

Министерство образования и науки Челябинской области  
Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение  
**«Южно-Уральский государственный технический колледж»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**  
**ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**  
**по ПМ 04** Осуществление текущего мониторинга состояния систем автоматизации

**МДК 04.02 Организация работ по устранению неполадок и отказов**  
**автоматизированного оборудования**

для студентов специальности по  
**15.02.14** Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств  
(по отраслям)

Челябинск, 2021 г.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Методические рекомендации по выполнению практических работ по ПМ.04 «Осуществление текущего мониторинга состояния систем автоматизации» предназначены для обучающихся по специальности 15.02.14 Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям).

Практические работы являются важным элементом учебной дисциплины. На практических занятиях студенты овладевают первоначальными профессиональными умениями и навыками, которые в дальнейшем закрепляются и совершенствуются в процессе курсового проектирования, учебной и производственной (по профилю специальности и преддипломной) практики. Наряду с формированием умений и навыков в процессе практических занятий обобщаются, систематизируются, углубляются и конкретизируются теоретические знания, вырабатывается способность и готовность использовать теоретические знания на практике, формируются элементы общих и профессиональных компетенций.

Программой профессионального модуля ПМ.04 предусмотрено выполнение 10 практических работ, направленных на формирование элементов следующих компетенций:

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

ПК 4.3. Составлять схемы специализированных узлов, блоков, устройств и систем автоматизации.

ПК 4.4. Рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

ПК 4.5. Оценивать и обеспечивать эргономические характеристики схем и систем автоматизации.

*формирование умений:*

- составлять типовую модель АСР (автоматической системы регулирования) с использованием информационных технологий;

*обобщение и систематизацию знаний:*

- назначение функциональных блоков модулей мехатронных устройств и систем, определение исходных требований к мехатронным устройствам путем анализа выполнения технологических операций;

- технические характеристики, принципиальные электрические схемы;

- основы автоматизированного проектирования технических систем.

Описание каждой практической работы содержит:

- номер работы;

- наименование;

- цель;

- теоретическое изложение необходимого материала;

- варианты заданий;

- порядок выполнения и оформления работы;
- контрольные вопросы.

Отчеты студентов по практическим работам должны содержать:

- номер работы;
- наименование;
- цель;
- задание в соответствии с вариантом;
- расчеты;
- ответы на контрольные вопросы;
- вывод.

Титульный лист отчета оформляется в соответствии с приложением А. Для получения дополнительной, более подробной информации по основным вопросам учебной дисциплины в конце методических рекомендаций приведен перечень информационных источников.

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

№ работы	Тема	Наименование работы	Часы
1		Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при	2

	Тема 2.2. Проектирование мехатронных модулей и мехатронных систем	незначительных энергетических нагрузках	
2		Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при значительных энергетических нагрузках	2
3		Расчет преобразователей движения	6
4	Тема 2.3. Аналитическое моделирование мехатронных систем	Построение математической модели объекта. Построение графа системы и нахождение передаточной функции системы.	10
5	Тема 2.5. Принцип построения схем управления и сигнализации	Анализ и описание схемы электрической принципиальной управления двигателем	2
6		Анализ и описание схемы электрической принципиальной сигнализации	2
7		Анализ и описание схем многопозиционных переключателей	2
8		Анализ и описание схемы электрической принципиальной управления нагревательной установкой	4
9		Анализ и описание схемы электрической принципиальной электропривода контроллерного управления двигателями крана	4
10		Анализ и описание схемы электрической принципиальной электропривода контакторного управления двигателями крана	6
		Итого:	40

## Практическая работа №1

### Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при незначительных энергетических нагрузках

**Цель работы:** Освоение методики расчета универсального мехатронного модуля при незначительных механических нагрузках.

## 1. Теоретическое обоснование

Исходными данными для расчета являются:

- структурная схема мехатронного модуля;
- приложенная внешняя нагрузка;
- требуемая скорость выходного звена.

1) Для мехатронного модуля (ММ) поступательного движения требуемую мощность двигателя, Вт, определяют по формуле

$$P = \frac{F_f v_{\text{вых}} \hat{E}_{\text{эф}}}{\eta}, \quad (1.1)$$

где  $F_f$  - усилие сопротивления на выходном звене, Н;

$v_{\text{вых}}$  - линейная скорость выходного звена, м / с;

$\eta$  – коэффициент полезного действия;

$K_{\text{дин}} = 1,1 \dots 1,3$  – коэффициент запаса, учитывающий влияние динамических нагрузок в период разгона и торможения.

2) Для мехатронного модуля (ММ) вращательного движения требуемую мощность двигателя, Вт, определяют по формуле

$$P = \frac{T_f \omega_{\text{вых}} \hat{E}_{\text{эф}}}{\eta}, \quad (1.2)$$

где  $\hat{O}_f$  - момент сопротивления на выходном звене, Н·м;

$\omega_{\text{вых}}$  - угловая скорость выходного звена, с<sup>-1</sup>.

3) Так как двигатели одной и той же мощности имеют разные номинальные вращающие моменты  $\hat{O}_{\text{н}}$ , то необходимо определить требуемый момент двигателя, Н·м:

$$\hat{O}_{\text{дв}} = \frac{\hat{O}}{i \cdot \eta}, \quad (1.3)$$

где  $i$  - передаточное отношение преобразователя движения.

4) Тип двигателя выбирают по каталогам, исходя из условий:

$$P_d \geq P$$

$$T_{\text{ном}} \geq T_{\text{д. тр}}$$

## 2. Задание.

Выполнить расчет ММ, выбрать двигатель. Варианты заданий представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры ММ.

Параметры	Варианты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$v_{\text{âüö}}, \text{м/с}$	15	12	10	6	-	-	-	-
$F_f, \text{Н}$	12	16	8	20	-	-	-	-
$\eta$	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,98	0,98
$u$	20	50	80	120	1	2	4	5
$\omega_{\text{âüö}}, \text{с}^{-1}$	-	-	-	-	150	120	100	80
$\dot{O}_f, \text{Н} \cdot \text{м}$	-	-	-	-	0,80	0,16	1,6	2,8

## 3. Контрольные вопросы

- 1) Перечислите основные составляющие ММ.
- 2) Какие двигатели применяют при конструировании ММ?
- 3) Какой тип двигателя считают наиболее сложным в управлении?

## Практическая работа №2

### Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при значительных энергетических нагрузках

**Цель работы:** Освоение методики расчета универсального мехатронного модуля при значительных механических нагрузках.

## 1. Теоретическое обоснование

Исходными данными для расчета являются:

- структурная схема мехатронного модуля;
- приложенная внешняя нагрузка  $M_n$  ( $F_f$  или  $T_n$ );
- требуемая скорость выходного звена (линейная  $v_{\text{вых}}$  или угловая  $\omega_{\text{вых}}$ );
- момент инерции  $J_n$  (масса  $m_n$ ) объекта управления;
- требуемое ускорение  $E_{\text{вых}}$  (угловое  $\varepsilon_{\text{вых}}$  или линейное  $a_{\text{вых}}$ ).

Длительность разгона и торможения значительно меньше периода установившегося движения, поэтому динамические нагрузки оказывают влияние на работу двигателя очень короткий промежуток времени. Поэтому мощность двигателя можно определить по известной методике.

1) Для мехатронного модуля (ММ) поступательного движения требуемую мощность двигателя, Вт, определяют по формуле

$$P = \frac{F_f v_{\text{вых}} \hat{E}_{\text{вых}}}{\eta}, \quad (2.1)$$

где  $F_f$  - усилие сопротивления на выходном звене, Н;

$v_{\text{вых}}$  - линейная скорость выходного звена, м / с;

$\eta$  – коэффициент полезного действия;

$K_{\text{дин}} = 1,1 \dots 1,3$  – коэффициент запаса, учитывающий влияние динамических нагрузок в период разгона и торможения.

2) Для мехатронного модуля (ММ) вращательного движения требуемую мощность двигателя, Вт, определяют по формуле

$$P = \frac{T_f \omega_{\text{вых}} \hat{E}_{\text{вых}}}{\eta}, \quad (2.2)$$

где  $\hat{O}_f$  - момент сопротивления на выходном звене, Н·м;

$\omega_{\text{вых}}$  - угловая скорость выходного звена, с<sup>-1</sup>.



3) Влияние динамических нагрузок на величину момента двигателя может быть значительным, поэтому необходимо определить требуемый момент двигателя с учетом динамических нагрузок, Н·м:

$$\dot{O}_{\ddot{a}\ddot{o}\ddot{\theta}} = \frac{\dot{O}_f + \dot{O}_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{t}}}{\dot{e} \cdot \eta}, \quad (2.3)$$

где  $\dot{O}_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{t}}$  - динамический момент, вызванный ускоренным движением вращающихся частей ММ и объекта управления, приведенный к выходному звену, Н·м, равный

$$\dot{O}_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{t}} = (J_{\ddot{A}} u^2 + J_{\ddot{I}\ddot{A}} + J_f) \varepsilon_{\ddot{a}\ddot{u}\ddot{o}}, \quad (2.4)$$

где  $J_{\ddot{A}}$  - момент инерции ротора двигателя, кг·м<sup>2</sup>;

$J_{\ddot{I}\ddot{A}}$  - момент инерции вращающихся частей преобразователя движения, кг·м<sup>2</sup>, равный

$$J_{\ddot{I}\ddot{A}} \approx (0,1 \dots 0,3) J_{\ddot{A}} u^2;$$

$J_f$  - момент инерции объекта управления, кг·м<sup>2</sup>.

$u$  - передаточное отношение преобразователя движения.

4) Тип двигателя выбирают по каталогам, исходя из условий:

$$P_d \geq P$$

$$T_{\text{ном}} \geq T_{\text{д. тр}}$$

$$T_{\text{д. max}} \geq T_{\text{д. тр max}},$$

где  $T_{\text{д. max}}$  - максимальный момент двигателя, задается в стандартах. При отсутствии данных приближенно можно принимать  $T_{\text{д. max}} \approx (2,0 \dots 2,2) T_{\text{ном}}$ .

## 2. Задание.

Выполните расчет ММ, выберите двигатель. Варианты заданий представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры ММ.

Параметры	Варианты
-----------	----------

	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{\dot{a}\dot{u}\dot{o}}$ , м/с	15	12	10	6	-	-	-	-
$F_f$ , Н	12	16	8	20	-	-	-	-
и	20	50	80	120	1	2	4	5
$J_{\ddot{A}} \cdot 10^{-3}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,14	0,18	0,06	0,4	0,608	0,245	0,91	0,23
$\omega_{\dot{a}\dot{u}\dot{o}}$ , с <sup>-1</sup>	-	-	-	-	150	120	100	80
$\dot{O}_f$ , Н·м	-	-	-	-	0,80	0,16	1,6	2,8

### 3. Контрольные вопросы.

- 1) Как определяется динамический момент ММ?
- 2) Из каких условий выбирается двигатель?

## Практическая работа №3

### Расчет преобразователя движения

**Цель работы:** Освоение алгоритмов расчета преобразователей движения в механизмах металлорежущих станков.

#### 1. Теоретическое обоснование

Передача движения от двигателя к выходному звену мехатронного модуля может быть обеспечена с помощью различных преобразователей движения (передат), структура и конструктивные особенности которых зависят от типа двигателя, вида перемещения выходного звена и их расположения (компоновки). Преобразователи движения предназначены для преобразования одного вида движения в другое, согласования скоростей и вращающих моментов двигателя и выходного звена. Для преобразования движения используют винтовые, реечные, цепные, тросовые и иные передачи. Так как электродвигатели в основном высокооборотные, а рабочие скорости выходных звеньев мехатронных модулей сравнительно невелики, то для согласования скоростей используются понижающие передачи (редукторы): зубчатые цилиндрические и конические, червячные планетарные, волновые.

Реечная передача предназначена для преобразования вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки и наоборот.

Зубчато-реечные передачи относятся к механизмам для преобразования вращательного движения в поступательное и состоят из двух основных элементов: зубчатой рейки и реечной шестерни. Основными параметрами зубчато-реечной передачи являются модуль рейки и число зубьев реечной шестерни.

В токарных станках зубчато-реечная передача применяется для преобразования вращательного движения, передаваемого на реечную шестерню от коробки передач через ходовой вал и механизм фартука, в поступательное движение станка. Реечная шестерня, закрепленная на валу фартука, входит в зацепление с зубчатой рейкой, закрепленной на станине, что обеспечивает поступательное движение суппорта станка по продольным направляющим (рисунок 3.1).

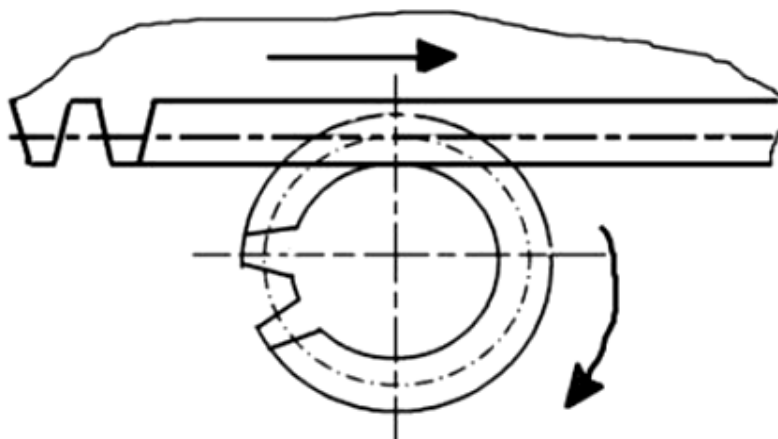


Рисунок 3.1 – Зубчато – реечная передача.

Основными параметрами зубчато – реечной передачи являются модуль рейки и число зубьев реечной шестерни. Уравнение кинематического баланса, связывающее движение шпинделя и движение суппорта (за один оборот шпинделя суппорт перемещается на величину подачи):

$$1 \text{ об.шп.} \times C_{\text{кц}} \times i_v \times \pi \times m \times Z_{\text{ш}} = S, \quad (3.1)$$

где  $C_{\text{кц}}$  – постоянная кинематической цепи;

$i_v$  – передаточное отношение регулирующего звена;

$m$  – модуль реечного колеса, мм;

$Z_{ш}$  – число зубьев приводной реечной шестерни;

$S$  – подача суппорта, мм/об.

Кинематическая схема станка представляет собой условное изображение взаимосвязанных отдельных механизмов, участвующих в передаче движений различным исполнительным органам. Передачи, связывающие вращение двух соседних валов, образуют группу (элементарную коробку) передач. Порядок чередования групп в передаче выражает структурная формула:

$$Z_{\bar{a}\bar{o}} = Z_{x1} \times Z_{x2} \times \dots \times Z_{xn}, \quad (3.2)$$

где  $Z$  – число передач в группе;

$i$  – передаточное отношение;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – кинематические характеристики групп передач.

Для кинематических расчетов коробок скоростей применяется графоаналитический метод. Сущность метода состоит в условном изображении валов, их частот вращения, передач и их передаточных отношений в виде структурных сеток и графиков частот вращения. Структурная сетка дает представление о количестве передач между валами, знаменателе и диапазоне регулирования элементарных коробок, последовательности включения передач для обеспечения ряда частот включения шпинделя. Структурная сетка характеризует закономерности изменения передаточных отношений в групповых передачах при изменении частот вращения шпинделя по геометрическому ряду.

Показатели для анализа структурной сетки:

1) Симметричность и веерообразность расположения лучей.

Симметричность структурной сетки может быть обеспечена в том случае если

произведение максимального и минимального передаточного отношения равно 1, т.е.  $i_{\min} \cdot i_{\max} = 1$ .

2) Количество передач равное 2, 3, 4.  $Z_{\text{гр}} = 2, 3, 4$ .

3) Уменьшение количества передач в группах, при приближении к шпинделю:  $Z_{x0} > Z_{x1} > Z_{x2} \dots > Z_{xm}$

4) Увеличение характеристик переборных групп от основной к последней переборной:  $X_0 < X_1 < \dots < X_m$ .

5) Диапазон регулирования

$$R = \varphi^{X_m (Z_m - 1)} \leq [R], \quad (3.3)$$

где  $X_{III}$  – кинематическая характеристика последней переборной группы;

$Z_{III}$  – число передач в последней переборной группе;  $[R] = 8$ .

График частот вращения является видоизмененной структурной сеткой и показывает действительные значения частотных передаточных отношений передач и частот вращения валов. График частот вращения валов строится в соответствии с кинематической схемой привода и структурной сеткой. Анализ графиков частот вращения производится по следующим условиям:

Наибольшая возможная частота вращения первично вала.

Уменьшение передаточного отношения в группах по мере приближения к шпинделю.

Для ограничения размеров зубчатых колес и радиальных габаритов коробок скоростей нормами станкостроения установлены пределы передаточных отношений:  $i_{\min} \geq 0,25$ ,  $i_{\max} \leq 2$ ,

что соответствует диапазону регулирования

$$R = \frac{i_{\max}}{i_{\min}} = \frac{2}{0,25} = 8 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

Передаточные отношения, удовлетворяющие тому условию возможны в том случае, если число полей между линиями, условно обозначающие передачи, при выбранном  $\phi$  не превышает указанное в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Максимальное число полей, допускаемое для пересечения линиями передач на структурном графике.

Передачи	Число интервалов (показатель степени $\phi$ )				
	$\phi = 1,12$	$\phi = 1,26$	$\phi = 1,41$	$\phi = 1,58$	$\phi = 1,76$
Понижающая	12	6	4	3	2
Повышающая	6	3	2	1	1

## 2.Задание.

1) Определите значение модуля рейки для получения заданной величины подачи суппорта токарного станка, который перемещается в продольном направлении с подачей  $S$ . Варианты заданий представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Варианты заданий.

Вариант	$S$ мм/об	$i_p$	$i_r$	$i_{кп}$	$i_\phi$	$Z_{ш}$
1	0,150	0,66	0,625	0,10	0,04	12
2	0,150	0,70	0,500	0,10	0,04	16
3	0,200	0,66	0,625	0,10	0,04	18
4	0,200	0,70	0,500	0,10	0,03	20
5	0,340	0,66	0,625	0,10	0,04	14
6	0,340	0,66	0,400	0,10	0,03	12
7	0,300	0,66	0,625	0,10	0,04	16
8	0,300	0,65	0,500	0,15	0,02	14
9	0,124	0,66	0,625	0,10	0,04	18
10	0,124	0,50	0,500	0,10	0,03	20

$i_p$  – передаточное отношение механизма реверса;

$i_r$  – передаточное отношение гитары сменных колес;

$i_{кп}$  – передаточное отношение коробки передач;

$i_\phi$  – передаточное отношение фартука.

2) Составьте структурную формулу, изобразите кинематическую схему, постройте структурную сетку, график частот вращения. Проведите анализ с точки зрения оптимальности структуры коробки по заданным показателям:

- число передач в группе;
- расположение передач;
- диапазон регулирования;
- пределы передаточных отношений.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные.

Вариант	Z	$\varphi$	Структура
1	7	1,41	Простая
2	8	1,41	Простая
3	9	1,58	Сложенная
4	10	1,26	Простая
5	11	1,26	Простая
6	12	1,41	Простая
7	14	1,26	Простая
8	15	1,26	Простая
9	16	1,26	Простая
10	7	1,41	Простая

### 3.Контрольные вопросы

- 1) Какое преобразование движений выполняет зубчато-реечная передача?
- 2) Основные элементы зубчато-реечной передачи?
- 3) Каково назначение зубчато – реечной передачи в токарном станке?

## Практическая работа №4

### Построение математической модели объекта. Построение графа системы и нахождение передаточной функции системы.

**Цель работы:** Освоение методики построения модели объекта и графа системы управления системы.

#### 1. Теоретическое обоснование

Модель – создаваемое человеком подобие изучаемых объектов: макеты, изображения, схемы, словесные описания, математические формулы, карты и т.д.

Модель можно определить как физическую или математическую конструкцию, определенным образом отражающую объект и служащую для его изучения.

Модель является заменителем реального объекта, обладающим, по крайней мере, двумя свойствами:

- она отражает те свойства объекта, которые существенны для данного исследования;
- всегда проще объекта.

Одним из эффективных методов реализации идеи компонентного моделирования на нижнем уровне (уровне энергетических доменов) является метод графов связей. Метод графов связей относится к группе топологических методов, т.е. методов, использующих графическое представление исследуемого объекта. Он позволяет на единой методологической базе моделировать объекты, содержащие элементы различной физической природы – электрические, механические, электромеханические, гидравлические, пневматические и т.д.

#### *Основные определения графов связей.*

Метод графов связей (ГС) или связанных графов основан на представлении о том, что любые физические процессы состоят из элементарных актов преобразования энергии. Такими элементарными процессами являются накопление энергии, диссипация (потери) энергии и преобразование энергии без потерь, метод ГС



демонстрирует известное единство природы и протекающих в ней физических процессов.

*Граф связей* представляет собой совокупность элементов, соответствующих основным типам преобразования энергии и изображаемых в качестве вершин графа, соединенных связями (дугами графа).

Связь изображается в графе линией с полустрелкой, показывающей принимаемое при моделировании за положительное направление передачи энергии. Для каждой связи в графе определены шесть величин, три из которых являются интегральными.

Каждый элемент характеризуется уравнением или системой уравнений относительно переменных относящихся к его связям.

#### *Переменные связей*

Основными переменными связей являются усилие  $e(t)$  и поток  $f(t)$ . Эти величины являются функциями времени и называются переменными мощности связи. Остальные четыре переменные вычисляются через основные по формулам:

1) мощность

$$N(t) = e(t) \cdot f(t); \quad (4.1)$$

2) энергия

$$E(t) = E(t_0) + \int_{t_0}^t N(\tau) d\tau; \quad (4.2)$$

3) перемещение

$$q(t) = q(t_0) + \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau; \quad (4.3)$$

4) момент

$$p(t) = p(t_0) + \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau. \quad (4.4)$$

Величина  $E(t) - E(t_0)$  – полезная энергия, передаваемая через связь в направлении, определенном полустрелкой.

### *Интерпретация переменных связей*

Некоторые интерпретации переменных связей в системах различной физической природы приведены в таблице 4.1. Нетрудно проверить, что произведение усилия на поток в каждом случае дает мощность. Принятые в таблице 4.1 способы интерпретации переменных не единственно возможные. Можно назвать ток в электрических системах усилием, а напряжение – потоком. Соответственно изменятся и интерпретации момента и перемещения. В этом проявляется дуальность графа.

Таблица 4.1- Интерпретация переменных графов связей

Переменные	Системы			
	электрические	механические поступательные	механические вращательные	гидравлические
Усилие $e(t)$	Напряжение $u(t)$	Сила $F(t)$	Момент силы $M(t)$	Давление $P(t)$
Поток $f(t)$	Ток $i(t)$	Скорость $v(t)$	Угловая скорость $\omega(t)$	Расход $Q(t)$
Момент $p(t)$	Потокоцепление $\psi(t)$	Импульс силы $p(t) = \int F dt$	Кинетический момент $H(t)$	Импульс давления
Перемещение $q(t)$	Заряд $q(t)$	Перемещение $x(t)$	Угол поворота $\varphi(t)$	Объем $V(t)$

### **Типовые элементы графа связей**

Элементы графа связей делятся на 4 группы:

- 1) источники энергии;
- 2) аккумуляторы энергии;
- 3) элементы потери энергии;
- 4) преобразователи энергии без потерь.

В первую группу входят два идеальных источника энергии (рисунок 4.1, *a*, *b*): **источник усилия**, обозначаемый как *SE*, и **источник потока**, имеющий обозначение *SF*. Источник усилия задает значение

$$e = e(t), \quad (4.5)$$

а источник потока

$$f = f(t). \quad (4.6)$$

В электрических системах этим элементам соответствуют, очевидно, идеальные источники ЭДС и тока. Легко устанавливаются аналогии и в системах иной природы. В соответствии со смыслом источников энергия выходит из них, что и отражается направлением полустрелок на связях источников.

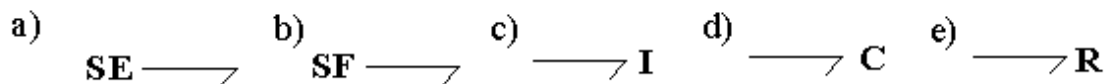


Рисунок 4.1 - Односвязные элементы:  
*a* – источник усилия; *b* – источник потока;  
*c* – инерционность; *d* – емкость; *e* –потери

Группа аккумуляторов тоже включает два элемента: **инерционность** *I* и **емкость** *C* (рисунок 4.1, *c*, *d*). Взаимосвязь между усилиями и потоками для аккумуляторов может быть задана уравнениями:

$$p = \Phi_I(f) \quad (4.7)$$

для инерционности и

$$q = \Phi_C(e) \quad (4.8)$$

для емкости.

Если рассматривать линейные модели, то уравнения аккумуляторов можно записать в виде:

$$I \frac{df}{dt} = e(t), \quad (4.9)$$

$$C \frac{de}{dt} = f(t), \quad (4.10)$$

где для обозначения параметров аккумуляторов  $I$  и  $C$  используются те же буквы, что и в обозначениях элементов.

Аккумуляторы различаются тем, что инерционность имеет свойство накапливать кинетическую энергию, а емкость – потенциальную.

В третью группу входит один **элемент потерь**  $R$ , для которого в общем случае

$$e(t) = \varphi_R(f(t)). \quad (4.11)$$

В простейшем случае уравнению (2.11) соответствует линейное уравнение

$$e(t) = R f(t), \quad (4.12)$$

где  $R$  – параметр элемента.

Четвертая группа включает 4 преобразователя энергии: трансформатор, гиратор, узел общего усилия и узел общего потока.

*Трансформатор*  $TF$  (рисунок 4.2) преобразует энергию в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= m e_2(t); \\ f_2(t) &= m f_1(t), \end{aligned} \quad (4.13)$$

где  $m$  – коэффициент передачи трансформатора.



Рисунок 4.2 - Трансформатор:

$a$  – с постоянным коэффициентом;  $b$  – модулированный

Нетрудно увидеть, что мощности в обеих связях трансформатора равны

$$e_1 f_1 = e_2 f_2.$$

Примерами трансформаторов являются редуктор, трансформатор переменного тока, рычаг. Трансформатор может иметь переменный коэффициент передачи, зависящий как от времени, так и от некоторой другой переменной. Такой трансформатор называется модулированным и обозначается как МТФ.

Гиратор  $GY$  можно получить из трансформатора, если в одной из его связей поменять местами усилие и поток. Уравнения гиратора имеют вид:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= r f_2(t); \\ f_2(t) &= r e_1(t), \end{aligned} \quad (4.14)$$

где  $r$  – коэффициент передачи гиратора.

Гиратор, как и трансформатор, сохраняет мощность, т.е.

$$e_1 f_1 = e_2 f_2.$$

Гираторы тоже могут быть модулированными и изображаются, как это показано на рисунок 4.3.

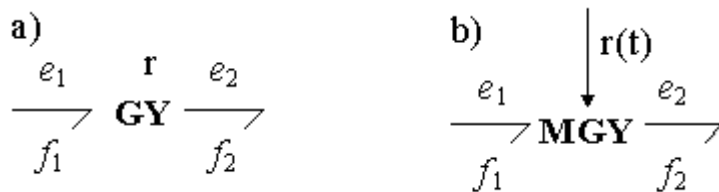


Рисунок 4.3 - Гиратор:

$a$  – с постоянным коэффициентом;  $b$  – модулированный

Отметим, что свойствами гиратора обладает, например, гироскоп, а в радиоэлектронике известно применение специальных устройств, называемых гираторами, с целью замены индуктивностей емкостями.

Гираторы и трансформаторы могут отображать преобразование энергии одной физической природы, а могут отображать также преобразование механического движения в электрическое, электрического в магнитное и т.п.

Узел общего усилия (0-узел) может иметь любое количество связей (рисунок 4.4).

Узел получил свое название потому, что усилия во всех его связях равны

$$e_1 = e_2 = e_3 = \dots e_n. \quad (4.15)$$

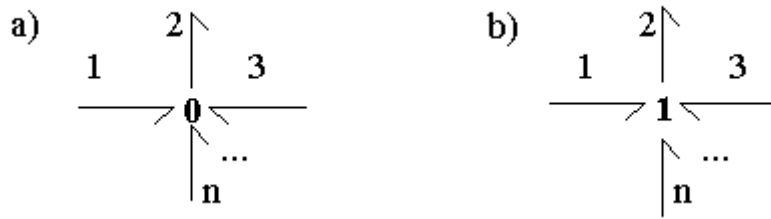


Рисунок 4.4 - Узлы графа связей:

*a* – узел общего усилия (0-узел); *b* – узел общего потока (1-узел)

При этом алгебраическая сумма потоков в связях узла равна нулю:

$$f_1 - f_2 + f_3 + \dots + f_n = 0. \quad (4.16)$$

Учитывая (4.15) и (4.16), можно получить закон сохранения энергии в 0-узле:

$$e_1 f_1 - e_2 f_2 + e_3 f_3 + \dots + e_n f_n = 0. \quad (4.17)$$

Узел общего потока (1-узел) во всем подобен узлу общего усилия, если поменять местами усилия и потоки. Таким образом, для 1-узла:

$$f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n = 0; \quad (4.18)$$

$$e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n = 0, \quad (4.19)$$

$$e_1 f_1 + e_2 f_2 + e_3 f_3 + \dots + e_n f_n = 0. \quad (4.20)$$

Знаки слагаемых в (4.19) и (4.20) определяются направлением полустрелок в связях.

Узлы общего усилия и потока отображают два возможных способа разветвления или суммирования потоков энергии в физических системах.

### **Физическая интерпретация основных элементов графов связей**

Примеры физической интерпретации элементов ГС для электрических и механических систем представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Элементы ГС

Электрические системы		Механические системы	
Элемент ГС	Физическое устройство, эффект	Элемент ГС	Физическое устройство, эффект
$SE$	Источник ЭДС	$SE$	Источник силы, момента
$SF$	Источник тока	$SF$	Источник скорости
$R$	Активное сопротивление	$R$	Вязкое трение
$I$	Индуктивность	$I$	Масса, момент инерции
$C$	Емкость	$C$	Пружина
$TF$	Трансформатор	$TF$	Редуктор, рычаг
$GY$		$GY$	Гироскоп
0-узел	Параллельное соединение электрических цепей	0-узел	Подвижное соединение элементов
1-узел	Последовательное соединение элементов	1-узел	Жесткое соединение элементов

### *Моделирование электрических систем на графах связей*

Аналогии между элементами ГС и электрическими элементами очевидны. Поэтому правила построения графа связей для электрических цепей могут быть получены на основе простых рассуждений.

*Первое правило* касается отображения в ГС электрических двухполюсников. Для примера на рисунке 4.5 показано прохождение электрической мощности через резистор. При этом часть входной мощности  $N_1$  проходит через резистор (мощность  $N_2$ ), а часть  $N_3$  теряется в форме рассеиваемого тепла. Поскольку токи в выводах резистора равны, т.е.

$$f_1 = f_2,$$

то разветвление мощности отражается в ГС узлом общего потока. Потери мощности отображаются элементом потерь  $R$ . Весь узел с элементом потерь описывается уравнениями

$$\begin{aligned} f_1 &= f_2 = f_3, \\ e_1 - e_2 - e_3 &= 0, \\ e_3 &= Rf_3. \end{aligned}$$

Подобные рассуждения могут быть проведены и для других электрических двухполюсников: источников ЭДС и тока, индуктивности и емкости. Во всех случаях двухполюсники представляются в ГС 1-узлом и соответствующим односвязным элементом ГС: источником усилия  $SE$  или потока  $SF$ , инерционности  $I$ , емкости  $C$ .

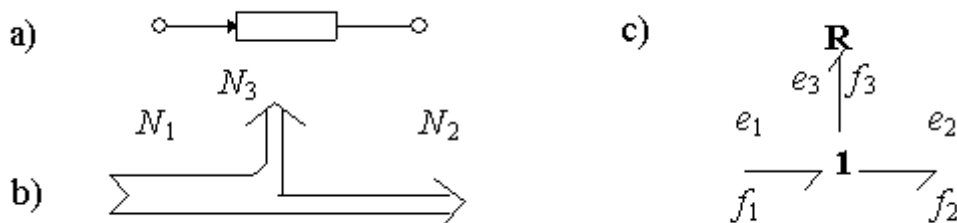


Рисунок 4.5. Потоки мощности в резисторе:  
 $a$  – резистор как двухполюсник;  $b$  – потоки мощности в резисторе;  
 $c$  – граф резистора

*Второе правило*, проиллюстрированное на рисунке 4.6, устанавливает соответствие между узлом электрической цепи и его отображением в графе. Поскольку электрический потенциал всех входящих в узел проводников одинаков, а сумма токов в узле равна нулю, то узел электрической цепи отображается в ГС узлом общего усилия.



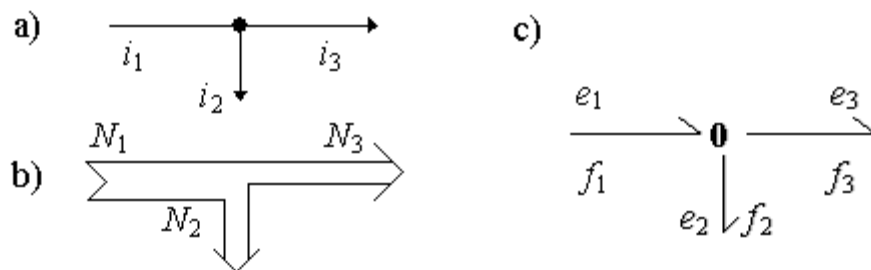


Рисунок 4.6 - Поток мощности в узле электрической схемы

На рисунке 4.7 представлен пример простой электрической схемы и соответствующий ей граф связей.

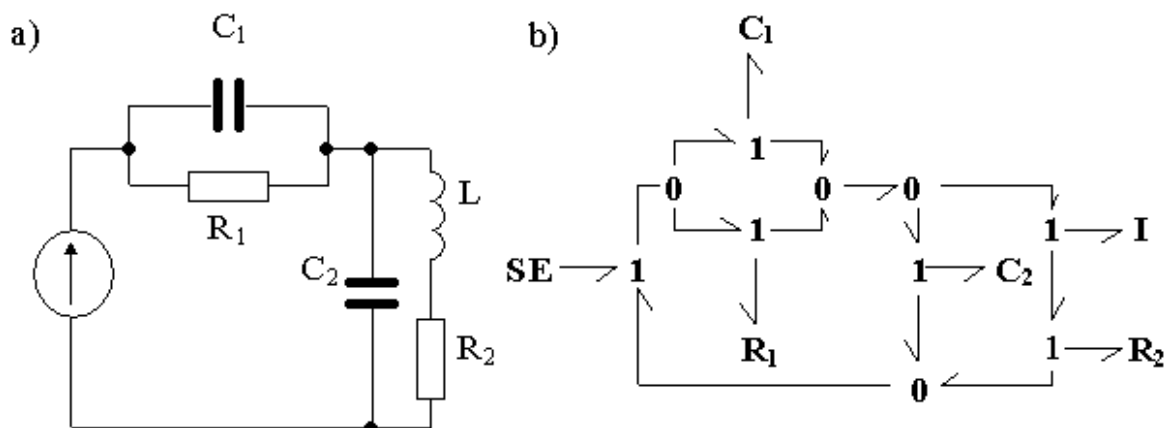


Рисунок 4.7 - Граф связей электрической цепи:  
 а – электрическая цепь; б – граф электрической цепи

### Эквивалентные преобразования графов связей

Одним из достоинств ГС является возможность эквивалентных преобразований, позволяющих упростить граф.

Некоторые из этих преобразований графов приведены в таблице 4.3.

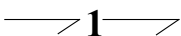

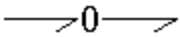

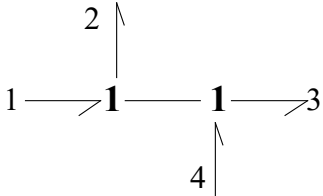
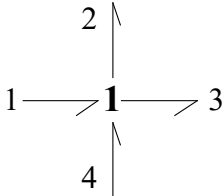
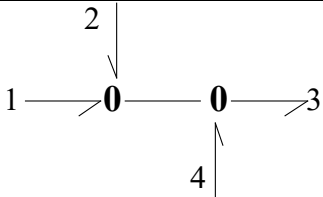
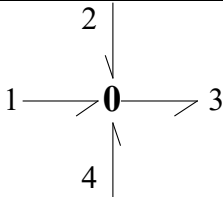
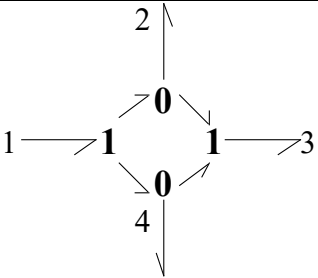
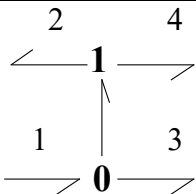
Первые две строки таблицы показывают, что можно исключить из графа узел с двумя связями при условии, что направление мощности в узле не меняется.

Строки 3 и 4 иллюстрируют, что два связанных узла одного типа можно заменить одним. Следствием из этого свойства является возможность переставлять

местами узлы одного типа вместе с их связями. Менее очевидные эквивалентные преобразования, показанные в пятой и шестой строках таблицы, заменяют четырехугольник из 0-узлов и 1-узлов на два узла, заметно упрощая граф. В таблице показано только два варианта направления связей четырехугольника из многих, для которых такое преобразование имеет место.

Последние две строки таблицы демонстрируют изменение направления связей, которое может производиться одновременно для всех связей узла. Это свойство можно обобщить и на другие, более сложные структуры графа. Все указанные в таблице 4.3 эквивалентные преобразования легко доказываются с использованием уравнений (4.15) – (4.19).

Таблица 4.3 – Преобразования структуры гравфа.

	Исходный граф	Результат
1		
2		
3		
4		
5		

6		
7		
8		

Следует отметить, что направление любой связи в графе, кроме односвязных элементов и трансформаторов, может быть изменено на противоположное. Такое преобразование не является эквивалентным, но допустимо, так как соответствующее изменение знаков некоторых потоков и усилий бывает обычно безразличным.

Одно из важных эквивалентных преобразований, не приведенное в таблице 4.3, справедливо только для ГС электрических цепей. Оно состоит в исключении из графа одного из 0-узлов вместе со всеми его связями и объясняется линейной зависимостью уравнений суммирования потоков, записанных для всех 0-узлов. Это свойство следует из особенности электрических цепей, при расчетах которых тоже не записывается закон Кирхгофа для одного из узлов схемы.

Применим рассмотренные преобразования к графу, построенному на рисунке 4.7, *b*: исключим нижний 0-узел из графа. Оставшаяся его часть показана на рисунке 4.8, *a*. Теперь в получившемся графе можно преобразовать «четырехугольник», а после этого исключить лишние 1-узлы в связях элементов  $SE$ ,  $C_2$  и  $R_2$ . Результат преобразований приведен на рисунке 4.8, *b*.

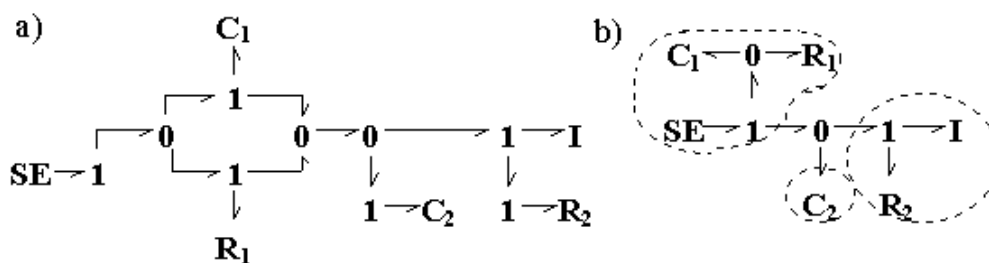


Рисунок 4.8. - Эквивалентные преобразования графа связей

Тот же результат может быть получен проще, если в исходном графе исключить другой 0-узел, а точнее – сразу два связанных 0-узла, разорвав, таким образом, одновременно два четырехугольника графа. В оставшемся графе (рисунок 4.9) теперь достаточно изменить направление всех связей нижнего 0-узла и исключить лишние 1-узлы.

Несмотря на значительные «потери» в количестве связей, граф, полученный на рисунке 4.8, *b*, полностью отражает все свойства исходной электрической схемы. Весьма интересное свойство ГС состоит в том, что каждый 0-узел соединяет графы параллельных частей схемы, а каждый 1-узел связывает модели последовательных участков. Поэтому 0-узел можно назвать узлом параллельного соединения, а 1-узел – узлом последовательного соединения. Для иллюстрации этого свойства на рисунке 4.8, *b* штриховой линией обведены три части графа, связанные 0-узлом. Нетрудно убедиться в том, что этим частям в схеме действительно соответствуют параллельные цепи. Каждый 0-узел и 1-узел позволяет увидеть свой вариант топологии схемы.

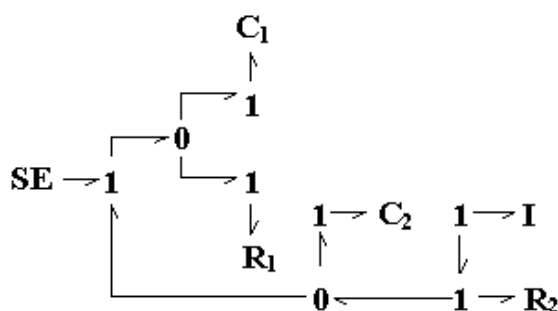


Рисунок 4.9 - Другой вариант эквивалентных преобразований

Отмеченные интересные свойства узлов графа позволяют значительно сократить процедуру построения ГС электрических цепей. Во многих случаях, когда схема может быть представлена параллельно и последовательно соединенными компонентами, граф связей в конечном виде может быть построен сразу, без промежуточных этапов.

#### *Моделирование механических систем на графах связей*

При моделировании механических систем естественно интерпретировать усилие  $e$  как силу  $F$  в поступательном движении или момент силы  $M$  во вращательном движении, а поток  $f$  – как скорость (линейную  $v$  или угловую  $\omega$ ). Тогда уравнение инерционности представляет собой не что иное, как второй закон Ньютона

$$m \frac{dv}{dt} = F, \quad (4.21)$$

где  $m$  – масса поступательно движущегося тела, или

$$J \frac{d\omega}{dt} = M, \quad (4.22)$$

где  $J$  – момент инерции тела.

Узел общего потока (1-узел) идеально подходит для того, чтобы отобразить принцип Даламбера: равенство нулю суммы всех внешних сил и силы инерции (рисунок 4.10). Этот граф является, в сущности, моделью динамики тела с массой  $m$  под действием суммы сил, которые могут быть как активными внешними силами, так и реакциями связей с другими телами механической системы.

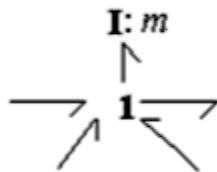


Рисунок 4.10 - Графическая интерпретация принципа Даламбера

Одновременно 1-узел можно использовать в качестве узла жесткого соединения твердых тел, при котором они, по существу, становятся единым телом.

Действительно, 1-узел – это узел общего потока, что в принятой терминологии соответствует общей (равной) скорости для всех связей 1-узла, а равенство скоростей означает движение двух тел как единого целого. Два эквивалентных графа на рисунке 4.11 иллюстрирует такую связь твердых тел с массами  $m_1$  и  $m_2$ . Граф, приведенный на рисунке 4.11, а, демонстрирует третий закон Ньютона о том, что действие равно противодействию. Действительно, сила  $F_c$  действует на оба тела, но с противоположным знаком.

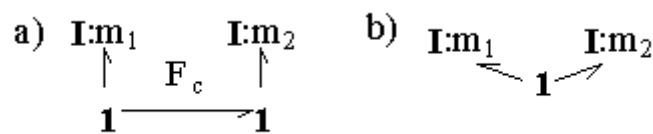


Рисунок 4.11 - Жесткое соединение тел.

В противоположность 1-узлу узел общего усилия (0-узел) можно считать узлом свободного соединения твердых тел. На рисунке 4.12 показано, что соединение двух тел через 0-узел позволяет каждому телу иметь свою скорость ( $v_1$  и  $v_2$  соответственно). При этом третья связь 0-узла характеризует относительное движение тел:

$$v_{\text{отн}} = v_2 - v_1. \quad (4.23)$$

Поэтому 0-узел можно использовать при моделировании упругих связей и трения, которые появляются лишь при наличии относительного движения двух тел.

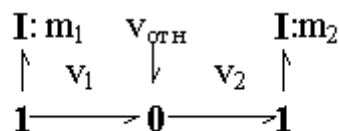


Рисунок 4.12 - Подвижное соединение тел

Рассмотрим физический смысл других элементов ГС, которые при моделировании механических систем связываются с 0-узлом.

Уравнение емкости для поступательного движения приобретает вид:

$$C \frac{dF}{dt} = v \quad (4.24)$$

Если его проинтегрировать, то можно получить привычную форму записи закона Гука

$$Kq = F, \quad (4.25)$$

где  $K = C^{-1}$  – жесткость пружины;

$C$  – податливость, т.е. величина, обратная жесткости;

$q = \int v dt$  – деформация пружины.

Учитывая свойства 0-узла, пружину можно представить графом, приведенным на рисунке 4.13, *a*.

0-узел необходим и для моделирования трения между двумя движущимися относительно друг друга твердыми телами (рисунок 4.13, *b*). Уравнение элемента потерь при вязком трении может иметь вид

$$R v_{\text{отн}} = F_{\text{тр}}, \quad (4.26)$$

где  $R$  – коэффициент вязкого трения.

В общем случае зависимость силы трения от скорости может быть и нелинейной. Узел общего усилия с элементом потерь может отражать не только естественно существующее трение, но и специально вводимые в некоторые механизмы устройства: демпферы, амортизаторы.

Подобно упругости и трению моделируются в механических системах источники энергии (рисунок 4.13, *c*). В большинстве случаев источник механического движения, воздействуя на некоторое тело, одновременно создает равное, но противоположное по знаку усилие на свою опору.

При моделировании реальных пружин иногда требуется учитывать потери энергии за счет внутреннего трения в материале пружины. Граф пружины с внутренним трением можно представить параллельно соединенными моделями идеальной пружины и демпфера (рисунок 4.13, *d*) или эквивалентным графом, который приведен на рисунок 4.13, *e*. Элементы  $C, R, SE, SF$  могут соединяться подобным образом в любых сочетаниях, кроме одновременного использования  $SE$  и  $SF$ .

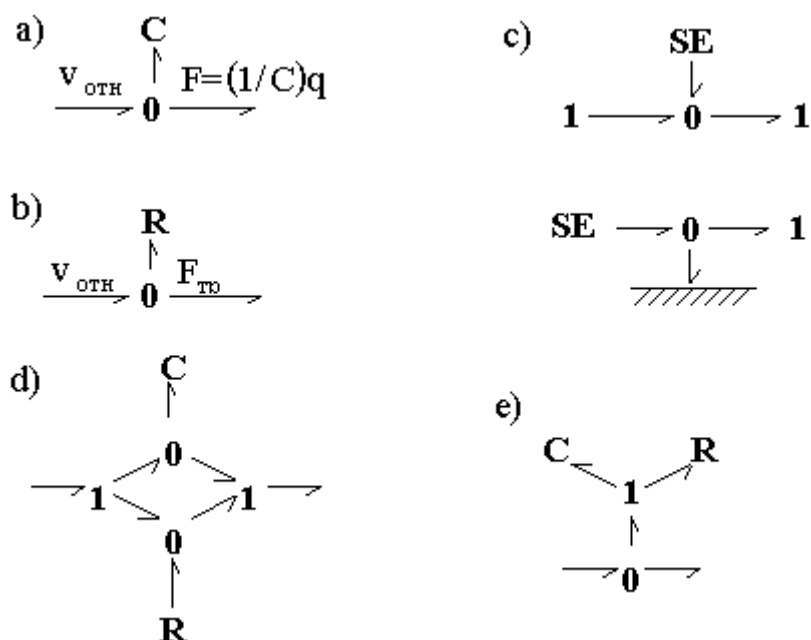


Рисунок 4.13 - Подвижное соединение твердых тел:  
*a* – идеальная пружина; *b* – источник механической энергии;  
*c* – демпфер; *d* – пружина с внутренним трением

Рассмотрим моделирование поступательного движения трех вагонеток, из которых две, массой  $m_2$  и  $m_3$ , жестко связаны друг с другом, а между первой и второй вагонетками упруго-вязкая связь. В колесных парах присутствует трение  $R_1, R_2, R_3$ . Вагонетки приводятся в движение человеком, который прикладывает к первой вагонетке силу  $F$ .

Источник усилия  $SE$  в исходном графе подключен через  $0$ -узел. В результате, человек прикладывает одно и то же усилие как к вагонетке, так и к



опоре, в данном случае, например, к Земле. Величина силы трения в колесных парах пропорциональна разности между скоростью вагонетки и скоростью опоры. Неподвижное основание тоже представляет собой твердое тело с очень большой массой и может быть представлено в графе 1-узлом с подключенной к нему инерционностью. Однако этот узел является узлом общего потока (скорости), принимаемого равным нулю. Поэтому связи с неподвижным основанием, а также все связи 1-узлов, соединенных с неподвижным основанием, имеют нулевую мощность и, следовательно, могут быть исключены из графа. Граф, полученный после эквивалентных преобразований, приведен на рисунке 4.14, *с*.

Свойство связей с неподвижным основанием в механических системах аналогично свойству связей с общей точкой (массой) в электрических системах. Различие состоит только в том, что в ГС электрической системы исключается 0-узел (узел общего нулевого потенциала). Получить полную аналогию можно было бы, применяя при моделировании механических систем дуальную интерпретацию: считать силу потоком, а скорость усилием. В этом случае инерционность  $I$  в графах заменяется на емкость  $C$ , 0-узлы на 1-узлы и наоборот. Однако вряд ли достоинства такого способа интерпретации оправдывают появляющиеся терминологические неудобства.

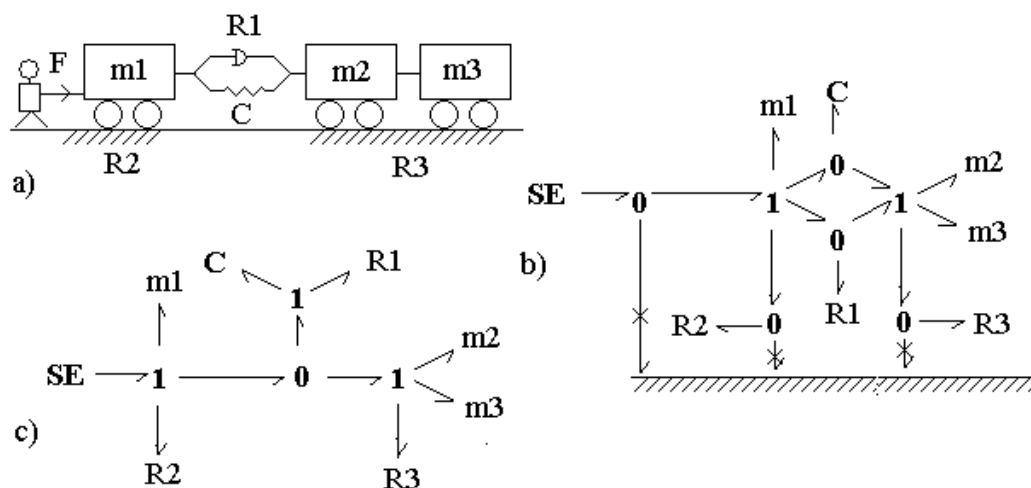


Рисунок 4.14 - Граф механической системы:  
*a* – кинематическая схема; *b* – исходный граф; *с* – упрощенный граф

Пример на рисунке 4.15 иллюстрирует моделирование вертикальных движений подвески автомобиля.

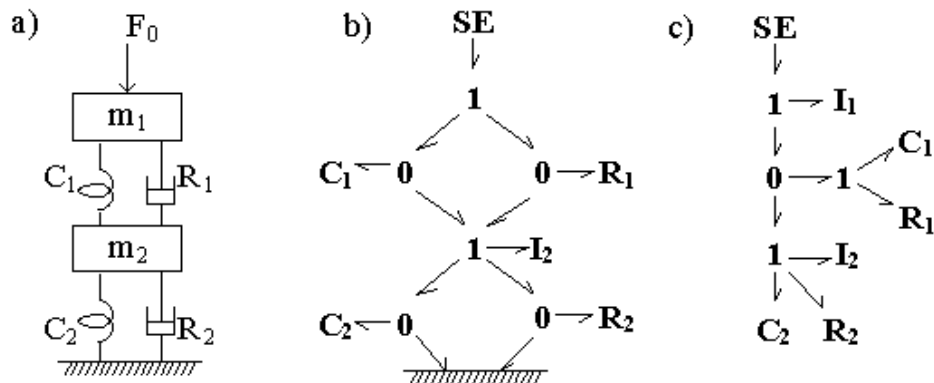


Рисунок 4.15 - Механическая система с поступательным перемещением.

Граф связей приведен на рисунок 4.15, *b*. Здесь предполагается, что источник усилия движется вместе с массой  $m_1$ . Это может быть сила инерции, либо, например, реактивный двигатель. Как и в предыдущем примере, модель *b* включает неподвижное основание, а в модели *c* это основание исключено со всеми своими связями.

Простой пример моделирования рычага представлен на рисунок 4.16. Сила  $F$  действует на массу  $m_1$ , а та, в свою очередь, через рычаг приводит в движение массу  $m_2$ . Обе массы движутся поступательно с трением. В данном случае рычаг моделируется с помощью элемента «Трансформатор».

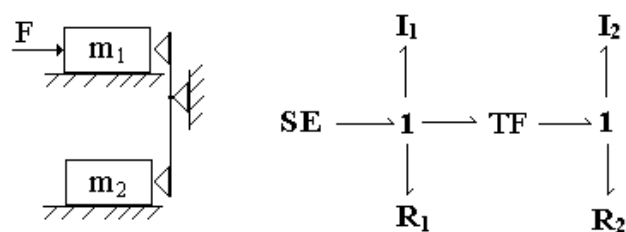


Рисунок 4.16 - Кинематическая схема и граф рычага

Рассмотренная методика моделирования одномерного поступательного движения механических систем может быть без труда распространена и на системы с вращательным движением. В этом случае роль силы  $F$  играет момент силы  $M$ , линейной скорости  $v$  – угловая скорость  $\omega$ , массы  $m$  – момент инерции  $J$  и т.д. В уравнениях (4.21)–(4.26) изменятся только обозначения и размерности переменных и констант.

Приведенный на рисунке 4.17 пример иллюстрирует построение ГС для узла передачи вращательного движения, включающего одну ступень редуктора с зубчатыми колесами и упругие валы

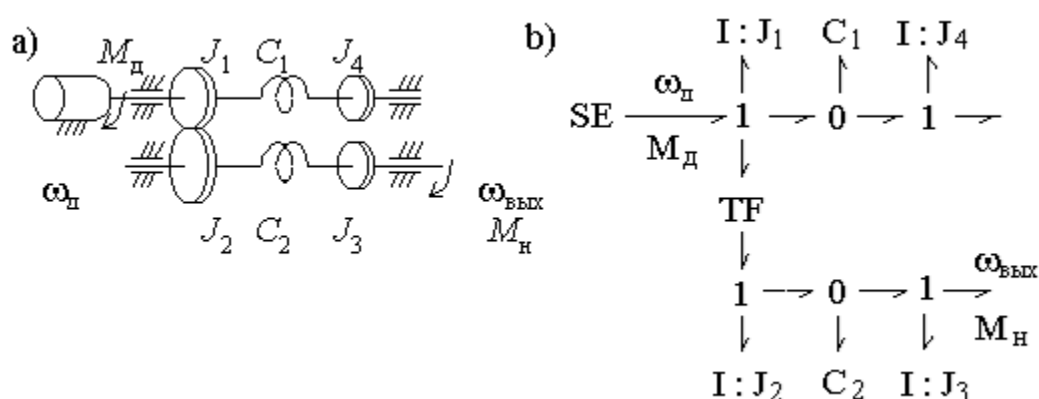


Рисунок 4.17- Механическая вращающаяся система.

Способ моделирования зубчатого соединения в рассмотренном примере справедлив, если основание неподвижно. В случае, когда редуктор установлен на подвижном основании, как показано на рисунке 4.18, а, ГС должен учитывать угловую скорость основания  $\omega_0$ .

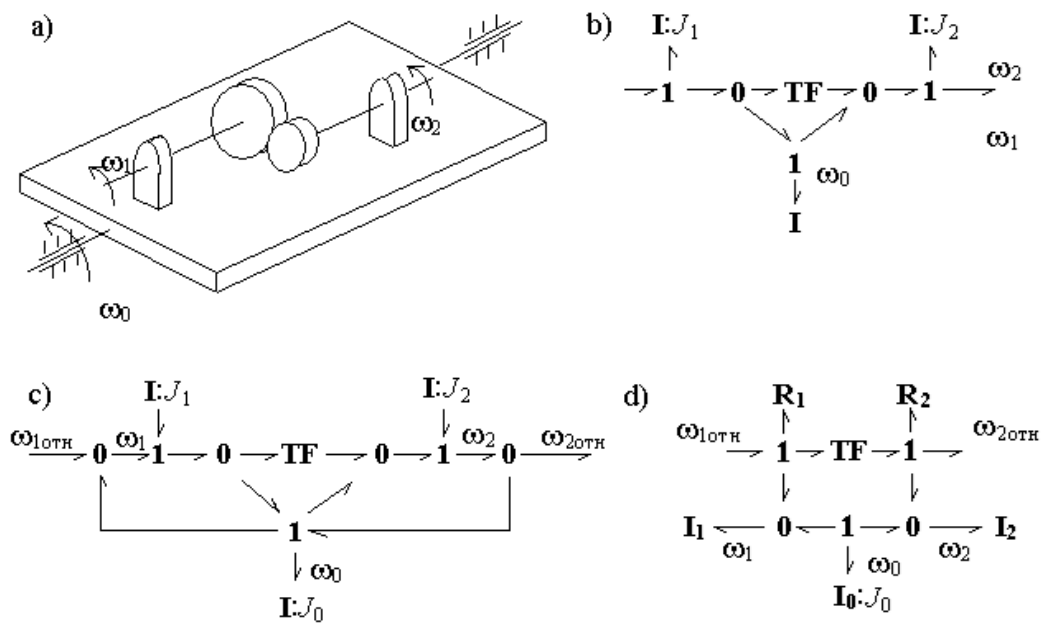


Рисунок 4.18 - Модель с подвижным основанием

Граф на рисунке 4.18, *b* показывает связь между абсолютными скоростями  $\omega_0$  и  $\omega_2$ , а граф на рисунке 4.18, *c* – связь между скоростями колес зубчатого соединения  $\omega_{1\text{отн}}$ ,  $\omega_{2\text{отн}}$  относительно основания. Последний граф можно преобразовать к более простому виду, приведенному на рисунке 4.18, *d*. Здесь дополнительно учтено также трение в опорах валов.

#### *Моделирование электромеханических систем*

Любая электромеханическая система с точки зрения преобразования энергии может быть представлена состоящей из трех частей: электрической Э, механической М и электромеханического преобразователя ЭМП (рисунок 4.19). Построение математической модели электромеханической системы можно таким образом свести к детальному моделированию каждой из трех частей.



Рисунок 4.19 - Электромеханическая система

В качестве достаточно простого примера рассмотрим построение графа связей двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В электрической части двигателя учтем индуктивное  $L_{\text{я}}$  и активное  $R_{\text{я}}$  сопротивления обмотки якоря, куда «уходит» часть входной электрической энергии. В графе связей это можно отобразить инерционностью  $I$  и элементом потерь, связанными в узле общего потока (тока). В механической части учтем только инерционность ротора  $J$ . Электромеханический преобразователь будем считать идеальным, без потерь преобразующим электрическую энергию в механическую. Среди элементов ГС роль идеального преобразователя могут выполнять только трансформатор и гиратор. Выбор из этих двух элементов определяется характером связи электрических и механических переменных. Если принять во внимание, что вращающий момент двигателя  $M_{\text{дв}}$  пропорционален току  $i_{\text{я}}$  в обмотке якоря, т.е. усилие в одной связи пропорционально потоку в другой связи, то выбор становится однозначным: электромеханический преобразователь ведет себя как гиратор.

Построенный практически без формул граф связей двигателя постоянного тока приведен на рисунок 4.20, *а*. Если для каждого 1-узла графа записать уравнения суммирования усилий, то получим:

$$\begin{aligned} L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} &= U_{\text{я}} - r \omega_{\text{дв}}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= r i_{\text{я}} - M_{\text{дв}}, \end{aligned} \quad (4.27)$$

где  $r$  – коэффициент передачи гиратора.

Полученные уравнения для многих приложений достаточно точно описывают процессы, протекающие в двигателе постоянного тока.

Более точная и полная модель такого двигателя представлена на рисунке 4.20, *б*. Здесь в механической части двигателя учтены неизбежные потери на трение, а в электромеханическом преобразователе – зависимость коэффициента  $r$  от магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого током  $i_{\text{в}}$  в обмотке возбуждения

$$r = k\Phi(i_B), \quad (4.28)$$

где  $k$  – конструктивный параметр, зависящий от количества пар полюсов и свойств якорной обмотки.

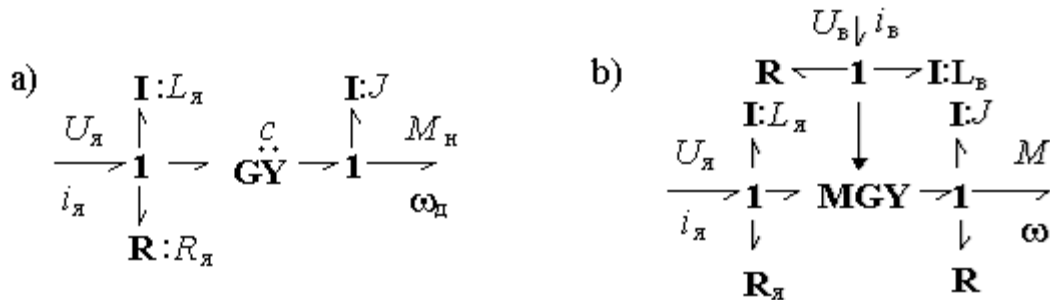


Рисунок 4.20 - Граф связей двигателя постоянного тока

В этой модели можно учесть также определяемую кривой намагничивания нелинейную зависимость индуктивности обмотки возбуждения  $L_B$  от тока  $i_B$ .

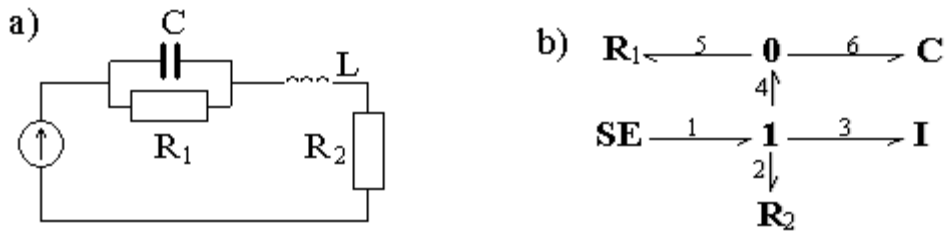
Важная особенность построенных моделей состоит в том, что в них явно не определены входы и выходы, что позволяет применять их для моделирования любых электрических машин постоянного тока, работающих как в двигательном, так и в генераторном режимах.

*Получение математической модели графа связей в форме системы уравнений.*

Самый простой способ построения математической модели проиллюстрируем на примере электрической схемы (рисунок 4.21, а), граф которой приведен на рисунке 4.21, б. Для этого пронумеруем все связи в графе и, обозначая в связи с номером  $i$  поток и усилие как  $f_i$  и  $e_i$ , соответственно, запишем компонентные уравнения каждого из элементов:

$$\begin{aligned} SE: \quad e_1 &= U_{\text{вх}}, & 0: \quad e_4 &= e_5 = e_6, \\ R_1: \quad R_1 f_5 - e_5 &= 0, & f_4 - f_5 - f_6 &= 0, \\ C: \quad C p e_6 - f_6 &= 0, & 1: \quad f_1 &= f_2 = f_3 = f_4, \\ I: \quad L p f_3 - e_3 &= 0, & e_1 - e_2 - e_3 - e_4 &= 0, \\ R_2: \quad R_2 f_2 - e_2 &= 0, & & \end{aligned} \quad (4.29)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования.



Рисунке 4.21 - Электрическая схема (а) и ее граф (б).

Примем начальные условия нулевыми. Тогда (4.29) удобнее рассматривать как систему операторных уравнений, где  $p$  – оператор Лапласа. В дальнейшем, в данной главе, будем придерживаться именно такой интерпретации символа  $p$ . Полученные 12 уравнений с 12 неизвестными могут быть записаны в матричной форме:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & R_1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Cp & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & Lp & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\
 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 e_1 \\ f_1 \\ e_2 \\ f_2 \\ e_3 \\ f_3 \\ e_4 \\ f_4 \\ e_5 \\ f_5 \\ e_6 \\ f_6
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 U_{BX} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0
 \end{bmatrix}
 \quad (4.30)$$

Решение системы уравнений (4.29) или (4.30) позволяет найти аналитические выражения для изображений всех потоков и усилий в графе.

Следует отметить, что матричная форма математической модели (4.30) более удобна при численном формировании и решении систем уравнений на ЭВМ. При обычном «ручном» моделировании решение может быть получено методом подстановок в (4.29). Например, для падения напряжения на резисторе  $R_2$ , последовательно исключая в (4.29) все переменные, кроме  $e_2$ , получим

$$e_2(p) = \frac{R_2(R_1 C_1 p + 1)}{R_1 L C p^2 + (L + R_1 R_2 C)p + R_1 + R_2} \cdot U_{\text{я}}(p).$$

### *Причинные отношения в графе связей*

Одной из чрезвычайно интересных и полезных особенностей ГС является возможность определения в нем вычислительной причинности. Чтобы пояснить суть этого термина, рассмотрим три формы записи одного и того же уравнения – закона Ома (элемента потерь графа связей):

$$U - Ri = 0; \quad (4.31)$$

$$U = Ri; \quad (4.32)$$

$$i = \frac{1}{R} U. \quad (4.33)$$

Первая формула представляет собой неявную запись закона, говорящую о том, что между током и напряжением существует взаимно однозначное соответствие.

Уравнения (4.32) и (4.33) не только задают закон Ома, но и показывают, как вычислить одну физическую величину через другую. Тем самым эти уравнения задают отношения причинности между переменными. В (4.32) причиной является ток  $i$ , а следствием – напряжение  $U$ . В (4.33), наоборот, напряжение  $U$  выступает как причина появления тока  $i$ . В реальной электронной схеме, как правило, не имеет смысла искать ответ на вопрос: что появляется раньше – напряжение или ток. Причинность может быть чаще всего только вычислительной, имеющей смысл при математическом моделировании. Причинность, а вместе с ней и форму зависимости между усилиями и потоками можно определить в графе связей. Она задается так называемой причинной



стрелкой – отрезком на одном из концов связи. На рисунке 4.22 показаны два возможных варианта причинности на связи, соединяющей 1-узел и элемент потерь. В первом варианте поток  $f$  является причиной, т.е. входной переменной элемента потерь, а усилие  $e$  является следствием или выходной переменной элемента потерь. Это дополнительно иллюстрируется на рисунке стрелками, наглядно показывающими вход и выход элемента  $R$ . Первому варианту соответствует уравнение

$$e = R f .$$

Альтернативному варианту, представленному на рисунке 4.22,  $b$ , соответствует уравнение

$$f = \frac{1}{R} e .$$

Здесь причиной для элемента  $R$  является усилие  $e$ , а следствием поток  $f$ .

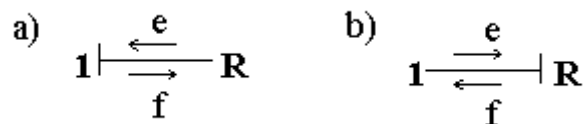


Рисунок 4.22- Варианты причинности:  
 $a$  – причинность по отношению к 1-узлу;  
 $b$  – причинность по отношению к  $R$

Причинность на рисунке 4.22 можно рассматривать не только по отношению к элементу потерь  $R$ , но и по отношению к 1-узлу. Тогда в первом варианте усилие  $e$  является причиной (входом) для 1-узла, а поток  $f$  – следствием (выходом) узла. Таким образом, каждая переменная является одновременно причиной (входом) для одного элемента, и следствием (выходом) для другого элемента.

Будем называть связь причинной по отношению к некоторому элементу, если причинная стрелка определяет в качестве входа этого элемента усилие  $e$ . Тогда связь на рисунке 4.22,  $a$  можно назвать причинной по отношению к 1-узлу, а связь на рисунке 4.22,  $b$  – причинной по отношению к элементу  $R$ .

Возможные варианты расстановки причинности на связях различных элементов представлены в таблице 4.4. Расстановка причинных отношений в графе подчиняется перечисленным ниже требованиям:

1) Причинность в связях источников энергии определяется типом источника. Для источника потока связь всегда должна быть причинной по отношению к источнику, а для источника усилия наоборот – причинной по отношению к узлу, с которым связан источник усилия.

2) Аккумуляторы подобно элементу потерь могут иметь оба варианта причинности. Один из вариантов соответствует интегральной причинности, другой дифференциальной – в соответствии с формой правой части уравнений аккумуляторов. Как это видно из таблицы 4.4, интегральной причинности соответствует причинность по отношению к элементу для инерционности  $I$  и причинность по отношению к узлу для емкости  $C$ .

3) Гиратор  $GY$  и трансформатор  $TF$  тоже могут иметь два варианта задания причинности. При этом трансформатор сохраняет направление причинности, а гиратор меняет направление причинности на противоположное.

4) 0-узел может иметь одну и только одну причинность по отношению к 0-узлу связь. В противоположность этому все связи, кроме одной, должны быть причинными по отношению к 1-узлу.

Перечисленные правила позволяют расставить причинные отношения в любом графе связей, причем, как правило, несколькими способами.

Правила расстановки причинных отношений в графе связей:

1) В первую очередь расставляются причинные отношения на связях источников энергии, поскольку они предопределены типами источников и не допускают свободы выбора.

2) Затем задаются причинности на связях аккумуляторов. Можно рекомендовать для всех аккумуляторов выбирать один тип причинности, например, интегральный.

3) Последовательно, в соответствии с правилами, расставляются причинные отношения на остальных связях графа. Если на этом этапе появляется

причинное противоречие, то можно вернуться к предыдущему пункту и изменить направление причинности у одного или нескольких аккумуляторов.

Варианты расстановки символов причинности в различных графах связей приведены в таблице 4.4.

Таблица 2.4 - Варианты расстановки символов причинности на ГС

	ГС	Уравнения	Представление в операторно-структурной схеме
1	$\text{SE} \xrightarrow{e} \vdash$	$e = e(t)$	$\xrightarrow{e}$
2	$\text{SF} \vdash \xrightarrow{f}$	$f = f(t)$	$\xrightarrow{f}$
3	$\vdash \xrightarrow{e} \text{R}$ $\xrightarrow{f}$	$e = R f$	$\xrightarrow{f} \boxed{\text{R}} \xrightarrow{e}$
4	$\xrightarrow{e} \vdash \text{R}$ $\xrightarrow{f}$	$f = \frac{1}{R} e$	$\xrightarrow{e} \boxed{\frac{1}{R}} \xrightarrow{f}$
5	$\vdash \xrightarrow{e} \text{C}$ $\xrightarrow{f}$	$e = \frac{1}{C} \int f dt$	$\xrightarrow{f} \boxed{\frac{1}{C_p}} \xrightarrow{e}$
6	$\xrightarrow{e} \vdash \text{C}$ $\xrightarrow{f}$	$f = C \frac{de}{dt}$	$\xrightarrow{e} \boxed{C_p} \xrightarrow{f}$
7	$\vdash \xrightarrow{e} \text{I}$ $\xrightarrow{f}$	$e = I \frac{df}{dt}$	$\xrightarrow{f} \boxed{I_p} \xrightarrow{e}$
8	$\xrightarrow{e} \vdash \text{I}$ $\xrightarrow{f}$	$f = \frac{1}{I} \int e dt$	$\xrightarrow{e} \boxed{\frac{1}{I_p}} \xrightarrow{f}$
9	$\vdash \xrightarrow{e_1} \text{TF} \xrightarrow{e_2} \vdash$ $\xrightarrow{f_1} \quad \quad \quad \xrightarrow{f_2}$	$f_2 = m f_1$ $e_1 = m e_2$	$\begin{array}{c} \xrightarrow{f_1} \boxed{m} \xrightarrow{f_2} \\ \xleftarrow{e_1} \boxed{m} \xleftarrow{e_2} \end{array}$

10		$e_2 = \frac{1}{m} e_1$ $f_1 = \frac{1}{m} f_2$	
11		$e_2 = r f_1$ $e_1 = r f_2$	
12		$f_2 = \frac{1}{r} e_1$ $f_1 = \frac{1}{r} e_2$	
13		$e_1 = e_2 = e_3$ $f_3 = f_1 - f_2$	
14		$f_1 = f_2 = f_3$ $e_3 = e_2 - e_1$	

Один из вариантов расстановки причинных отношений в ГС электрической схемы 4.21- а приведен на рисунке 4.23. Здесь связь емкости  $C_1$  имеет дифференциальную причинность, а связи инерционности  $I$  и емкости  $C_2$  – интегральную. В этом графе невозможно одновременно обеспечить интегральную причинность для емкостей  $C_1$  и  $C_2$ .

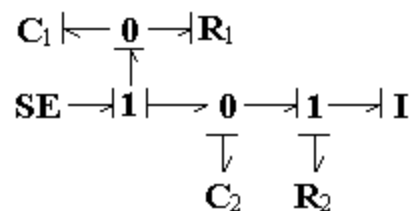


Рисунок 4.23- Граф схемы с расставленными причинными отношениями

На рисунке 4.24 представлены два варианта расстановки причинности для графа связей двигателя постоянного тока. В первом варианте выбраны интегральные, во втором – дифференциальные причинные отношения в связях инерционностей.

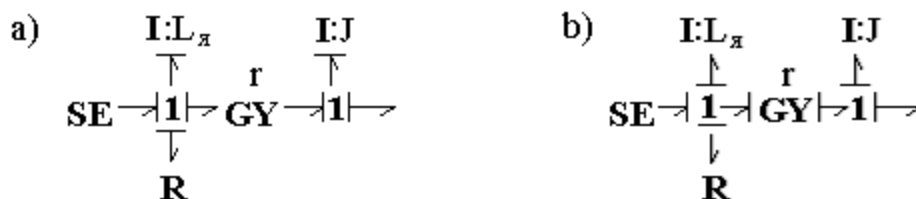


Рисунок 4.24 - Причинные отношения в графе связей ДПТ:

*a* – интегральные; *b* – дифференциальные

#### *Построение операторно-структурных схем по графу связей*

Построение операторно-структурных схем основано на том, что явные зависимости потоков и усилий для элементов ГС, получаемые после расстановки отношений причинности, могут быть, в случае линейных систем, отображены в виде функциональных направленных звеньев с соответствующими передаточными функциями, как это показано в последней колонке таблицы 2.3. Трансформаторы и гираторы в структурной схеме представляются парами одинаковых звеньев, одно из которых передает сигнал в прямом направлении, другое – в обратном. Каждый 0-узел представляется в структурной схеме точкой разветвления для усилий и сумматором для потоков. Каждый 1-узел представляется, наоборот, точкой разветвления для потоков и сумматором для усилий. Нетрудно заметить, что в каждом узле только одна связь, отличающаяся причинностью, соответствует сумме, остальные соответствуют слагаемым. Знаки слагаемых зависят от направления полустрелок на связях. Если направление связи слагаемого совпадает с направлением связи суммы, то слагаемое входит в сумму со знаком «плюс», в противном случае – со знаком «минус».

Процесс построения структурной схемы двигателя постоянного тока показан на рисунке 4.25. Для большей наглядности на рисунке 4.25, *b* сохранена форма структурной схемы, соответствующая форме графа связей. Перерисованная в более привычном виде эта схема приведена на рисунке 4.25, *c*.

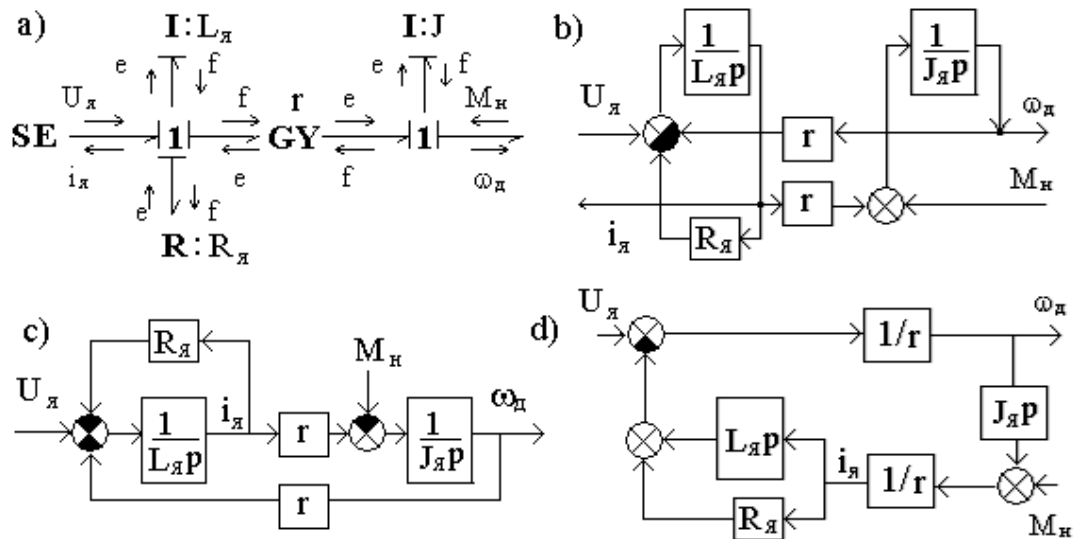


Рисунок 4.25 - Построение структурной схемы двигателя постоянного тока

## 2.Задание.

Вариант 1.

Постройте модель асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором.

Постройте модель реверсивного управления АД.

Вариант 2.

Постройте модель вентильного двигателя (ВД).

Постройте модель реверсивного управления ВД.

## 3.Контрольные вопросы.

- 1) Что называют моделью объекта?
- 2) На чем основан метод графов связей?

3) Дайте определение графа связей.

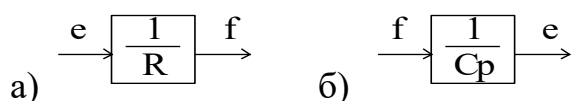
4) Перечислите основные элементы графов связей электрических систем, приведите их обозначения.

5) Перечислите основные элементы графов связей механических систем, приведите их обозначения.

6) Изобразите граф резистора.

7) Изобразите графы: принципа Даламбера; третьего закона Ньютона; идеальной пружины.

8) Определите типы причинности в графах связей:



## Практическая работа №5

### Анализ и описание схемы электрической принципиальной управления двигателем

**Цель работы:** Освоение способов изображения схем электрических принципиальных.

#### 1. Теоретическое обоснование.

Способы изображения принципиальных электрических схем

В принципиальных электрических схемах (ПЭС) элементы могут изображаться двумя способами: совмещенным и разнесенным.

При *совмещенном способе* все части каждого прибора, ТСА и электрического аппарата располагают в непосредственной близости и заключают в прямоугольный, квадратный или круглый контур, выполненный сплошной тонкой линией. Совмещенный способ в основном используется в схемах электропитания приборов, ТСА и других простых случаях.

В качестве примера на рисунке 5.1 приведена схема, в которой магнитный пускатель КМ и кнопочный пост с кнопками SB1 (“Пуск”), SB2 (“Стоп”) показаны совмещенным способом. Изображения магнитного пускателя и кнопочного поста имеют контуры в виде прямоугольников; в изображении автомата QF ввиду простоты его схемы контур не указывается.

*Разнесенный способ* изображения является преимущественным при выполнении ПЭС, т.к. при этом способе отчетливо видны все электрические цепи, что облегчает чтение схем. В этом случае составные части приборов, аппаратов, ТСА располагают в разных местах таким образом, чтобы отдельные цепи были изображены наиболее наглядно. Принадлежность изображаемых контактов, обмоток и других частей к одному и тому же аппарату устанавливается по позиционным обозначениям, проставленным вблизи изображений всех частей одного и того же аппарата.

Для облегчения чтения таких ПЭС используются следующие приемы:

- а) нумеруются все возможные цепи;
- б) под изображением каждой обмотки помещается табличка с указанием мест расположения контактов. В столбце Г таблички указываются номера цепей, в которые введены главные контакты, в столбце З – замыкающие контакты, а в столбце Р – размыкающие. Число клеток в табличке равно числу контактов аппарата, так что по ней можно определить, в каких цепях их искать;
- в) вблизи позиционных обозначений у изображения контакта указывается номер цепи, в которую включена соответствующая обмотка.

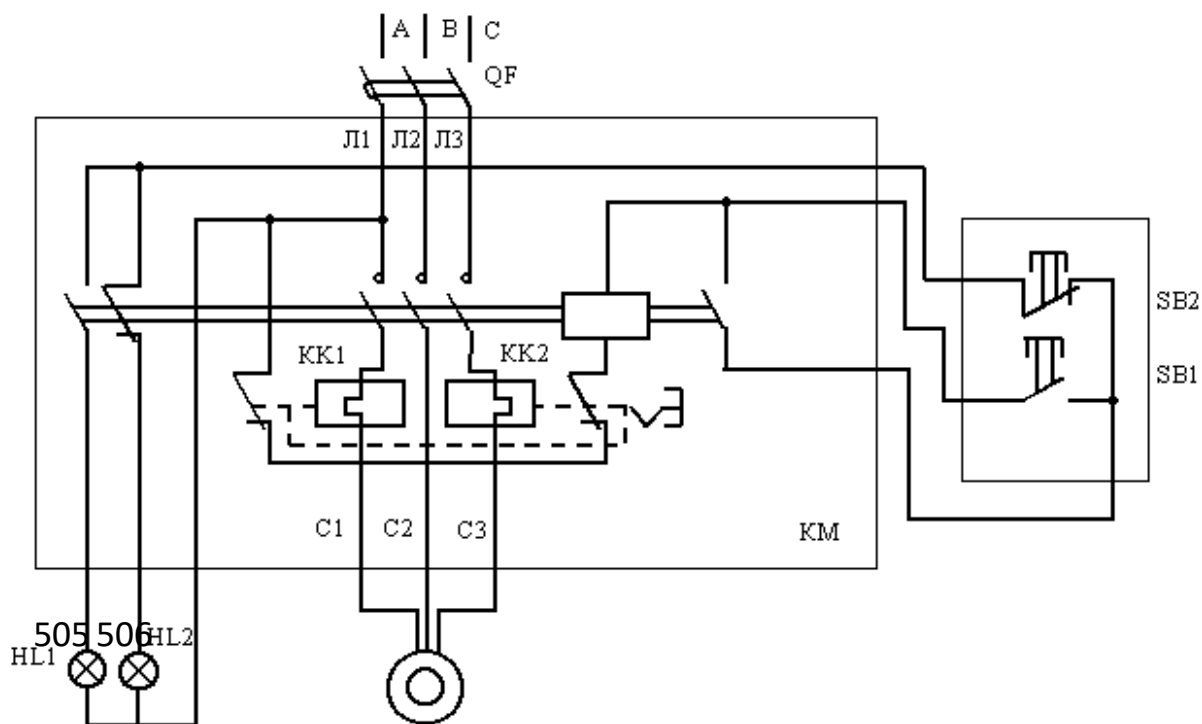


Рисунок 5.1 – Совмещенный способ изображения ПЭС



## Исходное положение аппаратов

Контакты автоматов, выключателей, кнопок, реле и других коммутирующих устройств на ПЭС изображаются при отсутствии тока во всех цепях схемы, т.е. в предположении, что в обмотках реле, контактов, магнитных пускателей и т.п. нет тока или он настолько мал, что якорь не может притянуться (типичный пример – ток в обмотке максимального токового реле при нормальной нагрузке) и на кнопки, рубильники и т.п. не действуют внешние принудительные силы. Поэтому все замыкающие контакты на ПЭС показываются разомкнутыми, а размыкающие – замкнутыми.

Если из этого правила в необходимых случаях сделано исключение, т.е. если отдельные аппараты изображены в выбранном рабочем режиме, то на схеме приводится соответствующее пояснение. Аппараты, не имеющие отключенного положения, изображаются в положении, принятом за исходное. Контакты коммутирующих устройств, имеющих два исходных положения (например, двухпозиционного реле с преобладанием), изображаются в одном произвольно выбранном положении, которое поясняется на схеме. Схемы многопозиционных переключателей, например, переключателей цепей управления, дополняются диаграммами переключателей.

## Позиционные обозначения.

Позиционные обозначения для ПЭС устанавливаются действующим ГОСТ 2.710-81. Позиционное обозначение, присвоенное прибору или аппарату, сохраняется в схеме для всех его частей. Оно проставляется над графическим изображением аппаратов и их частей при горизонтальном изображении электрических цепей и справа или слева от графических обозначений – при вертикальном изображении. Слева позиционные обозначения могут быть написаны только в тех случаях, когда цепи на схемах расположены достаточно далеко друг от друга. Позиционное обозначение вращающейся машины вписывается в ее графическое изображение.

**2. Задание.** Выполните изображение ПЭС, представленной на рисунке 5.1, разнесенным способом. Опишите изображение ПЭС.

### **3. Контрольные вопросы.**

- 1) Какой способ изображения ПЭС является преимущественным?
- 2) Какие позиционные обозначения получают части электротехнического устройства на ПЭС при изображении разнесенным способом?

## Практическая работа №6

### Анализ и описание схемы электрической принципиальной сигнализации

**Цель работы:** Освоение принципов построения различных видов схем сигнализации.

#### 1. Теоретическое обоснование

Кроме параметров, требующих измерения, системы технологического контроля имеют большое число параметров (или состояний производственных механизмов), о которых для нормального ведения технологического процесса оператору достаточна только двухпозиционная информация (параметр в норме – параметр вышел за пределы нормы, механизм включен – механизм отключен и т.п.). Контроль таких параметров осуществляется с помощью схем сигнализации. Обычно в них применяются релейно-контактные элементы со световой и звуковой сигнализацией. Световой сигнал может быть воспроизведен ровным или мигающим светом, свечением ламп неполным накалом, а звуковой с помощью звонков, гудков и т.п. Иногда информация о срабатывании защиты или автоматики может быть выполнена с помощью специальных указательных реле – блинкеров.

По назначению схемы сигнализации делят на следующие группы:

- схемы сигнализации положения (состояния) – для информации о состоянии технологического оборудования по типу “открыто” – “закрыто”, “включено” – “выключено” и т.д.;
- схемы технологической сигнализации, дающие информацию о значении таких параметров, как температура, давление, расход и т.д.;
- схемы командной сигнализации, позволяющие передавать различные указания из одного пункта управления в другой с помощью световых или звуковых сигналов.

#### *Схемы сигнализации положения*

Эти схемы выполняют для механизмов, которые имеют два рабочих положения и более. Наибольшее распространение получили два варианта построения схем сигнализации положения: схемы сигнализации, совмещенные со схемами

управления, и схемы сигнализации с независимым от схем управления питанием на группу технологических механизмов одного или разного назначения.

В схемах первого типа сигнализация положения может осуществляться одним или двумя световыми сигналами с горением ламп равным светом. Схемы, построенные с одной лампой, сигнализируют обычно о включенном состоянии механизма и используются редко. Для таких механизмов, как задвижки, заслонки, клапаны, шиберы и т.п., применяются двухламповые схемы.

На рисунке 6.1 приведены примеры простейших схем сигнализации. В схеме на рисунке 6.1,а лампа HL горит, когда магнитный пускатель KM включен; неисправность лампы равносильна ложному сигналу, т.к. погашенная лампа свидетельствует об отключении

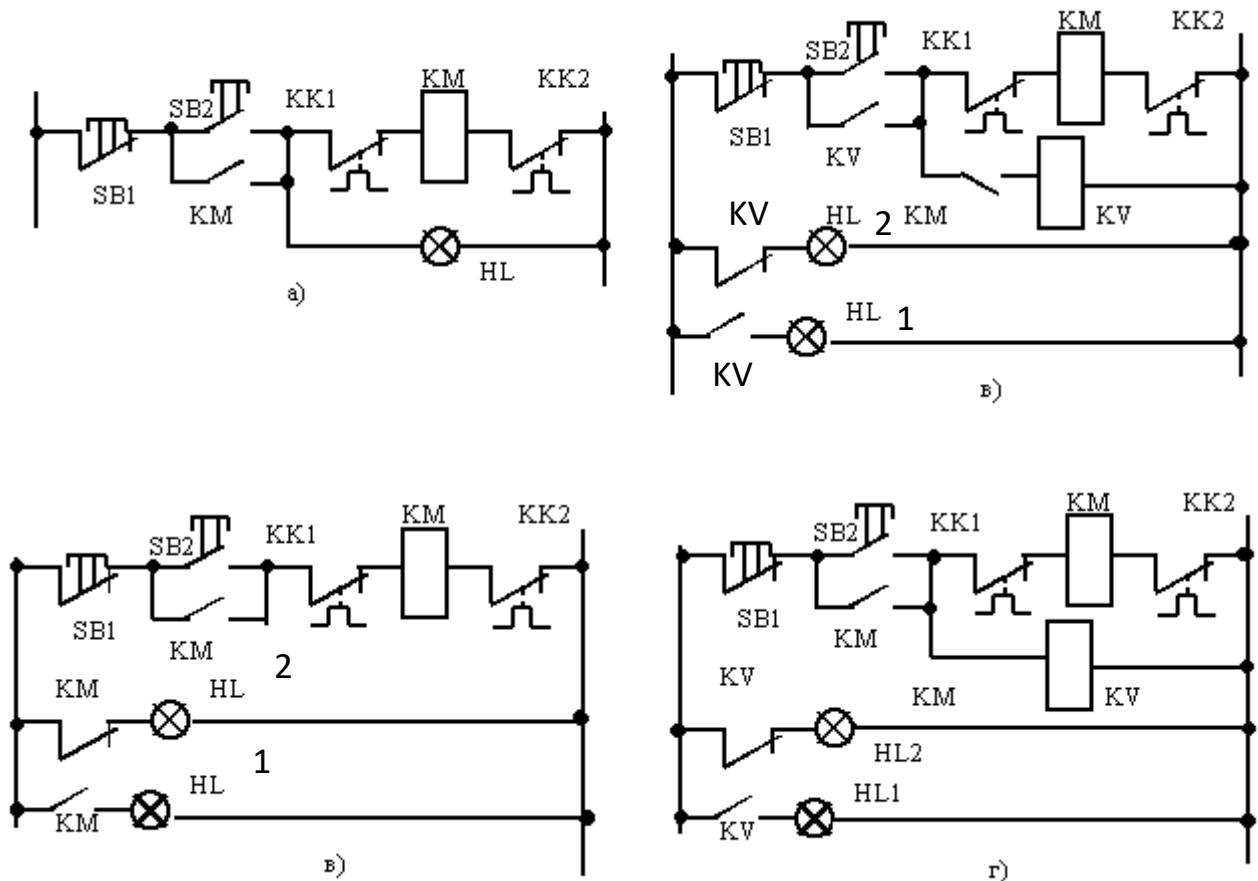


Рисунок 6.1- Примеры построения схем сигнализации, совмещенных со схемами управления

Схемы с двумя лампами (рисунке 6.1,б) свободны от этого недостатка, т.к. в любом положении магнитного пускателя одна из них горит (HL1 – пускатель включен, HL2 – пускатель отключен). Особенности схем на рисунке 6.1,в,г

является включение ламп через контакты промежуточного реле KV. Эти схемы работают следующим образом. Кнопкой SB2 включается магнитный пускатель КМ, который, срабатывая, включает реле KV; его контакт шунтирует кнопку, включает лампу HL1 и отключает HL2.

#### Схемы технологической сигнализации

Схемы технологической сигнализации предназначены для оповещения обслуживающего персонала о нарушении нормального хода технологического процесса. Технологическая сигнализация воспроизводится ровным и мигающим светом и сопровождается, как правило, звуковым сигналом. Сигнализация по назначению может быть предупредительной и аварийной.

Наиболее применяемыми являются схемы с центральным съемом звукового сигнала с повторностью действия. Они дают возможность принимать новый звуковой сигнал до размыкания контактов, вызвавших появление предыдущего сигнала.

Технологические процессы требуют позиционного контроля большого числа параметров, а характерной особенностью схем технологической сигнализации является наличие общих схемных узлов, в которых перерабатывается информация, поступающая от многих двухпозиционных технологических датчиков. Информация из этих узлов выдается в форме звукового и светового сигналов только о тех параметрах, значения которых вышли из нормы или необходимы для управления технологическим процессом. В зависимости от числа сигнализируемых параметров световая сигнализация может быть выполнена ровным или мигающим светом. Если число контролируемых параметров более 30, применяются схемы с миганием поступившего сигнала. Алгоритм работы схем технологической сигнализации в большинстве случаев одинаков: при отклонении параметра от заданного значения подаются звуковой и световой сигналы; звуковой сигнал снимают специальной кнопкой; световой сигнал исчезает при уменьшении параметра до допустимого значения.

#### Схемы командной сигнализации

Командная сигнализация обеспечивает одностороннюю или двустороннюю передачу различных сигналов команд в условиях, когда использование других видов связи технически нецелесообразно, затруднено или невозможно – например, использование телефона в производственном помещении.

## 2.Задание:

Вариант 1. Выполните описание цепей схемы управления (рисунок 6.2).

Вариант 2. Выполните описание принципа действия схемы управления (рисунок 6.3) по временной диаграмме .

Вариант 3. Выполните описание принципа действия схемы технологической сигнализации по временной диаграмме (рисунок 6. 4).

Вариант 4. Выполните все схемы технологической сигнализации с источником мигающего света: HL – лампа контроля напряжения; HA – звонок; KV – реле предупреждающей сигнализации; KV1-KVn – промежуточные реле индивидуальных сигналов, включаемые контактами датчиков SK1 - SKn технологического контроля; HL1-HLn – индивидуальные лампы; 1VD1-1VDn , 2VD1-2VDn – развязывающие диоды; SB1 – кнопка опробования сигналов; SB2 – кнопка съема сигналов; ШРС – шина ровного света; ШМС – шина мигающего света (рисунок 6.5).

Питание 80/220 В	Сигнал "Закрыто"	Указатель открыть	Лестное и танционное управление	Указатель закрыть	Лестное и танционное управление	Сигнал "Открыто"	Промежуточное реле
---------------------	---------------------	----------------------	---------------------------------------	----------------------	---------------------------------------	---------------------	-----------------------

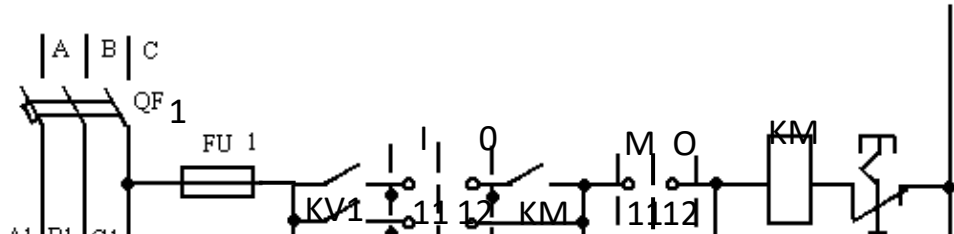
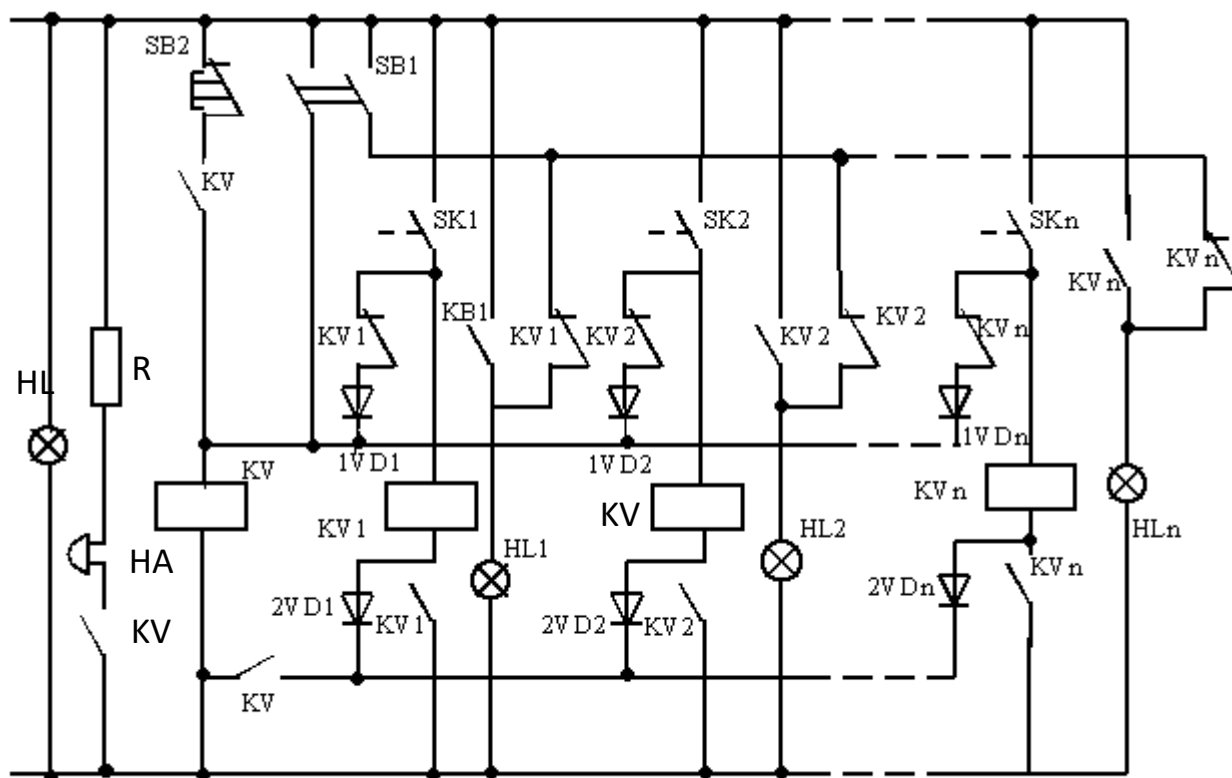


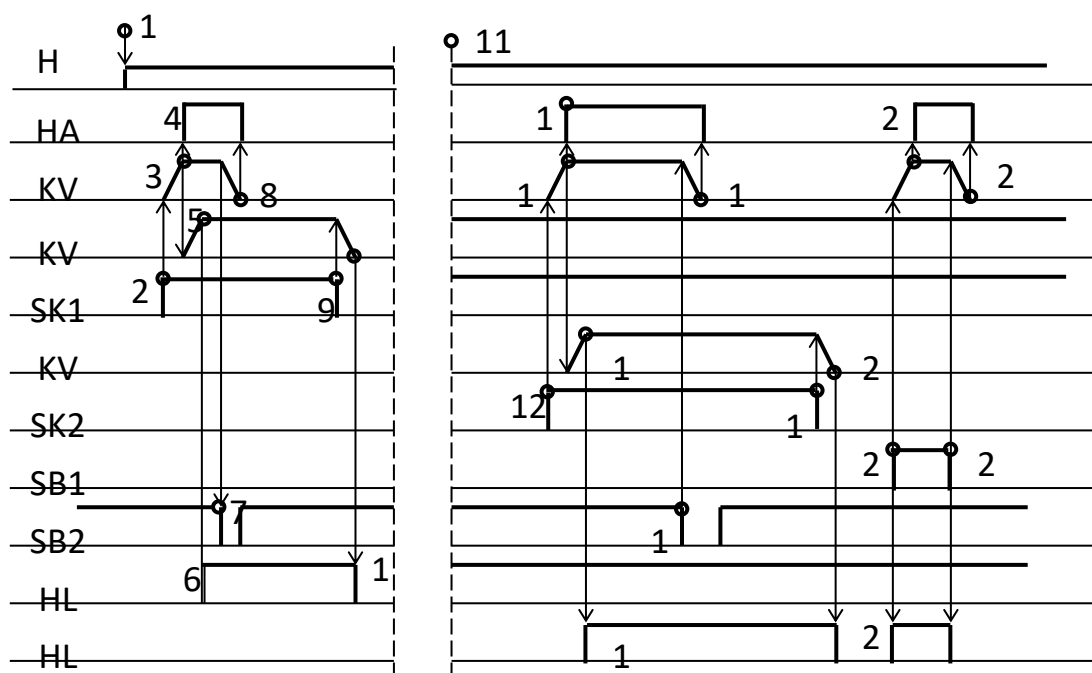
Рисунок 6.2 – Схема управления реверсивным асинхронным двигателем электропривода задвижки

Рисунок 6.3 - Принципиальная схема управления нереверсивными электроприводами дренажных насосов с автоматическим вводом резерва (а), вспомогательная схема (б),





а)



б)

Рисунок 6.4- Схема технологической сигнализации (а) и диаграмма работы ее элементов (б)

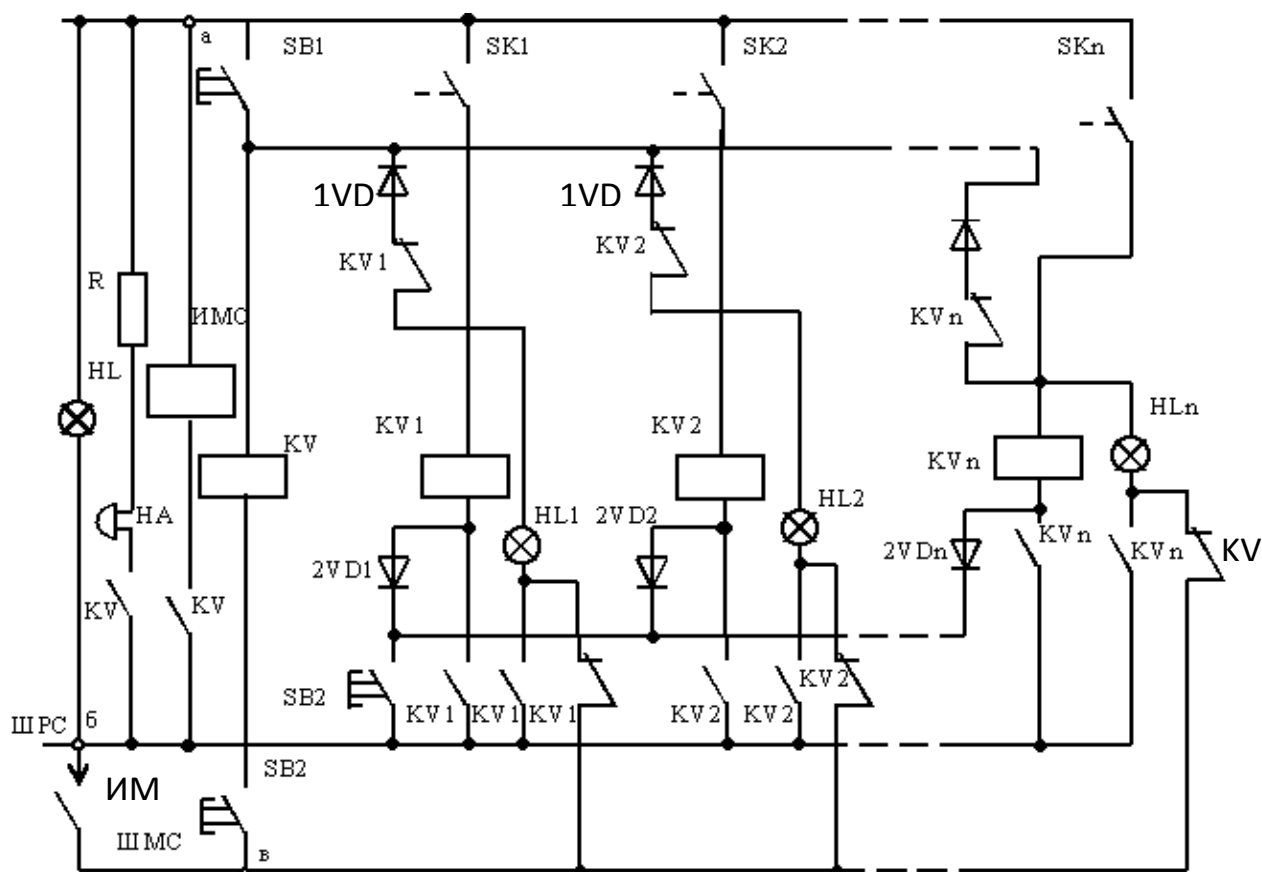


Рисунок 6.5 - Схема технологической сигнализации с источником мигающего света.

### 3.Контрольные вопросы.

- 1) Назначение схем сигнализации?
- 2) Виды схем сигнализации?
- 3) Каково назначение схем технологической сигнализации?

### Практическая работа №7

#### Анализ и описание схем многопозиционных переключателей

**Цель работы:** Освоение методики выполнения схем многопозиционных аппаратов.

### **1. Теоретическое обоснование.**

На схемах, в которых используются многопозиционные аппараты (ключи, переключатели, программные устройства и т.п.), размещаются диаграммы и таблицы переключений их контактов. В таблицах приводят данные, отражающие тип аппарата, вид рукоятки (спереди) и схему расположения контактов (сзади), тип рукоятки и пакета, номера контактов и режим работы. Неиспользованные в схеме контакты обозначают звездочкой (\*). На рисунке 7.1 показаны два примера изображения схем переключателей цепей управления и таблиц включения их контактов. На рисунке 7.2,а показана фронтальная пластина переключателя и обозначены три положения рукоятки: +45, 0, -45. Под ней дано монтажное изображение, на котором видно расположение выводов и указана их нумерация (1-6). На рисунке 7.1,б дана таблица переключения контактов, в которой буквы “л” и “п” обозначают соответственно левый и правый выводы, а крестик указывает на то, что контакт замкнут. Читается такая таблица следующим образом: в положении +45 соединены контакты между выводами 1 и 2, 5 и 6; в положении 0 соединены контакты 1 и 2, 3 и 4, а в положении -45 соединены контакты 5 и 6. На схеме эти соединения обозначают одним из способов, отличающихся только расположением на схеме выводов 1-6 переключателя (между штриховыми линиями – рисунок 7.1,в; над ними – рисунок 7.1,г; на них – рисунок 7.1 д). Все способы равнозначны. Рассматриваемый переключатель рассчитан на три цепи, условно названные А, Б и В. Штриховые линии +45, 0, -45 соответствуют положениям рукоятки, а жирные точки указывают на то, что контакт замкнут. По рис.3.14,в-г видно, что в положении +45 замкнуты цепи А и В, цепь Б разомкнута. В положении 0 замкнуты цепи А и Б, в положении -45 замкнута цепь В.

Рукоятка переключателя, показанного на рисунке 7.1,е-ж, также имеет три положения: +45, 0 и -45, но положение 0 как бы раздвоено и потому изображено не одной, а двумя штриховыми линиями. К одной из них идет

стрелка от линии +45, а к другой – от линии -45. Стрелки указывают на пружинный возврат. Если повернуть рукоятку в положение “Включить”, а

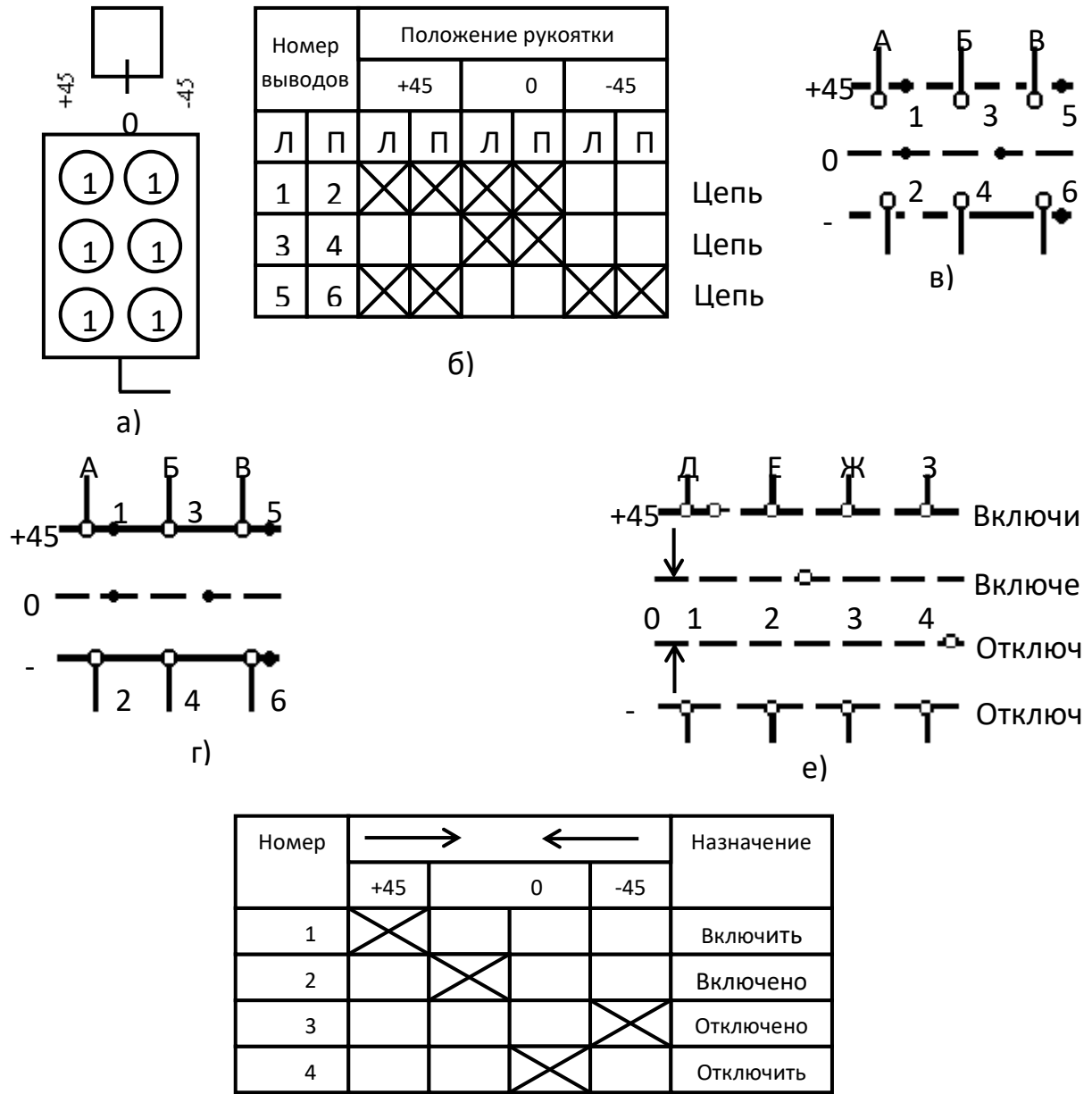


Рисунок 7.1 -Переключатели цепей управления

затем отпустить, то она вернется в исходное положение, а коммутационное положение будет сохраняться – “включено”. Аналогично работает цепь отключения.

## 2. Задание.

Выполните схему переключателя и опишите порядок переключения.

Схемы переключателей представлены в приложении Б. Варианты задания в соответствии с таблицей 7.1.

Таблица 7.1 – Номера схем.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ схемы	76	77	104	111	112	113	114	126	127	128

### **3.Контрольные вопросы.**

- 1) Каково назначение переключателей в схемах электрических принципиальных автоматизации?
- 2) Какая информация заложена в таблице схемы переключателя?

## **Практическая работа №8**

### **Анализ и описание схемы электрической принципиальной управления нагревательной установкой**

**Цель работы:** Выработка умения разбираться в схемах управления нагревательными установками.

#### **1.Теоретическое обоснование.**

Принципиальная электрическая схема управления электрической печью сопротивлением представлена на рисунке 8.1. Схема выполняет **две функции**:

- 1) Регулирование температуры печи через управление автотрансформатором АТ.
- 2) Поднимание и опускание двери печи с помощью электродвигателя АД.

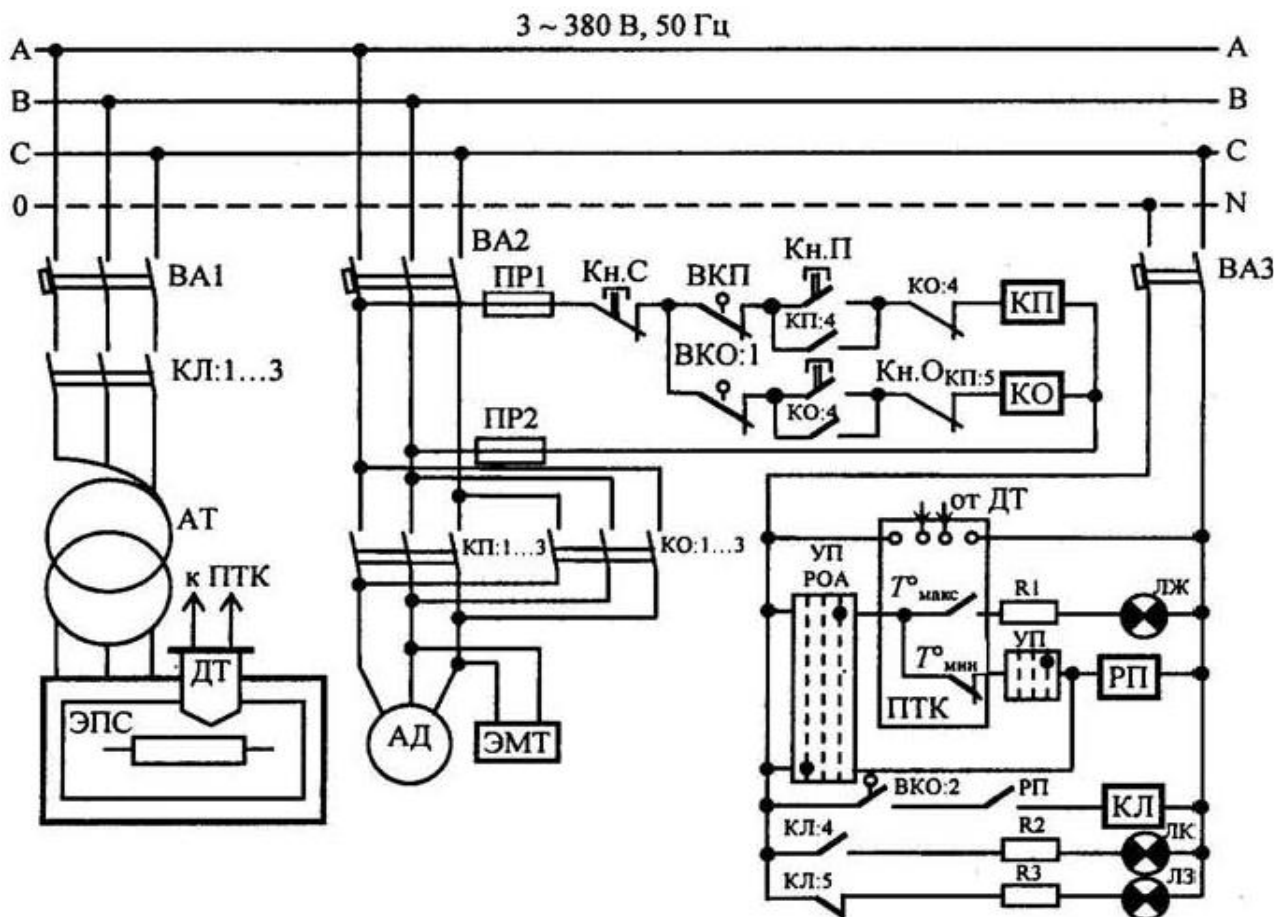


Рисунок 8.1 - Принципиальная электрическая схема управления электрической печью сопротивлением.

**2.Задание:** Опишите работу схемы управления нагревательной установкой по формам таблиц 8.1 и 8.2.

1) Определите на схеме место ввода питания, род тока, фазность. Записать характеристику питания цепи.

2) Определите составные элементы схемы и органы управления, записать их в таблицу 8.1.

3) Перечислите для каждого элемента его контакты в соответствующей графе таблицы 8.1.

4) Опишите работу схемы по форме таблицы 8.2. Считать, что вводные выключатели включены и питание подано. Включение, отключение аппарата (катушки, контакта) показать стрелкой  $\uparrow\downarrow$ .

Таблица 8.1- Элементы схемы.

Обозначение элемента	Наименование элемента	Обозначение контактов элемента с указанием «о» - открытый, «з» - закрытый

Таблица 8.2- Работа схемы.

№ п/п	Управление	Аппарат, катушка которого срабатывает (отключается)	Замыкание (размыкание) контактов аппарата	Срабатывание элемента схемы (катушка, контакты, лампы)	Готовится (блокируется) цепь	Запускается (останавливается, реверсируется) ЭД или АТ
	КнП ↑↓-					
	КнО ↑↓					
	УП- «А»					
	Тмин. ↓					
	Тмакс ↑					

### 3.Контрольные вопросы

- 1) При помощи какого элемента осуществляется контроль температуры печи?
- 2) Как называется способ торможения АД? Поясните принцип действия.

## Практическая работа № 9

### Анализ и описание схемы электрической принципиальной электропривода контроллерного управления двигателями крана

**Цель работы:** Выработка умения разбираться в схемах управления электропривода контроллерного управления двигателями крана

#### 1.Теоретическое обоснование

Для управления ЭД крановых механизмов применяют контроллеры типов ККТ и ККП. Схемы управления двигателями могут быть симметричными и несимметричными относительно нулевого положения контроллера или командно - контроллера. Симметричной схемой называется такая, при которой включение двигателя, а следовательно, и его характеристики при положениях рукоятки контроллера, имеющих одинаковый номер аналогичны. Такие схемы

применяются обычно для механизмов передвижения и поворота. Несимметричные схемы применяются для механизмов подъема, когда при подъеме и опускании груза двигатель работает в разных режимах и на различных характеристиках.

Типовая схема контроллерного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и характеристики двигателя представлены на рисунке 9.1. Питание к двигателю подводится через защитную панель ПЗК, на которой имеются рубильник В, предохранитель, линейный контактор КЛ, реле максимального тока РМ выключатель ВА. В схему управления введены также контакты конечных выключателей КВВ и КВН, выключатели люка выхода на мост КВЛ и кнопка управления Кн. При переводе контроллера вправо или влево от нулевого положения с помощью контактов К1, К3 и К5, К7 изменяют порядок чередования фаз напряжения на статоре, выбирая при этом требуемое направление движения. Одновременно с двигателем включается или отключается тормозной электромагнит ТМ.

Плавный пуск и регулирование скорости осуществляется путем шунтирования сопротивлений в цепи ротора двигателя, когда оператор переводит рукоятку контроллера из одного положения в другое. Изменение положения рукоятки должно происходить с некоторыми интервалами времени, что необходимо для ограничения бросков тока и момента двигателя. С целью уменьшения количества контактов и габаритов контроллера применяется несимметричная схема включения сопротивлений в цепь ротора.

Механические характеристики двигателя представлены на рисунке 9.2.





Порядок описания:

1) Определите на схеме место ввода питания, род тока, фазность. Запишите характеристику питания цепи.

2) Заполните таблицу 9.1:

- В графе «Обозначение» записать обозначение по схеме составных элементов схемы и органов управления.

- В графе «Наименование» - наименование аппарата (контактор - буква К в обозначении; реле - буква Р; КЛ – контактор линейный; В – выключатели и т.д.

- В графе «Обозначение контакта» перечислите построчно для каждого элемента обозначения его контактов по схеме.

- В графе «Функция контакта» запишите по состоянию контакта после срабатывания элемента, какую функцию они выполняют и для какого элемента, например: шунтирует R1 или самопитание КЛ.

3) Для каждого элемента проследить формирование его цепи и условия срабатывания.

4) Описать работу схемы, начиная с исходного состояния контроллера К – «0» до последнего (в зависимости от задания – вперед или назад).

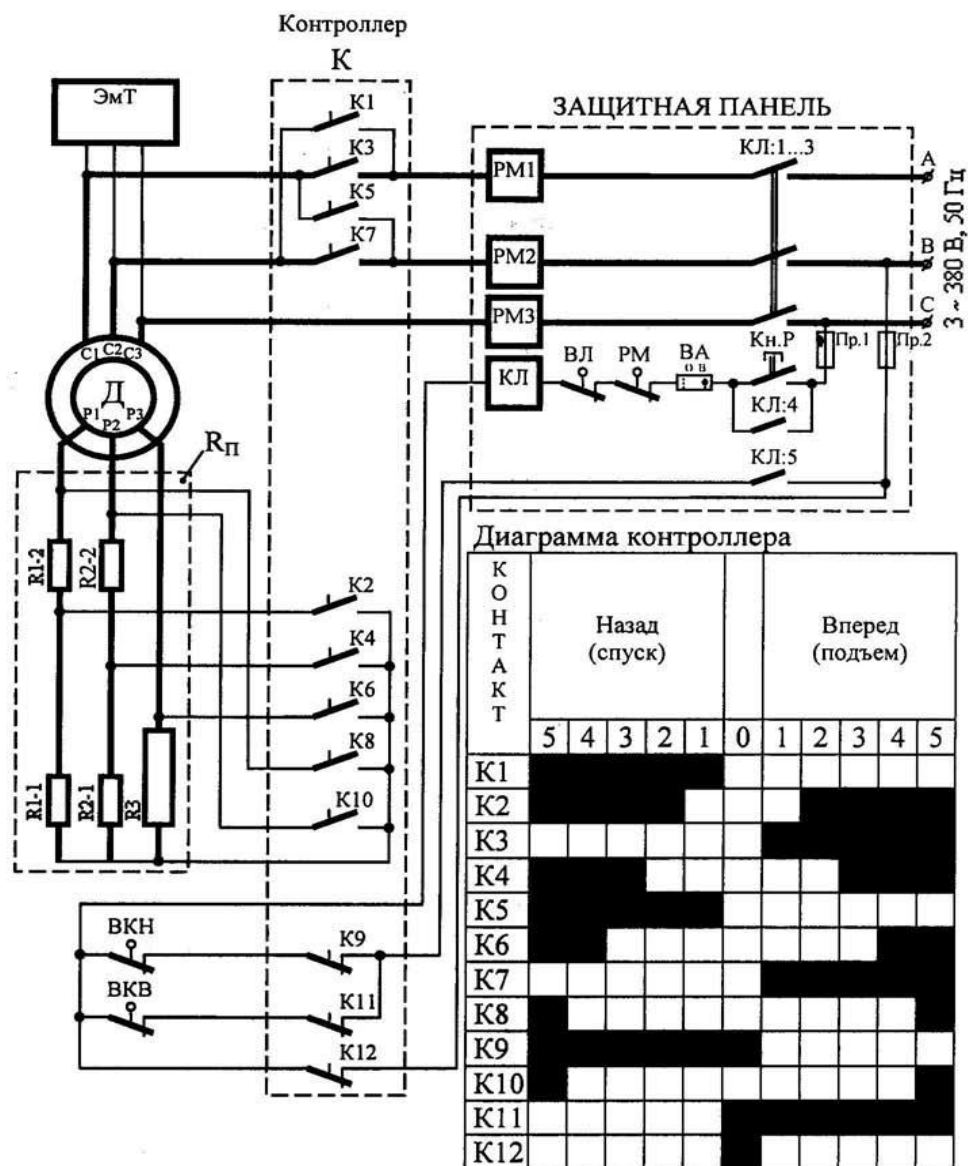


Рисунок 9.3 - Принципиальная схема контроллерного управления механизмами крана

**Пример записи:**  $\boxed{KY2} \uparrow - \boxed{PY3} \uparrow$  ( $KY2:3$ ) – это означает, что срабатывает контактор  $KY2$ , вследствие чего срабатывает реле  $PY3$  через контакт  $KY2:3$ .

**Примечание:** Считать, что вводные выключатели включены и питание подано. В исходном состоянии нажимается кнопка «пуск»  $Кн. П \uparrow \downarrow$  при ее наличии.

Таблица 9.1 – Работа схемы

Обозначение элемента	Наименование элемента	Обозначение контактов элемента с указанием «о» - открытый, «з» - закрытый	Функция контакта

### 3.Контрольные вопросы:

- 1) Какой элемент схемы имеет наибольшее количество контактов? Каково его функциональное назначение?
- 2) Какие режимы работы предусмотрены данной схемой? Поясните.

## Практическая работа № 10

### Анализ и описание схемы электрической принципиальной электропривода контакторного управления двигателями крана

**Цель работы:** выработка умения разбираться в схемах управления электропривода контакторного управления двигателями крана

#### 1.Теоретическое обоснование

Контакторное управление применяется в тех же случаях, что и контроллерное, но для двигателей большей мощности или с более частыми пусками остановками. Схема контакторного управления кроме пусков, остановок, торможения, регулирования скорости и реверсирования двигателя, предусматривает защиту его от перегрузки, понижения или исчезновения напряжения сети или других ненормальных режимов. Контакторное управление позволяет автоматизировать процессы управления электродвигателями. Перечень основных аварийных режимов и средств защиты от них представлен в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Аварийные режимы и защитные средства

Аварийный режим	Защитные средства
<b>Электрическая часть</b>	
Короткие замыкания;	Быстродействующие автоматы;
перегрузка силовых цепей по нагреву	плавкие предохранители;
	реле максимального тока;
	тепловые реле.
Перебои в электроснабжении;	Нулевая блокировка;
недопустимое снижение напряжения в сети	реле минимального напряжения;
	реле минимального тока
<b>Механическая часть</b>	
Перегрузка механизма по моменту (заклинивание)	Муфта предельного момента; предохранительная шпонка.
Расцепление рабочего органа с валом двигателя	Двойная тормозная система.
Превышение допустимой скорости рабочего органа	Реле максимальной скорости.
Выход рабочего органа за пределы зоны допустимых перемещений	Защитные путевые выключатели

## 2.Задание.

Опишите работу схемы управления электропривода контакторного управления двигателями крана (рисунок 10.1).

Порядок описания:

1) Определите на схеме место ввода питания, род тока, фазность.

Запишите характеристику питания цепи.

2) Заполните таблицу 10.2:

- В графе «Обозначение» запишите обозначение по схеме составных элементов схемы и органов управления.

- В графе «Наименование» - наименование аппарата (контактор - буква К в обозначении; реле - буква Р; КЛ – контактор линейный; В – выключатели и т.д.

- В графе «Обозначение контакта» перечислите построчно для каждого элемента обозначения его контактов по схеме.

- В графе «Функция контакта» записать по состоянию контакта после срабатывания элемента, какую функцию они выполняют и для какого элемента, например: шунтирует R1 или самопитание КЛ.



сблокированными контактами;

Кн.П - кратковременное нажатие кнопки «пуск»;

В - «О» - выключатель установлен в положение «отключено»;

К - «1» - контроллер установлен в положение «1».

**Пример записи:** КУ2 ↑ — РУЗ ↑ (КУ2:3). — это означает, что срабатывает контактор КУ2, вследствие чего срабатывает реле РУЗ через контакт КУ2:3.

Таблица 10.2 – Элементы схемы.

Обозначение элемента	Наименование элемента	Обозначение контактов элемента с указанием «о» - открытый, «з» - закрытый	Функция контакта

### 3.Контрольные вопросы.

- 1) Какое количество контакторов содержит схема управления? Каково назначение каждого из них?
- 2) Какую функциональную нагрузку несут реле?

### Перечень учебных изданий, дополнительной литературы

#### Основная литература:

1. Беккер В. Ф. Технические средства автоматизации. Интерфейсные устройства и микропроцессорные средства [Электронный ресурс]: Учебное пособие. 2-е изд. - М.: РИОР, ИЦ РИОР, 2019. - 152 с. Режим доступа <http://znanium.com/catalog/product/1007994>

2. Волкова Е. С. Автоматизация технологических процессов [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Фурсенко С.Н., Якубовская Е.С., Волкова Е.С. - М.: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2015. - 377 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/483246>

3. Иванов. А.А. Автоматизация технологических процессов и производств [Электронный ресурс]: учеб. пособие — 2-е изд., испр. и доп. — М.

: ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. — 224 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/946200>

4. Ившин В. П., Перухин М. Ю. Современная автоматика в системах управления технологическими процессами [Электронный ресурс]: Учебное пособие. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2018. - 402 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/923354>

5. Петрова, А.М. Теоретические основы разработки и моделирования систем автоматизации [Электронный ресурс]: Учебное пособие / А.М. Афонин, Ю.Н. Царегородцев, А.М. Петрова и др. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2019. - 191 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1016608>

6. Шишов О. В. Технические средства автоматизации и управления [Электронный ресурс]: Учебное пособие. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 396 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/600381>

7. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации [Электронный ресурс]: Учебник. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2020. - 365 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1057224>

8. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Автоматизация производственных процессов в машиностроении [Электронный ресурс]: учеб. пособие— Минск : Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2018. — 264 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/937347>

9. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике [Электронный ресурс]: Учебно-практическое пособие / Калинин А.В., Уваров Н.В., Дойников В.В., - 2-е изд. — Вологда: Инфра - Инженерия, 2016. - 564 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/554774>

10. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. Том 1 [Электронный ресурс]: Учебно-практическое пособие / Федоров Ю.Н., - 2-е изд. - Вологда: Инфра - Инженерия, 2016. - 448 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/760267>



11. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. Том 2[Электронный ресурс]: Учебно-практическое пособие / Федоров Ю.Н., - 2-е изд. - Вологда: Инфра - Инженерия, 2016. - 484 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/760269>

Дополнительная литература:

12. Юсупов Р.Х. Основы автоматизированных систем управления технологическими процессами: [Электронный ресурс] Учебное пособие - М.:Инфра-Инженерия, 2018. - 132 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/989081>

13. Феоктистов Н. А. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования [Электронный ресурс]: / Сторожев В.В., Феоктистов Н.А. - М.:Дашков и К, 2018. - 412 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/513143>

Интернет – ресурсы:

<http://window.edu.ru/>

<http://www.metod-kopilka.ru/>

<http://www.school.edu.ru/>

<http://subscribe.ru/>

<http://dic.academic.ru/>

[ru.wikipedia.org/wiki](http://ru.wikipedia.org/wiki)

<http://infotechlib.narod.ru/>

<http://mehanik-ua.ru/>

## **Приложение А**

Министерство образования и науки Челябинской области  
Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение  
**«Южно-Уральский государственный технический колледж»**

### **ОТЧЕТ**

по практическим работам

**ПО ПМ.04 «РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСЛОЖНЫХ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ»**

**МДК 04.02 «Теоретические основы разработки и моделирования  
отдельных несложных модулей и мехатронных систем»**

Выполнил \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Проверил \_\_\_\_\_

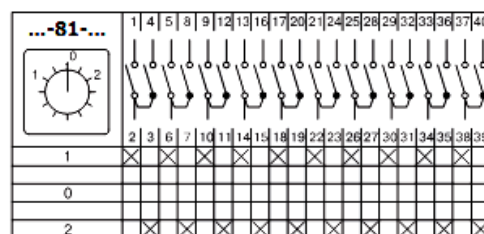
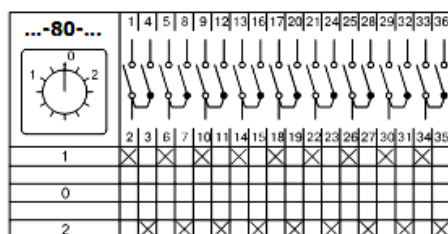
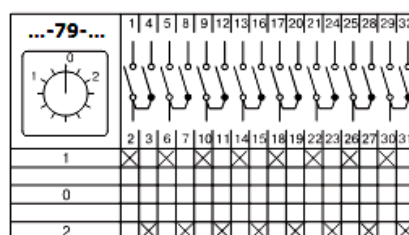
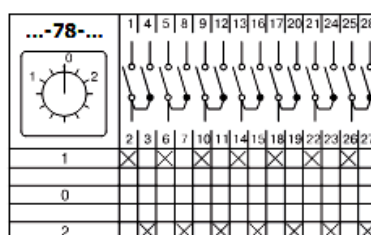
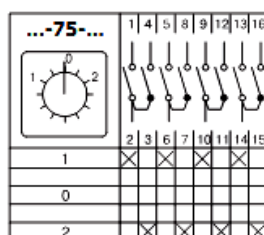
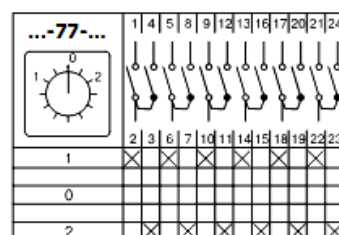
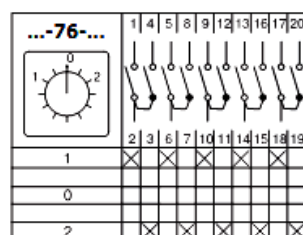
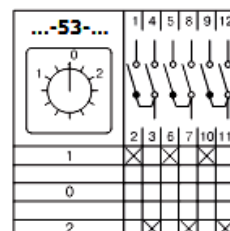
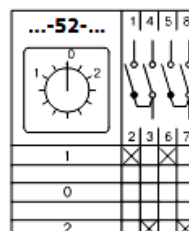
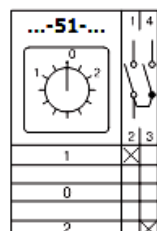
Челябинск, 2019

**Приложение Б**

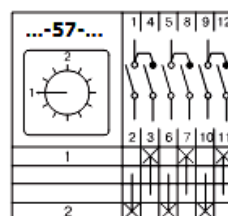
## Переключатели с нулевым положением «0» (1-0-2)

Таблица 31

Коммутационная программа	Номер схемы
<b>Переключатели с нулевым положением «0» (1-0-2)</b>	
1-полюсные	51
2-полюсные	52
3-полюсные	53
4-полюсные	75
5-полюсные	76
6-полюсные	77
7-полюсные	78
8-полюсные	79
9-полюсные	80
10-полюсные	81



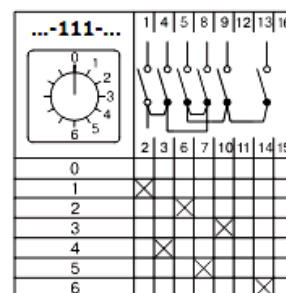
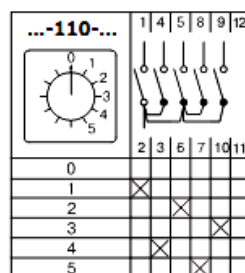
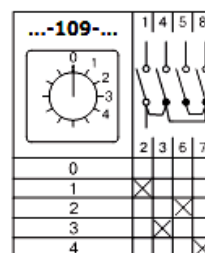
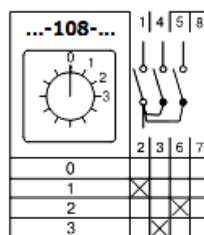
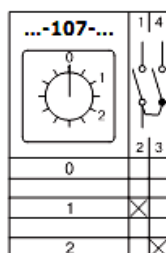
## Переключатели для трансформаторов тока (1-2)



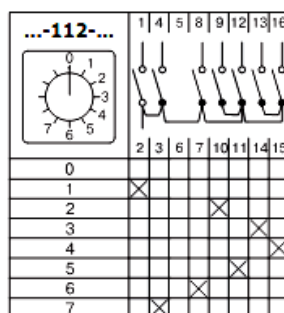
## Многопозиционные переключатели с нулевым положением (0-1-2...)

Таблица 33

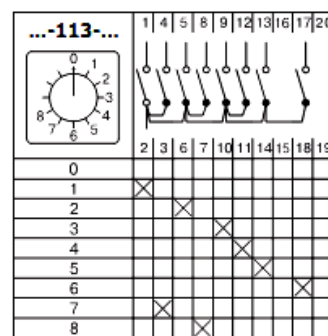
Коммутационная программа	Номер схемы
<b>Многопозиционные переключатели с нулевым положением (0-1-2...)</b>	
1-полюсные	2-позиции 107
	3-позиции 108
	4-позиции 109
	5-позиций 110
	6-позиций 111
	7-позиций 112
	8-позиций 113
	9-позиций 114
	10-позиций 115
	11-позиций 116
	2-позиции 123
2-полюсные	3-позиции 124
	4-позиции 125
	5-позиций 126
	6-позиций 127
	7-позиций 128
	8-позиций 129
	9-позиций 130
	10-позиций 131
	11-позиций 132
	2-позиции 135
3-полюсные	3-позиции 136
	4-позиции 137
	5-позиций 138
	6-позиций 139
	7-позиций 140
4-полюсные	2-позиции 145
	3-позиции 146
	4-позиции 147
	5-позиций 148
5-полюсные	2-позиции 151
	3-позиции 152
	4-позиции 153
	2-позиции 156
6-полюсные	3-позиции 157
	4-позиции 158
	2-позиции 160
7-полюсные	3-позиции 161
	2-позиции 163
8-полюсные	3-позиции 164



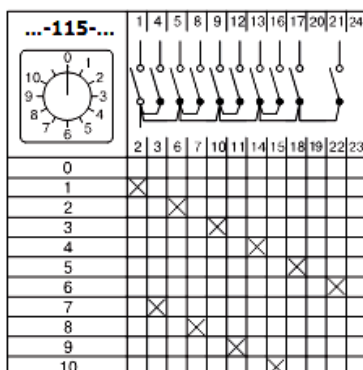
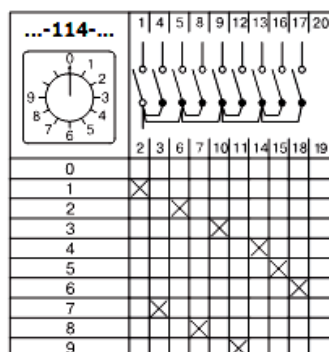
\* изменена нумерация контактов



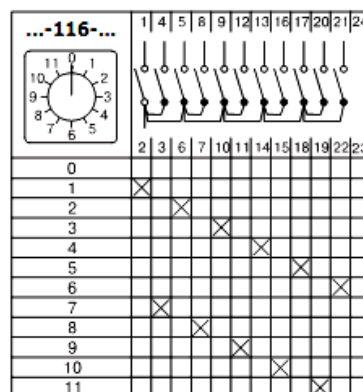
\* изменена нумерация контактов



\* изменена нумерация контактов

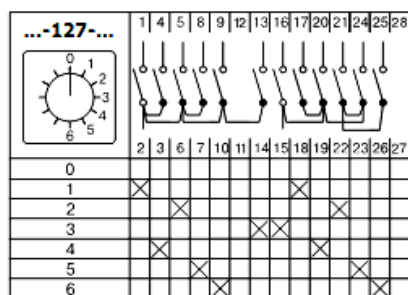
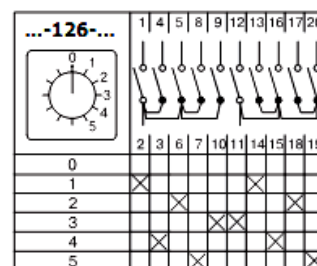
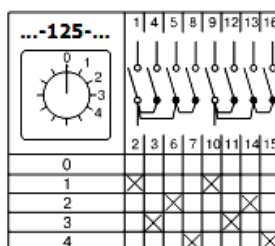
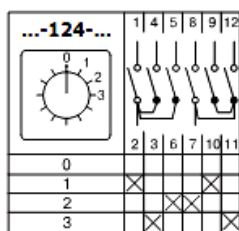
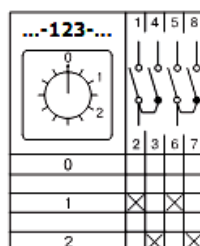


\* изменена нумерация контактов

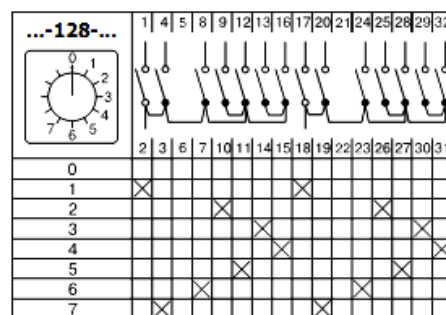


## 22 СТАНДАРТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ

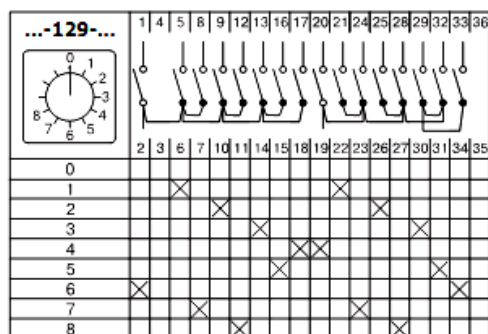
### Многопозиционные переключатели с нулевым положением (0-1-2...)



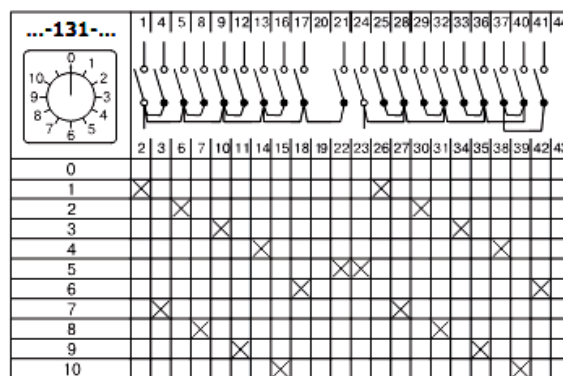
\* изменена нумерация контактов



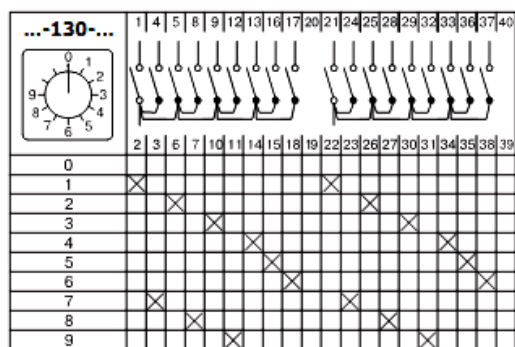
\* изменена нумерация контактов



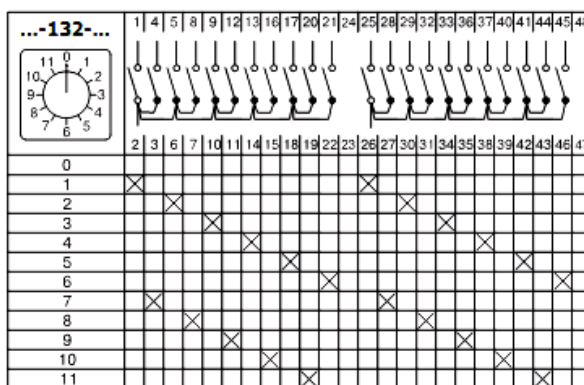
\* изменена нумерация контактов



\* изменена нумерация контактов



\* изменена нумерация контактов



\* изменена нумерация контактов

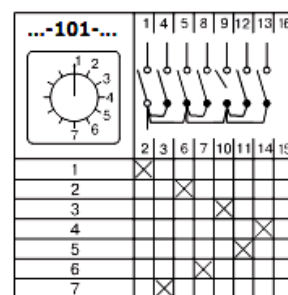
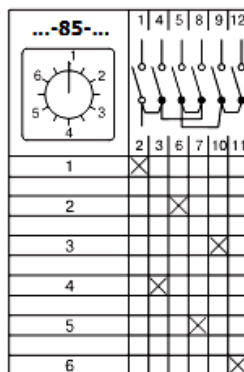
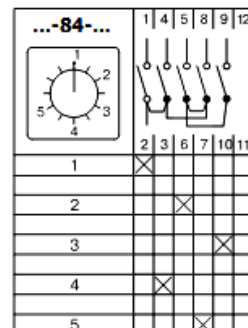
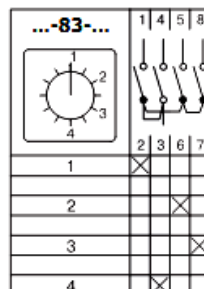
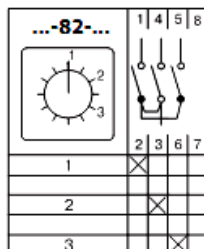
ЭНЕРГО ПЛАСТ

АПАТОР

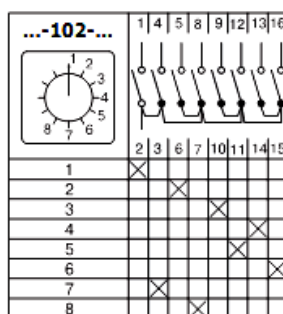
## Многопозиционные переключатели без нулевого положения

Таблица 34

Коммутационная программа	Номер схемы
<b>Многопозиционные переключатели без нулевого положения</b>	
1-полюсные	3-позиции 82
	4-позиции 83
	5-позиций 84
	6-позиций 85
	7-позиций 101
	8-позиций 102
	9-позиций 103
	10-позиций 104
	11-позиций 105
	12-позиций 106
2-полюсные	3-позиции 86
	4-позиции 87
	5-позиций 88
	6-позиций 89
	7-позиций 117
	8-позиций 118
	9-позиций 119
	10-позиций 120
	11-позиций 121
	12-позиций 122
3-полюсные	3-позиции 93
	4-позиции 94
	5-позиций 95
	6-позиций 96
	7-позиций 133
	8-позиций 134
4-полюсные	3-позиции 141
	4-позиции 142
	5-позиций 143
	6-позиций 144
5-полюсные	3-позиции 149
	4-позиции 150
6-полюсные	3-позиции 154
	4-позиции 155
7-полюсные	3-позиции 159
8-полюсные	3-позиции 162



\* изменена нумерация контактов



\* изменена нумерация контактов

