

**Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія  
Кафедра автоматизації виробничих процесів**

# **ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

**Конспект лекцій. Частина 1**

## **Виконавчі механізми і вимірювальні перетворювачі**

**Конспект лекції**

(для студентів спеціальності  
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»)

Краматорськ 2018

УДК 658.512

Технічні засоби автоматизації. Частина 1. Виконавчі механізми і вимірювальні перетворювачі. Конспект лекцій (для студентів спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»). Укл. О.О. Сердюк, О.В. Разживін - Краматорськ: ДГМА, 2018 - 217 с.

Розглянуто основні технічні засоби автоматизації застосовуваних при розробці АСУ.

Укл.

О.В. Разживін, доцент

Відповід. за випуск

О.В. Суботін, доцент

ДГМА. 84313, Краматорськ, вул. Академічна, 72.

## СОДЕРЖАНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ

Очень немногим промышленным объектам можно позволить работать самим по себе, большинство же нуждаются в системе управления того или иного вида, чтобы обеспечить их безопасное и экономичное функционирование. На рис. 1.1 представлена типичная установка, состоящая из объекта и связанной с ним управляющей системы. Ее функции заключаются в преобразовании команд человека-оператора в соответствующие воздействия и представлении оператору информации о состоянии объекта.

В простейшем случае объектом может служить вентилятор, вращаемый электромотором. Управляющей системой здесь является электрический пускатель с защитой от перегрузки мотора и повреждений провода. Команды оператора заключаются в нажатии кнопок пуск/стоп, а состояние объекта отображается в виде, «работает/не работает», а также с помощью индикаторов неисправности.



Рисунок 1.1 – Простая система управления

Другой крайний случай — когда объект является крупной нефтехимической установкой. Здесь управляющая система будет сложной, представляющей собой комбинацию различных видов оборудования. Связь с оператором также будет совершенно иной, когда выдача команд и отображение информации осуществляются с помощью множества устройств системы управления.

# 1 СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Очень легко можно прийти в замешательство и быть потрясенным размерами и сложностью крупных производственных процессов. Большинство из них, если не все, можно упростить, рассматривая их состоящими из множества простых подпроцессов. Эти подпроцессы в общем случае можно считать принадлежащими к трем различным категориям.

## 1.1 Подсистемы текущего контроля

Эти подсистемы отображают оператору состояние процесса и обращают его внимание на ненормальные условия или ошибки, требующие его особого внимания. Состояние объекта измеряется соответствующими датчиками.

Цифровые датчики измеряют состояния, характеризующиеся дискретными значениями. Типичными примерами являются состояния работа/остановка, вперед/выключено/назад, повреждено/исправно, температура низкая/средняя/высокая, высокий уровень/нормальный/низкий уровень. Аналоговые датчики измеряют состояния, характеризующиеся непрерывным диапазоном значений, такие как температура, давление, расход или уровень жидкости.

Результаты этих измерений представляются оператору с помощью индикаторов (для дискретных сигналов) либо стрелочных приборов или самописцев (для аналоговых сигналов).

Сигналы могут также проверяться на наличие аварийных ситуаций. Типичными дискретными аварийными ситуациями являются срабатывание концевого выключателя при достижении механизмом предельного положения или автоматическая остановка электродвигателя при его перегрузке. Типичными аналоговыми аварийными ситуациями могут быть низкий уровень жидкости или высокая температура. Оператор должен быть проинформирован об этом при помощи предупреждающих сигнальных ламп и звуковой

сигнализации.

Система текущего контроля часто обеспечивает регистрацию потребления энергии и материалов, необходимую для отчетности,

## 1.2 Подсистемы последовательного действия

Многие процессы протекают в соответствии с заранее установленной последовательностью. Например, чтобы запустить газовую горелку, изображенную на рис. 1.2, последовательность действий может быть следующей:

1 Стартовая кнопка нажата; если датчики показывают, что отсутствует поток воздуха и нет пламени, то начать последовательность действий.

2 Нажать кнопку пуска вентилятора. Если привод вентилятора работает (проверяется нажатием на кнопку) и поток воздуха установлен (проверяется с помощью выключателя потока), то

3 Подождать две минуты (чтобы воздух очистил камеру от несгоревшего газа) и тогда

4 Открыть вспомогательный вентиль газа, зажечь воспламенитель и

5 При наличии пламени (проверяется датчиком наличия/отсутствия пламени) открыть основной вентиль газа.

6 Последовательность действий завершена. Горелка запущена. Она остается в таком состоянии до тех пор, пока не будет нажата кнопка остановки, или пока не прекратится подача воздуха, или пока не погаснет пламя.

Приведенная выше последовательность действий справедлива только в случае дискретных сигналов, но сигналы могут быть и аналоговыми. В процессе выпечки хлеба при замесе теста (рис. 1.3) аналоговые датчики используются для измерения веса и температуры, при этом последовательность действий выглядит так:

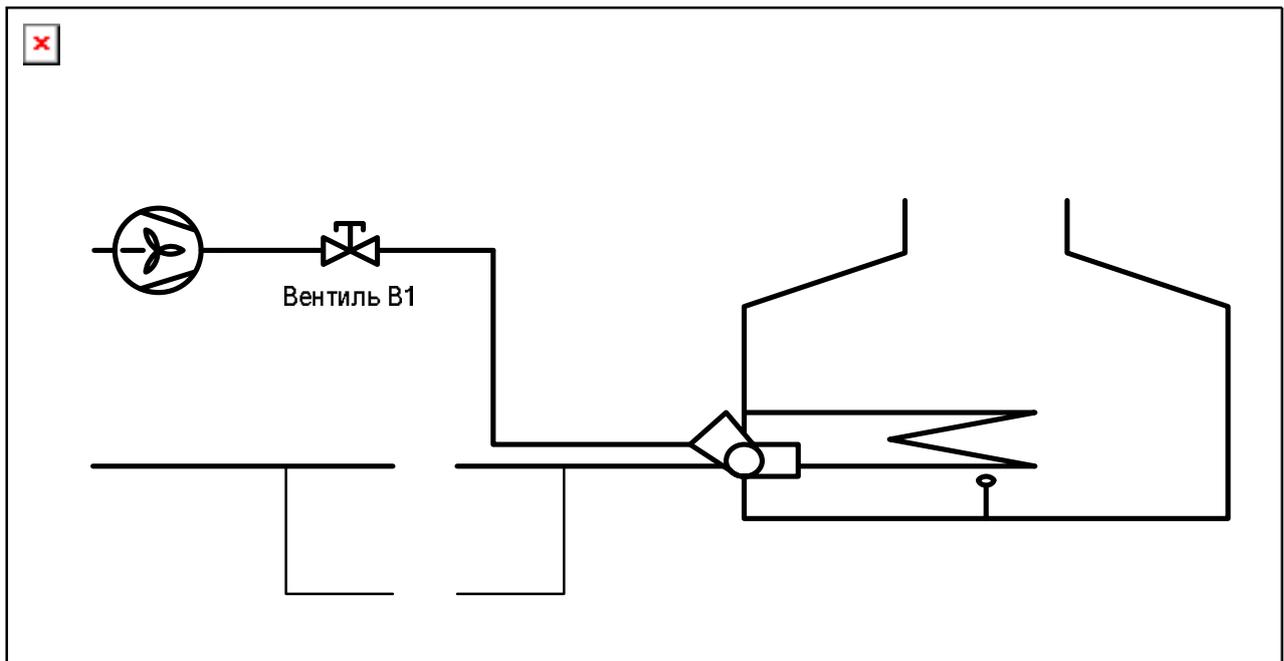


Рисунок 1.2 – Система управления последовательного действия (управление газовой горелкой)

1. Открыть вентиль VI, пока не будет введено 250 кг продукта А.
2. Привести во вращение мешалку.
3. Открыть вентиль V2, пока не будет введено 310 кг продукта В.
4. Подождать 120 с (для полного перемешивания).
5. Довести температуру до 80 °С и поддерживать ее в течение 10 мин.
6. Выключить нагреватель. Позволить смеси остыть до 30 °С.
7. Прекратить перемешивание.
8. Открыть вентиль V3, пока вес не уменьшится до 50 кг.

### 1.3 Подсистемы управления с обратной связью

Во многих непрерывных системах такие переменные, как температура, расход или давление, требуется автоматически поддерживать на заданном уровне или изменять их в соответствии с заданными значениями,

изменяющимися во времени. Например, на этапе 5 в приведенной выше процедуре заданную температуру 80 °С требуется поддерживать постоянной в течение 10 мин.

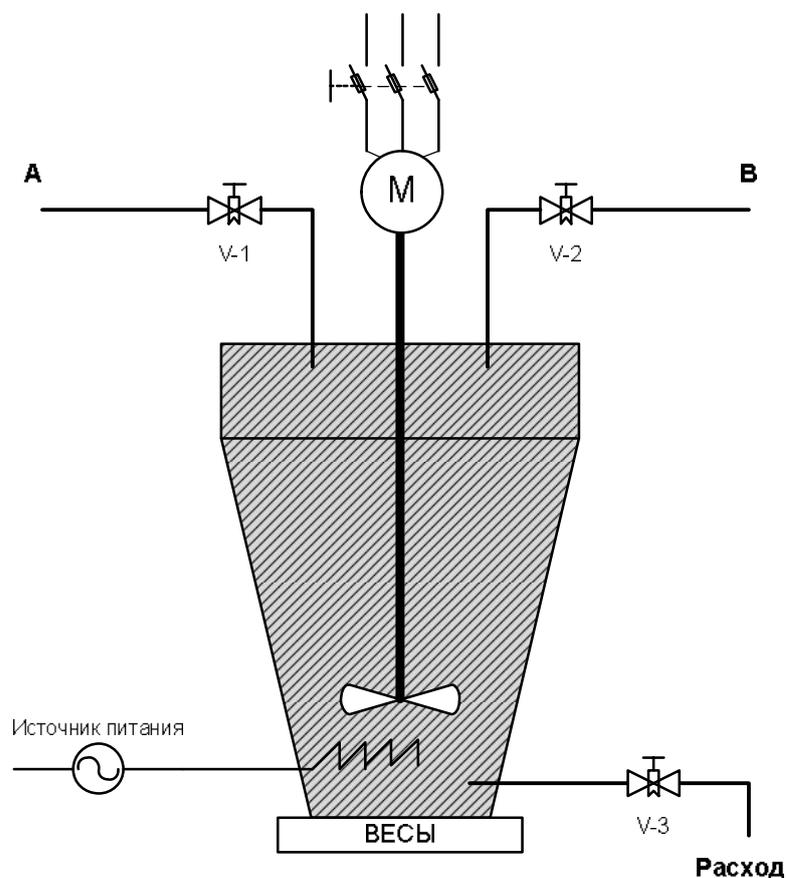


Рисунок 1.3 – Процесс замеса теста

Системы подобного рода можно представить в виде функциональной схемы, изображенной на рис. 1.4. В ней определенную переменную объекта (например, температуру), обозначенную PV (process variable — переменная процесса), требуется поддерживать на заданном уровне SP (setpoint — уставка). PV измеряется соответствующим датчиком и сравнивается с SP, в результате чего образуется сигнал ошибки:

$$\text{ошибка} = SP - PV. \quad (1.1)$$

Например, если мы имеем регулятор температуры, для которого уставка имеет значение 80 °С, а действительная температура равна 78 °С, то ошибка

составляет 2 °С. Этот сигнал ошибки используется в алгоритме управления. Существует много различных алгоритмов управления, этот вопрос подробно рассматривается в главе 4, а простой алгоритм управления можно выразить словами «если ошибка отрицательна, выключить нагреватель, если же ошибка положительна, то включить нагреватель».

Выходной сигнал алгоритма управления поступает на исполнительное устройство, которое воздействует на объект. При управлении температурой исполнительным устройством может быть нагреватель, а при управлении расходом им может быть регулирующий вентиль. Алгоритм управления будет воздействовать на исполнительное устройство до тех пор, пока ошибка не станет равной нулю, т. е. пока переменная процесса не примет то же значение, что и уставка.

На рис. 1.4 значение PV сравнивается с уставкой, благодаря чему появляется термин «управление с обратной связью». Можно заметить, что функциональная схема имеет вид замкнутой системы управления,

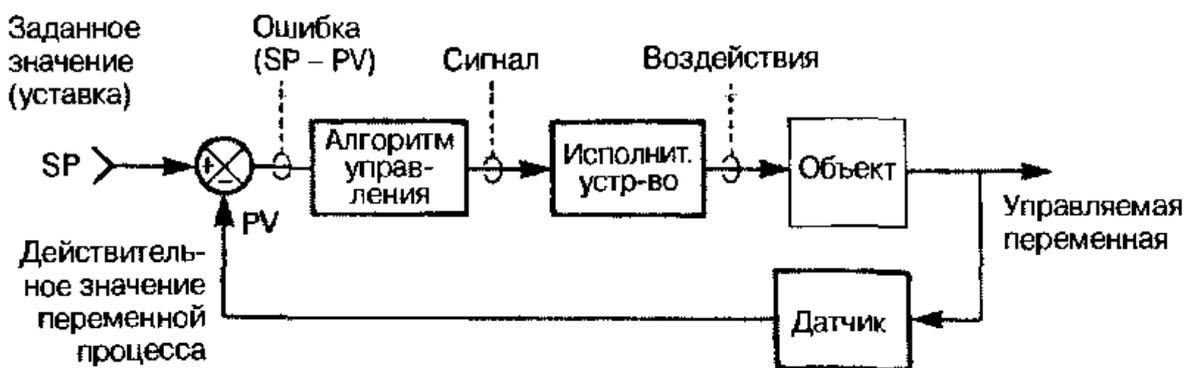


Рисунок 1.4 – Замкнутая система управления

#### 1.4 Функциональные схемы и условные обозначения элементов

На функциональных схемах технологическое оборудование должно показываться упрощенно, однако давать ясное представление о принципе работы и взаимодействия. Технологические аппараты, трубопроводы, датчики,

приборы и другие средства автоматизации показываются условными изображениями в соответствии с ГОСТ, должны иметь соответствующие надписи и обозначения.

Направления материальных и информационных потоков показываются стрелками.

Стандартами установлено два способа построения условных обозначений – упрощенный и развернутый. Для упрощенного способа достаточно применение основных условных обозначений.

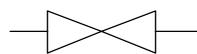
Примеры:



первичный измерительный прибор, установленный на месте;



прибор, устанавливаемый на щите;



регулирующий орган.

Буквенные обозначения измерительных приборов приведены в таблице 1.1.

Разновидности приборов обозначаются комбинацией букв, например:



прибор для измерения давления, регистрирующий, установленный на щите;



прибор для измерения размера, показывающий, установленный по месту.

При использовании условных обозначений необходимо соблюдать следующие правила:

- сигнализация предельных значений конкретизируется добавлением буквы Н (верхнее значение) или L (нижнее значение);

Таблица 1.1 – Буквенные обозначения измерительных приборов

Обозначение	Измеряемая величина	Функция информации	Обозначение	Измеряемая величина	Функция информации
1	2	3	4	5	6
A		Сигнализация	M	Влажность	—
B	—	—	N	—	—
C	—	Регулирование	O	—	—
D	Плотность	—	P	Давление	—
E	Электрическая величина	—	Q	Качество, состав, концентрация	Интегрирование
F	Расход	Соотношение	R	Радиоактивность	Регистрация
G	Размер	—	S	Скорость, частота	Сигнализация
H	Ручное воздействие	Верхний предел	T	Температура	
I	—	Показания	U	Несколько величин	
J	Автоматич. переключение		V	Вязкость	
K	Время		W	Масса	
L	Уровень	Нижний предел	X	(Резерв)	

- для обозначения не предусмотренных стандартами величин могут быть использованы резервные буквы;
- допускается растяжение окружности или нанесение дополнительных обозначений рядом;
- букву E можно применять для обозначения первичных преобразователей, датчиков;
- букву T можно применять для обозначения дистанционной передачи информации;
- букву K можно применять для обозначения переключателей;
- букву Y можно применять для обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств;

– если условное обозначение не раскрывает суть прибора, допускается приводить дополнительную информацию, например, «кодовый», «импульсный» и т.п.;

– скомпонованные панели, блоки, пульта и т.п. обозначаются прямоугольником с соответствующей надписью или ограничиваются тонкой сплошной линией;

– линии связи не допускается проводить через условные обозначения, но допускается пересечение изображений технологического оборудования.

Всем приборам и средствам автоматизации присваиваются позиционные обозначения, сохраняющиеся во всех материалах проекта. Позиционное обозначение образуется из двух частей: номера группы с арабскими цифрами и номера прибора в этой группе, например, 1-3.

### 1.5 Примеры функциональных схем автоматизации

Основной задачей водогрейного котла подача в теплосеть отходящей горячей воды с заданной температурой. Нагрев воды осуществляется путем конвекционного теплообмена топочная камера – водогрейный бак. Схема автоматизации подачи в теплосеть отходящей горячей воды представлено на рис 1.5. Открытие вентиля 2М1 подачи горячей воды в теплосеть происходит по показаниям погружаемой, в подогреваемую воду терморпары ТЕ1

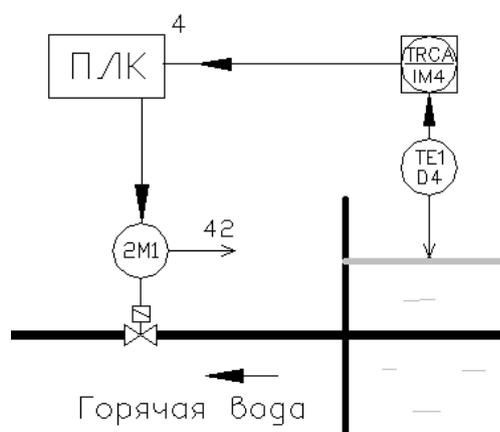


Рисунок 1.5 – Схема автоматизации подачи в теплосеть отходящей горячей воды

Система управления водогрейным котлом кроме регулирования температуры отходящей воды имеет также контуры: системы водоснабжения, воздухообогревания, газоснабжения, дымоотвода.

Воздух на горение подогревается в рекуператорах, установленных в дымопроводе и в борове. Вторичный воздух подогревается в трубчатом рекуператоре. Давление воздуха на горение автоматически регулируется с помощью клапана М1 с учетом температуры после его нагрева в двух рекуператорах. Для защиты рекуператоров от перегрева предусмотренный патрубков сбрасывания воздуха после каждого рекуператора с автоматическим регулировочным клапаном М3 открытие которого осуществляется по показаниям термопары ТЕ9. Схема автоматизации предотвращения перегрева рекуператоров изображена на рис. 1.6.

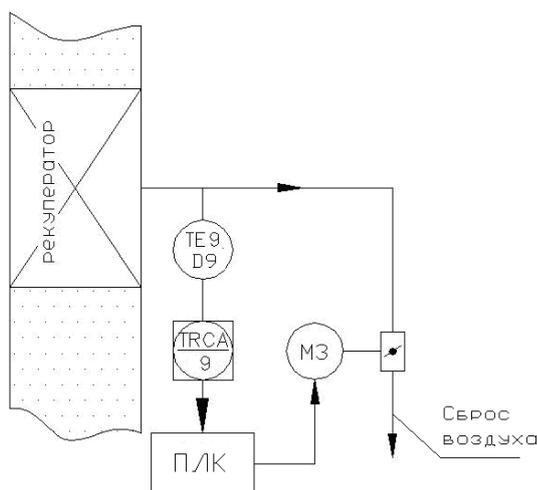


Рисунок 1.6 - Схема автоматизации предотвращения перегрева рекуператоров

В топочной камере осуществляется регулирование температуры по зонам. Регулирование температуры в рабочем пространстве топочной камеры во всех зонах осуществляется по показаниям термопар ТЕ1, ТЕ2 и ТЕ3 путем изменения параметров импульсного режима работы горелок. Изменение импульсного режима работы горелок осуществляется изменением положений заслонок исполнительными механизмами МЭО на подачу газа и воздуха. На рис 1.7 приведена схема автоматизации регулирования температуры в зоне 1

топочной камеры.

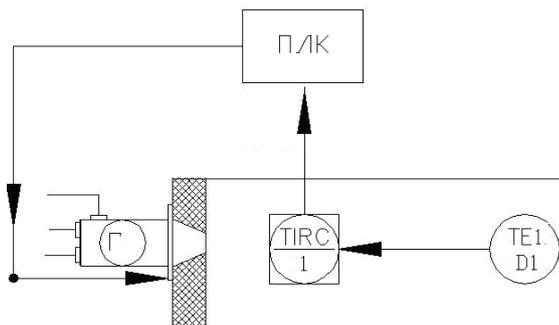


Рисунок 1.7 - Схема автоматизации регулирования температуры в зоне 1 топочной камеры

Регулирование давления воздуха на горение осуществляется по линии обратной связи от измерительного преобразователя давления P14 путем изменения положения регулировочных клапанов исполнительным механизмом M1. Задачей регулятора является автоматическая коррекция давления воздуха в зависимости от ее температуры после рекуператора в соответствии с показаниями термопары TE11. Схема автоматизации регулирования давления воздуха на горение представлена на рис. 1.8.

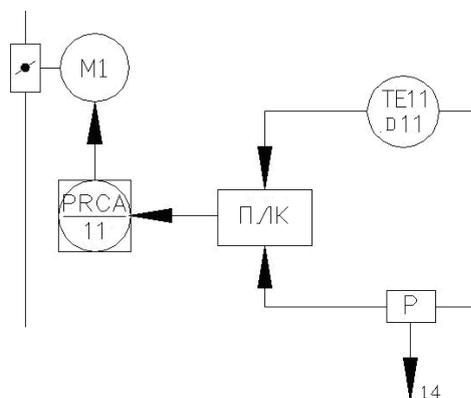


Рисунок 1.8 - Схема автоматизации регулирования давления воздуха на горение

Схема автоматизации управления аэродинамическим шибером изображена на рис. 1.9. Исключение подсосывания холодного воздуха в котел изменяется регулируемой тягой подачи воздуха в боров через положение аэродинамического шибера, которое регулируется приводом исполнительного

механизма М5, по обратной связи от датчика температуры ТЕ8.

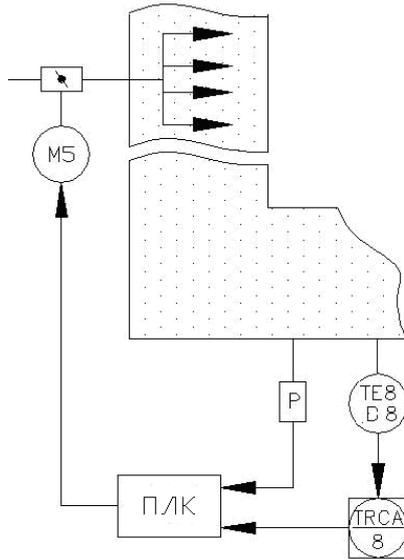


Рисунок 1.9 - Схема автоматизации управления аэродинамическим шибером

Контроль и регулирование рабочего давления пространстве водогрейного котла, производится по линии обратной связи от датчика давления Р12 путем изменения положения дымового клапана с помощью исполнительного механизма М6. Схема автоматизации регулирования давления рабочего давления пространстве водогрейного котла изображена на рис. 1.10.

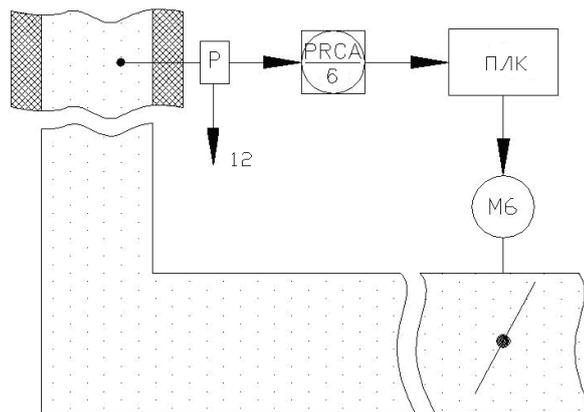


Рисунок 1.10 - Схема автоматизации регулирования давления рабочего давления пространстве водогрейного котла

Пример функциональной схемы автоматизации котла КВГ приведен на рисунке 1.11.

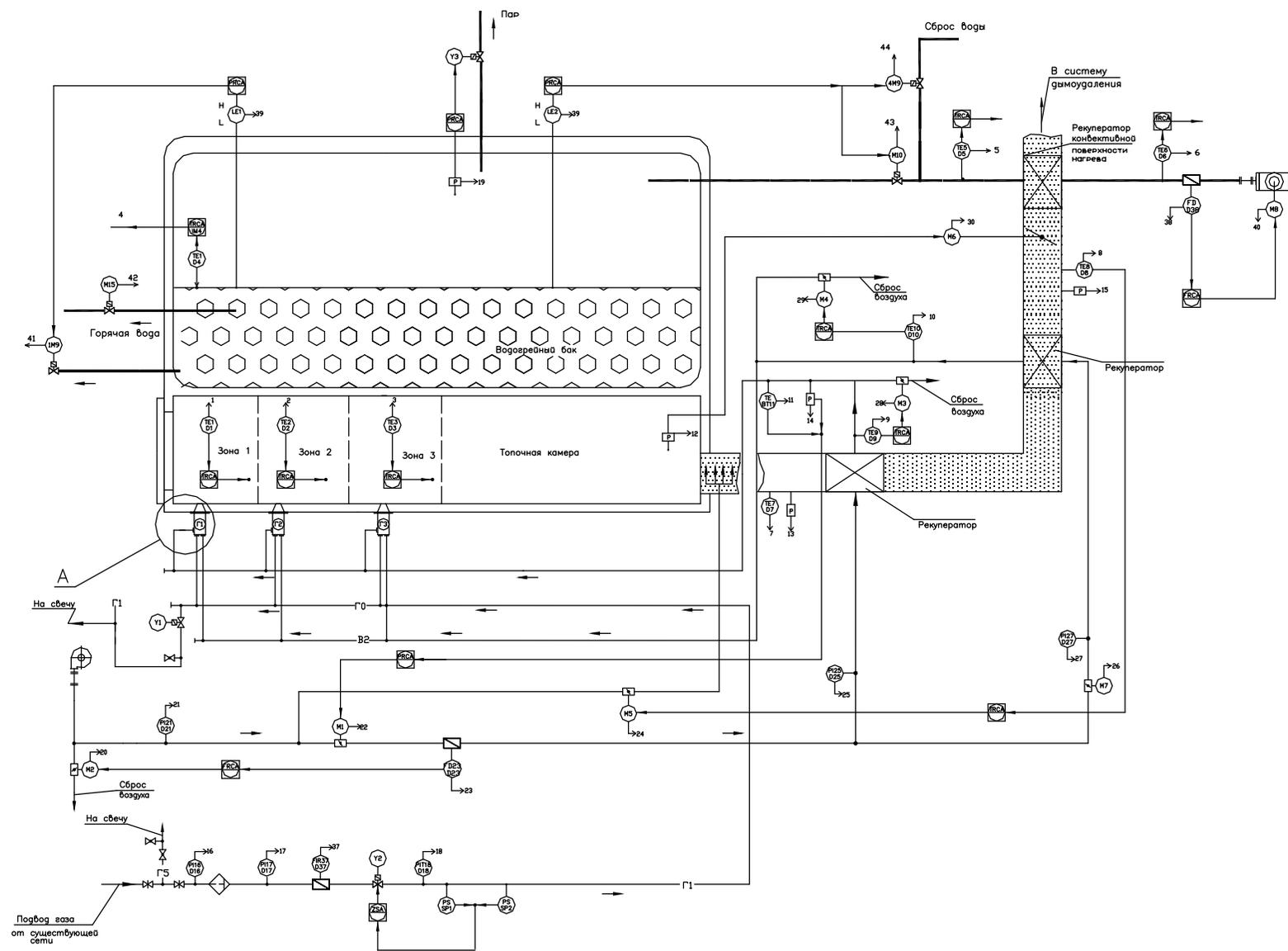


Рисунок 1.11 – Схема автоматизации водогрейного котла КВГ

## 2 КОНТАКТНЫЕ РЕЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1 Классификация, характеристики и требования к реле

*Реле* – это ЭА, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной наперед заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра.

*Классификация реле:*

а) по области применения: для схем автоматики, для управления и защиты энергосистем и электроприводов;

б) по принципу действия: электромагнитные, поляризованные, тепловые, индукционные, магнитоэлектрические, полупроводниковые и другие;

в) в зависимости от выбранного входного параметра: реле тока, напряжения, мощности, частоты и других величин, дифференциальное реле (реагирует на изменение знака);

г) по принципу воздействия на управляемую цепь: контактные и бесконтактные;

д) по способу включения в цепь: первичные и вторичные.

Первичные реле включаются в управляемую цепь непосредственно, вторичные – через измерительные трансформаторы.

*Характеристики реле* (см. рис. 2.1).

Значение входного параметра  $X$  (напряжения, тока и т.д.), при котором происходит срабатывание реле, называется *параметром срабатывания* ( $X_{ср}$ ).

Значение входного параметра, при котором происходит скачкообразное отпускание реле, называется *параметром отпускания* ( $X_{отп}$ ).

$$\text{Коэффициент запаздывания. } K_3 = \frac{X_{раб}}{X_{ср}} \quad (2.1)$$

$$\text{Коэффициент возврата } K_B = \frac{X_{omn}}{X_{cp}}. \quad (2.2)$$

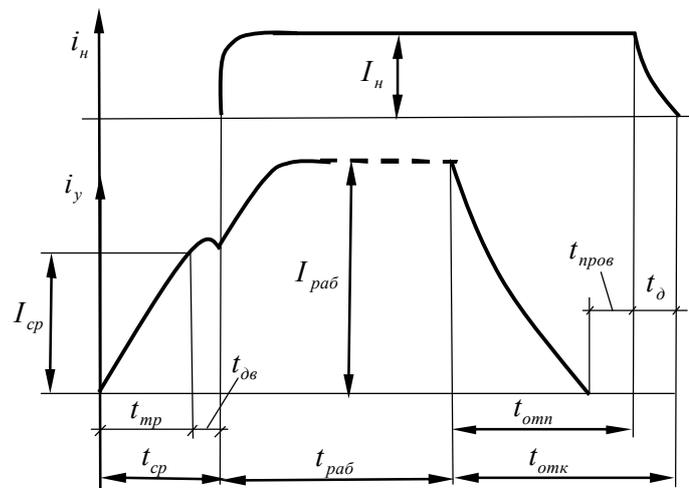
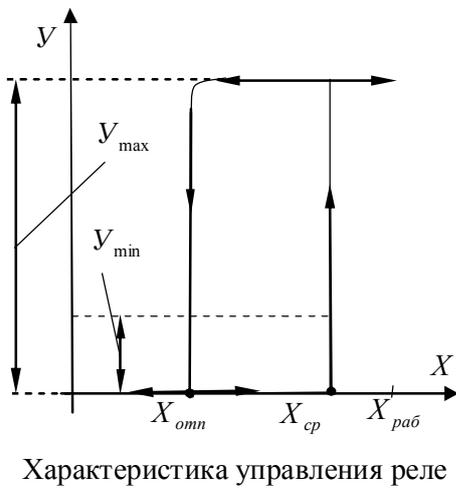


Рисунок 2.1 – Характеристики реле

$$\text{Время срабатывания: } t_{cp} = t_{mp} + t_{дв}; \quad (2.3)$$

где  $t_{mp}$  - время трогания;  $t_{дв}$  - время движения

$$\text{Время отключения: } t_{откл} = t_{отп} + t_{пров} + t_{д}; \quad (2.4)$$

где  $t_{отп}$  - время отпуская;  $t_{пров}$  - время провала;  $t_{д}$  - время угасания дуги.

Усилительное свойство реле характеризуется, коэффициентом усиления:

$$K_y = \frac{P_y}{P_{cp}}. \quad (2.5)$$

где  $P_y$  - максимальная мощность нагрузки в управляемой цепи;  $P_{cp}$  -

минимальная мощность срабатывания.

*Требования к реле:* селективность, быстродействие, чувствительность, надежность.

## 2.2 Реле времени с электромагнитным замедлением

Схематично реле времени с электромагнитным замедлением изображено на рис. 2.2.

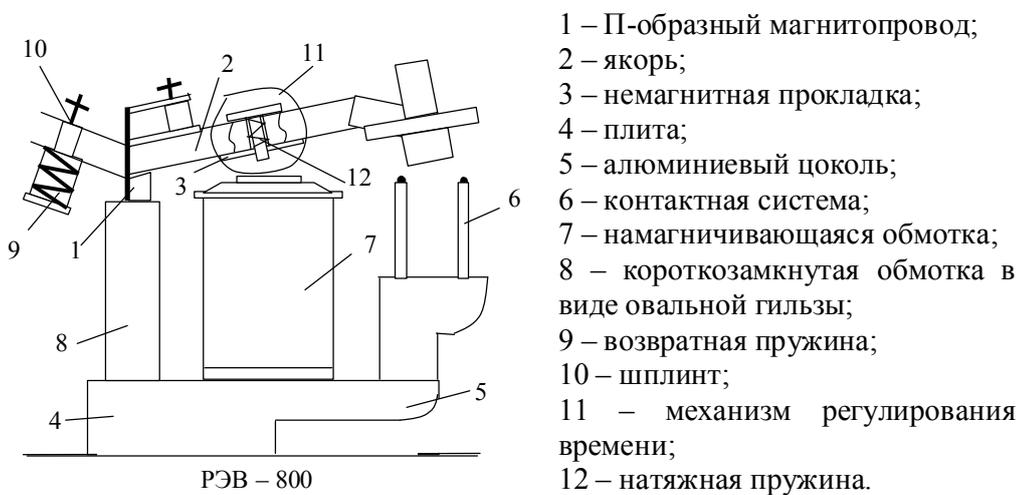


Рисунок 2.2 – Реле времени с электромагнитным замедлением РЭВ–800

Настройка реле времени осуществляется путем регулировки усилия возвратной и натяжной пружины и величиной немагнитной прокладки.

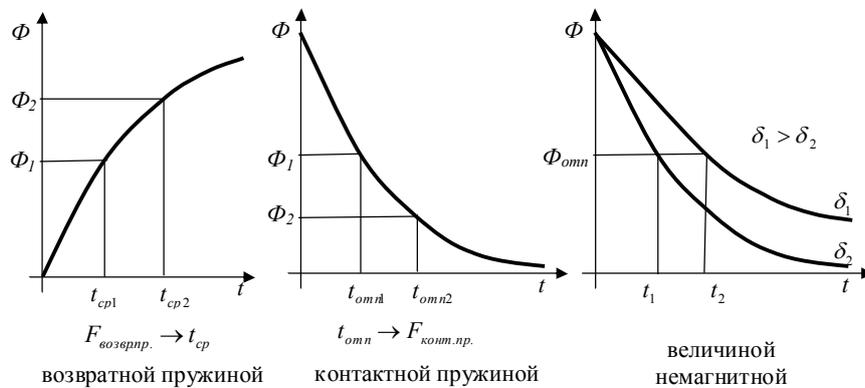


Рисунок 2.3 – Регулировочные характеристики реле времени с электромагнитным замедлением

## 2.3 Электромагнитное реле тока и напряжения (РТ40)

Эти реле благодаря своей простоте конструкции и надежности широко используются в схемах защиты энергосистем. Электромагнитные реле приводятся в действие с помощью электромагнитов постоянного и переменного тока (см. рис. 2.4).

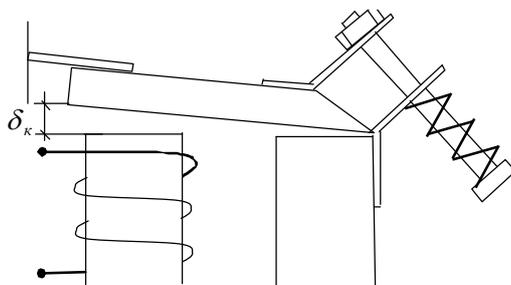


Рисунок 2.4 – Схематичное представление реле тока и напряжения

*Особенности реле тока:* небольшое количество витков; небольшой диаметр сечения провода; большой конечный зазор  $\delta_{\min}$  до 5 мм; малый ход якоря  $s = 1 \div 2$  мм для достижения постоянства электромагнитного потока  $\Phi_{\text{эм}}$ , и электромагнитного усилия  $F_{\text{эм}}$ ; уставка тока срабатывания  $I_{\text{ср}} = I_n \cdot ([30 \div 60] + 100)\%$ .

*Особенности реле напряжения:* реле напряжения отличаются диаметром провода и количеством витков.

## 2.4 Поляризованное реле

В поляризованном реле кроме основного потока, создаваемого катушкой, действует дополнительный магнитный поток, который создается установленным в реле постоянным магнитом. Благодаря поляризующему потоку направление ЭМУ, действующего на якорь, изменяется в зависимости от напряжения тока в катушке.

Потоки постоянного магнита в зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$ :

$$\Phi_{M1} = \frac{F_M}{R_{\delta 1} + R_{\delta}}; \quad \Phi_{M2} = \frac{F_M}{R_{\delta 2} + R_{\delta}}; \quad (2.6)$$

где  $F_M$  - МДС постоянного магнита;  $R_{\delta 1}, R_{\delta 2}$  - сопротивление зазоров  $\delta_1$  и  $\delta_2$ ;  $R_{\delta}$  - сопротивление паразитного зазора.

Магнитный поток катушки:

$$\Phi_K = \frac{F_M}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}}; \quad (2.7)$$

где  $F_M$  - МДС катушки.

При протекании тока по катушкам формируются магнитные потоки, при этом в соответствующих магнитных контурах магнитный поток постоянного магнита складывается с магнитным потоком правого контура и вычитается с левого контура. Вследствие, чего контакты перебрасываются вправо. При уменьшении направления тока происходит обратное переключение контакта. Различают трех позиционное реле и реле с преобладанием. В реле с преобладанием при отключении тока всегда включается левый контакт.

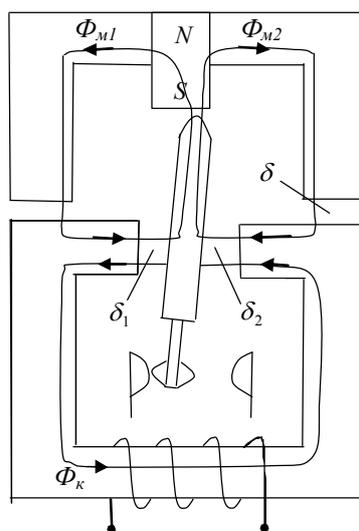


Рисунок 2.5 – Принцип действия поляризованного реле

Регулирование времени срабатывания достигается путем изменения значения потока постоянного магнита.

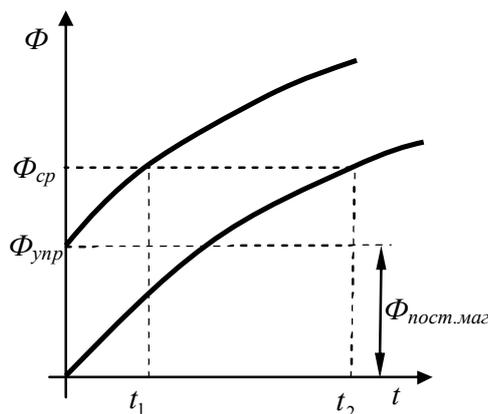


Рисунок 2.6 – Регулировочные характеристики поляризованного реле

Преимущества поляризованного над нейтральным реле:

1. выходной параметр зависит от полярности управляющего импульса, что расширяет его функциональные возможности;
2. реле могут управляться кратковременными импульсами тока;
3. замкнутое состояние контактов остается после окончания управляющего импульса, что позволяет использовать реле как элемент памяти;
4. после срабатывания не потребляется мощность для удержания якоря в притянутом положении;
5. высокая чувствительность и высокий коэффициент усиления мощности;
6. за счет положения упоров можно осуществить однопозиционную, нейтральную и двухпозиционную настройку.

Типы: РПС-18; РЭМ34; РЭМ33; РПС-32, 34, 36; РЭС-39,34,44.

## 2.5 Тепловое реле

Долговечность энергетического оборудования в значительной степени зависит от перегрузок, которым оно подвергается во время работы. Для

любого объекта можно найти зависимость допустимой длительности протекания тока от его значения, при котором обеспечивается его надежная и длительная эксплуатация.

Для защиты энергетического оборудования от токовых перегрузок широко применяются тепловые реле с биметаллическими пластинами. Биметаллический элемент состоит из двух пластин с различным коэффициентом линейного расширения  $\alpha$ , эти пластины жестко закреплены друг с другом. Если такой элемент нагреть то происходит его изгиб в сторону материала с меньшим  $\alpha$ .

Максимальный изгиб:

$$X_{\max} = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \tau}{\delta}, \quad (2.8)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  - температурный коэффициент расширения материала  $\alpha_1 > \alpha_2$ ;  $\delta$  - суммарная толщина биметаллического материала;  $l$  - его длина;  $\tau$  - превышение температуры биметаллического элемента относительно окружающей среды.

Незакрепленный конец элемента развивает усилие:

$$P = \frac{3}{16}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{b \sigma^2}{l} E \tau, \quad (2.9)$$

где  $b$  - ширина элемента;  $E = \frac{E_1 + E_2}{2}$  - средний модуль упругости материала элемента.

Широкое распространение получили материалы: инвар (малое  $\alpha$ ), хромникелевая сталь (большое значение  $\alpha$ ).

Способы нагрева биметаллических пластин:

- при прохождении тока выделяется тепло;

- специальные нагреватели;
- комбинаторный нагрев.

Основной характеристикой теплового реле является зависимость времени от тока нагрузки (времятоковая характеристика).

$$t_{cp} = T \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_\infty^2}, \quad (2.10)$$

где  $T$  - постоянная времени нагрева реле;  $I_0$  - ток предварительной нагрузки, протекающий через элемент;  $I_\infty$  - ток сработки реле, за время  $t \gg T$ ;  $I$  - ток сработки реле за время  $t_{cp}$ .

Из-за инерционности теплового процесса тепловые реле имеющие биметаллический элемент, не пригодны для защиты цепей от короткого замыкания. Поэтому защита должна быть дополнена магнитным реле, предохранителями или автоматическими выключателями.

## 2.6 Выбор электромагнитных реле защиты электродвигателей

### 1) Методика выбора токовых реле (КА):

а) Номинальный ток срабатывания реле должен быть равен максимальному току электродвигателя, который защищается  $I_{ном.р} \geq I_{ном.дв}$ , где  $I_{ном.р}$  и  $I_{ном.дв}$  - номинальный ток реле и двигателя, который защищается (см. рис. 2.7а)

б) уставка реле по току срабатывания  $I_{уст} \geq (1,3 \div 1,5)I_{пуск}$ ,  $I_{пуск}$  - пусковой ток двигателя (см. рис. 2.7б);

К примеру для двигателей с фазным ротором:  
 $I_{уст} \geq (2,25 \div 2,5)I_{ном.дв}$ ; установка КА0:  $I_{уст} \geq (2,25 \div 2,5)I'_{ном.дв} + \sum I_{ном.дв}$

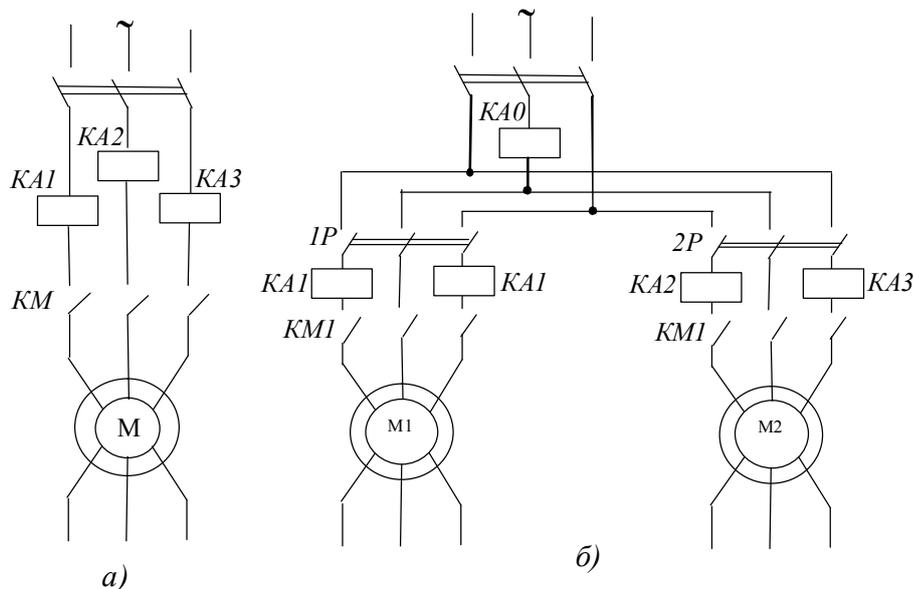


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема максимальной токовой защиты асинхронного электродвигателя

в) В случае если токи цепи двигателей достаточно велики, то реле защиты включаются в цепь с помощью трансформаторов тока ТА (см. рис. 2.8).

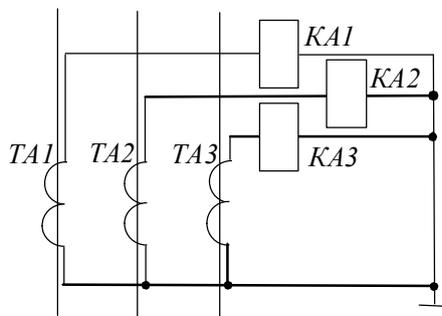


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема включения реле тока с помощью трансформаторов тока

г) Для того чтобы защитить двигатель при затянувшемся пуске (велика нагрузка на валу) или кратковременной перегрузке, КА воздействует на контактор через реле времени КТ, которое запускается с помощью реле КА4, его ток уставки:  $I_{уст} \leq 0,75I_{пуск}$  (см. рис. 2.9).

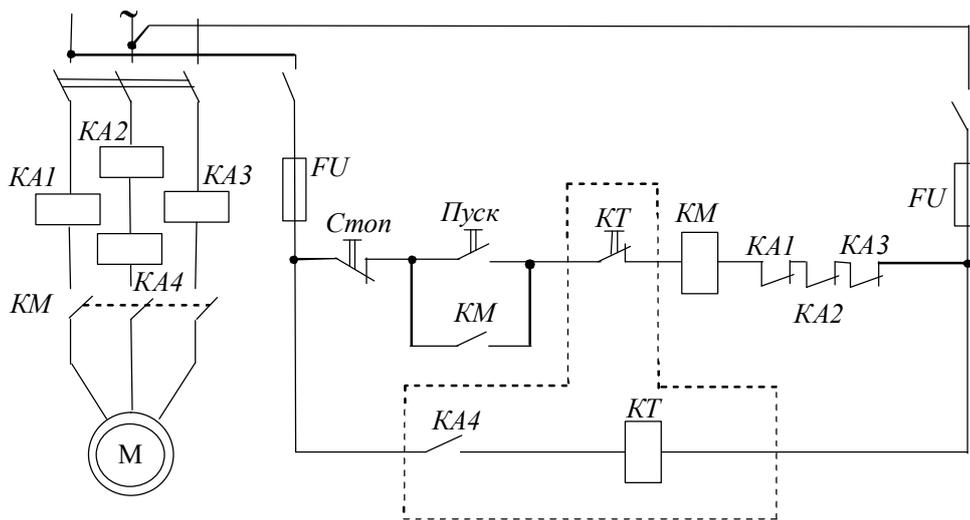


Рисунок 2.9 – Принципиальная схема защиты электродвигателя от затянувшегося пуска

2) *Выбор тепловых реле.* Применение тепловых реле целесообразно при длительности включения двигателя более 30 минут. При этом ток уставки теплового реле:  $I_{ном.нагр} = I_{ном.дв}$ ;  $I_{уст} = (0,75 \div 1,25)I_{ном.нагр}$ .

С учетом температуры окружающей среды:

$$I_{ном.нагр} = \frac{I_{ном.дв}}{1 - \frac{\delta}{100} \frac{\theta - \theta_{ном.окр}}{10}}. \quad (2.11)$$

3) *Защита двигателей от снижения напряжения.* При коротком замыкании в сети напряжение на двигателе уменьшается, а ток в статоре возрастает. Для защиты от снижения напряжения применяют электромагнитное реле напряжения KV.

Уставка реле напряжения: номинальное напряжение для реле KV должно быть равно напряжению срабатывания:  $U_{ном} = U_{ном.с}$ . Напряжение срабатывания для контактора:

– переменного тока  $U_{ср} \leq 0,85U_{ном.с}$ ;

– постоянного тока  $U_{ср} \leq 0,65U_{ном.с}$ .

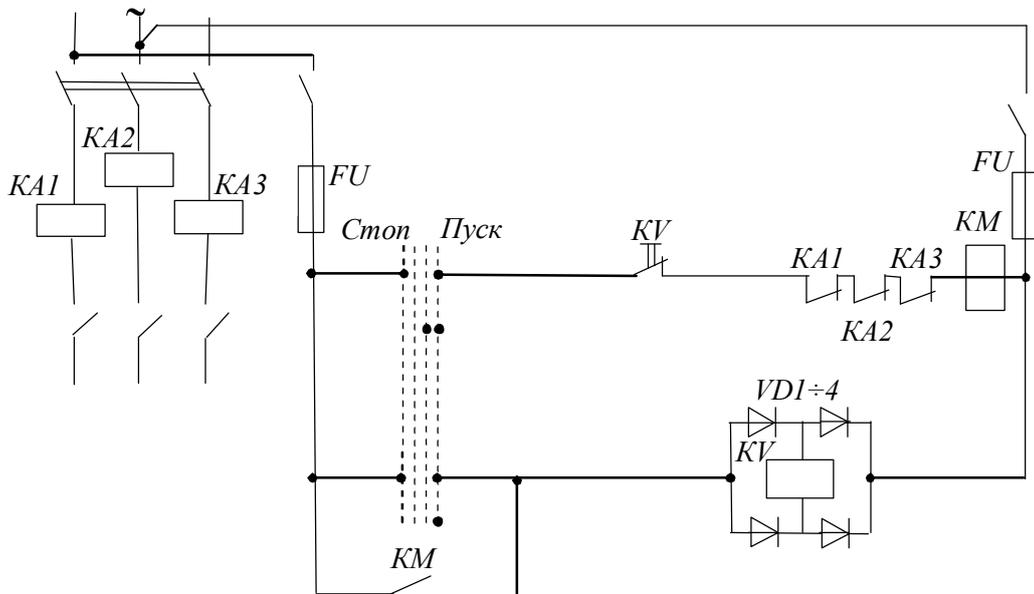


Рисунок 2.10 – Схема защиты двигателя при исследовании напряжения

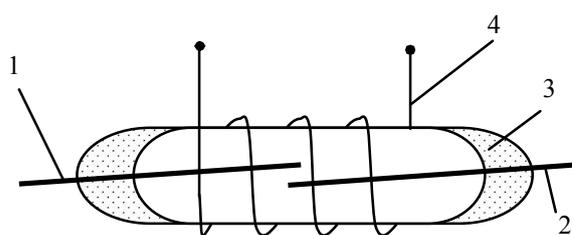
Напряжение отпускания реле с высоким коэффициентом возврата для самозапуска двигателя.

$$U_{отп.р} (0,6 \div 0,7) U_{ном.с} \quad (2.10)$$

### 3 ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ

#### 3.1 Устройство и принцип работы герконового реле

Устройство герконового реле (ГР). (см. рис. 3.1) Контактные сердечники (КС) 1 и 2 изготавливаются из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллоя) и ввариваются в стеклянный герметичный баллон 3. Баллон заполняется инертным газом (азот), инертная среда предотвращает окисление КС. Баллон устанавливается в обмотке управления 4. При подаче тока в обмотку возникает магнитный поток, который заставляет замыкаться КС. При исчезновении магнитного потока электромагнитная сила спадает и под действием сил упругости, КС размыкаются.



- 1 и 2 – Контактные сердечники;
- 3 – герметический стеклянный баллон
- 4 – магнитопровод (обмотка)

Рисунок 3.1 – Простейшие герконовые реле

На основе герконов могут быть созданы также реле с размыкающими и переключающими контактами. В герконе с переключающим контактом (рис. 3.2а) неподвижные КС 1, 3 и подвижный 2 размещены в баллоне 4. При появлении сильного магнитного поля КС 2 притягивается к КС 1 и размыкается с КС 3. Один из КС переключателей геркона (напр. 2) может быть выполнен из немагнитного материала (рис. 3.2б). ЧР (рис. 3.2в) имеет две обмотки управления 7, 8. Контакт 3 притягивается к КС 1 и к КС 2 и замыкает их. При согласном отключении обмоток 7, 8 и при согласном включении обмоток 9, 10 контакт замыкает КС 5 и КС 6.

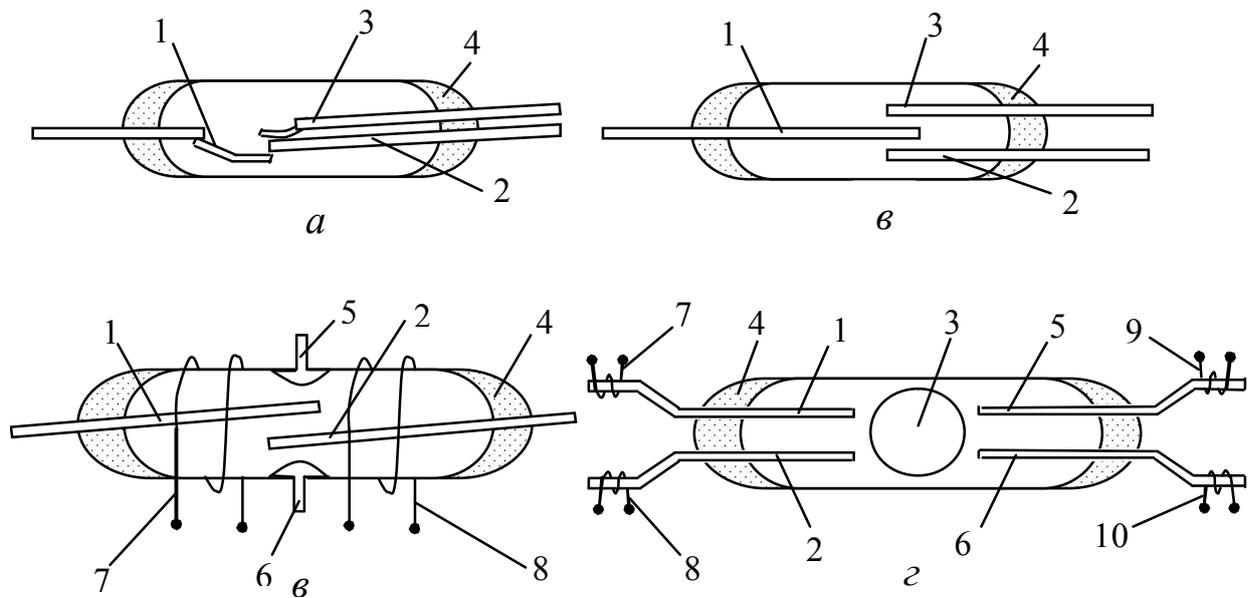


Рисунок 3.2 – Герконовые реле с размыкающими и переключающими контактами

### 3.2 Поляризованное герконовое реле

Управлять состоянием геркона можно с помощью поля постоянного магнита. Такой способ широко применяется в слабо точных аппаратах управления (тумблеры, переключатели, кнопки и другие).

Для устройств управляемых постоянными магнитами основными параметрами являются (см. рис. 3.3):

- а) координата срабатывания  $y_{cp}$ , определяет расстояние между магнитом и герконом в момент срабатывания;
- б) координата отпущения  $y_{omn}$ , определяет расстояние между магнитом и герконом при отпуске;
- в) дифференциал хода  $d$ ,  $d = y_{omn} - y_{cp}$ ;
- г) зона включенного состояния  $\Delta y$ ,  $\Delta y = y_{omn} + y_{co} = 2y_{cp} + d$ .

Принцип управления герконом с помощью ферромагнитного экрана изображен на рис. 3.4.

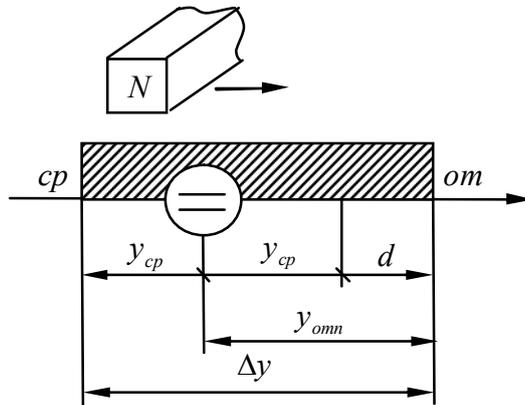
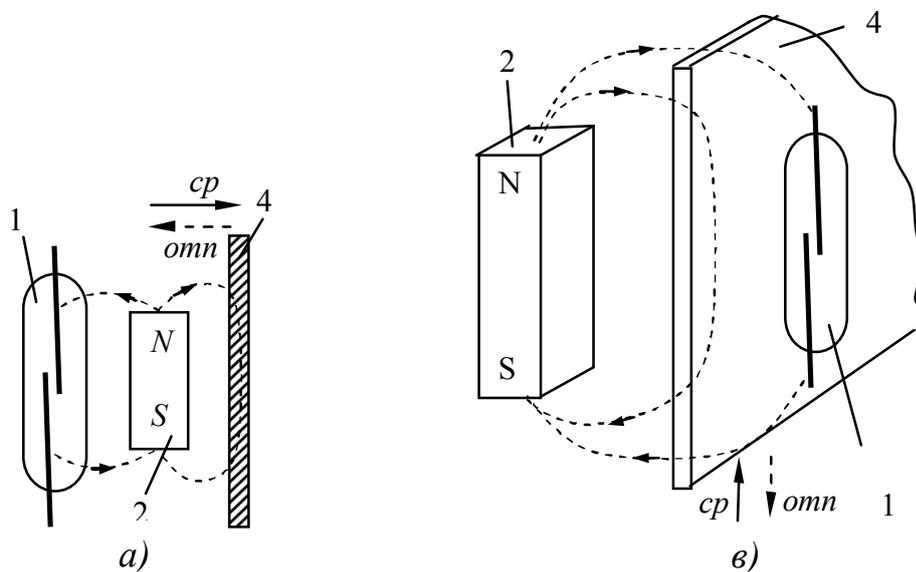


Рисунок 3.3 – Параметры управления поляризованного герконового реле



Геркон 1 срабатывает при удалении экрана от постоянного магнита 2

Геркон 1 срабатывает при удалении экрана 4 из зазора между постоянным магнитом 2 и герконом

Рисунок 3.4 – Принцип управления герконом с помощью ферромагнитного экрана

### 3.3 Герконовые реле с памятью (ферриды)

*Устройство и принцип действия ферридов* (см. рис. 3.5). Два элемента магнитной памяти (ЭМП) 1 и 1' примыкают к КС геркона 3. ЭМП выполняют из реманентных материалов, которые характеризуются прямоугольной

петлей гистерезиса и достаточно высокой остаточной индукцией, большой магнитной энергией и малым временем перемагничивания (10 – 50мкс). При появлении управляющего импульса и согласном включении обмоток 2 и 2' создаваемый ими магнитный поток проходит через КС и оба ЭМП, которые намагничиваются. После прохождения импульса КС притягиваются за счет потока остаточной индукции ЭМП. Для отключения реле в обмотку 2 подается импульс тока той же полярности и амплитуды, а в обмотку 2' - той же амплитуды, но обратной полярности. За счет разности МДС обмоток происходит размагничивание ЭМП и уменьшение магнитного потока в зазоре между КС, и они размыкаются. Длительность импульса тока срабатывания  $100 \div 300\text{мкс}$ .

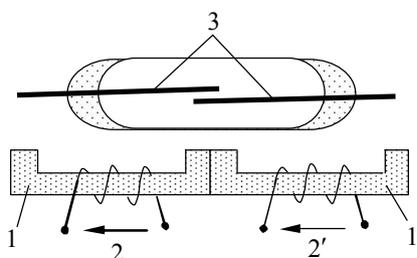


Рисунок 3.5 – Герконовые реле с памятью

### 3.4 Преимущества и недостатки герконового реле

#### *Преимущества:*

- 1) возможность работы в условиях повышенной влажности, запыленности и т. п. При низком переходном сопротивлении в замкнутом положении ( $0,001 \div 0,01\text{Ом}$ );
- 2) простота конструкции, малый вес и габариты;
- 3) высокое быстродействие ( $1 \div 3\text{мс}$ );
- 4) высокая электрическая прочность;
- 5) гальваническая развязка цепей управления и коммутируемых цепей;
- 6) возможность управления как электромагнитным полем, так и

ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ.

*Недостатки:*

- 1) сравнительно низкая чувствительность по МДС управления;
- 2) восприимчивость к внешним магнитам;
- 3) хрупкость стеклянного баллона, чувствительность к ударам и вибрациям;
- 4) значительное время вибрации контактов;
- 5) малая мощность коммутирующих цепей;
- 6) возможность самопроизвольного размыкания контактов при больших токах.

## 4 ДАТЧИКИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 4.1 Типы датчиков и их характеристики.

*Датчик* – это электрический аппарат, предназначенный для преобразования непрерывного изменения входной (контролируемой) неэлектрической величины в изменении выходной электрической величины.

Основной характеристикой является чувствительность:

$$S = \Delta Y / \Delta X, \quad (4.1)$$

где  $\Delta Y$ ,  $\Delta X$  – приращения выходной и входной величины.

Часто пользуются относительной чувствительностью:

$$S_0 = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X}, \quad (4.2)$$

где  $Y$  и  $X$  – полные изменения выходной и входной величины.

Датчики могут быть линейными ( $S=\text{const}$ ) и нелинейными ( $S=\text{var}$ ). У последних чувствительность зависит от входной величины. Важнейшим параметром датчика является порог чувствительности, представляющий собой наименьшее значение входной величины, вызывающее изменение выходной величины, которое может быть измерено.

Номинальной характеристикой датчика является зависимость вход-выход, которая дается в паспорте. Экспериментально снятая зависимость вход-выход отличается от номинальной на погрешность.

Различают погрешности:

– абсолютная  $\Delta X = X_{\text{вх.ном}} - X_{\text{д}}$ ;

– относительная  $\gamma_0 = \Delta X / X_{\text{д}}$ ,

где  $X_{\text{вх.ном}}$  – значение входной величины датчика, определенное по выходной величине и номинальной характеристике;  $X_{\text{д}}$  – действительное значение входной величины.

Коэффициент передачи или преобразования датчика:

$$K_{\text{ном}} = \frac{X_{\text{вх.ном}}}{X_{\text{вых}}} \quad (4.3)$$

Различают аддитивную погрешность, независящую от входной величины, и мультипликативную погрешность, зависящую от нее. Погрешность, а именно ее наличие, обусловлено влиянием возмущающих факторов окружающей среды (помех).

Датчики можно разбить на:

– параметрические (пассивные) – резистивные, индуктивные, емкостные и контактные датчики;

– генераторные (активные), используют пьезоэффект, эффект Холма, термо-ЭДС и тому подобное.

## 4.2 Датчики, устройство и принцип работы

а) *Резистивные датчики.* Эти датчики относятся к контактным. В таких датчиках подвижный скользящий контакт 1 переменного резистора связан с элементом, перемещение которого контролируется (см. рис. 4.1 а и б). Если сечение каркаса 2, на которое намотан резистор всюду одинаково, то сопротивление датчика меняется пропорционально углу поворота  $\alpha$  или ходу  $X$ . При необходимости зависимость  $R(\alpha, X)$  может быть нелинейной. Тогда

каркас имеет переменное сечение или резисторы неодинакового сопротивления.

Возможные схемы включения датчиков приведены на рис. 4.2.

Чувствительность датчика с линейным перемещением:  $S = \frac{dU_{\text{вых}}}{dX} = \frac{U_0}{X_{\text{max}}}$ ,

чувствительность повышается при увеличении  $U_0$ , однако увеличивается мощность рассеивания.

$$\text{Максимальная чувствительность } S_{\text{max}} = \frac{\sqrt{P_{\text{max}} R_0}}{X_{\text{max}}}, \quad (4.4)$$

где  $P_{\text{max}}$  – наибольшая допустимая мощность резистора  $R_0$ .

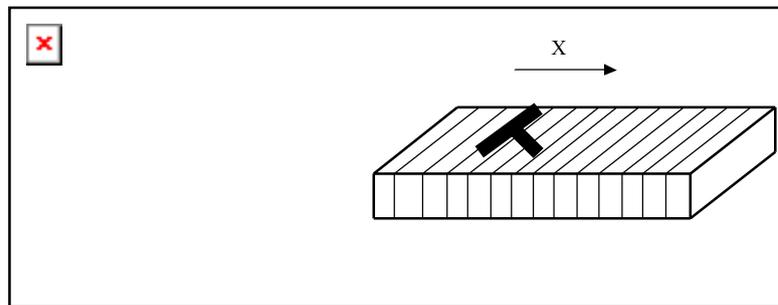


Рисунок 4.1 – Исполнения резистивных датчиков: а) поворотный; б) линейный

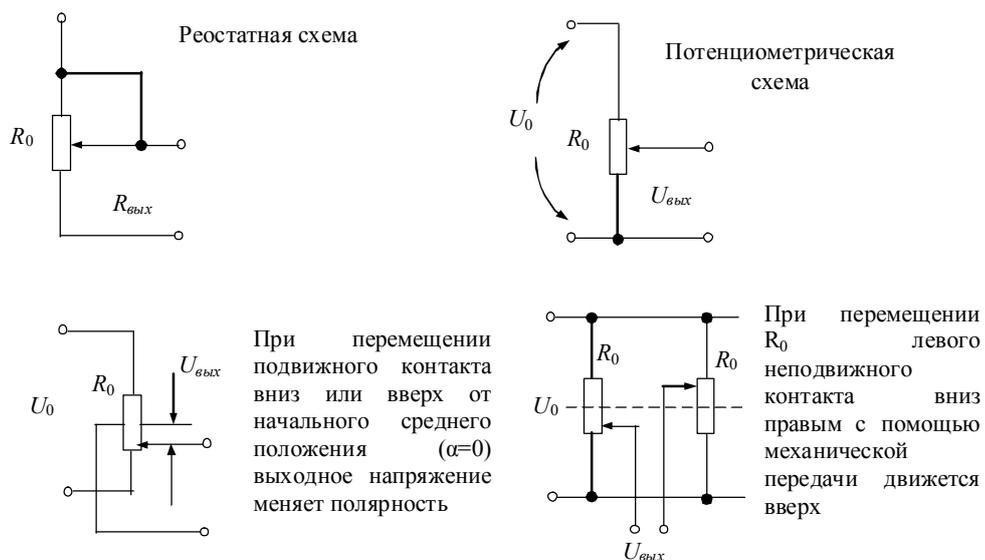


Рисунок 4.2 – Возможные схемы включения резистивных датчиков

Резистивные датчики применяются для измерения линейных и угловых перемещений. С их помощью можно измерить уровень и расход жидкости (датчик соединяется с поплавком), силу (датчик соединяется с упругим элементом), размеры и т. д.

б) *Индуктивные датчики.*

*Индуктивный датчик контроля перемещения.* Индуктивность обмотки  $L$  и протекающий по ней ток  $I$  могут изменяться за счет изменения зазора  $\delta$  или его площади (см. рис. 4.3 и 4.4). Чувствительность индуктивных датчиков:

$$\text{– при изменении зазора } S_\delta = -\frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{L_0}{\delta_0(1 + \Delta\delta/\delta_0)}; \quad (4.5)$$

$$\text{– при изменении площади } S_\delta = \frac{\Delta L}{\Delta S} = \frac{L_0}{S_0}. \quad (4.6)$$

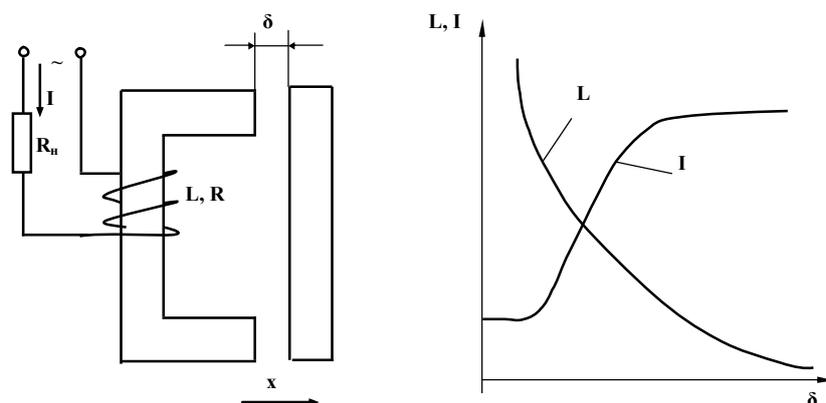


Рисунок 4.3 – Индуктивный датчик с изменяющимся зазором

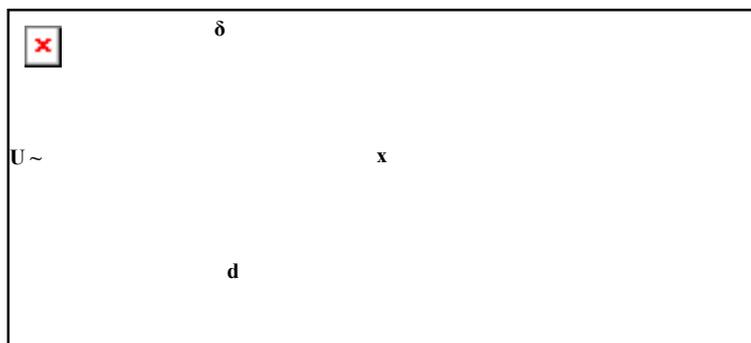


Рисунок 4.4 – Индуктивный датчик с изменяющейся площадью зазора

$$\text{Ток в цепи обмотки: } I = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R)^2 + \omega^2 (L_n + k \frac{S}{\delta_1})^2}}. \quad (4.7)$$

Дифференциальный датчик (рис. 4.5) содержит две совершенно одинаковые и симметрично расположенные электромагнитные системы

$$\text{Токи в обмотках } \omega_1 \text{ и } \omega_2: I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R)^2 + \omega^2 (L_n + k \frac{S}{\delta_1})^2}}; \quad (4.8)$$

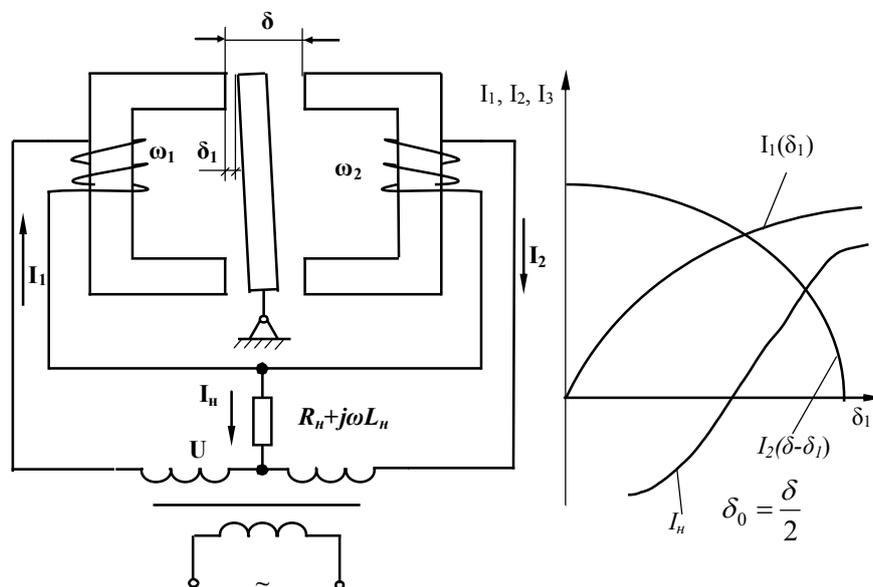


Рисунок 4.5 – Индуктивный дифференциальный датчик

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R)^2 + \omega^2 (L_n + k \frac{S}{\delta - \delta_1})^2}}. \quad (4.9)$$

$$\text{Ток в нагрузке } I_n = I_1 - I_2. \quad (4.10)$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент;  $R$  – активное сопротивление обмотки.

*Индуктивный датчик контроля углового перемещения.* Данный датчик (см. рис. 4.6) представляет собой разновидность индуктивного датчика контроля перемещения, у которого в качестве элемента контролирующего перемещение (количество оборотов) выступает профилированный диск или кулачок. При вводе в воздушный зазор профилированного ферромагнитного диска, контролируемый угол в данном случае достигает  $360^{\circ}$ .

в) *Трансформаторные датчики.*

В трансформаторном датчике (см. рис. 4.7) при изменении зазора  $\delta$  полное сопротивление первичной обмотки  $Z_1 \approx \omega L_1$  также меняется и происходит перераспределение напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , так и в индуктивном датчике.

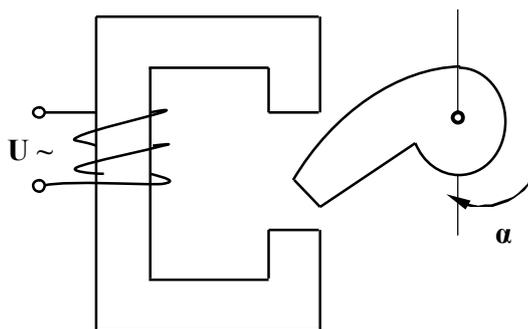


Рисунок 4.6 – Датчик с профильным диском

Трансформаторные датчики выгодно отличаются от индуктивных отсутствием гальванической связи между цепью питания и выходной цепью, а также простотой измерительных схем. Относительно большая мощность датчиков (до нескольких десятков Ватт) позволяет применять их без промежуточных усилителей.

Индуктивные и трансформаторные датчики применяются для измерения перемещений, деформаций, контроля размеров и т. п.

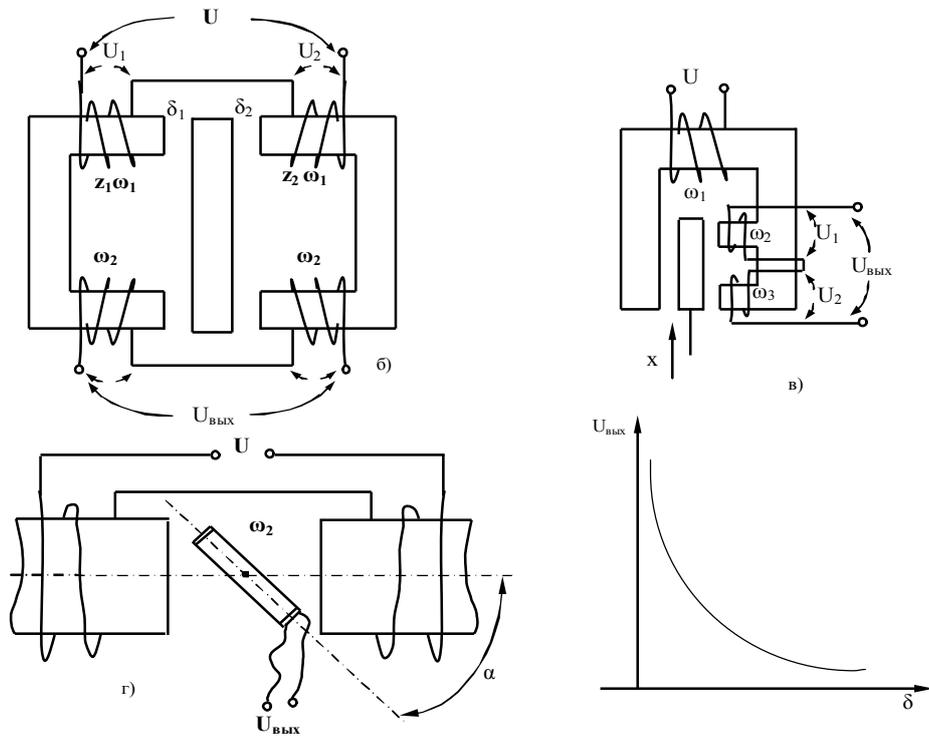


Рисунок 4.7 – Трансформаторные датчики: а) трансформаторный датчик с одним магнитопроводом; б) дифференциальный трансформаторный датчик; в) трансформаторный датчик с изменяемой площадью зазоров; г) датчик с поворотной рамкой

г) Магнитоупругие датчики (см. рис. 4.8).

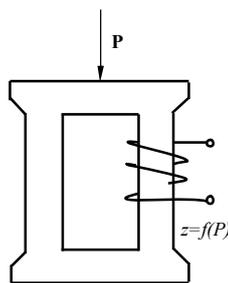


Рисунок 4.8 – Магнитоупругий датчик

Принцип действия датчика. На ферромагнитный материал воздействует усилие  $P$ , в результате меняется магнитная проницаемость  $\mu_a$ .

Для увеличения чувствительности желательно чтобы материалы имели высокую проницаемость и малую индукцию насыщения, эти свойства имеет пермаллой.

д) *Индукционные датчики.* Работа этих датчиков основана на изменении ЭДС индукции. Индукционные датчики (ИД) часто используются как датчики скорости. Если используется дифференцирующие и интегрирующие цепочки, то можно получить выходные величины, пропорциональные ускорению и перемещению.

*Индукционный датчик скорости линейного перемещения.* Выходной сигнал снимается с обмотки, в которой наводится ЭДС:

$$E = Bl\omega V ,$$

где  $B$  – индукция, создаваемая в рабочем зазоре кольцевым постоянным магнитом;  $l$  – длина витка перемещающейся измерительной обмотки, м;  $\omega$  – число витков;  $V$  – скорость перемещения измерительной обмотки, м/с.

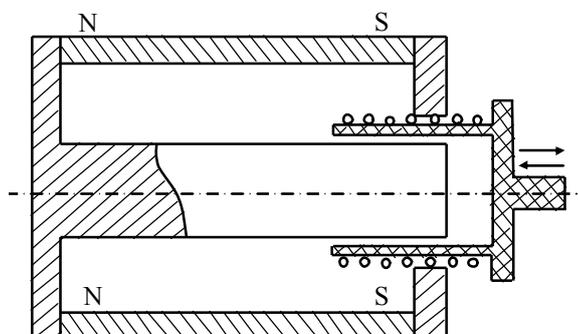


Рисунок 4.9 – Индукционный датчик скорости линейного перемещения

Чувствительность датчика:  $S=Bl\omega$ , может быть увеличена за счет увеличения индукции и числа витков. Для получения сигнала пропорционального перемещению, сигнал с обмотки интегрируется с помощью  $RC$ -цепочки. При интегрировании с малой погрешностью

постоянная времени  $T=RC$  берется достаточно большой и сигнал уменьшается в сотни раз.

*Тахогенератор (ТГ) и импульсный индукционный датчик (ИИД),* используется для контроля частоты вращения. ТГ постоянного тока может представлять генератор малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. ЭДС на выходе такого генератора пропорциональна частоте его вращения  $n$ :  $E=kn$ .

Для повышения линейности выходной характеристики сопротивление нагрузки должно быть, как можно больше, но при этом уменьшается реакция якоря. Переходное сопротивление щеток вносит существенную погрешность. Более надежные асинхронные ТГ (см. рис. 4.10).

Устройство и принцип действия асинхронного тахогенератора. Обмотка статора 1 питается от источника переменного тока частотой 400–500 Гц. Обмотка 2 неподвижна и сдвинута относительно обмотки 1 на  $90^\circ$ . Полый алюминиевый ротор 3 связан с валом, скорость которого контролируется.

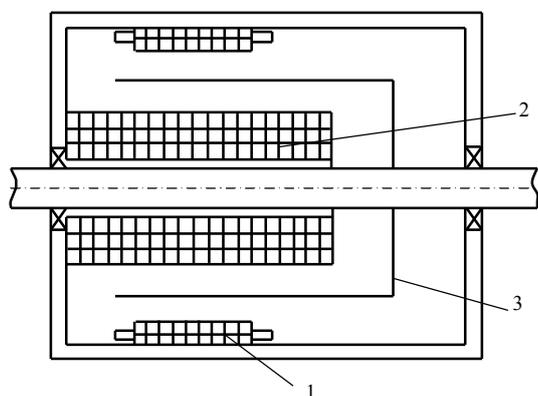


Рисунок 4.10 – Асинхронный тахогенератор

При неподвижном роторе пульсирующий поток от обмотки 1 не вызывает ЭДС в выходной обмотке, так как оси обмоток сдвинуты на  $90^\circ$ . При вращении ротора 3 в нем ЭДС и токи резания, пропорциональны частоте

вращения, эти токи создают поперечное магнитное поле, изменяющееся с частотой питания. Возникшее в обмотке 2 под действием магнитного поля ротора ЭДС имеет амплитуду, пропорциональную угловой скорости ротора:  $E \equiv \omega$ .

Достоинством является отсутствие щеток и неизменность частоты выходного сигнала. Следует отметить, если обмотку 1 питать от сети постоянного тока, то обмотка 2 выдает ЭДС, пропорциональное угловому ускорению вала.

*Принцип действия и устройство импульсного индукционного датчика.*

На вращающемся валу укреплен выступ 1 из магнитомягкой стали. При прохождении выступа мимо рабочего зазора магнитное сопротивление  $R_M$  для потока постоянного магнита резко уменьшается (см. рис. 4.11).

При нарастании потока появляется первый импульс ЭДС в выходной обмотке 3. При спадании потока – второй. За один оборот появляются два импульса ЭДС. Число импульсов в единицу времени считается измерительным устройством.

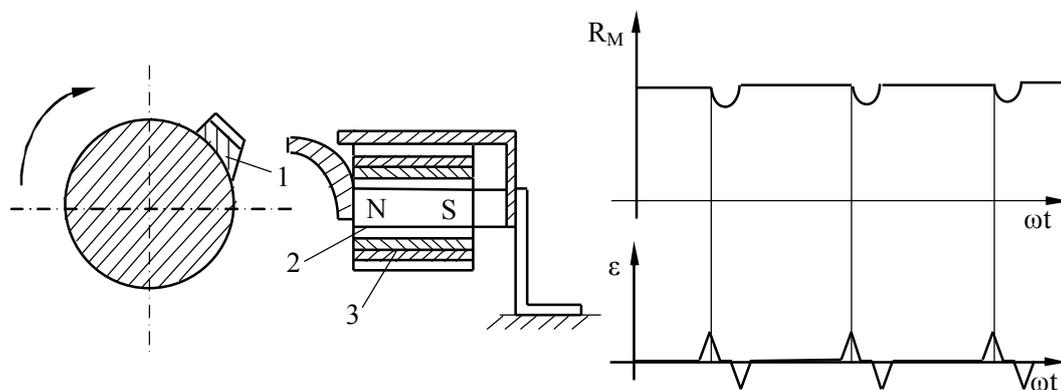


Рисунок 4.11 — Импульсный индукционный датчик

Достоинство датчика – в точности, не зависящей от качества выполнения магнитной системы, расстояния между валом и магнитом и других факторов. Источником погрешности для первых двух типов датчиков является изменение сопротивления обмоток под действием температуры.

## 5 ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАШИНЫ

К числу информационных машин относятся: поворотные трансформаторы, сельсины, магнесины и асинхронные тахогенераторы.

### 5.1 Поворотный трансформатор

Поворотными трансформаторами называют электрические машины переменного тока, преобразующие угол поворота  $\alpha$  в напряжение, пропорциональное некоторым функциям этого угла или самому углу. В зависимости от закона изменения выходного напряжения они подразделяются на следующие типы:

а) синусно – косинусный трансформатор, позволяющий получить на выходе два напряжения, одно из которых пропорционально  $\sin\alpha$ , а второе  $\cos\alpha$ ;

б) линейный поворотный трансформатор, выходное напряжение которого пропорционально углу  $\alpha$ ;

в) трансформатор – графопостроитель, выходное напряжение которого связано с подаваемыми первичными напряжениями зависимостью:

$$U_{\text{вых}} = C\sqrt{U_1^2 + U_2^2}, \quad (5.1)$$

где  $C$  – постоянная.

Для получения поворотных трансформаторов различных типов может быть использована одна и та же машина с двумя обмотками на статоре и двумя на роторе при различных способах включения обмоток.

Поворотные трансформаторы широко используются в автоматических и вычислительных устройствах для решения геометрических и тригонометрических задач. В системах автоматического регулирования они используются в качестве измерителей рассогласования.

Конструктивно поворотный трансформатор выполняется так же, как асинхронный двигатель с фазным ротором. На статоре и роторе расположены по две одинаковые однофазные распределенные обмотки, сдвинутые между собой в пространстве на 90 градусов. Магнитопровод – шихтованный.

Поворотный трансформатор может работать в режиме поворота ротора или в режиме вращения. В первом случае положение ротора относительно статора задается поворотным механизмом (см. рис. 5.1).

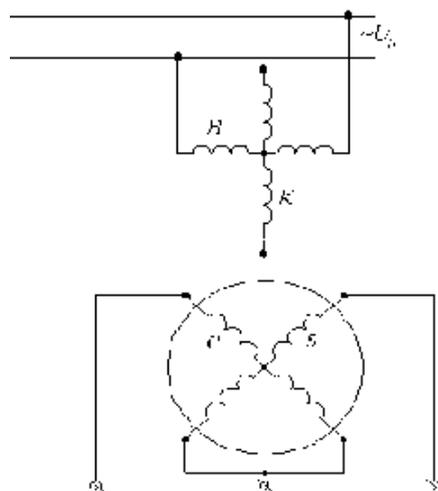


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема четырехобмоточного поворотного трансформатора

В этом режиме одна из статорных обмоток – обмотка возбуждения В – присоединяется к сети переменного тока, а другая – компенсационная или квадратурная обмотка К – подключается к некоторому сопротивлению или замыкается накоротко. В некоторых случаях обе статорные обмотки получают питание от независимых источников переменного напряжения. Обмотка ротора *S* (синусная) и *C* (косинусная) присоединяются к контактными кольцам. Для уменьшения числа колец концы двух обмоток объединяются. Применяется так же токосъем с помощью спиральных пружин; в этом случае угол поворота ротора ограничен 1,8...2 оборотами.

При работе в режиме вращения обмотки возбуждения и компенсации с целью уменьшения числа контактных колец размещают на роторе, а

синусную и косинусную – на статоре. При этом компенсационная обмотка замыкается накоротко, а выводы обмотки возбуждения подключаются к двум контактными кольцам.

Принцип действия. При подключении обмотки возбуждения  $B$  к сети переменного тока в машине возникает продольный магнитный поток  $\Phi_d$ , пульсирующий во времени с частотой сети. При холостом ходе в обмотках ротора  $S$  и  $C$  этот поток будет наводить ЭДС  $E_{s0}$  и  $E_{c0}$ , частота которых равна частоте сети  $f_1$ , а действующее значение будет зависеть от положения ротора относительно статора (см. рис. 5.2а).

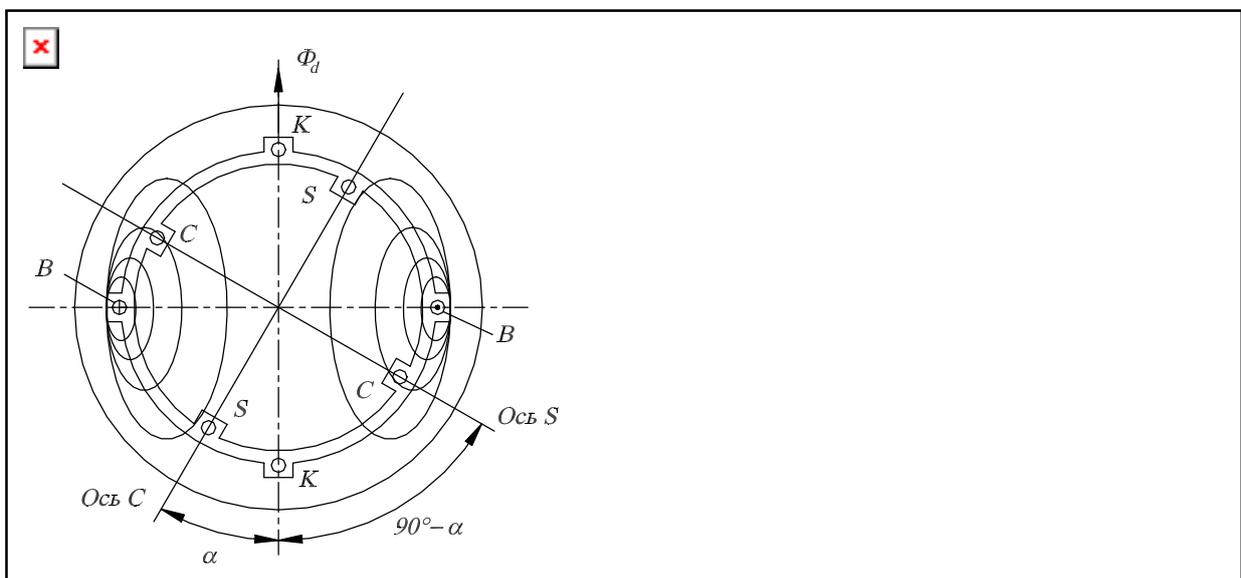


Рисунок 5.2 – Схематический разрез поворотного трансформатора (а) и график распределения индукции вдоль окружности его статора и ротора (б)

Предположим, что магнитный поток  $\Phi_d$  распределен в воздушном зазоре синусоидально; в этом случае индукция в воздушном зазоре изменяется вдоль окружности статора и ротора по закону (см. рис. 5.2б):

$$B_x = B_{cp} \cos \frac{\pi x}{\tau} = B_m \cos \frac{\pi x}{\tau} \sin \omega t, \quad (5.2)$$

где  $B_{cp}$  – индукция в воздушном зазоре по оси обмотки  $B$ .

В обмотке статора  $B$  поток  $\Phi_d$  индуцирует ЭДС:

$$E_B = 4,44 f_1 w_1 \Phi_{dm}, \quad (5.3)$$

где  $\Phi_{dm}$  – максимальное значение потока:

$$\Phi_{dm} = B_m l_1 \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \cos \frac{\pi x}{\tau} dx = \frac{2}{\pi} B_m \tau l_1 \quad (5.4)$$

где  $l_1$  – продольная длина статора (ротора);  $w_1$  – число витков обмотки статора.

Предположим, что ось фазы  $C$  обмотки ротора сдвинута относительно фазы  $B$  обмотки статора на некоторый угол  $\alpha = \frac{\pi x_0}{\tau}$ . В этом случае максимальное значение потока, сцепленного с обмоткой  $C$ :

$$\Phi_{cm} = B_m l_1 \int_{-\frac{\tau}{2}+x_0}^{\frac{\tau}{2}+x_0} \cos \frac{\pi x}{\tau} dx = \frac{2}{\pi} B_m \tau l_1 \cos \alpha = \Phi_{dm} \cos \alpha, \quad (5.5)$$

а ЭДС, индуцированная в этой обмотке

$$E_{CO} = 4,44 f_1 w_2 \Phi_{dm} \cos \alpha, \quad (5.6)$$

где  $w_2$  – число витков обмотки ротора.

Из соотношения  $\frac{E_{CO}}{E_{BO}} = \frac{w_2 \cos \alpha}{w_1} = k \cos \alpha$ , выходное напряжение

косинусной обмотки при холостом ходе

$$E_{CO} = k E_{BO} \cos \alpha. \quad (5.7)$$

Обмотка ротора  $S$  сдвинута относительно обмотки  $C$  на угол  $\pi/2$ , следовательно, выходное напряжение в этой обмотке

$$E_{SO} = 4,44 w_2 \Phi_{dm} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) = k E_B \sin \alpha. \quad (5.8)$$

Обмотка  $K$  с потоком  $\Phi_d$  не связана и он не индуцирует в ней ЭДС. Она используется для компенсации поперечных потоков, создаваемых обмотками ротора при нагрузке поворотного трансформатора. Если вместо обмотки  $B$  присоединить к сети переменного тока обмотку  $K$ , то она создаст поперечный поток, по отношению к которому обмотка  $S$  будет косинусной, а обмотка  $C$  – синусной. Таким образом, в обмотках ротора при холостом ходе индуцируются ЭДС, пропорциональные синусу и косинусу угла поворота ротора относительно соответствующего потока. Применяя различные схемы включения обмоток статора и ротора, можно получить и другие функциональные зависимости, а так же уменьшить погрешности, вызываемые током нагрузки.

### 5.1.1 Синусно – косинусный поворотный трансформатор

При подключении к синусной обмотке  $S$  нагрузки  $Z_{ns}$ , по ней будет проходить ток:

$$i_{ns} = \frac{\dot{E}_s}{Z_s + Z_{ns}}, \quad (5.9)$$

где  $Z_s$  – сопротивление обмотки  $S$ , которое будем считать постоянным.

Ток  $I_{HS}$  создает НС ротора, максимальное значение которой

$$F_s = \sqrt{2} I_{ns} w_2 \quad (5.10)$$

Как видно из рис. 5.3 ось этой НС совпадает с осью фазы  $S$ , поэтому ее можно представить в виде векторной суммы двух составляющих: продольной  $F_{sd} = F_s \sin \alpha$  и поперечной  $F_{sq} = F_s \cos \alpha$ . Продольная составляющая  $F_{sd}$  создает в обмотке возбуждения  $B$  компенсирующий ток, НС которого  $F_B$ , так же, как и в обычном трансформаторе, компенсирует действие  $F_{sd}$ . Результирующий продольный поток  $\Phi_d$  индуцирует в обмотке  $S$  ЭДС

$$E_{sd} = kE_B \sin \alpha \quad (5.11)$$

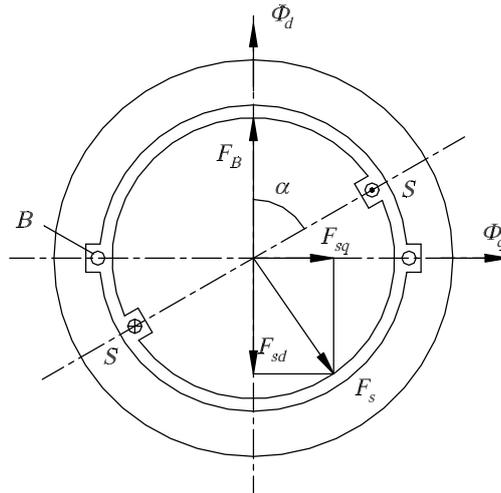


Рисунок 5.3 – Векторная диаграмма НС при подключении нагрузки к синусной обмотке

Поперечная составляющая  $F_{sq}$  создает в поворотном трансформаторе поперечный поток  $\Phi_q$ , максимальное значение которого

$$\Phi_{qm} = \frac{F_s \cos \alpha}{R_m} \quad (5.12)$$

где  $R_m$  – магнитное сопротивление магнитопровода машины.

По отношению к поперечному потоку  $\Phi_q$  обмотка  $S$  является косинусной и, следовательно, в ней индуцируется ЭДС

$$E_{sq} = 4,44 f_1 w_2 \Phi_{qm} \cos \alpha = 4,44 f_1 w_2 \frac{F_s}{R_m} \cos^2 \alpha. \quad (5.13)$$

ЭДС  $E_{sq}$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{sq} &= -j4,44 f_1 \frac{w_2^2}{R_m} \sqrt{2} \dot{I}_{ns} \cos^2 \alpha = \\ &= -jx_2 \dot{I}_{ns} \cos^2 \alpha = -jx_2 \frac{\dot{E}_s \cos^2 \alpha}{Z_s + Z_{ns}} \end{aligned} \quad (5.14)$$

где  $x_2 = 2\pi f_1 \frac{w_2^2}{R_m}$  - реактивное сопротивление обмотки ротора.

Таким образом, при нагрузке в синусной обмотке S продольным и поперечным потоками индуцируется результирующая ЭДС

$$\dot{E}_s = \dot{E}_{sd} + \dot{E}_{sq} \quad (5.15)$$

Следовательно, ЭДС, индуцированная в синусной обмотке будет иметь вид:

$$\dot{E}_s = k\dot{E}_B \sin \alpha - jx_2 \frac{\dot{E}_s \cos^2 \alpha}{Z_s + Z_{ns}} \quad (5.16)$$

Решив это уравнение относительно  $\dot{E}_s$ , получим

$$\dot{E}_s = \frac{k\dot{E}_B \sin \alpha}{1 + j \frac{x_2 \cos^2 \alpha}{Z_s + Z_{ns}}} = \frac{k\dot{E}_B \sin \alpha}{1 + \dot{A}_s \cos^2 \alpha}, \quad (5.17)$$

где  $\dot{A}_s = j \frac{x_2}{Z_s + Z_{ns}}$  - некоторый комплексный коэффициент.

Аналогично можно получить выражение для ЭДС, индуцированной в косинусной обмотке:

$$\dot{E}_c = \frac{k\dot{E}_B \cos \alpha}{1 + j \frac{x_2 \sin^2 \alpha}{Z_c + Z_{nc}}} = \frac{k\dot{E}_B \cos \alpha}{1 + \dot{A}_c \sin^2 \alpha}, \quad (5.18)$$

где  $\dot{A}_c = j \frac{x_2}{Z_c + Z_{nc}}$  - комплексный коэффициент;  $Z_c$  и  $Z_{nc}$  - сопротивление косинусной обмотки и подключенной к ней нагрузки.

Таким образом, при наличии тока нагрузки  $I_{ns}$  и  $I_{nc}$  нарушаются требуемые синусоидальная и косинусоидальная зависимости изменения ЭДС  $E_s$  и  $E_c$ , а, следовательно, и выходных напряжений  $U_s$  и  $U_c$  от угла поворота  $\alpha$  и возникает определенная погрешность. Относительная погрешность для синусной и косинусной обмоток:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_s &= \frac{\dot{E}_{s0} - \dot{E}_s}{\dot{E}_{s0\max}} = \frac{k\dot{E}_B \sin\alpha - \frac{k\dot{E}_B \sin\alpha}{1 + \dot{A}_s \cos^2\alpha}}{k\dot{E}_B} = \\ &= \frac{k\dot{E}_B \sin\alpha \frac{1 + \dot{A}_s \cos^2\alpha - 1}{1 + \dot{A}_s \cos^2\alpha}}{k\dot{E}_B} = \frac{\dot{A}_s \cos^2\alpha \sin\alpha}{1 + \dot{A}_s \cos^2\alpha},\end{aligned}\quad (5.19)$$

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_c &= \frac{\dot{E}_{c0} - \dot{E}_c}{\dot{E}_{c0\max}} = \frac{k\dot{E}_B \cos\alpha - \frac{k\dot{E}_B \cos\alpha}{1 + \dot{A}_c \sin^2\alpha}}{k\dot{E}_B} = \\ &= \frac{k\dot{E}_B \cos\alpha \frac{1 + \dot{A}_c \sin^2\alpha - 1}{1 + \dot{A}_c \sin^2\alpha}}{k\dot{E}_B} = \frac{\dot{A}_c \sin^2\alpha \cos\alpha}{1 + \dot{A}_c \sin^2\alpha}.\end{aligned}\quad (5.20)$$

где  $\dot{E}_{s0\max}$  и  $\dot{E}_{c0\max}$  - максимальные значения напряжений  $\dot{E}_{s0}$  и  $\dot{E}_{c0}$ .

Действительная часть комплексов  $\Delta\dot{U}_s$  и  $\Delta\dot{U}_c$  принимается за амплитудную погрешность, мнимая – за фазовую погрешность (изменение фазы выходного напряжения синусной или косинусной обмотки по отношению к фазе  $\dot{E}_{s0}$  или  $\dot{E}_{c0}$  при холостом ходе). Из выражений для  $\Delta\dot{U}_s$  и  $\Delta\dot{U}_c$  следует, что для уменьшения погрешности  $\Delta\dot{U}_s$  и  $\Delta\dot{U}_c$  необходимо уменьшить величины комплексов  $\dot{A}_s$  и  $\dot{A}_c$ , т.е. увеличить сопротивления нагрузки  $Z_{нс}$  и  $Z_{nc}$ . Наименьшая амплитудная погрешность соответствует активной нагрузке; наименьшая фазовая погрешность – индуктивной и емкостной нагрузкам.

На рис. 5.4 показаны зависимости  $U_s=f(\alpha)$  при холостом ходе (кривая 1) и при нагрузке (кривые 2 и 3), построенные по вышеуказанным формулам. При этом кривые 2 и 3 соответствуют значениям  $A_s$ , равным 0,25 и 1. Из этих кривых следует, что при нагрузке погрешность поворотного трансформатора может быть весьма значительной. Зависимости амплитудной погрешности  $\Delta U_s$  от угла поворота  $\alpha$  для указанных значений модуля комплекса  $A_s$  изображены на рисунке кривыми 4 и 5.

Исследование выражений для  $\Delta\dot{U}_s$  и  $\Delta\dot{U}_c$  показывает, что погрешность

$\Delta U_s$  достигает максимального значения при углах  $\alpha$ , равных  $35^{\circ}16'$ ,  $144^{\circ}44'$  и  $215^{\circ}16'$ .

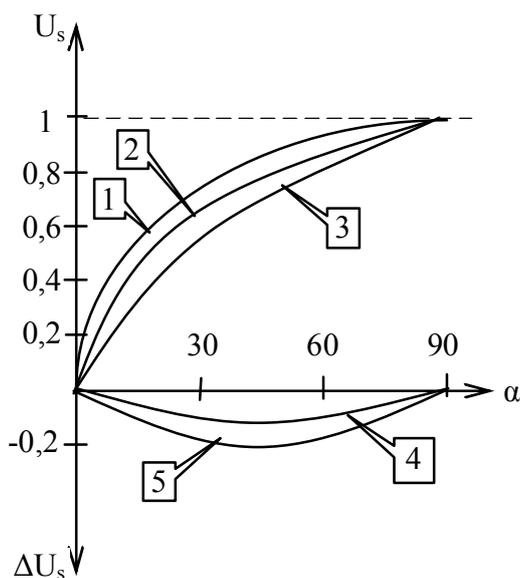


Рисунок 5.4 – Зависимость выходного напряжения  $U_s$  в синусной обмотке и погрешности  $\Delta U_s$  от угла поворота ротора. (1- кривая  $U_s = f(\alpha)$  при холостом ходе; 2,3- при нагрузке ( $A_{s2} = 0,25$  и  $A_{s3} = 1$ ); 4-зависимость  $\Delta U_s = f(\alpha)$  для  $A_{s2} = 0,25$ ; 5- зависимость  $\Delta U_s = f(\alpha)$  для  $A_{s3} = 1$ ).

Для устранения погрешности поворотного трансформатора, обусловленной поперечным потоком  $\Phi_q$ , применяют так называемое симметрирование трансформатора, т. е. компенсацию поперечного потока ротора. Существуют два способа симметрирования: вторичное (со стороны ротора) и первичное (со стороны статора).

Вторичное симметрирование. Уменьшить погрешность выходного напряжения, снимаемого с синусной обмотки, можно, если подключить к косинусной обмотке сопротивление  $Z_{ns}$  (рис. 5.5а).

В этом случае ток, проходящий по обмотке  $C$ , создает намагничивающую силу, максимальное значение которой

$$F_c = \sqrt{2} I_{nc} w_2. \quad (5.21)$$

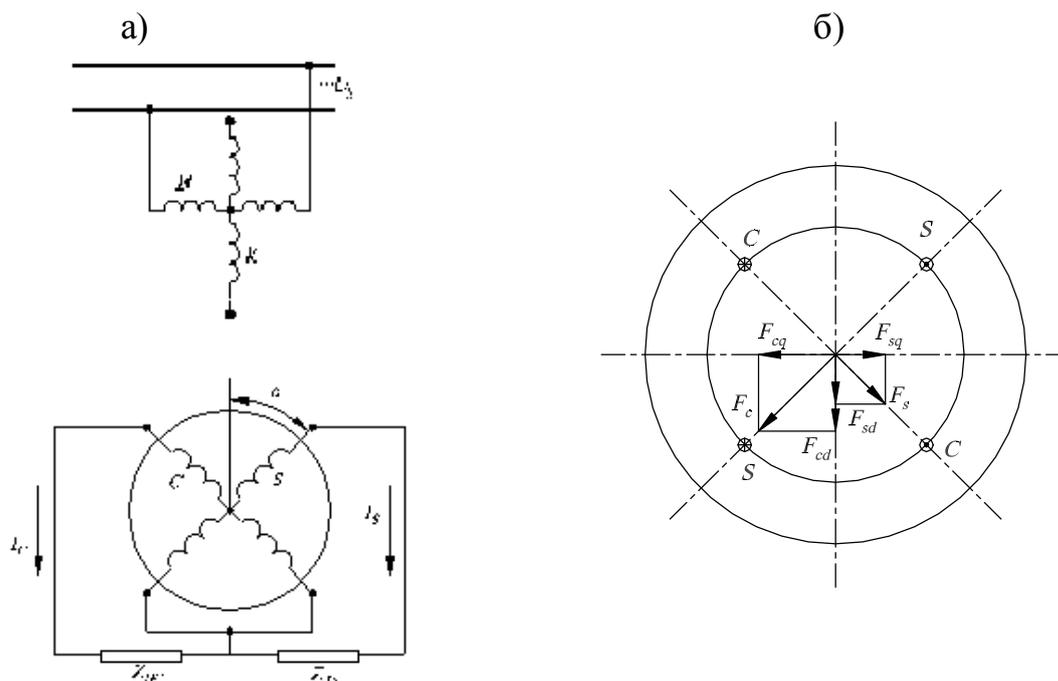


Рисунок 5.5 – Схема синусно-косинусного трансформатора с вторичным симметрированием (а) и диаграмма МДС, создаваемых обмотками ротора (б)

НС  $F_c$  можно представить, как и НС  $F_s$ , в виде векторной суммы двух составляющих: продольной  $F_{cd} = F_c \cos \alpha$  и поперечной  $F_{cq} = F_c \sin \alpha$ . Продольная составляющая  $F_{cd}$  совпадает по направлению с  $F_{sd}$ , а поперечная составляющая  $F_{cq}$  направлена против  $F_{sq}$ . При равенстве  $F_{cq} = F_{sq}$  поперечный поток  $\Phi_q$  будет равен нулю. Следовательно, не будет и погрешности, обусловленной этим потоком.

Величину  $Z_{nc}$  можно определить из условия

$$F_s \cos \alpha = F_c \sin \alpha \quad (5.22)$$

или

$$\sqrt{2} I_{ns} w_2 \cos \alpha = \sqrt{2} I_{nc} w_2 \sin \alpha \quad (5.23)$$

или

$$I_{нс} \cos \alpha = I_{нс} \sin \alpha . \quad (5.24)$$

Так как поперечный поток  $\Phi_q$  равен нулю, то

$$I_{нс} = \frac{kE_B \sin \alpha}{Z_s + Z_{нс}} \quad I_{нс} = \frac{kE_B \cos \alpha}{Z_c + Z_{нс}} \quad (5.25)$$

Следовательно

$$\frac{kE_B \sin \alpha}{Z_s + Z_{нс}} \cos \alpha = \frac{kE_B \cos \alpha}{Z_c + Z_{нс}} \sin \alpha \quad (5.26)$$

Откуда

$$Z_s + Z_{нс} = Z_c + Z_{нс} . \quad (5.27)$$

Т.е. при равенстве результирующих сопротивлений обеих фаз ротора ток  $I_B$  в обмотке возбуждения поворотного трансформатора не зависит от угла поворота ротора, т. к. в выражении для результирующей продольной составляющей НС ротора  $\dot{F}_{d2} = \dot{F}_{sd} + \dot{F}_{cd}$ , определяющей величину тока  $I_B$ , не входит какая-либо функция угла  $\alpha$ :

$$\dot{F}_{d2} = \dot{F}_s \sin \alpha + \dot{F}_c \cos \alpha = \frac{\sqrt{2}kE_B w_2 \sin \alpha}{Z_s + Z_{нс}} \sin \alpha + \frac{\sqrt{2}kE_B w_2 \cos \alpha}{Z_c + Z_{нс}} \cos \alpha$$

или

$$\dot{F}_{d2} = \frac{\dot{E}_6 w_2 k}{Z_2 + Z_n} , \quad (5.28)$$

$$\text{где } Z_2 = Z_c = Z_s ; Z_n = Z_{нс} = Z_{нс} . \quad (5.29)$$

Недостатком этого метода симметрирования является то, что практически он применим только при неизменном сопротивлении нагрузки.

Первичное симметрирование. Если нагрузка подключена только к одной из обмоток ротора, например к обмотке  $S$  (см. рис. 5.6а), то НС ротора по поперечной оси не равна нулю.

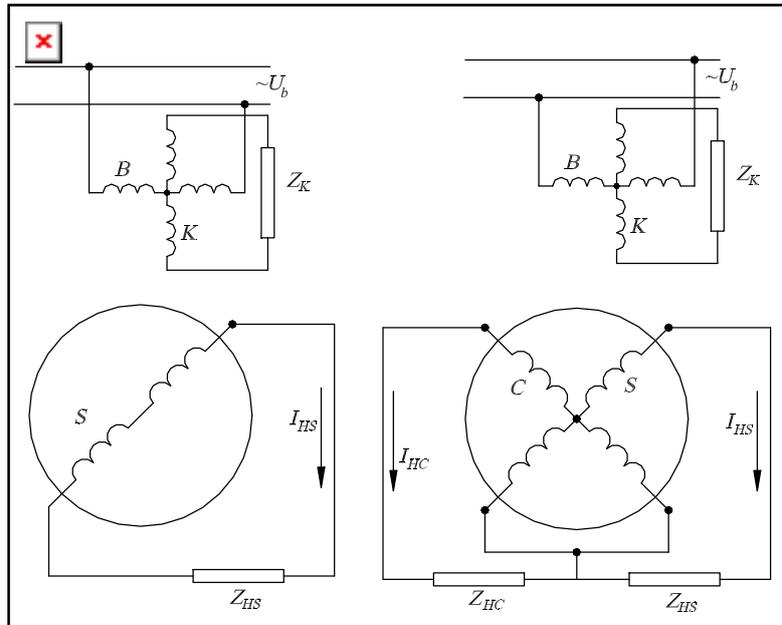


Рисунок 5.6 – Схемы синусо – косинусных поворотных трансформаторов с первичным (а) и первичным и вторичным симметрированием (б)

Для уменьшения поперечного потока компенсационную обмотку К статора замыкают на какое-либо малое сопротивление  $Z_k$  или накоротко. В этом случае по поперечной оси будет действовать результирующая НС

$$\dot{F}_q = \dot{F}_{sq} + \dot{F}_k, \quad (5.30)$$

где  $\dot{F}_k = \sqrt{2}i_k w_1$  - НС, создаваемая компенсационной обмоткой.

Так как обмотка К по отношению к поперечному потоку  $\Phi_q$  представляет собой замкнутую накоротко вторичную обмотку трансформатора, то результирующая НС  $\dot{F}_q$  будет значительно меньше НС  $\dot{F}_{sq}$  первичной обмотки. Поэтому поперечный поток  $\Phi_q$  и вызванная им погрешность резко уменьшается. При изменении нагрузки, подключенной к обмотке ротора, НС  $\dot{F}_k$  изменяется приблизительно пропорционально НС  $\dot{F}_{sq}$ , вследствие чего степень компенсации поперечного потока остается практически неизменной. Это является достоинством данного метода

симметрирования. Однако при изменении угла поворота ротора  $\alpha$  изменяется ток  $\dot{I}_B$  в обмотке возбуждения, что является нежелательным, т.к. при заданном напряжении  $\dot{U}_B$  в этом случае будет изменяться ЭДС  $\dot{E}_B$ . В результате появляется дополнительная погрешность в величине выходных напряжений  $\dot{U}_S$  и  $\dot{U}_C$  на зажимах синусной и косинусной обмоток. Поэтому в поворотных трансформаторах обычно применяют одновременно первичное и вторичное симметрирование (см. рис. 5.6б).

Рассмотренные методы компенсации поперечного потока  $\Phi_q$  могут быть применены при использовании в качестве рабочей обмотки как синусной, так и косинусной обмоток. Поэтому поворотный трансформатор, подключенный по схеме рис. 5.6б, называют синусно – косинусным.

### 5.1.2 Линейный поворотный трансформатор

Выбирая определенным образом схемы включения обмоток поворотного трансформатора, можно получить зависимость выходного напряжения от входного угла поворота, в некотором ограниченном диапазоне изменения угла поворота  $\alpha$ , близкую к линейной. Так, при желаемой точности линейной аппроксимации 0,1%, диапазон изменения угла ограничен пределами  $\pm 4,5^\circ$ . Поэтому использовать для линейного трансформатора одну синусную обмотку нерационально.

Диапазон изменения угла  $\alpha$  от  $-55^\circ$  до  $+55^\circ$ , при той же точности линейной аппроксимации 0,1%, можно получить, если выходное напряжение представить в виде функции

$$U_{\text{вых}} = c \sin \alpha / (1 + k \cos \alpha), \quad (5.31)$$

где  $k = 0,52 \div 0,56$ .

Для реализации зависимости (5.33) применяют две схемы соединения обмоток поворотного трансформатора: с первичным симметрированием (на

статоре) (см. рис. 5.7а) и с вторичным симметрированием (на роторе) (см. рис. 5.7б).

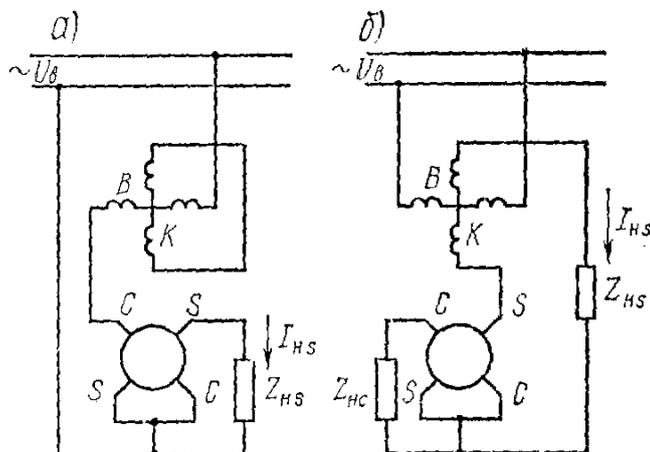


Рисунок 5.7 – Схема линейного поворотного трансформатора: а) с первичной компенсацией, б) со вторичной компенсацией

В схеме первичного симметрирования линейного поворотного трансформатора (см. рис. 5.7а)

компенсационная обмотка замыкается накоротко, поперечный поток при этом равен  $\Phi_q = 0$ . Для цепи обмоток S и C можно записать:

$$\dot{U}_e + \dot{E}_e + \dot{E}_c = \dot{I}_e Z_e + \dot{I}_c Z_c. \quad (5.32)$$

Так как ЭДС, индуцированные в косинусной обмотке и обмотке возбуждения совпадают по фазе, то они будут складываться алгебраически. Поэтому с учетом (5.3) и (5.6) сумма

$$E_e + E_c = 4,44 f_1 (w_1 + w_2 \cos \alpha) \Phi_{dm}, \quad (5.33)$$

откуда

$$\Phi_{dm} = \frac{E_e + E_c}{4,44 f_1 (w_1 + w_2 \cos \alpha)} \quad (5.34)$$

Следовательно, согласно (5.33) ЭДС, индуцируемая в выходной обмотке S определится выражением:

$$E_s = 4,44w_2f_1\Phi_{dm} \sin \alpha = \frac{w_2 \sin \alpha}{w_1 + w_2 \cos \alpha} (E_e + E_c) \quad (5.35)$$

Пренебрегая падениями напряжения в активных сопротивлениях синусных и косинусных обмоток, а также в активном сопротивлении обмотки возбуждения и принимая

$$E_e + E_c \approx U_e, \quad (5.36)$$

получим окончательное выражение для выходного напряжения линейного поворотного трансформатора:

$$U_{\text{вых}} \approx E_s = \frac{kU_e \sin \alpha}{1 + k \cos \alpha}. \quad (5.37)$$

В линейных поворотных трансформаторах с симметрированием по первичной обмотке изменение нагрузки  $Z_{нс}$  практически не оказывает влияния на выходное напряжение, т. е. на линейность выходной характеристики, т. к. компенсационная обмотка К компенсирует поперечный поток  $\Phi_q$ , а сопротивление  $Z_{нс} > Z_s$ . При изменении угла поворота ротора возникают небольшие погрешности в выходном напряжении из-за изменения тока и падения напряжения в первичном контуре.

## 5.2 Сельсины

Сельсинами (от слов self synchronizing – самосинхронизирующийся) называют индукционные машины, обеспечивающие синхронный и синфазный поворот или вращение двух или нескольких осей, механически не связанных между собой. Одна из таких машин механически соединена с ведущей осью и называется датчиком, а другая – с ведомой осью и называется приёмником.

Сельсины имеют две обмотки: возбуждения и синхронизации.

Различают одно- и трёхфазные сельсины, обмотка синхронизации у обоих - трёхфазная. В системах автоматики наибольшее распространение получили однофазные сельсины, которые бывают контактными и бесконтактными.

Однофазный сельсин представляет собой асинхронную машину, в которой обмотка возбуждения создает пульсирующий поток, индуцирующий в трех фазах обмотки синхронизации ЭДС. Величина этих ЭДС зависит от угла поворота датчика (ротора)  $\vartheta$ . При повороте ротора взаимоиндуктивность между обмоткой возбуждения и каждой из фаз обмотки синхронизации плавно изменяется по закону косинуса, вследствие чего ЭДС, индуцируемая в этих фазах пропорциональна косинусу угла датчика. Все три индуцируемые ЭДС имеют одну и ту же временную фазу.

Различают два режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный.

Индикаторный режим используется при отсутствии другого исполнительного двигателя. Синхронизирующий момент между валами сельсина- датчика и сельсина- приемника создается при наличии некоторого пространственного угла  $\vartheta = \vartheta_d - \vartheta_n$ , называемого углом рассогласования. Появляющиеся при этом ЭДС обеспечивают протекание тока по обмоткам синхронизации датчика и приемника. В результате в сельсине- приемнике возникает момент, старающийся повернуть его вал на угол равный углу поворота датчика. Из – за наличия механической нагрузки на валу приемника угол рассогласования, как правило, больше нуля.

В трансформаторном режиме к ведомой оси приложен значительный момент сопротивления. Поэтому угол рассогласования  $\vartheta$  отрабатывается в этом случае с помощью исполнительного двигателя. Появляющееся в обмотке возбуждения выходное напряжение подается через усилитель на обмотку исполнительного двигателя. Сельсины могут работать в режиме поворота и в режиме вращения. В первом случае имеем статическую ошибку системы синхронной связи, а во втором ошибка рассогласования определяет динамическую точность системы.

Требования, предъявляемые к сельсинам: статическая и динамическая точность передачи угла; удельный синхронизирующий момент, т.е. момент, приходящийся на  $1^\circ$  поворота ротора; максимальный синхронизирующий момент при наибольшем угле рассогласования; максимальная скорость вращения сельсинов и время успокоения ротора приемника при скачке поворота ротора датчика.

В зависимости от класса точности статическая ошибка сельсинов составляет  $\pm 0,25..2,5^\circ$ .

Устройство сельсинов. Однофазные сельсины, по существу, являются асинхронными машинами малой мощности. Они бывают явнополюсными (индикаторные) и неявнополюсными (трансформаторные). В явнополюсных сельсинах однофазная обмотка возбуждения располагается на явно выраженных полюсах ротора или статора. Обмотка синхронизации всегда выполняется распределенной и располагается в пазах статора или ротора; фазы её соединяются в звезду.

Сельсины выполняются двухполюсными, для того, чтобы обеспечить самосинхронизацию в пределах одного оборота.

Число контактных колец и щеток зависит от места расположения обмоток: сельсины с обмоткой возбуждения на роторе имеют два контактных кольца; с обмоткой возбуждения на статоре – три контактных кольца. В некоторых типах сельсинов применяются электрические или механические демпферы, обеспечивающие быстрое затухание собственных колебаний ротора при переходе его из одного положения в другое.

Для повышения надежности в настоящее время широко применяются бесконтактные сельсины с однофазной обмоткой возбуждения и трехфазной обмоткой синхронизации, расположенными на статоре, вследствие чего отпадает необходимость в скользящих контактах. Недостатком бесконтактных сельсинов является худшее использование материалов из-за больших потоков рассеяния и тока холостого хода. При одинаковых синхронизирующих моментах вес бесконтактного сельсина примерно в 1,5

раза больше, чем контактного.

Трансформаторный режим однофазных сельсинов. Рассмотрим работу однофазных сельсинов на примере контактных сельсинов с обмоткой возбуждения на статоре. Полученные выводы в одинаковой мере могут быть распространены как на контактные сельсины с обмоткой возбуждения на роторе, так и на бесконтактные сельсины.

Переменный ток, проходящий по обмотке возбуждения сельсина-датчика (рис. 5.8), создает в нем пульсирующий магнитный поток, который индуцирует ЭДС в трех фазах обмотки синхронизации. Токи, протекающие от действия этих ЭДС в обмотках синхронизации сельсина – приемника создадут свой пульсирующий магнитный поток. Направление оси этого потока зависит от углового положения ротора приемника. Если при этом в сельсине – приемнике возникает продольная составляющая потока, то она индуцирует в его обмотке возбуждения ЭДС, являющуюся выходным напряжением, подаваемым после усиления на исполнительный двигатель, который поворачивает ведомую ось  $O_2$  ротора приемника. Когда ось магнитного потока, создаваемого ротором сельсина – приемника станет перпендикулярной оси обмотки возбуждения, выходное напряжение станет равным нулю и вращение ведомой оси прекратится.

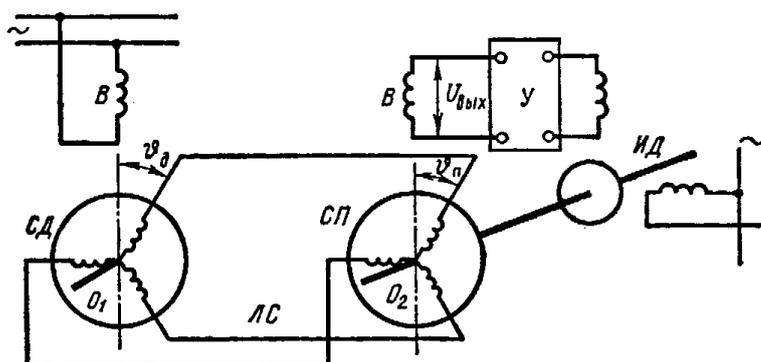


Рисунок 5.8 – Схема включения сельсинов при работе в трансформаторном режиме

Следовательно, для работы системы необходимо, чтобы ток в роторе

сельсина – приемника создавал продольную составляющую магнитного потока. В согласованном положении роторов продольная составляющая магнитного потока сельсина – приемника отсутствует. Обмотка возбуждения В сельсина – датчика создает магнитный поток  $\Phi_B$ , синусоидально распределенный вдоль окружности статора и ротора и пульсирующий с частотой сети. Величина ЭДС, индуцируемая этим потоком, в каждой фазе обмотки ротора датчика зависит от ее положения относительно оси обмотки возбуждения. Если ось первой фазы ротора – датчика совпадает с осью обмотки возбуждения (см. рис. 5.9а) то

$$\left. \begin{aligned} E_{1Д} &= E_{2м} = 4,44 f_1 w_2 \Phi_{Bм}; \\ E_{2Д} &= E_{2м} \cos 120^\circ; \\ E_{3Д} &= E_{2м} \cos(-120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (5.38)$$

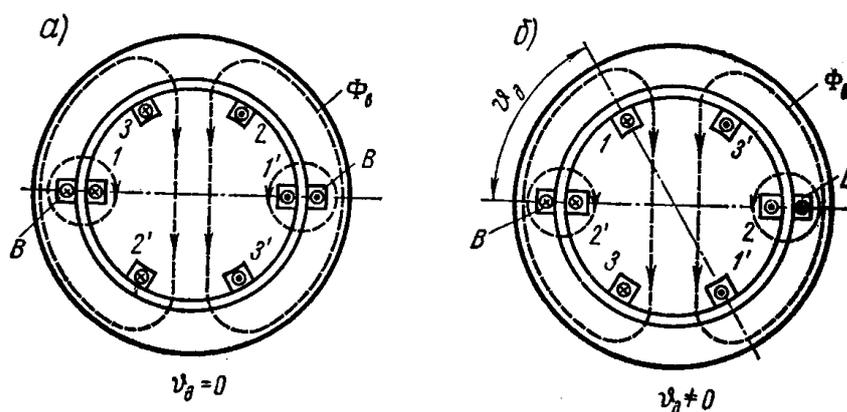


Рисунок 5.9 – Ротор и статор сельсина-датчика при  $\vartheta_D = 0^\circ$  (а) и  $\vartheta_D = 60^\circ$  (б)

В общем случае, когда ось первой фазы ротора сдвинута относительно обмотки возбуждения на угол  $\vartheta_D$ , получим

$$\left. \begin{aligned} E_{1Д} &= E_{2м} \cos \vartheta_D; \\ E_{2Д} &= E_{2м} \cos(\vartheta_D + 120^\circ); \\ E_{3Д} &= E_{2м} \cos(\vartheta_D - 120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

Так как одноименные фазы соединены последовательно, то

проходящий по ним ток:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{E_{1д}}{Z_2} = \frac{E_{2m}}{Z_2} \cos \vartheta_{д} = I_{2m} \cos \vartheta_{д}; \\ I_2 &= I_{2m} (\cos \vartheta_{д} + 120^0); \\ I_3 &= I_{2m} (\cos \vartheta_{д} - 120^0), \end{aligned} \right\} \quad (5.40)$$

где  $I_{2m} = \frac{E_{2m}}{Z_2}$  - наибольшее действующее значение тока в фазе обмотки ротора;  $Z_2$  - общее сопротивление последовательно включенных фаз датчика и приемника.

Очевидно, что  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$ , поэтому нейтральный провод не используется.

Считая, что НС отдельных фаз распределены в пространстве синусоидально, получим:

$$\left. \begin{aligned} F_{1д} &= F_{2m} \cos \vartheta_{д}; \\ F_{2д} &= F_{2m} \cos(\vartheta_{д} + 120^0); \\ F_{3д} &= F_{2m} \cos(\vartheta_{д} - 120^0), \end{aligned} \right\} \quad (5.41)$$

где  $F_{2m} = 0,9 I_{2m} w_2$  - максимальное значение НС, создаваемой одной фазой обмотки ротора.

Для определения результирующей НС всех трех фаз датчика сложим их составляющие  $F_{дd}$  и  $F_{дq}$  по продольной оси  $d$  (оси обмотки возбуждения) и по поперечной оси  $q$ .

$$\begin{aligned} F_{дd} &= F_{1д} \cos \vartheta_{д} + F_{2д} \cos(\vartheta_{д} + 120^0) + F_{3д} \cos(\vartheta_{д} - 120^0) = \\ &= F_{2m} [\cos^2 \vartheta_{д} + \cos^2(\vartheta_{д} + 120^0) + \cos^2(\vartheta_{д} - 120^0)] = \\ &= \frac{3}{2} F_m - \frac{F_m}{2} [\cos 2\vartheta_{д} + \cos 2(\vartheta_{д} + 120^0) + \cos 2(\vartheta_{д} - 120^0)] = \frac{3}{2} F_m \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned}
F_{dq} &= F_{1д} \sin \vartheta_{д} + F_{2д} \sin(\vartheta_{д} + 120^{\circ}) + F_{3д} \sin(\vartheta_{д} - 120^{\circ}) = \\
&= F_{2м} [\cos \vartheta_{д} \sin \vartheta_{д} + \cos(\vartheta_{д} + 120^{\circ}) \sin(\vartheta_{д} + 120^{\circ}) + \\
&+ \cos(\vartheta_{д} - 120^{\circ}) \sin(\vartheta_{д} - 120^{\circ})] = \\
&= \frac{F_{2м}}{2} [\sin 2\vartheta_{д} + \sin 2(\vartheta_{д} + 120^{\circ}) + \sin 2(\vartheta_{д} - 120^{\circ})] = 0
\end{aligned} \tag{5.43}$$

Таким образом, результирующая НС ротора датчика может быть представлена пространственным вектором  $\vec{F}_{д}$ , который при любом угле  $\vartheta_{д}$  направлен по продольной оси и имеет постоянную величину, равную  $\frac{3}{2}F_{м}$ . Намагничивающие силы соответствующих фаз ротора сельсина – приемника будут отличаться от НС фаз ротора датчика только знаком, т. к. ток в фазах обмотки ротора приемника направлен противоположно току в фазах обмотки ротора датчика. Поэтому результирующая НС сельсина – приемника также может быть представлена пространственным вектором  $\vec{F}_{н}$ , величина которого не зависит от угла поворота роторов датчика и приёмника и всегда равна  $-\frac{3}{2}F_{2м}$ .

Продольная и поперечная составляющие этой силы:

$$\begin{aligned}
F_{nd} &= -F_{1д} \cos \vartheta_{н} - F_{2д} \cos(\vartheta_{н} + 120^{\circ}) - F_{3д} \cos(\vartheta_{н} - 120^{\circ}) = \\
&= -F_{2м} [\cos \vartheta_{д} \cos \vartheta_{н} + \cos(\vartheta_{д} + 120^{\circ}) \cos(\vartheta_{н} + 120^{\circ}) + \\
&+ \cos(\vartheta_{д} - 120^{\circ}) \cos(\vartheta_{н} - 120^{\circ})] = \\
&= -\frac{3}{2}F_{м} \cos(\vartheta_{д} - \vartheta_{н}) = -\frac{3}{2}F_{2м} \cos \vartheta
\end{aligned} \tag{5.44}$$

$$\begin{aligned}
F_{nq} &= -F_{1д} \sin \vartheta_{н} - F_{2д} \sin(\vartheta_{н} + 120^{\circ}) - F_{3д} \sin(\vartheta_{н} - 120^{\circ}) = \\
&= -F_{2м} [\cos \vartheta_{д} \sin \vartheta_{н} + \cos(\vartheta_{д} + 120^{\circ}) \sin(\vartheta_{н} + 120^{\circ}) + \\
&+ \cos(\vartheta_{д} - 120^{\circ}) \sin(\vartheta_{н} - 120^{\circ})] = \\
&= -\frac{3}{2}F_{2м} \sin(\vartheta_{д} - \vartheta_{н}) = -\frac{3}{2}F_{2м} \sin \vartheta
\end{aligned} \tag{5.45}$$

Знак “–” в этих выражениях указывает, что вектор результирующей НС  $\vec{F}_{н}$  поворачивается в противоположную сторону по отношению к НС

ротора датчика.

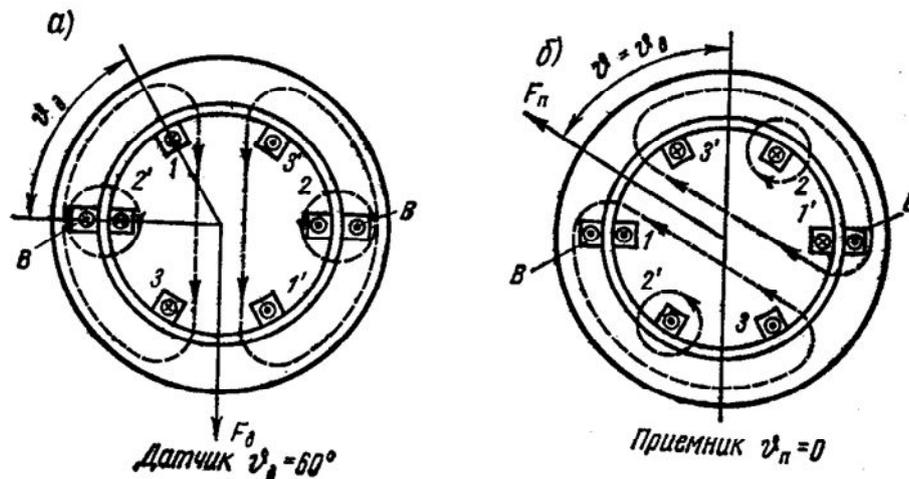


Рисунок 5.10 – Векторы МДС ротора в датчике  $\bar{F}_d$  (а) и приемнике  $\bar{F}_n$  (б) при повороте ротора датчика на угол  $\vartheta_d = 60^\circ$

Продольная составляющая НС ротора в датчике  $\bar{F}_{da}$  компенсируется НС, созданной компенсационным током, поступающим из сети в обмотку возбуждения (аналогично обычному трансформатору). В приемнике же НС ротора создает пульсирующий магнитный поток, продольная составляющая которого  $\Phi_{nd}$  индуцирует в выходной обмотке (обмотке возбуждения) ЭДС:

$$E_{вых} = 4,44 f_1 w_1 \Phi_{ndm} \cos \vartheta = E_{1m} \cos \vartheta , \quad (5.46)$$

где  $E_{1m}$  – действующее значение ЭДС в выходной обмотке в случае, когда вектор НС совпадает с осью этой обмотки.

Обычно удобнее иметь при согласованном положении приемника и датчика нулевой сигнал. Поэтому ротор и статор сельсина приемника при согласованном положении ведущей и ведомой осей предварительно смещают на  $90^\circ$  относительно ротора или статора сельсина – датчика. В этом случае выходной сигнал изменяется по закону

$$U_{вых} \approx E_{вых} = E_{1m} \cos(\vartheta + 90^\circ) = E_{1m} \sin \vartheta \quad (5.47)$$

При выборе сельсина, предназначенного для трансформаторного режима работы, важно знать величину удельного выходного напряжения, т.е. величину  $U_{вых}$ , приходящую на  $1^\circ$  угла рассогласования:

$$U_{уд} = E_{1m} \sin 1^\circ = 0,0175 E_{1m} \quad (5.48)$$

Эта величина обычно приводится в паспорте сельсина. Для того, чтобы зависимость выходного сигнала  $U_{вых}$  от угла рассогласования  $\vartheta$  была по возможности близкой к синусоидальной, сельсины, предназначенные для работы в трансформаторном режиме, выполняют с неявно выраженными полюсами. Этим достигается существенное уменьшение высших гармоник в кривой ЭДС и повышение точности при передаче угла.

Индикаторные режимы работы однофазных сельсинов. В этом режиме на валу сельсина – приемника имеется незначительный момент сопротивления, поэтому для поворота ротора приемника вслед за поворотом ротора датчика требуется небольшой вращающий момент, который может быть получен от самого сельсина – приемника без дополнительных усилительных устройств.

Схема включения сельсинов для индикаторного режима имеет вид (см. рис. 5.11).

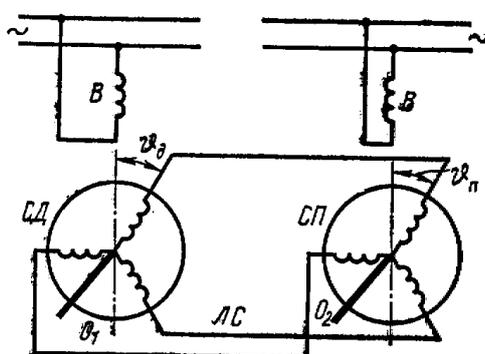


Рисунок 5.11 – Схема включения сельсинов при работе их в индикаторном режиме

Пульсирующие магнитные потоки, создаваемые обмотками

возбуждения датчика и приемника, индуктируют в трех фазах обмоток синхронизации ЭДС. Если между роторами датчика и приемника имеется некоторый угол рассогласования  $\vartheta$ , то по обмоткам синхронизации будут протекать токи, которые, взаимодействуя с потоком возбуждения, создают в датчике и приемнике синхронизирующие моменты. Эти моменты имеют противоположные направления и стремятся свести к нулю угол рассогласования. Обычно ротор датчика заторможен, поэтому его синхронизирующий момент воспринимается механизмом, поворачивающим ведущую ось  $O_1$ ; синхронизирующий же момент приемника поворачивает его ротор в ту же сторону и на тот же угол, на который поворачивается ротор датчика.

В трех фазах обмотки синхронизации датчика потока возбуждения  $\Phi_\delta$  индуцирует ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} E_{1д} &= E_{2m} \cos \vartheta_{д}; \\ E_{2д} &= E_{2m} \cos(\vartheta_{д} + 120^0); \\ E_{3д} &= E_{2m} \cos(\vartheta_{д} - 120^0). \end{aligned} \right\} \quad (5.49)$$

Так как обмотка возбуждения приемника присоединена к той же сети однофазного тока, то в фазах его обмотки синхронизации будет индуцироваться ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} E_{1н} &= E_{2m} \cos \vartheta_{н}; \\ E_{2н} &= E_{2m} \cos(\vartheta_{н} + 120^0); \\ E_{3н} &= E_{2m} \cos(\vartheta_{н} - 120^0). \end{aligned} \right\} \quad (5.50)$$

В виду того, что ЭДС в одноименных фазах датчика и приемника направлены по контуру, образованному проводами линии связи, встречно, токи в фазах датчика и приемника:

$$\left. \begin{aligned}
 I_1 &= \frac{E_{1d} - E_{1n}}{Z_2} = \frac{E_{2m}}{Z_2} (\cos \vartheta_d - \cos \vartheta_n) = \\
 &= I_{2m} (\cos \vartheta_d - \cos \vartheta_n); \\
 I_2 &= I_{2m} [(\cos \vartheta_d + 120^\circ) - (\cos \vartheta_n + 120^\circ)]; \\
 I_3 &= I_{2m} [(\cos \vartheta_d - 120^\circ) - (\cos \vartheta_n - 120^\circ)].
 \end{aligned} \right\} \quad (5.51)$$

Представим ток в фазах обмоток синхронизации в виде двух составляющих:

$$\left. \begin{aligned}
 I_1 &= I_1' + I_1''; \\
 I_2 &= I_2' + I_2''; \\
 I_3 &= I_3' + I_3'';
 \end{aligned} \right\} \quad (5.52)$$

где составляющая со «штрихом» обусловлены наличием ЭДС  $E_d$  в обмотках датчика, а «два штриха» – ЭДС  $E_n$  в обмотках приемника. Это позволяет при определении НС в датчике и приемнике воспользоваться результатами, полученными для дифференциального режима работы сельсинов.

Составляющие токов  $I_1', I_2'$  и  $I_3'$  создают в датчике НС

$$F_d' = F_{dd}' = \frac{3}{2} F_{2m}, \quad (5.53)$$

направленную по продольной оси, а в приемнике НС-

$$F_n' = -\frac{3}{2} F_{2m}, \quad (5.54)$$

продольная и поперечная составляющие которой равны

$$\left. \begin{aligned}
 F_{nd}' &= -\frac{3}{2} F_{2m} \cos \vartheta \\
 F_{nq}' &= -\frac{3}{2} F_{2m} \sin \vartheta
 \end{aligned} \right\} \quad (5.55)$$

Составляющие же токов  $I_1'', I_2''$  и  $I_3''$  создают в приемнике НС

$$F_n'' = F_{nd}'' = \frac{3}{2} F_{2m}, \quad (5.56)$$

направленную по продольной оси, а в датчике НС  $F_D''$ , продольная и поперечная составляющая которой равны:

$$\left. \begin{aligned} F_{Dd}'' &= -\frac{3}{2} F_{2m} \cos \vartheta; \\ F_{Dq}'' &= \frac{3}{2} F_{2m} \sin \vartheta. \end{aligned} \right\} \quad (5.57)$$

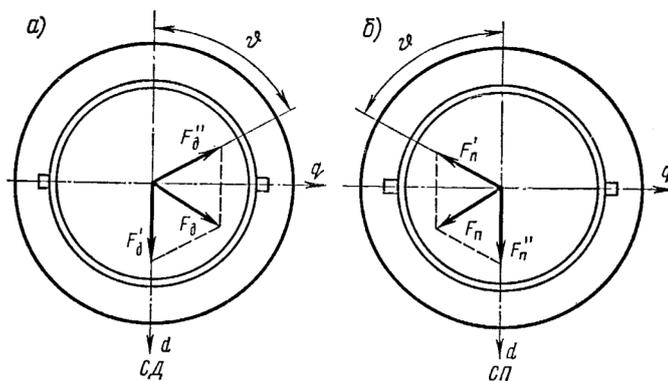


Рисунок 5.12 – Составляющие векторов НС ротора  $F_D$  и  $F_D'$  в датчике (а) и в приемнике (б), обусловленные действием ЭДС  $E_D$  и  $E_D'$

При этом результирующие НС (рис. 5.12) будет иметь следующие составляющие:

– в датчике

$$\left. \begin{aligned} F_{Dd} &= F_{Dd}' + F_{Dd}'' = \frac{3}{2} F_{2m} (1 - \cos \vartheta); \\ F_{Dq} &= F_{Dq}'' = \frac{3}{2} F_{2m} \sin \vartheta. \end{aligned} \right\}; \quad (5.58)$$

– в приемнике

$$\left. \begin{aligned} F_{nd} &= F_{nd}' + F_{nd}'' = \frac{3}{2} F_{2m} (1 - \cos \vartheta); \\ F_{nq} &= F_{nq}'' = -\frac{3}{2} F_{2m} \sin \vartheta. \end{aligned} \right\} \quad (5.59)$$

При  $\vartheta=0$  НС в датчике и приемнике будут равны нулю, т. к. ЭДС в фазах обмоток синхронизации датчика и приемника взаимно компенсируется и ток в этих фазах отсутствует.

При наличии угла рассогласования появляются токи и НС ротора, величины которых в датчике и приемнике одинаковы:

$$\begin{aligned} F_{\text{Д}} = F_{\text{П}} &= \sqrt{F_{\text{д}}^2 + F_{\text{q}}^2} = \frac{3}{2} F_{2m} \sqrt{(1 - \cos \vartheta)^2 + \sin^2 \vartheta} = \\ &= \frac{3}{2} F_{2m} \sqrt{2 - 2 \cos \vartheta} = \frac{3}{2} F_{2m} \sin \frac{\vartheta}{2} \end{aligned} \quad (5.60)$$

На рис. 5.13 показаны токи и НС датчика и приемника при угле рассогласования датчика  $\vartheta_{\text{Д}}=60^\circ$  и приемника-  $\vartheta_{\text{П}}=0^\circ$ . НС ротора датчика  $F_{\text{Д}}$  смещается относительно поперечной оси в сторону поворота датчика на угол  $\frac{\vartheta}{2} = 30^\circ$ . В приемнике НС  $F_{\text{П}}$  смещается на такой же угол  $\frac{\vartheta}{2} = 30^\circ$ , но в обратном направлении, и поперечная составляющая  $F_{\text{пq}}$  направлена противоположно поперечной составляющей  $F_{\text{Дq}}$  НС ротора датчика.

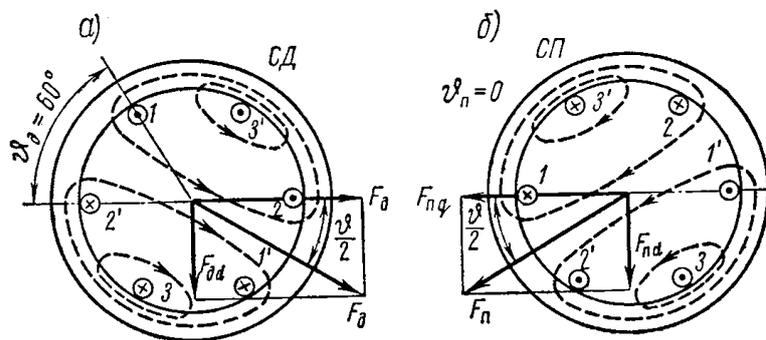


Рисунок 5.13 – Положение векторов НС ротора  $F_{\text{Д}}$  и  $F_{\text{П}}$  в датчике (а) и в приемнике (б) при повороте ротора датчика на угол

$$\vartheta_D = 60^\circ$$

Продольные составляющие  $F_{Dd}$  и  $F_{nd}$  НС ротора датчика и приемника создают в обеих обмотках возбуждения компенсационные токи (аналогично трансформатору), НС которых компенсирует действие НС  $F_{Dd}$  и  $F_{nd}$ . Поперечные же составляющие  $F_{Dq}$  и  $F_{nq}$ , оставшиеся нескомпенсированными, взаимодействуют с потоком статора, создавая в датчике и приемнике синхронизирующие моменты.

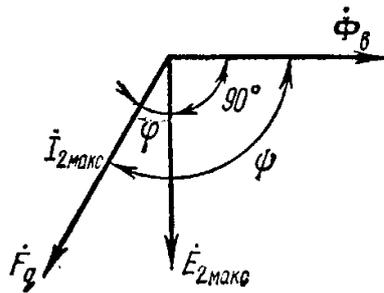


Рисунок 5.14 – Векторная диаграмма для ротора сельсина-приемника.

Векторная диаграмма для ротора сельсина (см. рис. 5.14) подобна векторной диаграмме для ротора асинхронного двигателя. Поперечная составляющая  $\dot{F}_q$  НС ротора совпадает по фазе с током ротора  $\dot{I}_{2m}$  и отстает от вектора потока возбуждения  $\dot{\Phi}_s$  на угол  $\psi = 90^\circ + \varphi$ . Величину и направление синхронизирующего момента можно определить также, как и в обычной асинхронной машине, считая, что момент создается активной составляющей ротора. Это наглядно показано на рис. 5.15.

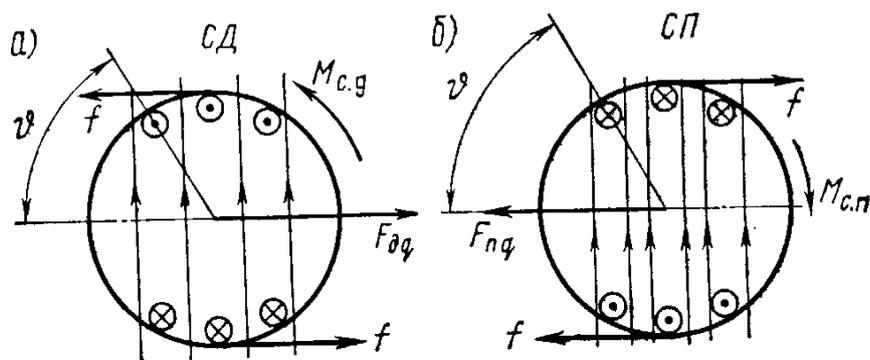


Рисунок 5.15 – Схема возникновения синхронизирующего момента в датчике (а) и в приемнике (б)

На рис. 5.15. крестиками и точками показано направление составляющих тока ротора, соответствующих некомпенсированным поперечным НС  $F_{Dq}$  и  $F_{nq}$ . Из рис. 5.15 следует, что синхронизирующие моменты в датчике и приемнике направлены в противоположные стороны и стремятся повернуть оба ротора в согласованное положение. На ротор датчика действует момент  $M_{c,d}$ , стремящийся возвратить ротор в исходное положение, а на ротор приемника - момент  $M_{c,n}$ , увлекающий его в сторону поворота ротора датчика.

Мгновенное значение синхронизирующего момента:

$$\begin{aligned} m_c &= C_1 \Phi_{Bm} \sin \omega t \cdot F_q \sin(\omega t - \psi) = \\ &= C \Phi_{Bm} F_{2m} \sin \vartheta [\cos \psi - \cos(2\omega t - \psi)] \end{aligned} \quad (5.61)$$

где  $C$  и  $C_1$  – постоянные.

Следовательно, при заданном угле рассогласования  $\vartheta$  синхронизирующий момент изменится в соответствии с изменением угла  $\omega t$ .

Среднее значение синхронизирующего момента:

$$M_c = C_1 \Phi_{Bm} F_q \cos \psi = C \Phi_{Bm} F_{2m} \sin \vartheta \sin \varphi \quad (5.62)$$

Принимая  $\sin \varphi = \text{const}$  и обозначая  $C_1 \Phi_{Bm} F_{2m} \sin \varphi = M_m$ , получим

$$M_c = M_m \sin \vartheta. \quad (5.63)$$

Таким образом, средняя величина синхронизирующего момента пропорциональна синусу угла рассогласования. Для того, чтобы сельсины обладали свойством самосинхронизации в пределах одного оборота, их обычно выполняют двухполюсными так, что геометрический угол поворота ротора  $\vartheta$  соответствует «электрическому» углу.

Из рис. 5.16а, следует, что синхронизирующий момент равен нулю при

углах рассогласования  $\vartheta=0$  и  $\vartheta=180$ , т. е. рассматриваемая система передачи угла на сельсинах имеет в пределах одного оборота две точки согласованного положения ротора датчика и приемника. Однако, в действительности согласованное положение соответствует  $\vartheta=0$ , т.к. при  $\vartheta=180^0$  имеет место неустойчивое равновесие: при малейшем отклонении ротора в ту или иную сторону от этой точки возникает синхронизирующий момент стремящийся ликвидировать угол рассогласования  $\vartheta$  и сделать его равным нулю.

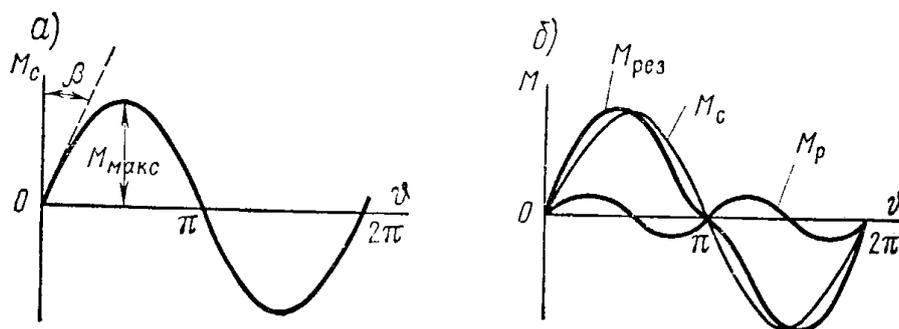


Рисунок 5.16 – Зависимости синхронизирующего момента от угла рассогласования в сельсинах с неявновыраженными (а) и явновыраженными (б) полюсами

Величина максимального синхронизирующего момента  $M_m$  зависит от произведения  $F_{2m} \sin\varphi$ . Так как  $F_{2m} = 0.9 \frac{E_{2m}}{Z_2} w_2$ , а  $\sin\varphi = \frac{X_2}{Z_2}$ , то момент

$$M_m = A\Phi_{Bm} E_{2m} \frac{x_2}{Z_2} = BU_B^2 \frac{x_2}{r_2^2 + x^2} \quad (5.64)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные;  $U_B$  – напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения сельсинов;  $Z_2, r_2$  и  $x_2$  – суммарное, активное и индуктивное сопротивления последовательно включенных фаз датчика и приемника (для сельсинов с явновыраженными полюсами (см. рис. 5.16б) берут значения  $Z_2$  и  $x_2$  приведенные к поперечной оси сельсина).

Взяв производную момента  $M_m$  по  $x_2$  и приравняв её нулю, можно определить значение  $x_2$ , при котором этот момент имеет наибольшую

величину:

$$\frac{d}{dx_2} \left( \frac{x_2}{x_2^2 + r_2^2} \right) = \frac{x_2^2 + r_2^2 - 2x_2^2}{(x_2^2 + r_2^2)^2} = 0, \quad (5.65)$$

отсюда  $x_2 = r_2$ .

Таким образом, для получения наибольшей величины  $M_m$  необходимо иметь равные индуктивное и активное сопротивления ротора сельсина.

Важной характеристикой сельсина является удельный синхронизирующий момент (момент, приходящийся на  $1^\circ$  угла рассогласования).

$$M_{уд} = M_m \sin 1^\circ = 0,0175 M_m \quad (5.66)$$

Часто этим термином обозначают также крутизну  $S$  нарастания синхронизирующего момента в начальной части характеристики  $M=f(\vartheta)$ , т.е.

$$S = M'_{уд} = \frac{dM_c}{d\vartheta}. \quad (5.67)$$

Момент  $M'_{уд}$  представляет собой тангенс угла наклона  $\beta$  характеристики  $M=f(\vartheta)$  в её начальной части. Чем больше величина  $M_{уд}$  и  $M'_{уд}$ , тем при меньшем угле рассогласования  $\vartheta$  будет преодолен момент от сил трения, действующих на ротор и, следовательно, тем меньшей будет статическая погрешность сельсина.

Для увеличения удельного синхронизирующего момента при малых углах рассогласования сельсины, предназначенные для работы в индикаторном режиме, выполняются, как правило, с сосредоточенной обмоткой возбуждения и явно выраженными полюсами на статоре. Благодаря этому появляется дополнительный реактивный момент  $M_p$ , который усиливает результирующий удельный синхронизирующий момент примерно

на 10..20 %.

Возникновение реактивного момента можно объяснить притяжением ротора, являющегося электромагнитом, к выступающим полюсам статора (см. рис. 5.17).

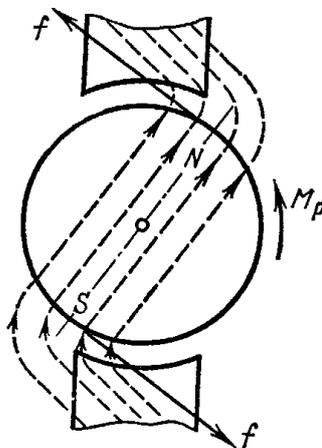


Рисунок 5.17 – Схема возникновения реактивного момента

Погрешность в сельсинах. Погрешность при работе сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах вызывается электрической, магнитной и механической асимметрией датчика и приемника, обусловленными технологическими причинами, влиянием высших гармоник в кривой НС ротора, влиянием сопротивления линии связи, изменением напряжения питающей сети и др. Кроме того, при работе сельсинов в трансформаторном режиме погрешность в работе сельсинов может быть вызвана тормозным моментом на валу приемника.

Устранить технологические погрешности можно, обеспечив высокую точность штамповки листов ротора и статора и сборки их пакетов, строгую concentricность цилиндрических поверхностей ротора и статора (равномерность воздушного зазора, тщательную балансировку ротора и пр.). Уменьшить высшие гармоники в кривой НС ротора можно применением синусных (точных) обмоток. При работе сельсинов в трансформаторном режиме весьма важно, чтобы при  $\vartheta=0$  было мало остаточное напряжение в выходной обмотке (нулевой сигнал). В современных сельсинах благодаря

высокому качеству изготовления и использованию точных обмоток удается уменьшить нулевой сигнал до 0,2..0,3%.

В тех случаях, когда датчик удален на значительное расстояние от приемника, сопротивление линии связи становится соизмеримым с собственным сопротивлением обмоток синхронизации. Это приводит к уменьшению тока в обмотках синхронизации датчика и приемника, вследствие чего уменьшается выходное напряжение  $U_{вых}$  приемника при работе сельсинов в трансформаторном режиме и величина синхронизирующего момента  $M_c$  при работе в индикаторном режиме. Аналогично влияет и падение напряжения в скользящих контактах.

Для уменьшения влияния контактов на работу сельсинов и снижения трения в их подвижных частях стремятся по возможности уменьшить число скользящих контактов.

С этой целью обмотку синхронизации, в большинстве случаев, располагают на статоре, а возбуждения – на роторе. Тогда изменение переходного сопротивления контактов мало сказывается на точности работы системы передачи угла; выход их из строя не приводит к полному нарушению работы системы (в этом случае сельсин – приемник работает как синхронный реактивный двигатель). Недостатком сельсинов с обмоткой возбуждения на роторе является то, что ток через скользящие контакты проходит у них постоянно, в то время как у сельсинов с обмоткой возбуждения на статоре контакты пропускают ток только в момент отработки угла. Однако токи возбуждения сельсинов обычно малы, поэтому надежность работы сельсинов с обмоткой возбуждения на роторе будет значительно выше, чем при расположении её на статоре.

Если сельсины работают в индикаторном режиме, то при значительных расстояниях между датчиком и приемником напряжение, подводимые к их обмоткам возбуждения, могут несколько отличаться по величине и фазе. В этом случае даже при согласованном положении роторов датчика и приемника по обмоткам синхронизации будет проходить ток и возникает

определенная погрешность. Для её устранения в цепь возбуждения одной из машин включают дополнительное активно-индуктивное сопротивление, с помощью которого выравнивают по величине и фазе напряжения, подводимые к обмотке возбуждения.

При работе сельсинов в трансформаторном режиме выходная обмотка приемника обычно включается на высокоомный вход усилителя. В этом случае ток в обмотке очень мал и можно сказать, что  $U_{\text{вых}} \cong E_{\text{вых}}$ . Однако, если сопротивление нагрузки  $Z_H$  не очень велико, то ток нагрузки

$I_H = \frac{\dot{E}_{\text{вых}}}{Z_H + Z_1}$  создает определенную погрешность. Так как

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{E}_{\text{вых}} - I_H \dot{Z}_1, \quad (5.68)$$

где  $Z_1$  – сопротивление обмотки статора, то выходное напряжение

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{E}_{\text{вых}} \left(1 - \frac{Z_1}{Z_H + Z_1}\right) = E_{1m} \sin \vartheta \frac{Z_H}{Z_H + Z_1}; \quad (5.69)$$

Таким образом, с увеличением нагрузки выходное напряжение (при одном и том же угле рассогласования) уменьшается. Кроме того, при большой нагрузке возникает реакция выходной обмотки, приводящая к таким же искажениям зависимости  $U_{\text{вых}} = f(\vartheta)$ , как и в поворотных трансформаторах.

При работе сельсинов в индикаторном режиме тормозной момент на валу приемника создает довольно существенную погрешность. Так как тормозной момент, создаваемый нагрузкой, в рассматриваемом режиме обычно весьма мал; основное влияние на точность передачи угла оказывает трение в подшипниках приемника и трение щеток о контактные кольца. Погрешность, вызванная моментом трения  $M_{тр}$  сельсина – приемника, характеризует его зону нечувствительности  $\Delta \vartheta_{тр}$ , в пределах которой ротор приемника может занимать любое положение при одном и том же положении

датчика.

Величина этой зоны определяется отношением  $\Delta\vartheta_{mp} = \frac{M_{mp}}{M_{вд}}$ , чем больше величина  $M_{вд}$  и  $M'_{вд}$ , тем при меньшем угле рассогласования будет преодолен момент трения  $M_{mp}$  и тем меньше будет погрешность в передаче угла. При работе сельсинов в трансформаторном режиме момент трения, приложенный к ведомой оси, не оказывает влияния на точность передачи угла, так как этот момент воспринимается исполнительным двигателем.

Ток в фазе ротора при индивидуальном питании от датчика одного приемника

$$\dot{I}_{n.u.} = \dot{I}_{д.и} = \frac{\dot{E}_д - \dot{E}_n}{Z_{2д} + Z_{2н}}, \quad (5.70)$$

а при групповом питании нескольких приемников

$$\dot{I}_{n.г} = \frac{\dot{I}_{д.г}}{n} = \frac{\dot{E}_д - \dot{E}_n}{n(Z_{2д} + \frac{Z_{2н}}{n})} = \frac{\dot{E}_д - \dot{E}_n}{nZ_{2д} + Z_{2н}}. \quad (5.71)$$

Так как максимальный синхронизирующий момент пропорционален НС  $F_{2m}$ , то есть току, протекающему по обмотке ротора, то при питании нескольких приемников от одного датчика максимальный момент приемника уменьшается в отношении

$$\frac{M_{г.м}}{M_{и.м}} = \frac{\dot{I}_{n.г}}{\dot{I}_{n.и}} = \frac{Z_{г.д} + Z_{г.н}}{nZ_{2д} + Z_{2н}}, \quad (5.72)$$

То есть погрешность каждого приемника будет больше, чем при индивидуальном питании. Чтобы не допустить увеличение погрешности обычно при групповом питании в качестве датчика используют сельсин с уменьшенным сопротивлением, то есть применяют для этой цели сельсин большей мощности.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1975. – 647с.
- 2 Михайлов О.П., Соколов В.Е. Электрические аппараты и средства автоматизации. М., Машиностроение, 1985.
- 3 Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. -М. : Металлургия, 1980. - 312 с.
- 4 Ключев В.И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов. - М.:, Энергия, 1974. - 96 с.
- 5 Электрические машины и аппараты. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 7.092501/ Сост.: А.В. Разживин. – Краматорск: ДГМА, 2007–с. 40.
- 6 Электрические машины и аппараты. Методические указания к выполнению контрольных работ для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 7.092501/ Сост.: А.В. Разживин. – Краматорск: ДГМА, 2008–с. 40.
- 7 Методические указания к выполнению лабораторного практикума работ по курсу «Электрические машины и аппараты» для студентов заочной формы обучения специальности 7.092501/ Сост.: А.В. Разживин. – Краматорск: ДГМА, 2007–с. 40.
- 8 Электрические машины и аппараты. Модуль 1. Конспект лекций для студентов специальности 7.092501 /Сост. А.В. Разживин. - Краматорск: ДГМА, 2008. – 140 с.
- 9 Справочник по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоиздат, 1983. – 504 с.
- 10 Жукова Г.А., Золина М.А. Лабораторные работы по электрическим аппаратам. – М.: Высш. шк., 1986. – 1986. – 193 с.
- 11 Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. – М.: Высш. шк. 1978. – 333 с..

*Навчальне видання*

# **ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

*(Технические средства автоматизации)*

Укладач: РАЗЖИВІН Олексій Валерійович

28/2007. Підп. до друку . Формат 60 x 84/16.  
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 5.0 Обл.-вид. арк. 2,18  
Тираж 80 прим. Зам. №446

Видавець і виготівник  
«Донбаська державна машинобудівна академія»  
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру  
серія ДК №1633 від 24.12.03.