (где  $a$  – ускорение перемещения детали, возникающее при разгоне и торможении ПР, м/с<sup>2</sup>), направленной коллинеарно вектору ускорения  $a$ ;
- 3) силы аэродинамического сопротивления  $P_{a} = kS_{y}V^2$  ( $k$  – коэффициент пропорциональности;  $S_{y}$  – площадь перемещения детали, м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость перемещения, м/с), учитываемой при скорости более 0,30 м/с и направленной коллинеарно вектору скорости  $V$ ; прочих сил  $N_{пр}$  (возникающих при сборке, установке детали в приспособление, инструмента в магазин, для нежестких ЗУ – реакция в упругих элементах).

### **2.4 Конструктивно-технологические особенности ЗУ**

В большинстве случаев транспортируемые детали захватываются двумя пальцами, расположенными друг против друга, и их положение регулируется устройством, способным создавать усилие сжатия, достаточное для надежной фиксации детали. Обычно стремятся ограничить число степеней свободы детали выбором точек зажима кулачками соответствующей формы, при этом стараются избегать статической неопределенности ЗУ, уменьшая число контактных поверхностей. Опыт создания ЗУ показывает, что требуются губки с определенной поверхностью, обеспечивающие ориентацию перемещаемых деталей и, предотвращающие излишнее усилие зажима и преждевременный их износ.

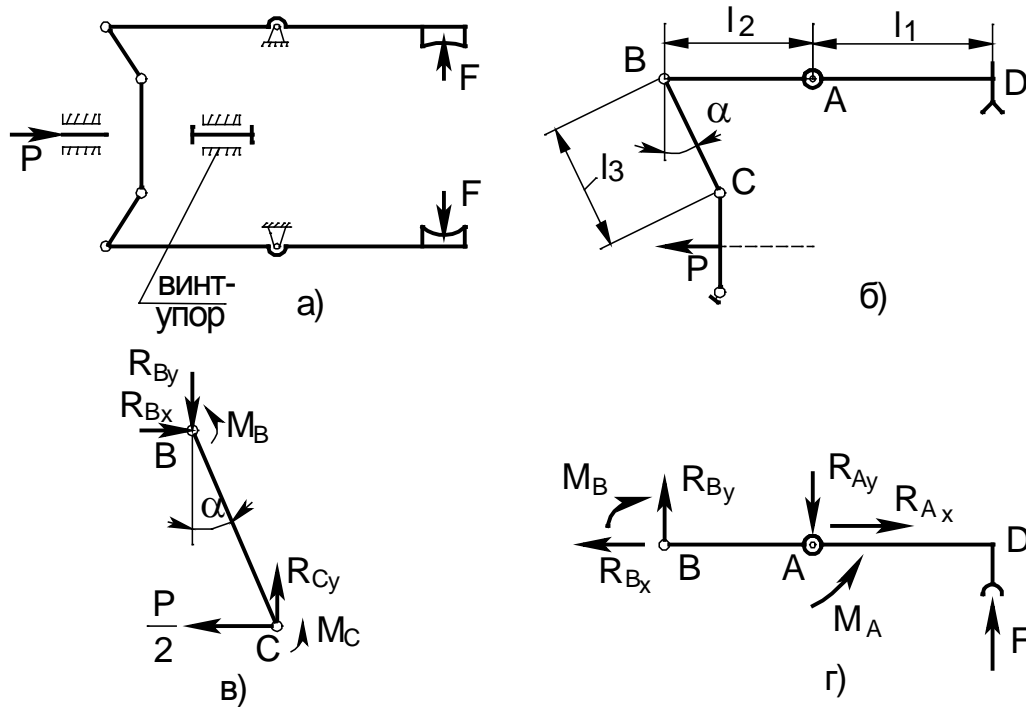
### **2.5 Расчет механических хватных устройств**

Расчет механических ЗУ включает шесть этапов [5-9]. Это определение:

- 1) силовых и кинематических передаточных отношений выбранной схемы ЗУ;
- 2) необходимого усилия привода;

- 3) необходимого усилия захвата;
- 4) сил, действующих в местах контакта;
- 5) контактных напряжений;
- б) допустимых крутящих и изгибающих моментов на местах крепления ЗУ.

### 2.5.1 Кинематические схемы стержневых механизмов ЗУ



а) кинематическая; б) расчетная; в) сил и моментов на звене BC; г) сил и моментов на звене BD

Рисунок 9 – Схемы ЗУ

Рычажно-стержневые схемы проанализированы на примере рычажно-стержневой схемы, показанной на рисунке 9, а. Привод ЗУ от гидроцилиндра. Силовое передаточное отношение схемы:

$K_p = F/P$ , где  $F$  — усилие на губках;  $P$  — движущая сила.

Из соотношения работ  $\delta_F F = \delta_P P \eta$  получим, что  $K_p = \eta/K\delta$ , где:  $\delta_F$ ,  $\delta_P$  — перемещение соответственно губок и штока цилиндра;  $\eta$  — КПД механизма;  $K\delta = \delta_F/\delta_P$  — кинематическое передаточное отношение.

Для получения выражения силового передаточного отношения проведем силовой анализ механизма. Рассмотрим схемы сил и моментов, действующих на ведущее звено механизма при зажиме детали (рисунок 9).

Моменты сил трения в шарнирах:

$$M_B = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \rho}{2} \sqrt{R_{BY}^2 + R_{BX}^2}, M_C = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \rho}{2} \sqrt{R_{CY}^2 + R_{CX}^2};$$

(1)

где:  $d$  — диаметр осей шарниров;  $\rho$  — угол трения. Для применяемых на практике размеров звеньев и углов можно принять:

$$M_B = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \rho}{2} \cdot R_{BY}; M_C = \frac{d \cdot \operatorname{tg} \rho}{2} \cdot R_{CY}.$$

(2)

Из условий равновесия звена BC:

$$R_{BY} = \frac{P}{2} \cdot \frac{l_3}{d \cdot \operatorname{tg} \rho + l_3 \alpha};$$

(3)

где:  $\alpha$  — угол между вертикалью и звеном BC при закрытом ЗУ. Из условий равновесия звена BD:

$$R_{BY} = \frac{F}{2} \cdot \frac{2l_1 + d \cdot \operatorname{tg} \rho}{l_2}.$$

(4)

Тогда из уравнений (3) и (4):

$$K_P = \frac{l_2}{2l_1} \cdot \frac{1}{\left(a_1 + \frac{d}{l_3} \cdot \operatorname{tg} \rho\right) \left(1 + \frac{d}{2l_1} \cdot \operatorname{tg} \rho\right)}.$$

(5)

Исключая малые величины, получим КПД при  $\operatorname{tg} \rho \leq 1$ :

$$K_\delta = \left[ \frac{1}{K_P} \right]_{\operatorname{tg} \rho=0} = \frac{2l_1}{l_2} \cdot \alpha;$$

(6)





$$\eta = K_p \cdot K_\delta = \frac{1}{1 + \frac{d}{l_3} \cdot \operatorname{tg} \frac{\rho}{\alpha}}$$

(7)

Величина  $K_p$  в немалой степени зависит от угла  $\alpha$ . Наибольшее значение  $K_p$  может быть получено при малых  $\alpha$ . Однако соблюдение в конструкции ЗУ точного значения  $\alpha$  затруднено из-за ошибок сборки (особенно при установке губок) и деформации деталей. При невыдержанном точно малом значении  $\alpha$  шарнир С может пройти "мертвое" положение (когда звено ВС и ведущее звено сольются в одну прямую) и тогда губки раскроются. Точность размеров звеньев и координат расположения неподвижных шарниров должна строго соблюдаться. В противном случае сила зажатия детали может быть далека от расчетной, а потери на трение в шарнирах велики. К недостаткам схемы можно отнести большие потери на трение при малом  $\alpha$ .

### 2.5.2. Расчет усилий привода

Соотношения между силой  $P$  привода, силами  $F$  или моментом  $M$

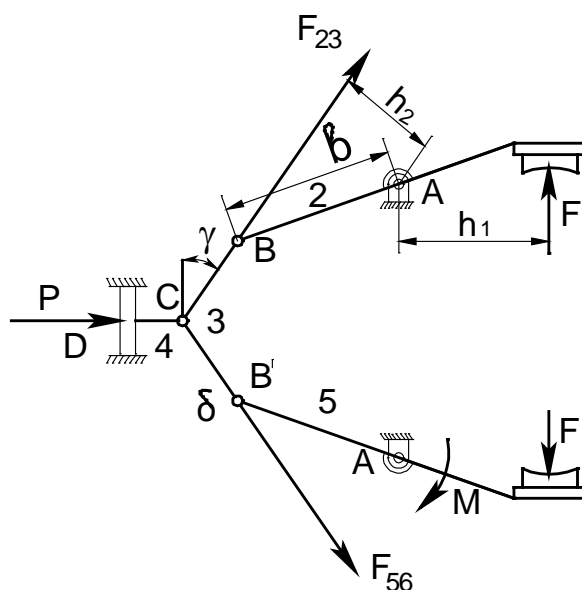


Рисунок 10 – Расчетная схема рычажно-стержневого механизма

на губках ЗУ определяют из условий статического равновесия. Так, для захвата с рычажным механизмом, показанным на рисунок 10, из условия  $\sum F = 0$  в точке С имеем  $F_{23} + F_{56} - P = 0$ , откуда  $F_{23} = P/2 \sin \gamma$ . Из условия  $\sum F = 0$  относительно точки А следует:

$$\frac{P}{F} \eta = \frac{h_1}{h_2} \cdot 2 \sin \gamma. \quad (8)$$

При известном моменте  $M$  сила привода:

$$P_2 = \frac{\sum_{j=1}^n M_j \sin \gamma}{b}; \quad (9)$$

где:  $M_j$  — момент сил на губке;  $b$  — плечо рычага;  $n$  — число губок. Данный захват обладает эффектом самоблокировки, так как рычаг проходит через "мертвое" центральное положение.

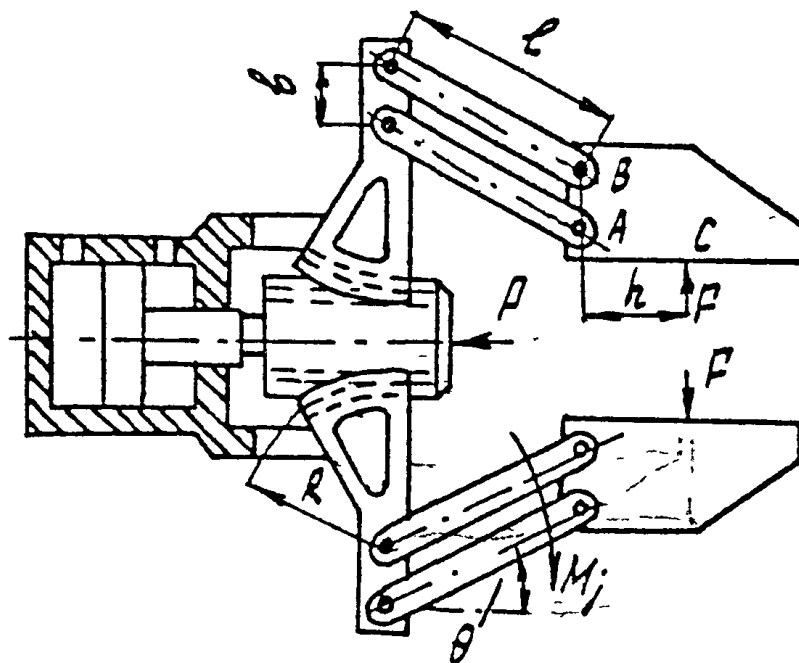


Рисунок 11 – Расчетная схема реечного механизма

В некоторых случаях удобен метод расчета, основанный на определении работы при малых перемещениях. Применяя этот метод к расчету захватного устройства с реечным механизмом (рисунок 11), получим:  $PV/2 = FV_{ca}$ , где  $V = R\omega$ ;  $V_{CB} = l\omega \cos \theta$ :

$$\frac{P}{F} \eta = \frac{2l}{R} \cos \theta \quad (10)$$

Здесь  $\omega$  — угловая скорость звена 2;  $R$  — радиус зубчатого сектора;  $V_{CB}$  — вертикальная скорость в точке  $C$ , равная скорости в точке  $A$ .

Для рассмотренного на рисунке 11 захвата сила привода может быть определена также через наибольший момент  $M_j$ :

$$P \cdot \eta = \frac{1}{m_C \cdot r_C} \cdot 2 \sum_{j=1}^n M_j; \quad (11)$$

где:  $m_C$  — модуль зубчатого сектора;  $r_C$  — полное число зубьев сектора;  $\eta$  — КПД реечной передачи.

### 2.5.3. Определение усилия захвата ЗУ

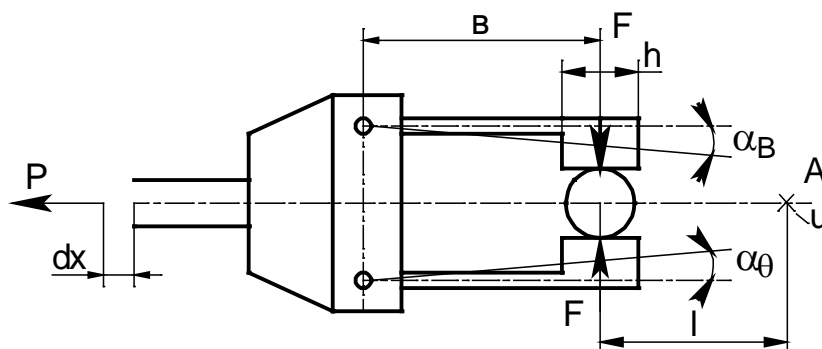


Рисунок 12 – Расчетная схема двухшарнирного захвата

Определение необходимого усилия захвата ЗУ рассмотрим на примере ЗУ клещевого типа (рисунок 12) с V-образными губками, используя метод анализа действующих сил, для детали весом  $G$  — при четырех видах перемещений:

1) при вертикальном линейном перемещении:

$$F = G \frac{K}{\mu} \left( 1 + \frac{a_B}{g} \right); \quad (12)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения;  $\alpha_B$  — ускорение вертикального движения;  $K$  — коэффициент запаса ( $K=1,5$  —  $2,0$ );  $g$  — ускорение свободного падения;

2) при горизонтальном линейном перемещении:

$$F = G \left( \frac{K}{\mu} + \frac{a_{\Gamma}}{g} \operatorname{tg} \alpha \right);$$

(13)

где  $a_{\Gamma}$  — ускорение горизонтального движения;  $\alpha$  — угол скоса губок;  
3) при вращении ЗУ в горизонтальной плоскости:

$$F = G \cdot \left( \frac{K}{\mu} + \frac{\omega^2}{g} R \operatorname{tg} \alpha + \frac{\varepsilon}{g} R \right);$$

(14)

где:  $\omega$  — угловая скорость вращения ЗУ;  $\varepsilon$  — угловое ускорение поворота ЗУ;  $R$  — расстояние от оси вращения до оси заготовки;

4) при одновременном торможении всех трех движений:

$$F = G \cdot \left[ \frac{K}{\mu} \left( 1 + \frac{a_B}{g} \right) + \frac{1}{g} (a_{\Gamma} \operatorname{tg} \alpha + \omega^2 R \operatorname{tg} \alpha + \varepsilon \cdot R) \right].$$

(15)

По этой последней зависимости рассчитывается привод ЗУ. Для определения усилия зажима детали можно также воспользоваться эмпирической формулой:

$$F = K_1 K_2 K_3 \cdot mg,$$

(16)

где:  $m$  — масса заготовки;  $K_1$  — коэффициент безопасности, значения которого зависят от условий применения ПР и расположения других элементов РТК ( $K_1=1,2$  —  $2,0$ ),  $K_2$  — коэффициент, зависящий от максимального ускорения  $\alpha$ , с которым робот перемещает заготовку, закрепленную в его захвате ( $K_2=1+\alpha/g$ );  $K_3$  — коэффициент передачи, зависящий от конструкции захвата и расположения в нем заготовки ( $K_3=F/mg$ ).

Например, для двухшарнирного захвата (рис. 2.6.3.1):

$$P dx = 2 F_b \cdot d\theta \Rightarrow F = \frac{P}{2b} \cdot \frac{dx}{d\theta},$$

(17)

где  $dx$  — малое перемещение привода;  $d\theta$  — соответствующее малое



перемещение губок. На каждую из губок действует различное усилие при захвате: если на верхнюю губку — реакция  $R_1$ , то на нижнюю губку — реакция  $R_2=(R_1+mg)$ . В предельном случае, если  $R_1=0$ , то  $R_2=mg$  и следовательно,  $P=P_{\min}$ :

$$P_{\min} dx = R_1 b \cdot d\theta + R_2 b \cdot d\theta = mgb \cdot d\theta; \quad (18)$$

$$P_{\min} = mgb \cdot \frac{d\theta}{dx}, \quad (19)$$

подставляя  $P=P_{\min}$  в (17), получим:

$$F = \frac{mg}{2} \Rightarrow \dots K_3 = \frac{F}{mg} = \frac{1}{2}. \quad (20)$$

#### 2.5.4 Определение сил, действующих в местах контакта заготовки и элементов ЗУ

Различают следующие схемы удержания объектов в механическом ЗУ: деталь поддерживается губкой ЗУ, силы трения мало влияют на механизм удержания детали (схема 4 в таблице 1); деталь удерживается благодаря запирающему действию губок при ограниченном влиянии сил трения (схемы 2 и 5); деталь удерживается силами трения (схемы 3 и 6).

На практике обычно встречается сложное нагружение ЗУ с комбинацией описанных случаев (схема 2), при этом в процессе манипулирования объектом характер нагрузки ЗУ и схемы удержания детали могут изменяться. Поэтому расчет должен вестись для критического случая нагрузки.

Таблица 1 – Расчет сил, действующих в местах контакта

№ схе	Расчетная схема	Формула
1		а) $R_1 = \frac{b \cdot a}{b} Q$ $R_2 = \frac{a}{b} \cdot Q$ б) $R_1 = \frac{b+a}{b} \cdot Q$ $R_2 = -\frac{a}{b} \cdot Q$

2		$\sin \theta (\sin \varphi_j - \sin \varphi_h - \mu (\cos \varphi_j - \cos \varphi_h)) - \frac{\cos \theta}{\mu}$ $N_j = R_n \frac{(1 - \mu^2) \sin(\varphi_j - \varphi_h)}{(1 - \mu^2) (\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \sin(\varphi_3 - \varphi_1))} +$ <p>где <math>i, j, k=1, 2, 3</math>; <math>i \neq j \neq k</math>, <math>\theta = 0</math></p>
3		$N_j = \frac{R_n}{\mu} - \frac{\sin(\varphi_j - \varphi_k)}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \sin(\varphi_3 - \varphi_1)}$ <p>где <math>i, j, k=1, 2, 3</math>; <math>i \neq j \neq k</math></p>
4		$N_i = R_n \frac{\sin \varphi_i - \mu \cos \varphi_j}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - 2\mu \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}$ <p>где <math>i, j=1, 2</math> <math>i \neq j</math></p>
5		$\varphi_1 = 90^\circ; \varphi_2 = \varphi$ $N = R_n \frac{\sin \varphi - \mu \cos \varphi}{\cos \varphi + 2\mu \sin \varphi}$ $N = R_n \frac{1}{\cos \varphi + 2\mu \sin \varphi}$
6		$\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$ $N_1 = N_2 = \frac{R_n}{2\mu}$

### 2.5.5 Определение напряжений на поверхностях контакта ЗУ с объектом манипулирования

Это необходимо как при расчете ЗУ, так и при установлении возможности повреждения объекта при его захватывании и удержании. В ряде случаев, особенно при удержании детали благодаря силам трения, усилия, действующие в местах контакта ЗУ, бывают значительными. Это может привести к повреждению поверхности детали, что недопустимо при их чистовой обработке, или к повреждению зажимных губок ЗУ. Контактные напряжения  $\sigma_K$  должны быть меньше допустимого значения  $[\sigma_K]$ . Формулы, определяющие напряжения на поверхностях контакта заготовки с ЗУ, приведены в таблице 2, значения коэффициента  $m$  в таблице 3, допустимые контактные напряжения  $[\sigma_K]$  — в таблице 4.

Обозначения:  $N$  — сила, действующая в месте контакта захвата с деталью (таблица 1);  $E_{пр}$  — приведенный модуль упругости материалов губки захвата и детали;  $l$  — ширина губки захвата, см;  $d$  — диаметр детали, см;  $r$

— радиус губок захвата, см;  $m$  — коэффициент, зависящий от отношения наименьшего радиуса к наибольшему из двух соприкасающихся поверхностей (таблица 3).

Таблица 2 – Расчет контактных напряжений

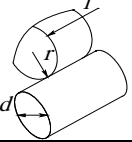
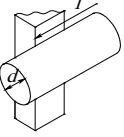
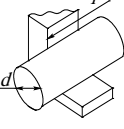
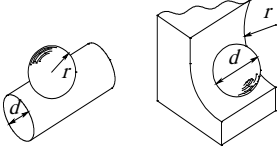
	$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{N \cdot E_{np}}{l} \left( \frac{2}{d} + \frac{1}{r} \right)}$
	$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{N \cdot E_{np}}{l} \left( \frac{2}{d} + \frac{1}{r} \right)}$
	$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{N \cdot E_{np} \cdot 2}{l \cdot d}}$
	$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{N \cdot E_{np} \cdot 2}{l \cdot d}}$ при $\frac{\alpha}{2} < r$

Таблица 3 – Значение коэффициента  $m$  в зависимости от отношения  $2r/d$

$2r/d$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,10	0,05
$m$	0,388	0,4	0,42	0,44	0,47	0,49	0,536	0,6	0,716	0,8	0,97	1,98

Таблица 4 – Допускаемые контактные напряжения

Материал	Вид контакта	$[\sigma_k]$ , МПа
Сталь	Линейный	450-850
	Точечный	1100-2200
Чугун	Линейный	260-350
	Точечный	600-800

Примечание:  $[\sigma_k]$  может быть приближенно определено по формуле:

$[\sigma_k] = 50\text{НВ}$  (1-0,001НВ) — при линейном контакте;

$[\sigma_k] = 100\text{НВ}$  (1-0,001НВ) — при точечном контакте.

Приведенный модуль упругости материалов  $E_{np}$  подсчитывают по формуле:

$$E_{\text{ПР}} = \frac{2E_{\text{ЗАГ}} \cdot E_{\text{ЗУ}}}{E_{\text{ЗАГ}} + E_{\text{ЗУ}}}; \quad (21)$$

где:  $E_{\text{ЗАГ}}$  — модуль упругости материала заготовки;  $E_{\text{ЗУ}}$  — модуль упругости материала губок ЗУ.

Значения приведенного модуля упругости (в  $10^5$  МПа) для некоторых пар материалов заготовок при стальных губках ЗУ даны в таблице 5.

Таблица 5 – Значения  $E_{\text{ПР}}$  для стальных губок ЗУ

Материал заготовки	$E_{\text{ПР}} \cdot 10^5, \text{ МПа}$	Материал заготовки	$E_{\text{ПР}} \cdot 10^5, \text{ МПа}$
Сталь	2,1	Бронза	1,25
Чугун серый	1,25	Алюминий	1,05
Чугун модифицированный	1,6	Латунь	1,2

### 2.5.6 Расчет эксцентрикового захватного устройства

При подъеме детали под действием ее веса  $G$  (рисунок 3, а) эксцентрик затягивается, в результате чего возникает усилие распора  $N$ , создающее силу трения:

$$F = F_1 + F_2 = N\mu_1 + N\mu_2 > G; \quad (22)$$

где  $\mu_1 = 0,15$  и  $\mu_2 = 0,1$  — коэффициенты трения детали соответственно об эксцентрик и заднюю стенку ЗУ. Если толщина детали  $a$ , а радиус эксцентрика  $r$ , то из уравнения моментов относительно оси эксцентрика следует:

$$\begin{aligned} Nr \cdot \sin \alpha - N\mu_1 r \cdot \cos \alpha - N\mu_2 (r \cdot \cos \alpha + a) &= 0 \text{ или} \\ \sin \alpha - \mu_1 \cos \alpha - \mu_2 (r \cos \alpha + a) &= 0, \text{ откуда:} \\ \text{tg} \alpha &\leq \mu_1 + \mu_2 \left[ 1 + \frac{a}{r \cos \alpha} \right], \end{aligned} \quad (23)$$

что и определяет параметры эксцентрика (таблица 6).

Таблица 6 – Расчет параметров эксцентриковых ЗУ

Параметр	Устройство	
	эксцентриковое ЗУ	рычажно-эксцентриковое ЗУ





Передаточное число	$i = c / b = 1 / \operatorname{tg} \alpha$	$i = [a + (c / \cos \alpha)] / b$
Сила сжатия	$N = 0,5G\sqrt{i^2 + 1}$	$N = 0,5G[a + (c / \cos \alpha)] / b$
Реакция в шарнире	$R = 0,5G\sqrt{i^2 + 1}$	$S = G / (2 \cos \alpha)$
КПД	$\eta = 1 - 0,5\rho \left(\frac{d}{c}\right) \sqrt{i^2 + 1}$	$\eta = 1 - 0,5\rho \left(\frac{d}{c}\right) \sqrt{i^2 + 1}$

В таблице  $d$  — диаметр оси шарнира;  $\rho$  — коэффициент трения в шарнирах.

Рабочую поверхность эксцентриков рекомендуется профилировать по логарифмической спирали  $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$  (рисунок 3, г). В этом случае  $r = r_0 \cdot e^{t\rho}$ , где  $t = \operatorname{tg} \alpha$ .

Для повышения значения  $\mu$  и надежного в связи с этим удержания детали рабочие поверхности эксцентриков снабжают насечкой и угол  $\alpha$  доводят до  $10^\circ$ . Делать его меньше не рекомендуется, поскольку при  $\alpha < 10^\circ$  ЗУ заклинивается и трудно снимается с детали.

### 2.5.7 Клиновые захватные устройства

Клиновые (цанговые) ЗУ (рисунок 4) в основном предназначены для подъема и транспортирования деталей, имеющих полость, выполненную обычно в виде круглого отверстия необходимого диаметра для взаимодействия с распорными элементами ЗУ. Значительно реже клиновые ЗУ применяют для захвата изделий за боковые поверхности или выступающие элементы.

Основными частями наиболее распространенного клинового ЗУ являются размещенные в отверстиях груза подвижные в горизонтальном направлении распорные элементы и конусообразный клин, подвижный в вертикальном направлении (см. рисунок 4).

Сила зацепления в клиновом ЗУ (см. рисунок 4)  $P = \sum \mu N > G$ , где  $\mu$  — коэффициент трения между деталью и распорным элементом;  $N$  — сила нормального давления. Передаточная функция клиновой пары зависит от коэффициента  $\mu_1$  трения распорного элемента о клин:

$u = (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha)$ . Тогда при  $n$  распорных элементах:

$$N = \frac{G}{n} \cdot \frac{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha}{\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha}.$$

(24)



Сумма горизонтальных сил, действующих на груз:  $\sum N = G u$ .

При проектировании ЗУ следует избегать малых углов наклона граней клина, которые могут вызвать заклинивание.

### 2.5.8 Крепление захватных устройств

Рекомендуется два исполнения мест крепления ЗУ: сменные и быстросменные. Конструкции мест крепления и размерные ряды разнообразны. В РТМ 2 Р00-1-78 в качестве конструктивного исполнения мест крепления сменных ЗУ рекомендовано фланцевое крепление, причем на руке ПР выполняется фланец с центрирующим отверстием по оси и с резьбовыми отверстиями вокруг него. Такая конструкция позволяет размещать часть ЗУ внутри руки ПР, осуществлять связь ЗУ, не имеющих встроенного привода, с приводом, находящимся в руке, являясь при этом простой и универсальной. Предусмотрено два исполнения фланцев: круглой и квадратной формы, причем координаты резьбовых отверстий в обоих случаях остаются постоянными (для данного типоразмера) и оба исполнения креплений — взаимозаменяемы (рисунок 8 и таблица 7). Допустимые изгибающие и крутящие моменты для каждого типоразмера приведены в таблицах 8 и 9.

РТМ 2 Р00-1-78 рекомендует байонетное крепление (рисунок 8), которое может использоваться как для быстрой ручной, так и для автоматической смены ЗУ. При установке хвостовик 2 ЗУ вводится в гнездо 1 с одновременным отжимом упора 3, затем ЗУ поворачивается на  $90^\circ$  (разрез А-А) и упор 3 заскакивает в отверстие, выполненное на фланце ЗУ. Для смены ЗУ требуется повернуть его относительно гнезда на  $90^\circ$  и вынуть из гнезда. Основные размеры узла крепления, выполненного в соответствии с конструкцией рисунок 8, приведены в табл. 10, а допустимые крутящие и изгибающие моменты для мест крепления - в табл. 8 и 9.

Таблица 7 – Основные размеры (мм) мест крепления сменных ЗУ

d	D1	d1	l, не менее	D2	D3, не менее	h	t	n		B
								исполне-		
								1	2	
10	18	M4	6	30	26	3	2			20
20	30	M5	7	40	40	4	2	4		30
40	52	M6	9	60	64	5	3			48
60	76	M8	12	76	92	6	3		4	68
90	110	M10	15	144	130	8	4			110
120	140	M10	15	180	160	8	4			140
160	184	M12	18	240	208	10	5	7		182
200	232	M16	24	300	264	12	5			230

Примечания:



1. Отклонение центрального угла между осями крепежных отверстий по ГОСТ 14140-81.
2. При использовании ЗУ со встроенным пневмоприводом выполнение канавки размером  $h$ ,  $x$ ,  $t$  необязательно,  $n$ -число крепежных отверстий.

Таблица 8 – Допустимые изгибающие моменты (Н·м) в местах крепления сменных ЗУ

Исполнение	Диаметр базового отверстия, мм							
	10	20	40	60	90	120	160	200
1	20	50	140	400	1300	1700	3300	7800
2	20	50	140	400	900	1100	2200	5200

Таблица 9 – Допустимые крутящие моменты (Н·м) для мест крепления сменных ЗУ, согласно РТМ 2 Р00-1-78

Исполнение	Диаметр базового отверстия, мм							
	10	20	40	60	90	120	160	200
1	4	12	30	80	310	400	770	1845
2	4,4	12	30	80	180	230	440	1050

Таблица 10 – Основные размеры (мм) мест крепления быстросменных ЗУ, согласно РТМ 2 Р00-1-78

d	D	L	l1	l2	B1	B2
20	32	40	7	6	20	21
30	44	60	9	8	30	31
40	56	85	9	8	40	41
50	68	100	9	8	50	51
60	80	120	11	10	60	61

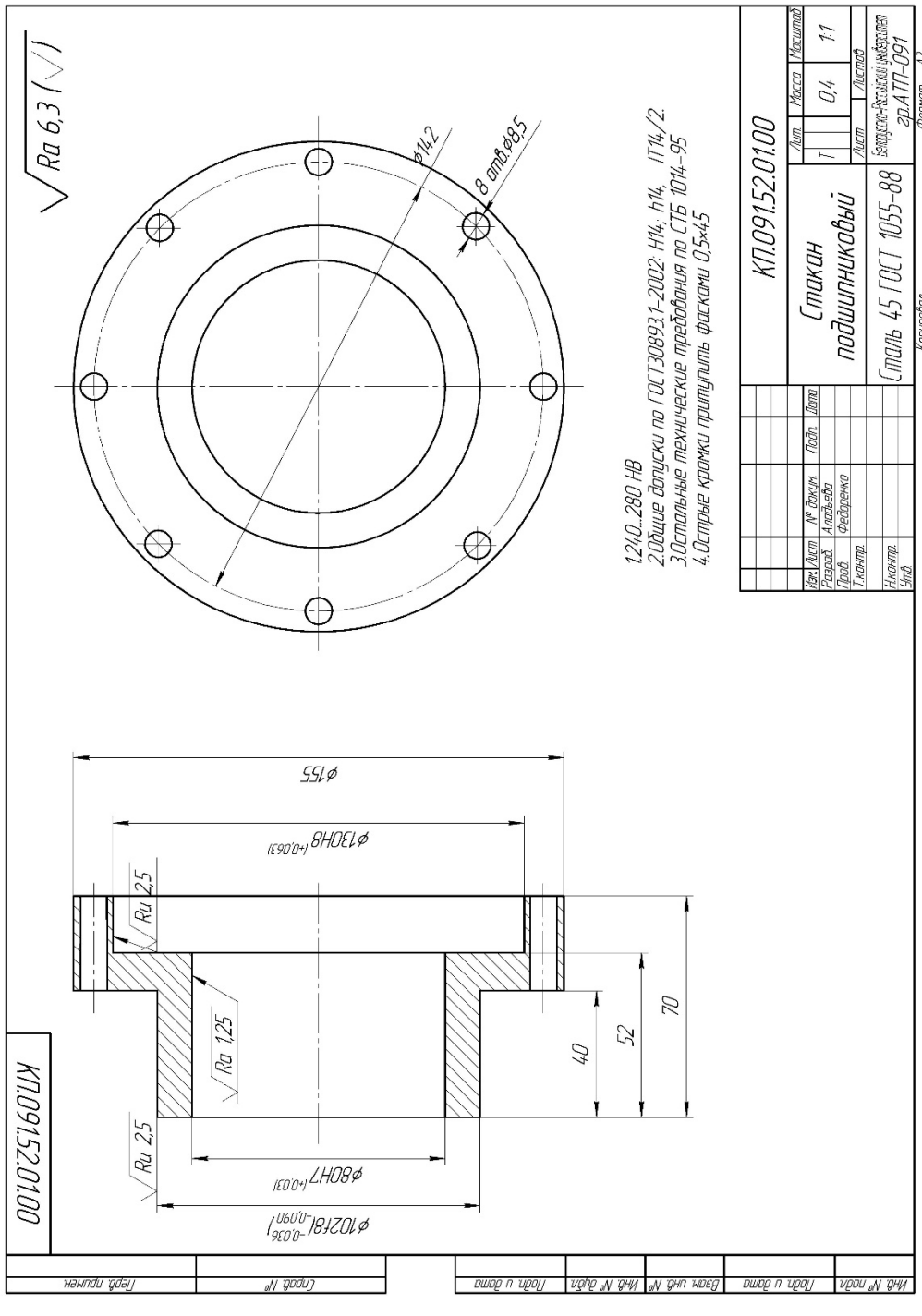


## Список литературы

1. Остяков, Ю. А. Проектирование механизмов и машин: эффективность, надежность и техногенная безопасность: учебное пособие / Ю. А. Остяков, И. В. Шевченко – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 260 с. (электронный ресурс), режим доступа – <http://znanium.com/bookread2.php?book=513552>.
2. Егоров О. Д. Конструирование механизмов роботов: учебник / О. Д. Егоров. - М.: Абрис: Высш. шк., 2012. – 444 с.: ил.
3. Борисенко, Л. А. Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств: монография / Л. А. Борисенко. - Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. - 187с.: ил.
4. Иванов А. А. Основы робототехники: учеб. пособие / А. А. Иванов. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2016. – 224 с.
5. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и элементы промышленных роботов: учебное пособие / Ю. Г. Козырев. – М.: КНОРУС, 2011. – 312 с.: ил.
6. Козырев Е.Г. Промышленные роботы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1988. - 392 с.
7. Технология машиностроения. Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пособие / М. Ф. Пашкевич [и др.]; под ред. М. Ф. Пашкевича. – Минск: Изд-во Гревцова, 2010. – 400 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 910 с.
9. Технологическая оснастка: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. – 320 с.



Приложение А (справочное)



1. 240...280 HB  
 2. Общие допуски по ГОСТ 30893.1-2002: H14; h14; IT14/2  
 3. Остальные технические требования по СТБ 1014-95  
 4. Острые кромки притупить фасками 0.5x45

Рисунок А.1 – Пример выполнения чертежа детали

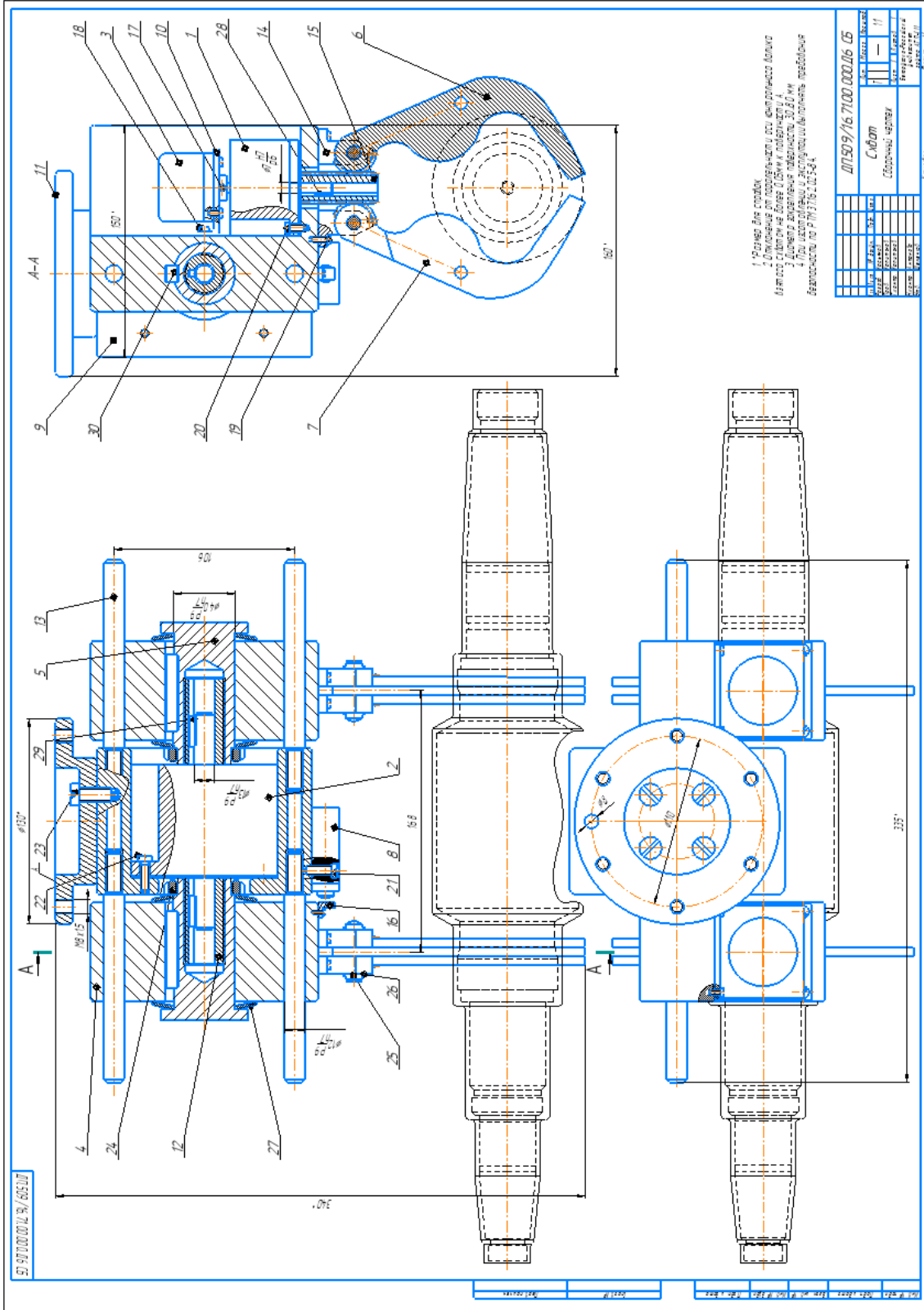


Рисунок А.2 – Пример выполнения сборочного чертежа ЗУ (схвата)

