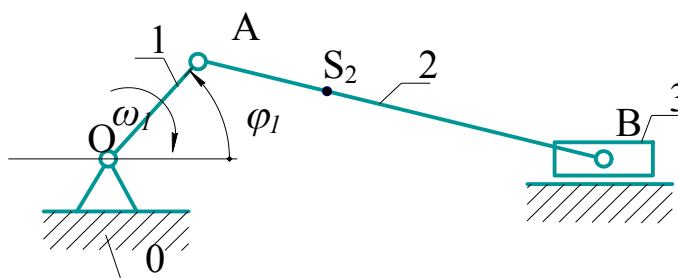


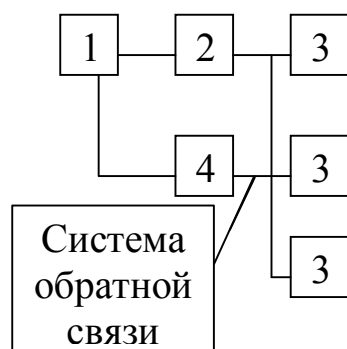
## 1.1 Практика №1. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ

Рассмотрим в качестве примера кривошипно-ползунный механизм (рис. 1.1), который лежит в основе двигателей внутреннего сгорания поршневых компрессоров и насосов, ковочных машин и прессов и т.д. Несмотря на специфические требования, они все имеют одинаковые зависимости, описывающие их структуру, геометрию, кинематику и динамику, что и является предметом изучения курса ТММ.



Р и с . 1.1. Пример плоского механизма с низшими парами

Схема машины:



- 1 – двигатель
- 2 – передаточный механизм
- 3 – исполнительный механизм
- 4 – регулятор

В качестве передаточного механизма используют фрикционные, цепные и зубчатые передачи.

Основными элементами механизма являются звенья и кинематические пары. *Звеном* называется одно или несколько жестко соединенных твердых тел, входящих в состав механизма. Основные типы звеньев механизмов представлены в прил. 1. Звенья разделяются на входные и выходные. Входное звено – звено, которому сообщается

движение, преобразуемое механизмом в требуемые движения других звеньев. Выходное звено – звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен механизм. Звенья могут быть упругими (пружины, мембраны), гибкими (ремни, цепи, канаты), жидкими и газообразными (масло, вода, воздух). *Кинематической парой* называется подвижное соединение двух звеньев. Звенья пары могут соприкоснуться по поверхностям, линиям и точкам. В зависимости от этого пары называются высшими (касание по линии или точке) и низшими (касание по поверхности). Существование пар обеспечивается условиями замыкания, сохраняющими постоянство контактов звеньев. Замыкание бывает геометрическим (обычно низшие пары) и силовым. Различают пары плоские, когда относительное движение звеньев происходит в параллельных плоскостях, и пространственные.

Основные виды механизмов – это рычажные, зубчатые и кулачковые. Рычажный механизм – это механизм, звенья которого образуют только вращательные, поступательные, цилиндрические и сферические пары. Зубчатый механизм (зубчатая передача) – передаточный механизм, в котором подвижными звеньями являются зубчатые колеса, образующие со стойкой или водилом вращательные или поступательные пары. Кулачковый механизм – механизм, в состав которого входит кулачок. Кулачок имеет рабочую поверхность переменной кривизны и образует с взаимодействующим с ним звеном высшую пару.

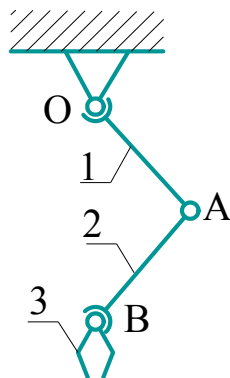
Кинематической цепью называют связанную систему звеньев, образующую кинематические пары. Открытая цепь – та, в которой имеются звенья, входящие в одну кинематическую пару (рис. 1.2).

Замкнутая цепь – это цепь, у которой все звенья входят не менее чем в две пары. Механизм представляет собой частный вид кинематической цепи, у которой одно звено обращено в стойку, а движение выходных звеньев вполне определяется заданным движением входных (исключение для механизмов манипуляторов). Механизмы бывают пространственные и плоские; рычажные, когда звенья образуют лишь низшие пары; шарнирные, когда имеются лишь вращательные

пары. Кинематические цепи разделяют на классы в зависимости от числа условий связи, налагаемых на относительное движение двух звеньев. Тело в пространстве имеет шесть степеней свободы. Если обозначить число связей налагаемых кинематической парой через  $U$ , то

$$W = 6 - U, \quad (1.1)$$

где  $W$  – относительное число степеней свободы двух звеньев.



Р и с. 1.2. Механизм манипулятора

Кинематические пары обозначаются как  $P_1, P_2, \dots, P_5$ , т.е. пары 1, 2, ..., 5 классов. Примеры различных кинематических пар представлены в табл. 1.2.

Степень свободы пространственных кинематических цепей определяется по формуле Малышева (1923):

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6n - \sum_{i=1}^5 i \cdot P_i, \quad (1.2)$$

где  $n$  – число подвижных звеньев.

Степень подвижности плоской кинематической цепи подсчитывается по формуле Чебышева (1869):

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3n - \sum_{i=4}^5 (i-3)P_i. \quad (1.3)$$

Примечание: на плоскости существуют только пары 4 и 5 классов, причем пары 5 класса являются низшими, т.е. касание звеньев происходит по поверхности. Это могут быть вращательные и поступательные пары. Каждая низшая пара  $p_{nn}$  накладывает два условия связи, а высшая  $p_{en}$  одно.

Формула (1.3) верна лишь для статически определимых систем.

Согласно формуле Чебышева плоский кривошипно-ползунный механизм (рис. 1.1) имеет степень подвижности  $W = 1$ . За счет погрешностей при изготовлении и сборке возможны натяги в кинематических парах и деформации звеньев, т.е. возникают избыточные контурные связи  $q$ , число которых можно определить, если рассматривать механизм как пространственный. В рассмотренном механизме

$$q = W - 6n + 5p_5 = 1 - 6 \cdot 3 + 5 \cdot 4 = 3.$$

Для исключения этих трех избыточных связей следует применять более подвижные цилиндрические и сферические кинематические пары. Например, если пару в т.А представить как цилиндрическую, а в т. В как сферическую, то  $q = 1 - 6 \cdot 3 + 5 \cdot 2 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 0$ , и механизм становится статически определимым.

Часто при структурном и кинематическом анализе плоский механизм рассматривают лишь с низшими парами, используя замену высших пар на низшие. Правило следующее: любая высшая кинематическая пара может быть заменена одним дополнительным звеном с двумя низшими парами, причем, длина этого звена равна суммарному радиусу кривизны сопряженных поверхностей высшей пары. Составляя схему нового механизма, конструктор должен в самой начальной стадии проектирования правильно выбрать ее структуру, убедиться в ее работоспособности. Структурный синтез проводится без определения размеров звеньев и базируется на учении о кинематических парах, степенях свободы кинематических цепей.

В 1911 году профессор Л.В. Ассур дал рациональную классификацию плоских механизмов, которая позволила все плоские механизмы разбить на классы, для которых возможны единые методы кинематических и динамических расчетов. Согласно методике Ассура и уточнению И.И. Артоболевского любой механизм может быть получен путем подсоединения к базовым (звено со стойкой) групп Ассура. Основное свойство группы – равенство степени подвижности нулю. Базовые механизмы отнесены к первому классу (турбины, электродвигатели, цилиндр с поршнем...). Согласно формуле (1.3) при  $W_{zp} = 0$  соотношение звеньев и низших кинематических пар следующее:

$n$	2	4	6
$p_{нп}$	3	6	9
Кл.	2	3	4

Класс механизма определяется по наиболее высокому классу групп Ассура, входящих в механизм.

Основной прием структурного анализа механизма состоит в том, что от механизма (начиная от выходного звена) отсоединяется простейшая группа Ассура (диада), т.е. два звена и три кинематические пары, после чего оставшаяся часть должна составлять замкнутую кинематическую цепь. В противном случае нужно отсоединять более сложные группы. Операцию повторяют до тех пор, пока не останутся базовые механизмы, а их количество равно степени подвижности механизма. Различные виды групп Ассура и примеры механизмов, получающихся при их присоединении к базовому механизму, представлены в табл. 1.1. Порядком группы является число кинематических пар, которыми группа подсоединяется к механизму.

Таблица 1.1

### Классификация кинематических пар

Наименование пары	Класс пары	Подвижность	Схема пары	Условные обозначения
Точечная	1	5		
Линейная	2	4		
Плоская	3	3		

Наименование пары	Класс пары	Подвижность	Схема пары	Условные обозначения
Сферическая	3	3		
Цилиндрическая	4	2		
Винтовая	5	1		
Поступательная	5	1		
Вращательная	5	1		

Таблица 1.2

**Примеры различных видов групп Ассра**

Класс	Пор	Вкл	Схема	И	Р	Пример механизма
2	2	1		2	3	
		2		2	3	

Класс	Пор	Вкл	Схема	И	Р	Пример механизма
		3		2	3	
		4		2	3	
		5		2	3	
3	3	1		4	6	
	4	1		6	9	
4	2	1		4	6	

### Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен механизм?
2. Какая кинематическая цепь является механизмом?
3. Что такое шатун?
4. Что является кинематической парой?
5. Какая кинематическая пара относится к 5-му классу?
6. Какая кинематическая пара относится к 1-му классу?
7. Какая кинематическая пара является плоской?

8. Какая кинематическая пара является низшей?
9. Сколько неподвижных звеньев в 6-звенном механизме?
10. Чему равна степень подвижности группы Ассура?
11. Чему равна степень подвижности группы начальных звеньев, состоящей из стойки и одного подвижного звена?
12. Чем определяется класс группы Ассура?
13. Чем определяется порядок группы Ассура?
14. Чем определяется класс и порядок механизма по классификации Л.В. Ассура?



## 1.2. Пример структурного анализа рычажного механизма

**Задание 1.** Для кривошипно-ползунного рычажного механизма (рис. 1.3), выполнить: построить (в выбранном масштабе) механизм в заданном положении; построить 8 последовательных положений механизма, начиная от заданного; построить график перемещения ведомого звена 3 (за начало отчета принять заданное положение); выполнить структурный анализ механизма; для заданного положения механизма определить линейные скорости и ускорения всех точек, в том числе и центров тяжести звеньев, а также угловые скорости и ускорения звеньев механизма; определить массу и вес звеньев; определить силы инерции звеньев и моменты сил инерции; определить реакции в кинематических парах; определить уравновешивающую силу и момент этой силы на ведущем звене, выполнить проверку уравновешивающей силы методом рычага Жуковского.

Дано:  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $AB = 100$  мм,  $BC = 200$  мм,  $n_1 = 100$  об/мин,  $F_{BH} = 250$  Н,  $m_1 = 10$  кг,  $m_2 = 20$  кг,  $m_3 = 10$  кг.

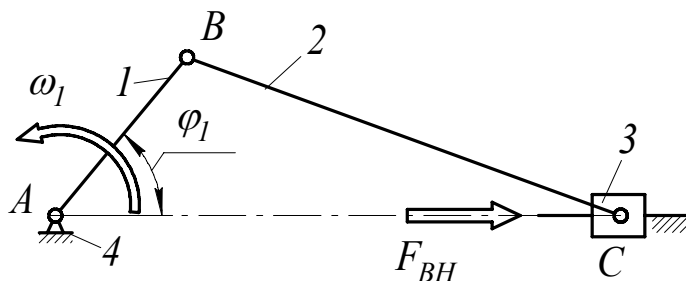


Рис. 1.3. Схема кривошипно-ползунного рычажного механизма

### Решение.

1. С помощью масштаба длин  $\mu_l$  строим механизм в заданном угловом положении (рис. 1.4), откладывая угол  $\varphi_1$  от горизонтали в сторону вращения звена 1.

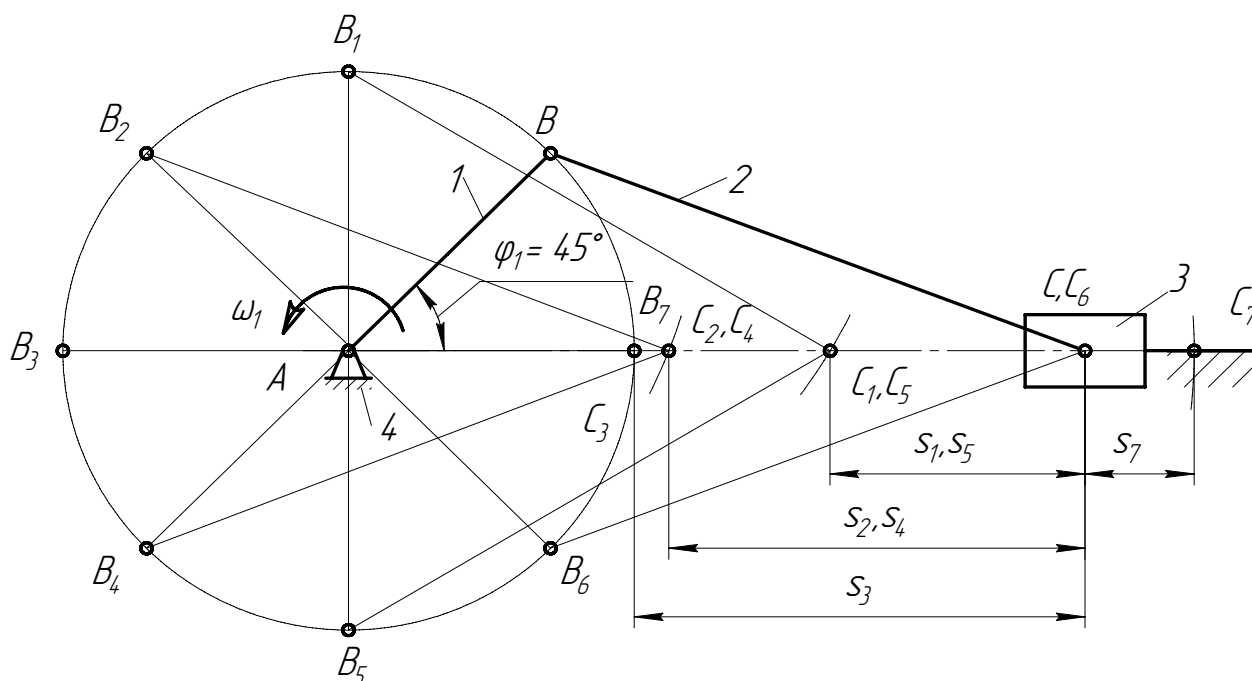


Рис. 1.4. Механизм в заданном положении и его 8 последовательных положений

Радиусом  $AB$  из точки  $A$  строим окружность (траектория движения точки  $B$ ), которую разбиваем на 8 равных частей от заданного положения звена  $I$  в сторону его вращения. Таким образом получаем точки  $B_1, B_2, \dots, B_7$ . Далее радиусом  $BC$  последовательно из точек  $B_1, B_2, \dots, B_7$  делаем засечки на горизонтальной линии  $AC$  и получаем точки  $C_1, C_2, \dots, C_7$ . Соединяя последовательно соответствующие точки, получаем 8 последовательных положений механизма.

Измеряя перемещения точки  $C$  ( $S_1, S_2, \dots, S_7$ ) строим график перемещения звена  $3$  за цикл движения механизма (рис. 1.5). При этом условно считаем перемещения влево от заданного отрицательными.

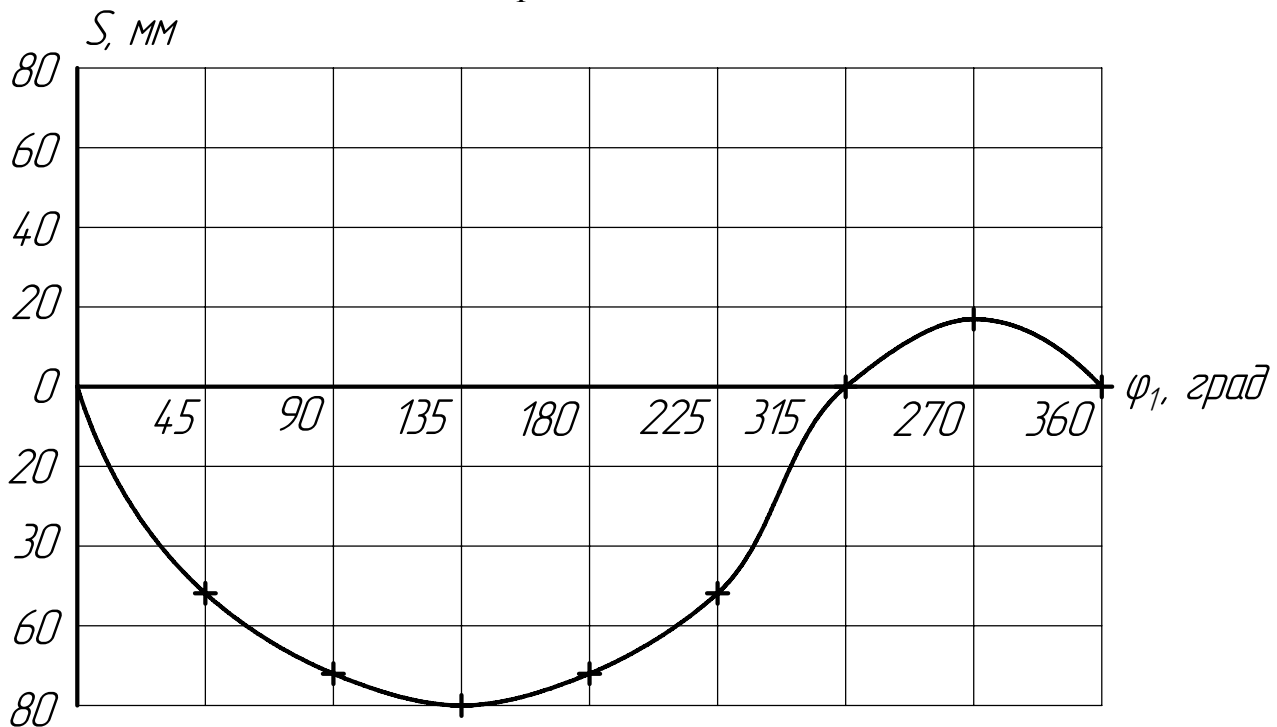


Рис. 1.5. График перемещения ведомого звена 3

2. Выполняем структурный анализ механизма и результаты заносим в таблицу 1.3

Звено 1 - кривошип (подвижное);

звено 2 - шатун (подвижное);

звено 3 - ползун (подвижное);

звено 4 - стойка (неподвижное).

Кинематическая пара А (вращательная), образуют звенья 3 и 1;

кинематическая пара В (вращательная), образуют звенья 1 и 2;

кинематическая пара С (вращательная), образуют звенья 3 и 3;

кинематическая пара С (поступательная), образуют звенья 3 и 4.

Все кинематические пары пятого класса.

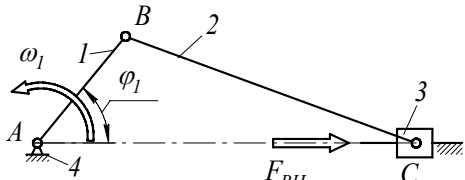
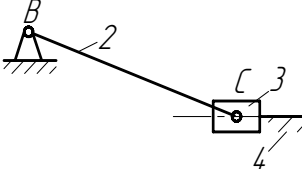
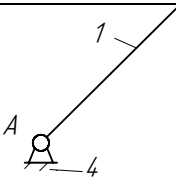
Определяем степень подвижности механизма.

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1,$$

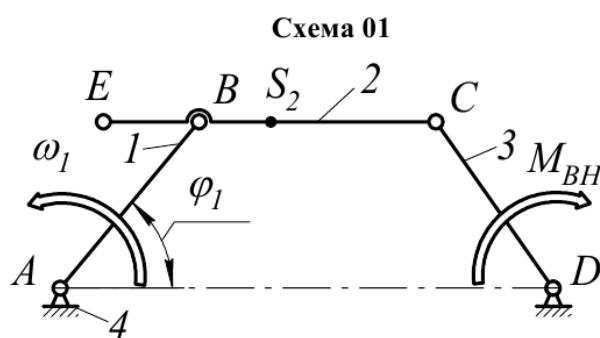
где  $n$ -число подвижных звеньев,  $p_5$ -число кинематических пар 5-го класса,

$p_4$ -число кинематических пар 4-го класса.

Таблица 1.3

Группа	Структурная схема	Класс	Вид
1 - 4 Механизм	 $W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 0 = 1$	2	-
2 - 4 Группа Ассура	 $W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 - 0 = 0$	2	2
4 - 1 Начальный механизм	 $W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 - 0 = 1$	1	-

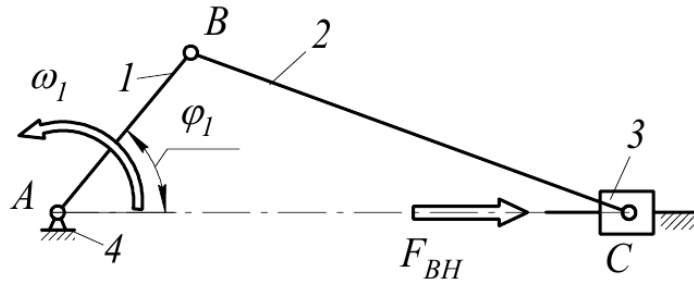
В качестве примера выполнить структурный анализ любого из представленных механизмов по второму варианту.



$$CS_2 = 0,5EC$$

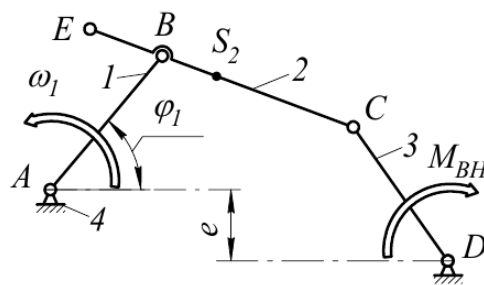
Параметры	В а р и а н т ы				
	1	2	3	4	5
φ <sub>1</sub> , град.	0	60	90	180	270
AB, мм	70	100	70	80	80
BC, мм	120	150	200	200	120
BE, мм	30	40	50	80	100
CD, мм	80	110	100	90	100
AD, мм	120	150	220	200	130
n <sub>1</sub> , об./мин	1000	-1000	-1500	2000	3000
M <sub>BH</sub> , Н м	40	60	50	80	30

Схема 02



Параметры	В а р и а н т ы				
	1	2	3	4	5
$\varphi_1$ , град.	40	160	90	0	120
AB, мм	75	110	100	150	80
BC, мм	150	250	200	350	120
$n_1$ , об./мин	100	200	300	400	500
$F_{BH}$ , Н	40	80	100	150	50

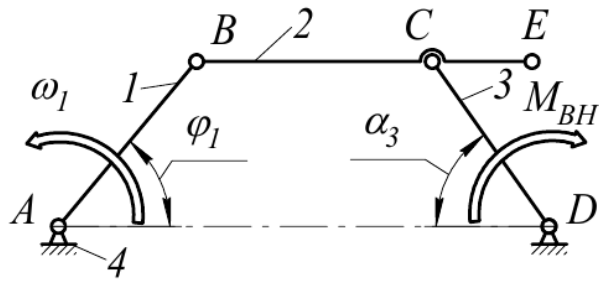
Схема 03



$$CS_2 = 0,5EC$$

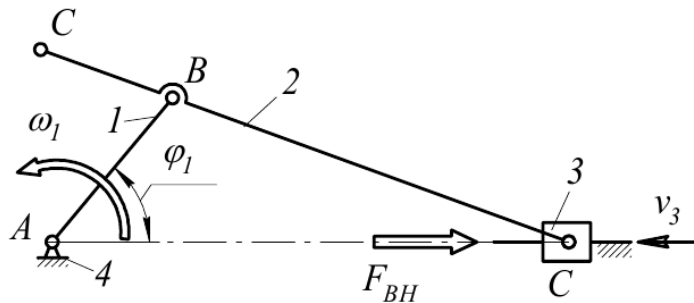
Параметры	В а р и а н т ы				
	1	2	3	4	5
$\varphi_1$ , град.	45	60	0	120	150
AB, мм	70	100	120	150	80
BC, мм	110	150	210	300	120
CD, мм	80	110	130	160	100
AD, мм	120	150	220	300	130
e, мм	10	20	30	5	0
$n_1$ , об./мин	2000	-1500	-500	1000	300
$M_{BH}$ , Н м	40	60	50	80	30

Схема 04



Параметры	В а р и а н т ы				
	1	2	3	4	5
$\varphi_1$ , град.	45	60	0	120	150
AB, мм	70	100	120	150	80
BC, мм	125	150	220	300	130
CE, мм	100	80	50	60	30
CD, мм	80	110	130	160	100
AD, мм	120	150	220	300	130
$n_1$ , об./мин	2000	-1500	-500	1000	300
$M_{BH}$ , Н м	30	50	50	80	100

Схема 05



Параметры	В а р и а н т ы				
	1	2	3	4	5
$\varphi_1$ , град.	50	0	190	30	10
AB, мм	45	140	100	250	180
BE, мм	45	80	50	100	30
BC, мм	150	250	200	350	120
$n_1$ , об./мин	200	250	380	450	600
$F_{BH}$ , Н	45	70	120	100	65