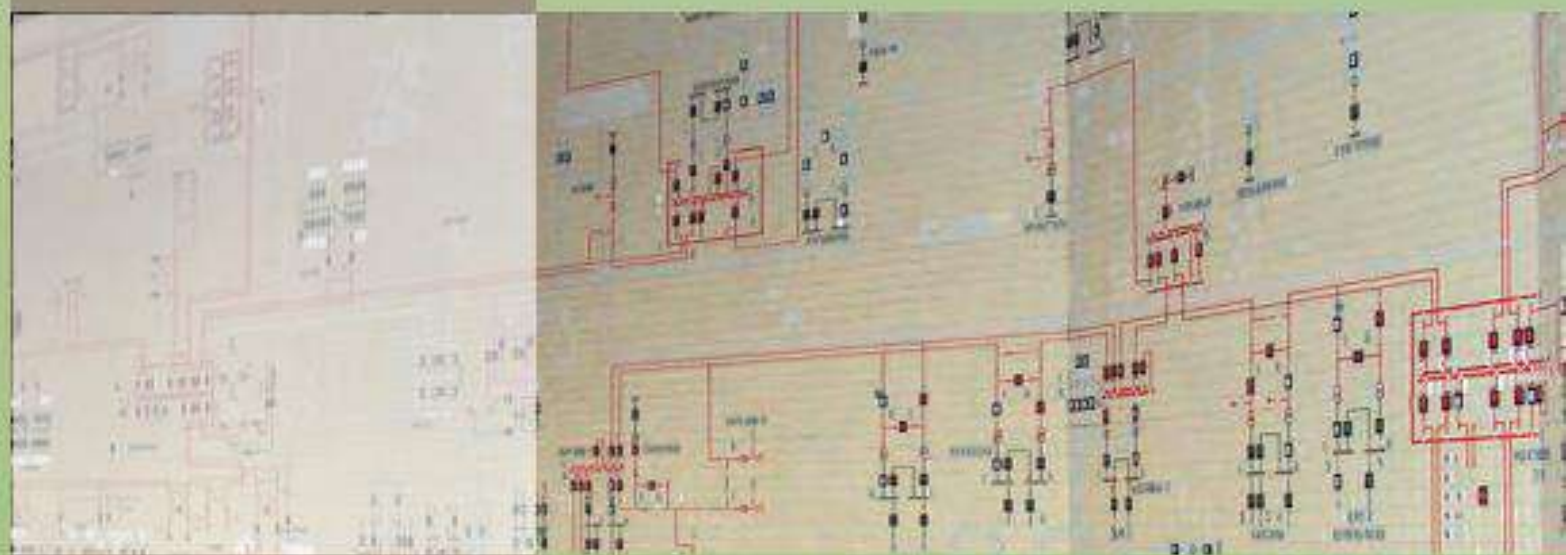


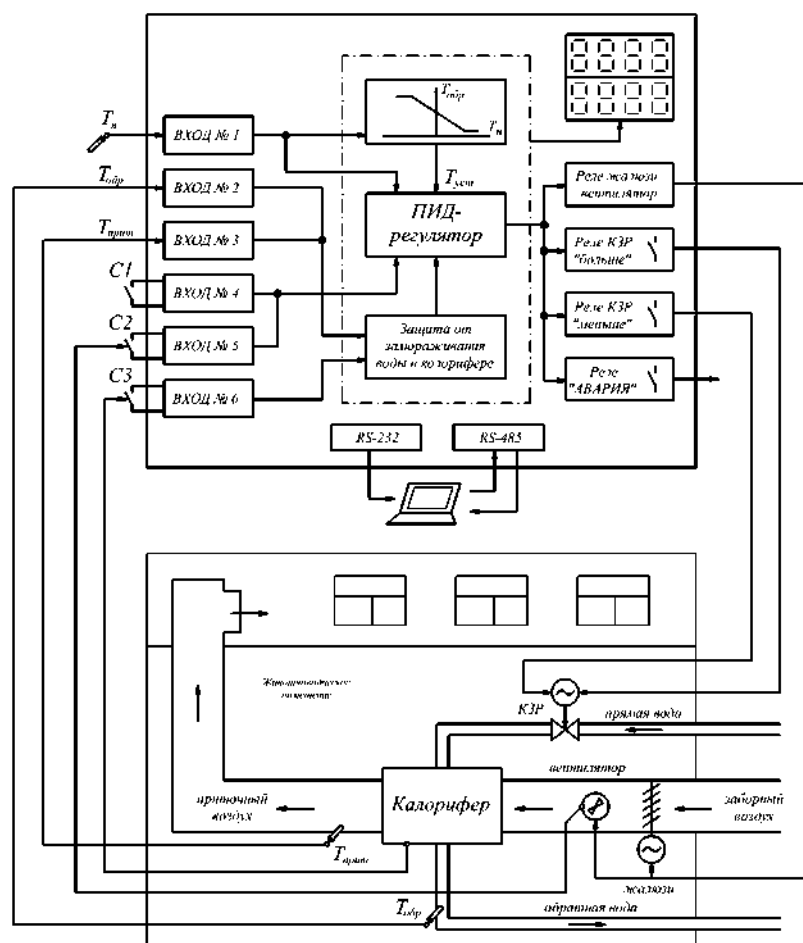
**Змеев А.Я., Усанов К.М.,  
Мошкин В.И., Каргин В.А.**

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ**

**Учебное пособие**



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ



УДК 631.371: 621.311.1(07)

ББК 31.27-02Я73

П79

### **Рецензенты**

профессор Курганской ГСХА им. Т.С. Мальцева, доктор технических наук

**В.И. Чарыков;**

заместитель директора по научной работе и инновационному развитию Курганского института железнодорожного транспорта – филиала УрГУПС, кандидат технических наук, доцент **В.В. Харин.**

Печатается по решению методического совета Курганского государственного университета.

**Змеев А. Я., Усанов К. М., Мошкин В. И., Каргин В. А.**

Проектирование систем электрификации : учебное пособие. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2016. 292 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования, даны представления об объектах и средствах электрификации в АПК, указаны их особенности. Пособие предназначено для студентов направления 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», а также для направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», направленность «Электроснабжение», квалификация – бакалавр.

Рис. – 128, табл. – 57, библиограф. – 25 назв., прилож. – 17.

ISBN 978-5-4217-0372-3

УДК 631.371: 621.311.1(07)

ББК 31.27-02Я73

П79

© Курганский государственный  
университет, 2016

© Авторы, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ .....	7
1.1. Основные категории системной электрификации.....	7
1.2. Системы машин и автоматизация как главные факторы научно- технического прогресса в растениеводстве и животноводстве....	8
1.3. Особенности обеспечения энергией сельскохозяйственных потребителей.....	10
1.4. Основные задачи в области электроснабжения АПК.....	11
1.5. Нетрадиционные методы энергообеспечения потреби- телей.....	12
1.6. Возможности использования солнечной энергии.....	14
1.7. Перспективы использования биогазовых установок.....	15
1.8. Общие требования к проекту электрификации сельскохоз- яйственного объекта.....	16
1.9. Состав рабочего проекта.....	17
1.10. Исходные материалы для проектирования.....	21
1.11. Оценка эффективности вариантов проекта.....	21
1.12. Типовые проекты. Порядок согласования и утверждения проек- тов.....	23
1.13. Структура электротехнической части проекта.....	24
2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ХОЗЯЙСТВА-МАКЕТА.....	26
2.1. Задачи и объем макетного проектирования. Основные показате- ли по хозяйству-макету для данного района.....	26
2.2. Примерный объем исходных данных при проектировании электри- фикации хозяйства-макета.....	29
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА.....	31
3.1. Определение осветительных нагрузок производственных и об- щественных зданий.....	31
3.2. Проектирование осветительной установки зданий.....	31
3.2.1. Выбор источника света.....	32
3.2.2. Выбор вида и системы освещения.....	32
3.2.3. Выбор нормированной освещенности.....	33
3.2.4. Выбор коэффициента запаса и добавочной освещенности....	33
3.2.5. Выбор типа светильников.....	34
3.2.6. Размещение светильников в помещении.....	35
3.2.7. Расчет и выбор мощности источников света.....	37
3.2.8. Метод удельной мощности.....	37
3.2.9. Метод коэффициента использования светового потока....	38
3.2.10. Точечный метод расчета.....	39
3.2.11. Расчет осветительных установок с люминесцентными	

лампами.....	40
3.2.12. Расчет наружного освещения.....	42
3.2.13. Выбор напряжения источников питания.....	45
3.2.14. Выбор мест ввода и установки щитков.....	46
3.2.15. Компоновка осветительной сети.....	46
3.2.16. Расчет сечения проводов осветительной сети.....	47
3.2.17. Выбор щитков, коммутационной и защитной аппаратуры.....	48
3.2.18. Мероприятия по технике безопасности.....	49
3.3. Выбор электропривода машин для переработки и приготовления корма.....	51
3.4. Расчет и выбор электрооборудования для водоснабжения.....	53
3.4.1. Определение расчетных расходов воды.....	54
3.4.2. Методика расчета водонасосной установки.....	55
3.5. Электрический подогрев воды.....	58
3.6. Расчет и выбор установок микроклимата в помещении.....	60
3.7. Расчет установки местного электрообогрева.....	66
3.8. Расчет и выбор облучательных установок.....	68
3.9. Расчет аэроионизатора коронного разряда.....	71
3.10. Расчет электрического обогрева сооружений защищенного грунта.....	73
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	75
4.1. Проектирование электроприводов с двигателями вращательного движения.....	75
4.1.1. Приводные характеристики сельскохозяйственных машин.....	75
4.1.2. Расчет мощности электроприводов.....	77
4.1.3. Выбор аппаратуры управления электроприводами.....	83
4.1.4. Выбор аппаратуры защиты электроприводов.....	87
4.2. Проектирование электроприводов с двигателями линейного движения.....	93
4.2.1. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в технологиях сельхозпроизводства .....	93
4.2.2. Определение геометрических соотношений магнитных систем ЛЭМД.....	96
4.2.3. Тепловые процессы в ЛЭМД.....	100
4.2.4. Конструкции машин с ЛЭМД.....	126
4.2.5. Управляющие электрические преобразователи ЛЭМД....	130
5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	135
5.1. Разработка систем автоматизации технологических процессов...	136
5.2. Общие сведения об исследовании объекта управления.....	137
5.2.1. Основные понятия и определения.....	137
5.2.2. Краткие сведения о законах регулирования, типах регуляторов, определение их параметров.....	142

5.3. Технические средства автоматизации.....	152
5.3.1. Датчики.....	152
5.3.2. Реле.....	201
5.3.3. Исполнительные механизмы.....	208
5.4. Автоматизация технологических процессов в животноводстве...	212
5.4.1 Автоматизация первичной обработки молока.....	212
5.4.2 Автоматическое управление системами обеспечения микроклимата.....	215
5.5. Автоматизация технологических процессов при хранении и пе- реработке сельскохозяйственной продукции.....	217
5.5.1. Автоматизация процессов хранения сельскохозяйственной продукции.....	217
5.5.2. Автоматизация технологических процессов переработки сельскохозяйственной продукции.....	222
5.6. Пример разработки и исследования автоматических систем.....	226
5.6.1. Анализ объекта и выбор принципа регулирования.....	227
5.6.2. Определение математических моделей элементов САР.....	229
5.6.3. Определение параметров настройки регулятора и оценка качества регулирования.....	235
6. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ...	242
6.1. Определение расчетных нагрузок на примере ремонтно- механического цеха.....	242
6.2. Коэффициент мощности и способы его повышения.....	249
6.3. Проверка электрической сети 0,38 кВ на возможность запус- ка асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым рото- ром.....	265
6.4. Определение допустимых сопротивлений заземляющих устройств	267
6.5 Расчет заземляющих устройств.....	268
6.6 Защита от прямых ударов молнии.....	270
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	272
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	273
ПРИЛОЖЕНИЯ П1–П17 Справочные материалы.....	275

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие агропромышленного комплекса невозможно без соответственного технического и приборного оснащения, разработанного и произведенного с учетом передовых достижений научно-технического прогресса.

Обоснованный выбор машин для комплектования технологических линий при проектировании и последующая грамотная эксплуатация, являются важными факторами надежного и бесперебойного снабжения населения продовольствием, а перерабатывающей промышленности – сырьем.

Эти положения учтены при разработке в настоящем учебном пособии «Проектирование систем электрификации», в которой используется системный подход к повышению производительности труда, энерго-, электросбережению, эффективному использованию электрической энергии, грамотной эксплуатации электрооборудования, в первую очередь электродвигателей, выбору новейших методов электротехнологии, интенсификации производственных процессов на основе их электрификации и автоматизации.

Учебное пособие нацелено на развитие творческого мышления и самостоятельности при выборе новейших методов и средств технологий у инженеров-электриков сельскохозяйственного производства и призвано способствовать успешной реализации новых методов интенсификации производства и повышению производительности труда.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

## 1.1 Основные категории системной электрификации

При системной электрификации необходимо обеспечить гармоническое сочетание прогрессивных технологий, системы электрифицированных машин, рациональной организации труда, позволяющее осуществить высокоэффективное производство сельскохозяйственной продукции. При этом предполагается использовать электротехнические средства не только для обеспечения рабочих операций, но и для улучшения условий труда.

Организация производства называется *поточной*, если все рабочие операции по производству конечного продукта выполняются системой машин без применения ручного труда. Такая организация создает условия для автоматизации как отдельных операций, так и всей технологии в целом.

Следует различать понятия «объекты электрификации» и «средства электрификации» [1-3].

*Объекты электрификации* – это поточные линии, сельскохозяйственного предприятия, оросительные системы, коммунально-бытовые, торговые и обслуживающие предприятия, населенные пункты и территориальные районы, где имеются рабочие операции, технологические процессы.

*Средства электрификации* – устройства, оборудование, приборы и аппараты, предназначенные для снабжения, преобразования или использования электрической энергии при выполнении рабочих операций. Чем крупнее объект, тем больший набор средств потребуется для решения задачи комплексной электрификации.

На эффективность применения электротехнических средств оказывают влияние специфические условия сельскохозяйственного производства, которые необходимо учитывать при разработке проектов электрификации.

Так, проектирование системы электрификации без учета ряда требований, например, бесперебойности электроснабжения ряда сельхозобъектов, точности поддержания параметров микроклимата при автоматическом управлении и др., может привести к снижению выхода продукции.

Сельскохозяйственное производство характеризуется целым набором факторов окружающей среды, в котором работают машины и средства электрификации. В частности, резкие колебания температуры, повышенная влажность воздуха, содержание агрессивных и взвешенных в воздухе примесей, отрицательно влияют на электрооборудование. Таким образом, при проектировании необходимо выбирать оборудование, исполнение которого соответствует условиям окружающей среды. Нарушение этого требования влечет значитель-



ный ущерб из-за сокращения сроков службы технических средств и недопроизводства.

Рассредоточенность нагрузки по хозяйству или району вызывает необходимость строительства протяженных сетей и увеличения числа трансформаторных подстанций, что снижает эффективность использования. Поэтому при разработке проектов любого объекта сельского хозяйства необходимо стремиться к концентрации электрических нагрузок.

Сезонность работ в сельхозпроизводстве резко уменьшает коэффициент использования оборудования и снижает эффективность электрификации. Так, число часов использования электродвигателей на ряде объектов не превышает 1000 за год, а на зерноочистительных пунктах составляет не более 100...250 час/год.

Таким образом, учитывая сезонность работ при выборе технических средств электромеханизации производственных процессов, следует рассматривать варианты, нацеленные на повышение коэффициента использования оборудования. Например, сочетание зерноочистительного пункта с комбикормовым заводом или кормоцехом позволяет использовать транспортные механизмы в течение всего года.

При проектировании следует учитывать особенности сельскохозяйственных машин, обладающих значительными моментами инерции и диапазонами частот вращения, влияющими на их производительность и построение схем автоматического управления [2].

Так как характерной особенностью многих объектов сельской электрификации является соизмеримая мощность источника электроснабжения и отдельных токоприемников, то для наиболее мощных и часто включаемых электродвигателей необходимо предусмотреть средства облегчения их запуска.

## **1.2. Системы машин и автоматизация как главные факторы научно-технического прогресса в сельхозпроизводстве**

В настоящее время создание техники для сельского хозяйства осуществляется на основе постоянно совершенствуемой системы машин, которая является технической основой комплексной механизации и электрификации сельскохозяйственного производства.

Постоянное совершенствование технических средств и технологий отрасли – необходимое условие непрерывного увеличения производительности труда. Развитие материально-технической базы позволяет перейти от применения отдельных машин к комплексным поточным линиям с автоматизированным управлением и существенно снизить затраты труда на производство единицы продукции.

Развитие системы машин для молочного животноводства идет по пути создания типоразмерных рядов поточных линий для доения, переработки кормов, их хранения и раздачи, уборки и переработки навоза, обеспечения оптимального микроклимата, максимальной унификации всех животноводческих ферм и комплексов, дальнейшей автоматизации процесса доения с учетом эффективного построения системы «человек–машина–животное».

В свиноводстве система машин развивается по пути ускоренного создания и применения автоматизированных поточных линий, которые предопределяют внедрение все более совершенных технологий содержания животных.

Во всех отраслях животноводства важной задачей является изыскание оптимальных способов автоматизации управления технологическими процессами, создание ферм-автоматов для откорма свиней и молодняка крупного рогатого скота, выращивания бройлеров и производства яиц.

Повышение производительности труда в значительной степени зависит от уровня автоматизации процессов и отдельных установок, как стационарных, так и мобильных. Для них предложены технические решения, которые позволяют работать независимо от человеческого внимания. В частности, это дает возможность раздвинуть границы скоростей на полевых работах. Установка на агрегаты автоматов позволяет увеличить мощность машин и точность их действия [2-5].

Быстродействие и точность работы мощных и скоростных машин обеспечиваются при программном управлении. Массовое применение автоматов создает предпосылки к дальнейшему совершенствованию техники и технологии. При этом сокращается разрыв между потребностью в рабочей силе и ее использованием, открываются новые перспективы по улучшению качества выполнения операций и получаемой продукции.

Таким образом, автоматизация как одна из форм технического прогресса в значительной мере определяет техническое развитие средств механизации и в стационарных, и в мобильных процессах. Это повышает требования и расширяет круг обязанностей инженера-электрика.

Промышленность выпускает системы автоматизированного управления (САУ) зерноочистительными агрегатами и зерноочистительно-сушильными пунктами, а также целый набор элементов для комплектации систем автоматизации других стационарных установок.

На свеклоуборочных комбайнах успешно применяются автоматические устройства для направления движения рабочих органов вдоль рядков. Внедряются в производство системы контроля и сигнализации вращения валов высевающих аппаратов, заглубления сошников и дистанционной связи между сеяльщиком и трактористом. Совершенствуются фотоэлектронные системы авто-

матического контроля работы посевных агрегатов, позволяющие повысить производительность труда при выполнении операции более чем в два раза. Ведутся опытно-конструкторские работы по созданию систем автоматического вождения сельскохозяйственных тракторных агрегатов.

В конструкцию наиболее сложных сельскохозяйственных машин вводятся электронные блоки для автоматического регулирования рабочего процесса, обеспечивающие максимальную производительность в различных условиях при эксплуатации. Развиваются поточные методы проведения работ на уборке зерновых, сахарной свёклы, на заготовке кормов, способствующие интенсификации производства в целом.

Автоматизация процессов предполагает разработку и освоение производства автоматических устройств для обеспечения индивидуального нормирования выдачи кормов, диспетчерского управления производственными процессами на комплексах, определения привесов животных на откорме, контроля качества процессов послеуборочной обработки зерна или выполнения механизированных работ в полеводстве, управления машинотракторными агрегатами при индивидуальном и групповом вождении.

В настоящее время созданы и используются стандартизованные модули для автоматизации отдельных операций и процессов или управления целыми объектами в полеводстве и животноводстве, составляющие основу для единой автоматизированной системы управления сельским хозяйством.

Разработаны единые научно-методические основы для автоматизированных систем управления (АСУ), действующих в сельском хозяйстве и в других звеньях АПК.

Дальнейшее развитие материально-технической базы сельского хозяйства невозможно без надежной, развивающейся опережающими темпами, энергетической базы.

### **1.3. Особенности обеспечения энергией сельскохозяйственных потребителей**

Энергетическая база АПК складывается из различных стационарных и мобильных средств, работающих на жидком топливе, газе, угле, торфе, дровах и электрической энергии [2-5]. Эти виды энергии доставляют по четырем различным каналам с большими расходами на транспорт, средства хранения и передачи. Уголь, дрова и нефтепродукты завозят железнодорожным и автомобильным транспортом; газ транспортируют по трубопроводу или доставляют в баллонах. Для передачи и распределения электрической энергии созданы разветвленные электрические сети.

В общем энергетическом балансе агропромышленного комплекса потребление мобильными средствами энергии жидкого топлива и газа составляет около 35 %. Всего в энергетическом балансе АПК электроэнергия занимает около 12 %, из которых 8 % энергии потребляют электросиловые установки, главным образом, приводы стационарных машин, и около 4 % – осветительные, облучательные установки и приборы небольшой мощности. Тепловые процессы в производстве, коммунальном хозяйстве и быту в общем балансе энергопотребления составляют до 52 %.

Потребление топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве увеличивается примерно в полтора раза через каждые 10 лет. Особо следует отметить тенденцию нарастания потребления жидкого топлива в АПК, что требует серьезной проработки всего комплекса проблем энергообеспечения на перспективу. При этом необходимо учесть, что источники получения нефтепродуктов имеют конечные, невозобновляемые запасы, поэтому с течением времени будет наблюдаться постоянное увеличение стоимости нефтепродуктов в связи усложнением техники добычи нефти из обедненных и остаточных пластов, а также с использованием сложной техники для крекинг-процесса. В связи с этим разрабатываются усовершенствованные схемы энергоснабжения агропромышленного комплекса с учетом использования как традиционных, так и перспективных источников энергии.

#### **1.4. Основные задачи в области электроснабжения АПК**

Увеличение потребления электроэнергии наряду с предстоящими качественными изменениями в составе сельскохозяйственных потребителей и постепенным переводом АПК на индустриальную основу требует коренного улучшения системы электроснабжения и решения таких важных задач, как повышение ее надежности, широкое внедрение подземных кабельных линий, определение оптимальных способов резервирования, в том числе, за счет дизельных электростанций.

Применение кабельных линий повышает надежность электроснабжения, уменьшает ущерб, наносимый сельскохозяйственному производству перерывами в подаче электроэнергии, исключает необходимость защиты сетей от атмосферных перенапряжений, ураганов и обледенений проводов, исключает затраты на высококачественную древесину, стальные и железобетонные изделия, снижает опасность поражения персонала электрическим током, значительно сокращает убытки, наносимые отчуждением земель при строительстве ВЛ [3].

Однако кабельные сети требуют более высоких капиталовложений по сравнению с воздушными линиями. Так стоимость перспективных облегченных подземных кабельных сетей превышает стоимость ВЛ на 18...22 %.

Надежное обеспечение, постоянно увеличивающейся потребности сельского хозяйства в высококачественной электрической энергии, требует совершенствования системы передачи и распределения.

Одно из наиболее важных условий эффективного и качественного электроснабжения – "приближение" высоких напряжений к вводам потребителей, расширение питающих сетей напряжением 35...110 кВ, а также переход на использование этих линий в качестве распределительных с одновременным сокращением радиуса действия сетей 10 кВ.

Необходимо увеличивать единичную мощность трансформаторов и число двухтрансформаторных подстанций всех напряжений с применением схем с двухсторонним питанием. Повышение надежности электроснабжения требует внедрения специальных автоматических устройств, контролирующих основные параметры и следящих за состоянием сетей.

При выборе оптимального варианта проектируемых линий и увеличения пропускной способности электрических сетей необходимо стремиться к повышению точности определения значений расчетных электрических нагрузок, добиваться уплотнения и выравнивания их суточных и сезонных графиков. При их составлении следует использовать сведения о фактически выполняемых технологических процессах и используемых технических средствах; применять аккумулярующие устройства и автоматическое регулирование нагрузок трансформаторов, добиваться снижения запроецированной установленной мощности электроприемников при одновременном увеличении продолжительности их работы.

Кабельные линии напряжением 0,38...10 кВ следует выбирать при компоновке внутримплощадочных сетей на животноводческих и других предприятиях.

### **1.5. Нетрадиционные методы энергообеспечения потребителей**

В сельскохозяйственном производстве существуют автономные потребители небольшой мощности, электро- и теплоснабжение которых является технической и социальной задачей. К таким потребителям относятся, в частности, летние жилища пастухов, водопойные пункты на отгонных пастбищах, отдельные жилые дома, в которых проживает обслуживающий отдаленные животноводческие фермы персонал, передвижные домики для рабочих и т.д. Почти все эти объекты, как правило, не имеют централизованного энергоснабжения.

Для электроснабжения автономных потребителей перспективным является использование возобновляемых источников энергии [5].

Однако энергия ветра не может быть использована для электрификации сельхозпредприятий даже в районах с малой плотностью нагрузки, прежде всего, из-за отсутствия гарантий бесперебойного электроснабжения, что является необходимым условием комплексной электрификации объектов отрасли. Установка резервной тепловой электростанции при ветрогенераторах нецелесообразна, так как требует дополнительных капиталовложений и сохраняет проблему доставки топлива. В связи с этим ветроустановки нашли незначительное применение, в частности, для механического привода мельниц и устройств для орошения небольших участков овощных культур и садов.

Реальные перспективы для широкого использования ветродвигателей имеются лишь на объектах, расположенных в труднодоступной местности, в степях, пустынных и полупустынных зонах страны, в первую очередь, для подъема воды из скважин, а в местах с постоянными ветрами – для электроснабжения.

Перспективной представляется схема комплексного электроснабжения объектов АПК, предусматривающая централизованную доставку на объект одного вида энергоносителя, например, сжиженного газа, который используется для получения требуемого количества теплоты и электрической энергии (рис.1.1).

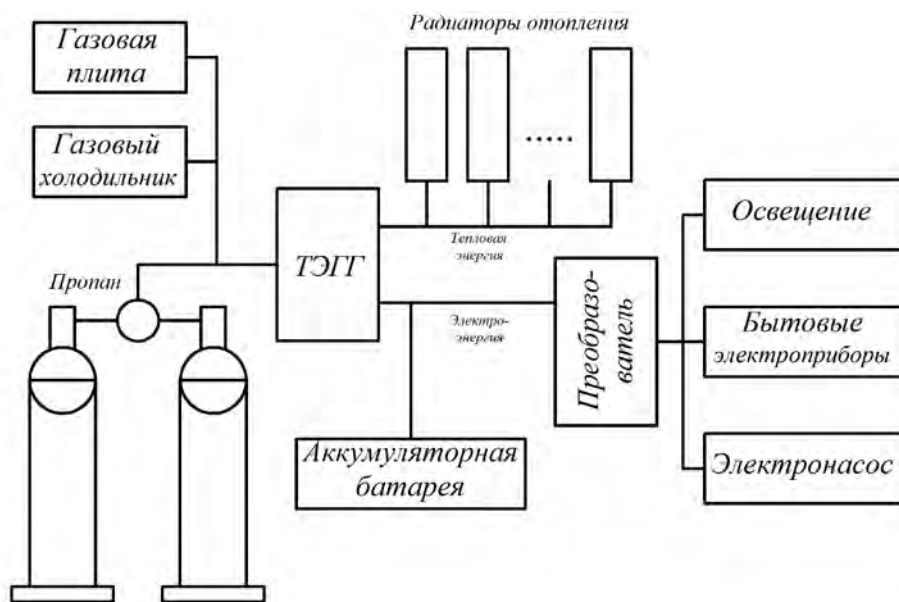


Рис. 1.1 Структурная схема комплексного энергоснабжения автономного сельскохозяйственного потребителя

Основным элементом структурной схемы (рис.1.1), вырабатывающим электрическую и тепловую энергию, является газовый термоэлектрический генератор (ТЭГТ), для поддержания работоспособности которого необходимы лишь смена газовых емкостей и внешний осмотр установки. Мощность гене-

ратора выбирают в зависимости от суточного потребления энергии всеми электроприемниками объекта АПК. Для обеспечения пиковых нагрузок можно использовать буферную аккумуляторную батарею. При необходимости в схему включают преобразователь постоянного тока в переменный с частотой 50 Гц и напряжением 220 В.

При работе только на производство электроэнергии расход газа установкой мощностью 100 Вт составляет не более 0,4 кг/ч. В случае использования потребителями электрической и тепловой энергии общий энергетический КПД установки может достигать до 70 %.

### 1.6. Возможности использования солнечной энергии

Солнечная энергия во многих странах рассматривается как один из дополнительных энергетических источников.

Наиболее перспективными районами для солнечных установок в нашей стране считаются Северный Кавказ и Нижнее Поволжье. Здесь продолжительность солнечного дня достигает 3000 часов в год, а общая солнечная энергия, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности, за год составляет от 1280 до 1870 кВт·ч.

Солнечную энергию можно использовать для получения низкопотенциальной теплоты для горячего водоснабжения, сушки сельскохозяйственной продукции, отопления жилых помещений, обогрева сооружений защищенного грунта, получения электроэнергии в автономных энергетических установках.

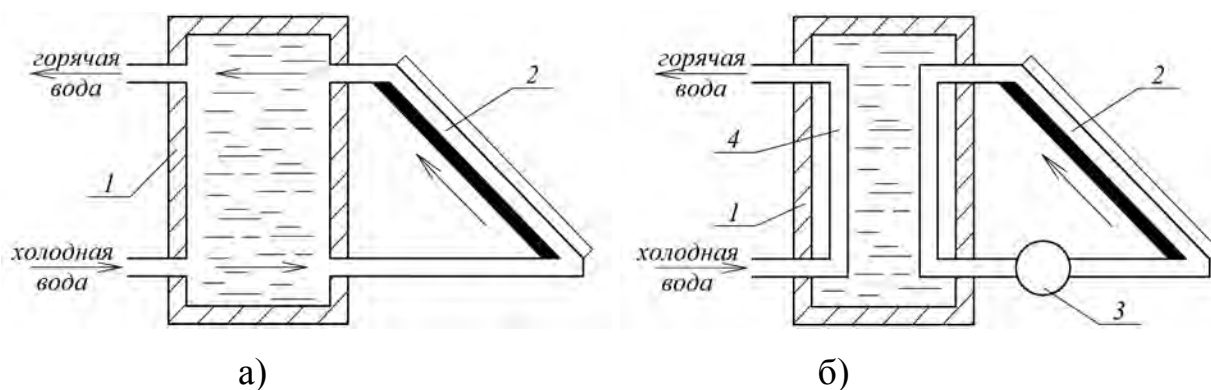


Рис. 1.2 Солнечные нагревательные панели с естественной циркуляцией (а) и двухконтурный (б): 1 – бак-аккумулятор; 2 – коллектор; 3 – насос; 4 – змеевик второго контура.

В настоящее время налажен выпуск солнечных нагревательных панелей с естественной циркуляцией (рис.1.2,а), основной частью которых является плоский солнечный коллектор 2, где нагревается вода, поднимаясь затем в бак-аккумулятор 1 для дальнейшего потребления.

В ряде случаев целесообразно применять теплообменник, в котором тепло от нагревательных панелей поступает в змеевик, где часть его расходуется

на подогрев протекающей в теплообменнике воды (рис.1.2,б). Такие солнечные нагревательные панели называются двухконтурными с теплообменником.

Использование солнечных нагревателей в весенне-летний период представляется перспективным и в ряде случаев позволяет значительно сократить расходы на получение горячей воды для технологических нужд.

### 1.7. Перспективы использования биогазовых установок

Солнечная энергия, запасенная в биомассе, может быть использована прямым сжиганием биомассы, анаэробным сбраживанием с получением биогаза или пиролизом с получением жидкого топлива.

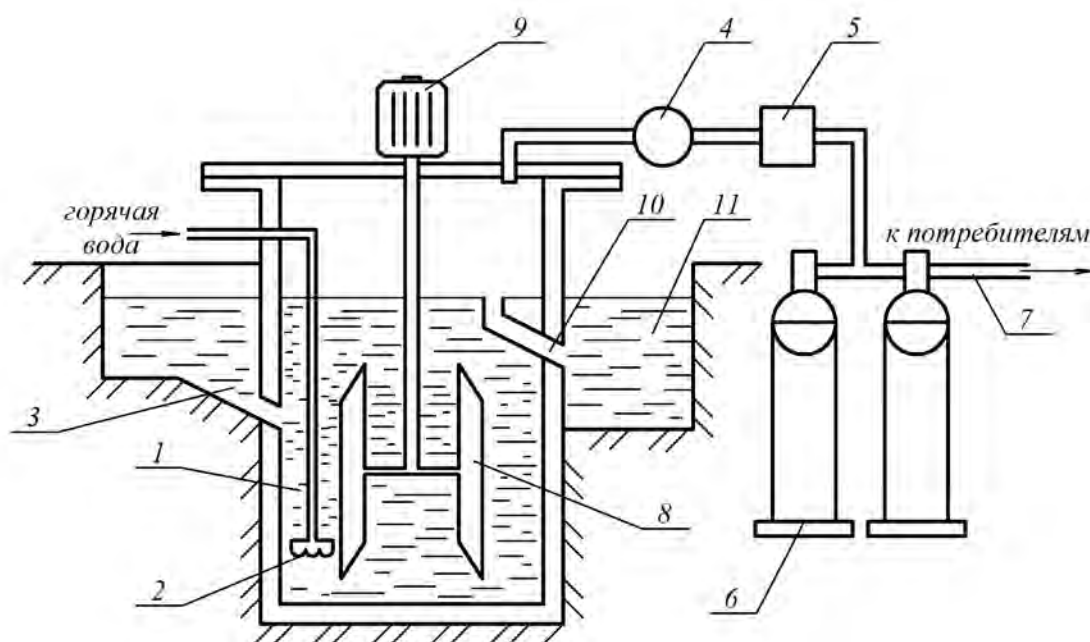


Рис. 1.3 Схема биогазовой установки: 1 – бродильная камера; 2 – теплообменник; 3 – загрузочное устройство; 4 – насос; 5 – фильтр; 6 – газгольдер; 7 – газопровод; 8 – перемешивающее устройство; 9 – электродвигатель; 10 – выпускное отверстие; 11 – приемник перебродившей массы.

Биогаз получается при анаэробном сбраживании сельскохозяйственных отходов, включающих целлюлозу, и содержит 65 % метана, 33 % углекислого и 2 % других газов. Так, из одной тонны навоза при оптимальных условиях можно получить до 340 м<sup>3</sup> биогаза и использовать его в качестве топлива на тепловых миниэлектростанциях.

Схема биогазовой установки представлена на рис.1.3. Через загрузочное устройство 3 жидкий навоз поступает в бродильную камеру 1. Для подогрева массы в холодное время года используется теплообменник 2, выполненный в виде трубки, по которой пропускают горячую воду. Выделяющийся при брожении биогаз концентрируется в верхней части камеры 1, откуда насосом 4 его перекачивают в газгольдер 6 через фильтр 5 и далее по газопроводу 7 к потребителям. Для предотвращения образования в сбраживаемой массе корки, пре-



пятствующей выходу биогаза, применяется специальное устройство для перемешивания 8 с приводом от электродвигателя 9 небольшой мощности. Переработанную массу удаляют через выпускное отверстие 10 в специальный приемник 11.

Применение биогазовых установок, как в небольших фермерских хозяйствах, так и в сельскохозяйственных артелях и кооперативах позволяет снизить затраты на отопление и горячее водоснабжение, а продукты переработки органической массы использовать как высококачественное удобрение.

### **1.8. Общие требования к проекту электрификации сельскохозяйственного объекта**

Проект современного сельскохозяйственного объекта представляет собой документ, который содержит архитектурные, инженерные, социально-экономические решения и соответствует ряду общих требований [2-7].

- Прогрессивная технология, базирующаяся на современной системе машин и механизмов. При проработке проектных решений необходимо стремиться к увеличению коэффициентов загрузки и сменности этих машин, рациональному их размещению, повышению уровня механизации и автоматизации рабочих операций.
- Рациональное использование сырья, материалов, энергии. При этом необходимо определить наличие местных источников энергетического сырья, которые не представляют промышленной ценности, но могут эффективно использоваться в конкретных условиях. В ряде случаев целесообразно проработать варианты по использованию возобновляемых источников энергии.
- Привязка к существующим коммуникациям: водо- и энергоснабжения, канализации, очистным сооружениям, транспортным магистралям и др.
- Рациональное использование земли, ее рекультивация, охрана окружающей среды. Согласно существующему законодательству, под вновь проектируемые объекты должна отводиться малопродуктивная земля.
- Система организации и управления производством. На сложных объектах следует предусматривать автоматизированные системы управления производством (АСУП) с использованием программируемых логических контроллеров (ПЛК) и ЭВМ. Подобные системы целесообразно применять на крупных животноводческих комплексах.
- Широкое использование типовых и повторно применяемых решений. Это не только сокращает сроки проектирования, но и повышает надежность объекта, для которого решения проверены уже в хозяйственных условиях.
- Перспектива развития объекта на 7...10 лет, с учетом времени, затраченного на проектирование, строительства и освоение объекта.

- Экономичность принятых решений достигается путем проработки различных вариантов основных идей.
- Решение вопросов жилищного строительства, культурно-бытового обслуживания населения. Проектирование таких объектов обычно проводится при комплексном развитии хозяйства или создании нового комплекса по производству сельскохозяйственной продукции.
- Высокий уровень организации строительства, выполнение сроков освоения капитальных вложений и мощностей. Электротехническая часть проекта должна отвечать требованиям правил устройства электроустановок (ПУЭ), правил техники безопасности и технической эксплуатации, а также предусматривать высокий уровень электромонтажных работ, который оценивается коэффициентом индустриализации:

$$K = \frac{A + B}{B + B} \geq 0,45, \quad (1.1)$$

где  $A$  – стоимость электроконструкций заводского исполнения (щиты, пульты и др.);  $B$  – стоимость электрооборудования, подлежащего монтажу;  $B$  – стоимость электромонтажных работ.

Проектирование осуществляют на основе проектного задания, в котором учитываются технические возможности, экономическая целесообразность и хозяйственная необходимость строительства в данном месте и в намеченные сроки.

### 1.9. Состав рабочего проекта

Рабочий проект включает в себя следующие разделы и рабочие чертежи.

1. **Пояснительная записка** содержит краткую характеристику важнейших технических решений, сведения об использованных изобретениях, а также основные ссылки на соответствующие нормы и правила; в ней указаны сроки и очередность строительства. Здесь же приводятся основные мероприятия по охране окружающей среды: очистке сточных вод, атмосферы, восстановлению земель.

2. **Технико-экономический раздел** включает материал по экономическому обоснованию проектируемого объекта, анализу капитальных вложений; приводятся данные о технологии и ее соответствии мировым стандартам; основные показатели, характеризующие объект (занимаемая площадь, уровень механизации и автоматизации, производительность труда).

3. **Генеральный план, транспорт и рекультивация земель** включают описательную часть и чертежи по соответствующим разделам.

*Генеральный план.* В этом разделе приводят основную характеристику архитектурно-планировочных решений, размеры площадок строительства, ори-

ентацию их на местности по направлению господствующих ветров. В разделе дают перечень основных мероприятий по гражданской обороне, как правило, со ссылкой на соответствующий проект. В состав раздела входят чертежи: генплан, ситуационный план с коммуникациями, план объекта и сводный план инженерных сетей.

*Транспорт.* В разделе приводят характеристику грузопотоков, объем перевозок и радиус (плечо) перевозок, а также характеристику транспортных средств. Для крупных объектов составляют схему грузопотока и схему перевозки обслуживающего персонала. Для отдельных объектов приводят лишь ссылку на генплан и транспортные коммуникации, отраженные в нем.

*Рекультивация земель.* Здесь обосновывают рациональное использованию земли и уточняют объемы работ по снятию и использованию плодородного слоя, мелиорации или другим мероприятиям по восстановлению земель и компенсации продуктивной площади, занимаемой проектируемым объектом. К разделу прилагают чертежи земельных участков (застраиваемого и вновь вводимых).

**4. Технология производства, обеспечение энергоресурсами и защита окружающей среды.** *Технологии производства.* Приводят характеристику производства продукции, схему (технологию) производства, характеристику и обоснование технологических и технических решений, режим работы предприятия, условия окружающей среды, данные об исходном и конечном продукте. Здесь же обосновывают выбор основного технологического и вспомогательного оборудования, приводят требования к освещенности, шуму, вибрации, а также к очистке сточных вод и выбросам в атмосферу, расчет численности обслуживающего персонала и распределение его по сменам (бригадам), состав рабочих групп. К разделу прикладывают чертежи: технологическую схему, планы с размещением и компоновкой оборудования, схемы трубопроводов.

*Автоматизация технологических процессов.* Приводят перечень операций и процессов, подлежащих автоматизации, дают обоснование принятых решений по контролю, регулированию сигнализации и автоматизации технологических процессов, требования к приборам, регуляторам по точности и закону регулирования.

При двухстадийном проектировании могут быть сформулированы требования к приборам, датчикам, оборудованию, которые не производятся промышленностью, но необходимы для решения задач данного производства, то есть задания заводам изготовителям на разработку технических средств.

К описанию прикладывают необходимые для монтажа и эксплуатации чертежи, схемы автоматического управления, контроля, регулирования (структурные, функциональные, принципиальные и др.).

*Электроснабжение и электрооборудование.* Здесь приводят перечень машин и механизмов и их характеристики по потреблению электрической энергии. На основании расчетов определяют нагрузки на вводе потребителей и выбирают мощность источников электроснабжения. При этом определяют число, месторасположение и мощность каждой трансформаторной подстанции, протяженность, сечение проводов, жил воздушных и кабельных линий, способ монтажа и прокладки. В зависимости от категории потребителей разрабатывают мероприятия по повышению надежности электроснабжения.

В этом же разделе приводят обоснования по выбору источников освещения, типов светильников, выбору пускозащитной аппаратуры, щитов, пультов, а также характеристики внутренних проводок и способы их прокладки. В ряде случаев приводят расчет и обоснование типа электропривода, если машина или механизм поставляется некомплектно, или решают вопрос о переводе каких-либо механизмов на электропривод. Одновременно могут быть решены задачи по обоснованию электротехнологии. В соответствии с ПТБ и ПТЭ приводят рекомендации по устройству молниезащиты и эксплуатации электроустановок.

К разделу прикладывают заказные спецификации на оборудование и материалы, а также чертежи: планы и разрезы с размещением технологического, электротехнического оборудования, щитов и пультов, с трассами проводок, схемами управления и защиты токоприемников, расчетно-монтажные таблицы.

*Энергетические установки.* В разделе приводят обоснования и расчеты по обеспечению проектируемого объекта сжатым воздухом, кислородом, газом, разрабатывают чертежи для прокладки магистралей и составляют заказные спецификации.

*Тепловые сети.* Раздел содержит расчеты необходимого количества теплоты, решения по выбору источника теплоснабжения и сооружению тепловых сетей, их изоляции, защиты от коррозии и т. д. Здесь намечают трассы наружных и внутренних сетей и составляют заказные спецификации.

*Охрана водоемов, почвы и атмосферы.* С учетом санитарных норм и сведений гидрометеослужбы проводят расчеты количества выбросов, по которым выбирают типы и размеры очистных сооружений. Разрабатывают чертежи защитных сооружений или используют типовые проекты для выбранного объекта.

**5. Организация труда и системы управления предприятием.** *Рекомендации по организации труда, технике безопасности,* в том числе и электробезопасности, приводят в соответствии с технологией и режимом работы.

*Система управления.* В разделе приводят общие сведения по структуре управления, расчет необходимых средств для обеспечения системы, расчет чис-

ленности и состава аппарата управления. Составляют заказные спецификации и чертежи: общие схемы управления, схемы информационных потоков и схемы размещения и расположения системы управления и управляющих сетей.

*Связь и сигнализация.* В пояснительной записке приводят обоснования принимаемых решений по организации связи и сигнализации, составляют заказные спецификации.

**6. Строительная часть.** *Архитектурно-строительная часть.* В этом разделе приводят обоснование архитектурно-планировочных решений и разрабатывают строительные чертежи.

*Отопление и вентиляция.* В разделе решают вопросы по созданию микроклимата, например, оптимальных температурно-влажностных режимов для обслуживающего персонала, содержания животных, выращивания растений и т. п. В соответствии с нормами, указанными в СНиП (строительные нормы и правила), проводят обоснования и расчеты по отоплению и вентиляции, определяют количество потребной теплоты, выбирают необходимое оборудование. Разрабатывают чертежи для прокладки наружных и внутренних отопительных и вентиляционных сетей, составляют заказные спецификации.

*Водоснабжение и канализация.* Приводят обоснования и расчеты по определению потребностей предприятия в водопотреблении и по отводу отходов, выбирают оборудование, рассчитывают коммуникационные сети. К разделу составляют заказные спецификации и необходимые чертежи.

**7. Организация строительства.** В разделе определяют объемы строительных и монтажных работ, очередность их проведения, обосновывают временные коммуникации и площадки для хранения материалов и оборудования, составляют графики проведения работ и строительно-организационный план.

**8. Организация подготовки и освоения проектных мощностей.** Раздел содержит рекомендации по очередности ввода объектов или их частей и по их освоению.

**9. Сметно-финансовый расчет.** На основании объемов работ, определенных в предыдущих разделах проекта, и ценников составляют сметы и сводки затрат. При этом составляют как общую смету на строительство, так сметы по объектам и видам работ. Сметы – это документы, по которым финансируется строительство.

**10. Жилищное и гражданское строительство.** Этот раздел включает обоснование необходимости, объемов и сроков, строительства, а также определяет выбор типовых проектов, по которым должно осуществляться данное строительство.

**11. Паспорт рабочего проекта** составляется по установленной форме.

## **1.10. Исходные материалы для проектирования**

Разработку проекта ведут на основании задания на проектирование, которое составляет заказчик – руководитель хозяйства, района, области или министерства. Исходными материалами для разработки проекта служат директивные и нормативные материалы, результаты обследования объекта проектирования, типовые проекты и решения.

В качестве нормативных материалов при проектировании комплексной электрификации следует принимать: строительные нормы и правила, строительные нормы, нормы технологического проектирования, правила устройства электроустановок, правила техники безопасности и технической эксплуатации электроустановок, руководящие материалы, издаваемые ведущими проектными организациями, технические условия.

Важным этапом разработки проектов является технико-экономическое обоснование (ТЭО), в котором подтверждается техническая возможность и экономическая целесообразность проектирования и строительства (реконструкции) данного объекта хозяйства в указанные сроки.

При обследовании хозяйства необходимо детально ознакомиться с основными направлениями деятельности, достигнутыми показателями, выяснить состояние существующих зданий и сооружений, их габаритные размеры, состав машинно-тракторного парка, состав средств электромеханизации в животноводстве и их техническое состояние, перспективы развития на 5...7 лет. При этом нужно собрать следующие материалы:

- планы расположения животноводческих ферм, схемы коммуникаций (транспорт, водоснабжение, канализация, электроснабжение и др.);
- природно-климатические характеристики района;
- данные о поголовье скота, способе содержания и кормления, наличии кормовой базы, технологии первичной обработки продукции животноводства;
- данные о численности рабочего персонала, в том числе, в животноводстве.

## **1.11. Оценка эффективности вариантов проекта**

Поиск оптимальных вариантов принимаемых решений базируется на экономическом сравнении близких по техническим возможностям предложений. Для оценки эффективности варианта существует целый ряд показателей: удельные и суммарные капитальные вложения, производительность труда, себестоимость продукции, наименьшие эксплуатационные затраты и т.п.

Согласно существующей методике выбора технических средств и оценки новых машин, за оптимальный вариант принимается тот, у которого приведенные затраты наименьшие. При этом оказывается, что уровень электромехани-

зации процессов (по удельным капитальным вложениям) меньше, чем при поиске оптимума по трудовым затратам или себестоимости. Из этого следует, что оптимальным вариантом комплексной электрификации следует считать тот, у которого

$$П_3 = E_H \cdot K + \mathcal{E} \rightarrow \min, \quad (1.2)$$

где  $П_3$  – приведенные затраты;  $E_H$  – коэффициент нормативной окупаемости капитальных вложений;  $K$  – суммарные капитальные затраты;  $\mathcal{E}$  – годовые эксплуатационные затраты.

При сопоставлении вариантов выбор можно вести исходя из срока окупаемости

$$T = \frac{K_1 - K_2}{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1} \leq T_H, \quad (1.3)$$

где  $T$  и  $T_H$  – соответственно расчетный и нормативный сроки окупаемости капитальных вложений,  $T = \frac{1}{E_H}$ ;  $K_1$  и  $K_2$  – капитальные вложения по первому и второму вариантам, при этом полагаем  $K_1 > K_2$ ,  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  – эксплуатационные затраты по вариантам, при этом  $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$ .

Капитальные вложения определяются суммой затрат на оборудование, материалы, монтажные и строительные работы, связанные с электрификацией производства:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (1.4)$$

где  $n$  – число типов оборудования;  $K_j$  – капитальные затраты на один из типов оборудования.

$$K_i = m \cdot (Ц + M + H), \quad (1.5)$$

где  $m$  – количество однотипного оборудования;  $Ц$  – преysкурantная цена оборудования;  $M$  – затраты на установку и монтаж;  $H$  – накладные расходы.

Величины, входящие в выражение (1.5), приводятся в соответствующих ценниках. Эксплуатационные затраты в общем виде можно определять по выражению

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_л + A + T_p + \Gamma + П, \quad (1.6)$$

где  $\mathcal{Z}_л$  – зарплата обслуживающего персонала;  $A$  – отчисления на амортизацию;  $T_p$  – затраты на текущий ремонт;  $\Gamma$  – стоимость горюче-смазочных материалов и электроэнергии;  $П$  – прочие затраты.

При выборе наилучшего варианта электрификации объекта определяют основные показатели эффективности внедрения новых технических решений. К ним относятся суммарные капитальные вложения  $K$ , себестоимость продукции  $C$ , производительность труда  $П_{mp}$ , энергоемкость процессов  $q$ , годовой эконо-

мический эффект  $\Gamma$ , и другие показатели, характеризующие данное производство.

Себестоимость продукции определяют делением годовых эксплуатационных затрат  $\mathcal{E}$  на валовой продукт  $B$ .

$$C = \mathcal{E}/B. \quad (1.7)$$

Производительность труда:

$$P_{TP} = N/B, \quad (1.8)$$

где  $N$  – количество обслуживающего персонала.

$$N = \frac{T_3}{t \cdot \alpha}, \quad (1.9)$$

где  $T_3$  – суммарные годовые затраты труда на производство продукции по технологическим картам и эксплуатацию оборудования, ч;  $t$  – продолжительность рабочего дня, ч;  $\alpha$  – число рабочих дней в году.

Энергоемкость процесса или производства  $q$  определяется по формуле:

$$q = \frac{Q}{B}. \quad (1.10)$$

Годовой экономический эффект определяется разностью между приведенными затратами предлагаемого и существующего вариантов, умноженной на годовой валовой продукт:

$$\Gamma_{\mathcal{E}} = [(E_H K_1 + \mathcal{E}_1) - (E_H K_0 + \mathcal{E}_0)]B, \quad (1.11)$$

где индекс «1» соответствует предлагаемому варианту, а «0» – существующему. Срок окупаемости дополнительных вложений  $T$  определяется по выражению (1.3).

Для выбора оптимального решения необходимо провести технико-экономическое сравнение не менее трех вариантов, равнозначных по своим техническим возможностям.

### **1.12. Типовые проекты. Порядок согласования и утверждения проектов**

Одним из обязательных условий проектирования является требование по использованию типовых решений или проектов. Типовым называется проект, который многократно использовался при строительстве, выдержал экспертизу и утвержден в качестве типового.

Сущность проектирования на основе типовых решений (проектов) заключается в привязке данного проекта к конкретным условиям. В понятие «привязки» входят: архитектурно-строительные решения в соответствии с природно-климатическими условиями, увязка проекта с транспортными магистралями, с системой электроснабжения, водоснабжения, канализации, мерами по защите окружающей среды, гражданской обороне и т. п.



Использование типовых решений в значительной мере удешевляет стадию проектирования, сокращает сроки монтажа и наладки и повышает эффективность производства.

Проектные организации по просьбе руководителя на основании вариантной проработки предлагают оптимальный для данных условий вариант. Далее идут согласования со всеми организациями, чьи интересы затрагивает данное строительство, с местными органами самоуправления, финансирующими организациями и т. п.

Следует различать обязательные службы, согласование с которыми не зависит от рода проекта, и вспомогательные, согласование с которыми проводится только в том случае, если вновь строящийся объект как-то затрагивает их интересы.

К обязательным службам относятся пожарная инспекция, санэпидемстанция, инспекция водоохраны, районные органы, контролирующие использование земли.

### **1.13. Структура электротехнической части проекта**

Комплексное применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве связано с использованием многочисленных технических средств, выбор которых определяется перечнем электрифицируемых технологических процессов и уровнем их автоматизации.

Проектирование систем электрификации базируется на технико-экономическом сравнении различных вариантов. Проектировщикам приходится рассматривать возможность применения тех или иных технических средств при электрификации технологических процессов, не выделяя их в самостоятельные группы. Однако методически целесообразно представлять электротехническую часть проектов как совокупность самостоятельных разделов по обоснованию и выбору технических средств, объединенных общностью технологического назначения.

В соответствии с этим электротехническая часть проекта обычно представлена характерными разделами: электромеханизация (электропривод), электронагрев и электротехнологии, электроосвещение, аппаратура защиты, электроснабжение, автоматическое управление, включая автоматизированные системы управления производством (АСУТП), молниезащита и заземление. Число разделов может изменяться в зависимости от объекта проектирования.

Согласованный проект подлежит утверждению. При этом следует иметь в виду, что чем выше стоимость проекта, тем более высокая инстанция его утверждает. Проекты, выполненные на основе типовых, требуют утверждения в инстанции на порядок ниже, чем индивидуальные.

Индивидуальное проектирование может содержать элементы научного поиска и отработки технологических, энергетических или социально-организационных решений.

Общая схема развития комплексной электрификации может быть представлена следующим образом:

- 1) директивные указания – творческий поиск их реализации (проработка технико-экономического обоснования);
- 2) разработка проекта (утверждение и согласование его), строительство объекта (освоение объекта), достижение заданных показателей.

## **2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ХОЗЯЙСТВА-МАКЕТА**

### **2.1 Задачи и объем макетного проектирования. Основные показатели по хозяйству-макету для данного района**

Макетное проектирование электрификации типового для данного района хозяйства имеет целью определить или уточнить удельные характеристики для проведения расчетов ожидаемых планово-экономических показателей. Таким образом, в проекте хозяйства-макета должны быть подробно рассмотрены задачи по эффективному использованию электрической энергии для производственных целей, планированию вариантов энергопотребления различными объектами, выбору электрических схем управления и электроприводов установок, их автоматизации, проведению технико-экономических расчетов, конструированию и комплектованию отдельных нестандартных устройств [7].

Проект хозяйства-макета включает следующие расчеты:

1. определение, с учетом достижений научно-технического прогресса, комплексов электромеханических и электротехнических средств для объектов растениеводства, животноводства, подсобных предприятий, мастерских, коммунально-общественного хозяйства и индивидуального быта;
2. определение расчетной мощности нагрузки по группам объектов, а также по хозяйству в целом, выбор сечений проводов воздушных линий и внутренних проводок, выбор и размещение распределительных щитков на объектах и расположение источника электроснабжения – трансформаторной подстанции или электростанции;
3. составление суточных и сезонных графиков нагрузок.

При проектировании следует учитывать перспективу развития хозяйства на 7...10 лет и необходимость электрификации несельскохозяйственных объектов, находящихся на территории хозяйства.

В процессе расчетов определяют осветительные, бытовые, силовые и тепловые нагрузки по хозяйству; установленную, максимальную и расчетную мощность потребителей; мощность, число источников питания и их месторасположение; рассчитывают линии напряжением 380/220 В и т.д.

В заключение составляют спецификацию основного технологического и электротехнического оборудования с указанием его стоимости.

В процессе проектирования хозяйства-макета необходимо определить основные показатели электрификации.

*Общая установленная мощность  $P_y$  электрооборудования характеризует состояние электровооруженности хозяйства:*

$$P_y = P_c + P_o + P_{кб}, \quad (2.1)$$

где  $P_c$  – мощность силовых установок;  $P_o$  – мощность осветительных установок;  $P_{кб}$  – мощность коммунально-бытовых электроустановок

*Совмещенный максимум нагрузки* потребителей, подключенных к источнику электроснабжения, определяют по графику нагрузки или расчетному графику, составленному в процессе проектирования.

*Коэффициент спроса*  $K_c$  определяется отношением максимальной мощности  $P_{max}$  к общей установленной  $P_y$

$$K_c = \frac{P_{max}}{P_y}. \quad (2.2)$$

На показатель  $K_c$  оказывают влияние КПД установок, коэффициенты загрузки машин и каталожной неувязки электродвигателей, потери мощности на линиях, коэффициенты мощности отдельных токоприемников. Чем лучше техническое оснащение сельскохозяйственных объектов, совершеннее машины, тем выше коэффициент спроса.

Для групп коммунально-бытовых и производственных электроприемников мощностью до 3 кВт коэффициент спроса составляет 0,6. При суммарной мощности от 4 до 18 кВт значение  $K_c=0,5$ , от 11 до 20 кВт – 0,45; от 21 до 50 кВт – 0,4; от 51 до 100 кВт – 0,35; более 100 кВт – 0,3.

Коэффициент спроса для осветительной нагрузки небольших зданий производственного характера – 1,0; производственных зданий, состоящих из отдельных крупных пролетов – 0,95; административных зданий, столовых, библиотек – 0,9; производственных зданий, состоящих из нескольких отдельных помещений – 0,85; конторско-бытовых, лечебных, детских, учебных учреждений и лабораторных зданий – 0,8; складов, подстанций – 0,6.

*Суточное потребление электроэнергии*  $A_{cym}$  (кВт·ч) в зимний, летний, весенний и осенний периоды используют для подсчета примерного годового потребления электроэнергии.

Суточное потребление электроэнергии определяют по графику нагрузки (рис.2.1). Суточный расход энергии  $A_{cym}$  по отдельным процессам можно определить исходя из количества подлежащего переработке материала  $M$  и из удельного расхода электроэнергии на переработку единицы материала  $a$  (кВт·ч/т или кВт·ч/кг):

$$A_{cym} = M \cdot a. \quad (2.3)$$

По графикам нагрузки для всех сезонов можно определить характерное для данного района число часов использования установленной  $P_y$  или максимальной  $P_{max}$  мощности.

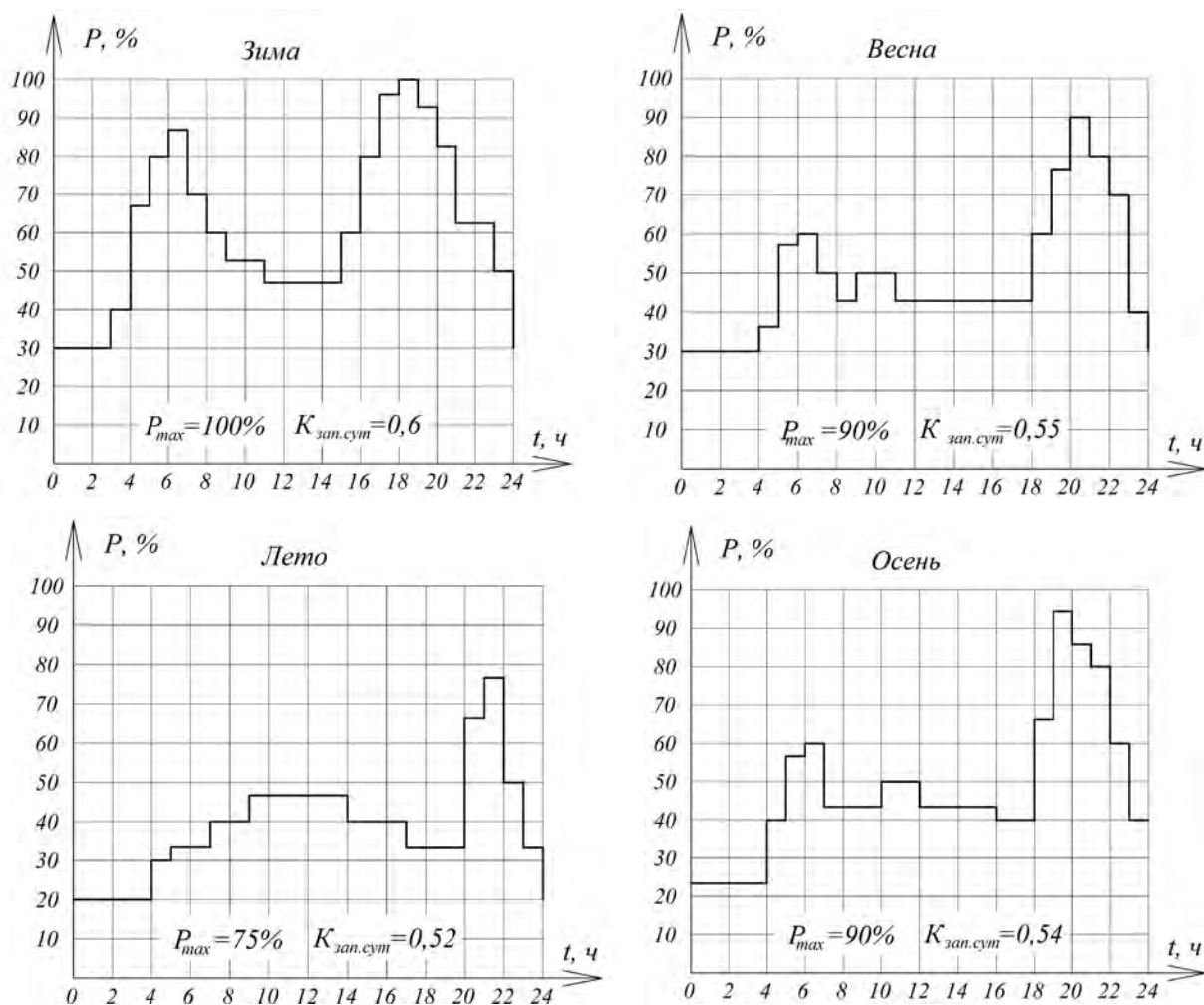


Рис.2.1 Суточные графики нагрузок сельской трансформаторной подстанции

Использование установленной мощности трансформатора  $S_{тр}$  на подстанции характеризуется коэффициентом заполнения графика  $K_{зап.сут}$ :

$$K_{зап.сут} = \frac{A_{сут}}{S_{тр} \cdot \cos \varphi_{тр} \cdot 24}. \quad (2.4)$$

Использование установленной мощности токоприемников характеризуется коэффициентом использования:

$$K_{исп} = \frac{A_{сут}}{P_y \cdot 24}. \quad (2.5)$$

Число часов использования установленной мощности:

$$T_y = \frac{A_{год}}{P_y}. \quad (2.6)$$

Число часов использования максимальной мощности в году определяют по формуле

$$T_{max} = \frac{A_{год}}{P_{max}}. \quad (2.7)$$

Удельный расход электроэнергии на единицу показателя:

$$a = \frac{A}{H}, \quad (2.8)$$

где  $H$  – число единиц показателя.

Удельный расход мощности на единицу показателя:

$$P_{y\partial} = \frac{P_{max}}{H}. \quad (2.9)$$

Электрообеспеченность – это мощность силовых трансформаторов, приходящаяся на 100 га пашни (кВ·А/100 га) при общей ее площади  $F$  (га);

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{S_y \cdot 100}{F}. \quad (2.10)$$

Электровооруженность труда определяется как отношение годового потребления электроэнергии к числу работающих:

$$\mathfrak{E}_\epsilon = \frac{A_{год}}{N}, \quad (2.11)$$

где  $N$  – среднее годовое число работающих.

Уровень электрификации – отношение электрических мощностей в хозяйстве к сумме всех мощностей, выраженный в процентах:

$$Y_\epsilon = \frac{P_y}{P_\Sigma} \cdot 100, \quad (2.12)$$

где  $P_\Sigma = P_\epsilon + P_m + P_t$  – сумма мощностей электроустановок, механических и тепловых двигателей.

## 2.2 Примерный объем исходных данных при проектировании электрификации хозяйства-макета

Исходные данные при проектировании электрификации представляются следующим образом [7].

1. Название хозяйства и его адрес.
2. Число дворов, домов и жителей.
3. Общая площадь и ее распределение под пашню, огороды, сады, лес, выгон, сенокос.

4. Сведения о культурах и технологии переработки и хранения, оформленные в виде табл.2.1.

Табл.2.1. – Сведения о культурах и технологии переработки и хранения

Наименование культуры	Площадь, га	Урожайность т/га	Валовой сбор, т	Технология переработки и хранения, принятая в хозяйстве

5. Сведения о числе животных и рационе зимнего и летнего дня, оформленные в виде табл.2.2.

Табл.2.2. – Сведения о числе животных и рационе зимнего и летнего дня

Вид животных	Число голов	Суточный рацион на голову на всех животных						Технология переработки, хранения
		зерно	жмых	корне-плоды	силос	сено	солома	

6. Сведения о производственных, общественных и других помещениях, их размерах, размещении на плане хозяйства.
7. План-карта хозяйства с нанесением всех объектов с указанием дорог и расстояний.
8. Стоимость дров, угля или другого топлива в данном хозяйстве, продолжительность отопительного сезона, средние зимние за отопительный сезон и средние минимальные температуры холодного месяца.

Перечень задач, подлежащих решению при проектировании данного хозяйства:

- выбрать машины и электропривод к ним;
- спроектировать осветительную установку;
- составить графики нагрузок по отдельным объектам и по группам объектов, а также по всему хозяйству в целом;
- определить место подстанции для имеющихся объектов;
- указать целесообразное размещение запланированных к строительству объектов (с точки зрения обеспечения показателей качества электроэнергии);
- выбрать мощность трансформаторной подстанции;
- выбрать аппаратуру управления и защиты к электродвигателям;
- показать, в каких процессах можно эффективно использовать электроэнергию;
- определить удельные показатели электрификации.

### 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА

#### 3.1 Определение осветительных нагрузок производственных и общественных зданий

Подсчет электрических осветительных нагрузок производственного помещения ведут методом удельных нормативов мощности для заданной площади. Количество светильников для помещения определяют с учетом рекомендуемой мощности источников света (табл.3.1). Установленную мощность осветительной установки определяют по формуле:

$$P_{\text{уст}} = S_{\text{уд}} \cdot F, \quad (3.1)$$

где  $S_{\text{уд}}$  – удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь помещения по наружному обмеру, м<sup>2</sup> [6-9].

Табл.3.1 – Нормы удельных нагрузок искусственного освещения

Наименование помещений	Удельная нагрузка освещения, Вт/м <sup>2</sup> (по наружному обмеру)	Средняя установленная мощность светоточек, Вт
Коровник с доением в доильном зале	4	75
Коровник с доением в стойлах	4,5	75
Доильное, молочное отделение	15,5	100
Родильное отделение	23	100
Телятник	3,75	75
Помещение для молодняка крупного рогатого скота	3,25	75
Пункт искусственного осеменения	25	100
Помещение для хряков-производителей, тяжелосупоросных и подсосных маток и поросят-отъемышей	4,5	75
Свинарник для холостых и легкосупоросных маток, молодняка	3,3	75
Помещение для откормочного поголовья	2,6	75
Помещение для кормления свиней	5,5	75
Овчарня для маток, баранов молодняка	3,5	60
Ягнятник с родильным отделением	8	100
Птичник при напольном содержании	4	75
Птичник при клеточном содержании	5	75
Конюшня	2,3	60
Мастерские, весовая	12	150
Склады, хранилища	3	200
Дом животновода	16	100

#### 3.2 Проектирование осветительной установки зданий

Осветительные установки создают необходимые условия освещения, которые обеспечивают зрительное восприятие (видение), дающее около 90 % ин-



формации, получаемой человеком от окружающего его мира. Искусственное освещение играет важную роль в нормальном развитии животных и птиц, влияет на урожайность растительных культур. Без искусственного освещения невозможны строительство и сельскохозяйственные работы в темное время суток, а также работа транспорта.

Эффективное использование электрической энергии при ее преобразовании в световую невозможно без знания законов светотехники, применения современных энергосберегающих источников света и осветительных приборов, позволяющих обеспечивать необходимые показатели осветительных установок.

### **3.2.1. Выбор источника света**

Из всего многообразия выпускаемых промышленностью источников света для освещения помещений наиболее приемлемы газоразрядные (люминесцентные) лампы или лампы накаливания. Высокая световая отдача, значительный срок службы, благоприятный спектральный состав излучения люминесцентных ламп позволяют проектировщикам уверенно отдавать им предпочтение, особенно при необходимости создания высоких уровней освещенности.

Наружное освещение следует выполнять при помощи газоразрядных ламп, например, ДРЛ. В ряде случаев для освещения помещений и наружного освещения целесообразно использовать LED (светодиодные) лампы или светильники, что существенно повышает показатели осветительной установки.

### **3.2.2. Выбор вида и системы освещения**

В электрических осветительных установках различают следующие виды освещения: рабочее, дежурное, аварийное, охранное, архитектурное, декоративное и т. д. В сельскохозяйственном производстве распространено в основном освещение первых четырех видов [6; 8; 9].

Рабочее освещение предназначено для создания во всех точках рабочих поверхностей нормальных условий видимости при выполнении некоторых работ. При этом освещенность во всех точках должна быть не ниже нормированной, а пульсация светового потока не должна превышать допустимого значения.

Дежурное освещение служит для создания определенных условий видимости при периодическом контроле состояния животных, птицы, работающего в автоматическом режиме оборудования, а также в проходах, коридорах, при входах в помещения и т. д. В соответствии с рекомендациями оно должно создавать 10...20 % нормированной рабочей освещенности, но не менее 0,5 лк в главных проходах и 2 лк в тамбурах и на входных площадках [8; 9].

Аварийное освещение применяют для обеспечения нормального режима работы при внезапном отключении рабочего освещения.

Эвакуационное аварийное освещение монтируют в производственных помещениях с числом одновременно работающих 50 и более человек, в общественных помещениях с числом одновременно находящихся свыше 100 человек, на лестничных клетках многоэтажных жилых домов.

В соответствии с правилами устройства электроустановок аварийное освещение должно выполняться лампами накаливания. Допускается использование люминесцентных ламп в помещениях с температурой выше 5 °С, если при этом напряжение в сети не менее 0,9 номинального.

Питание аварийного освещения осуществляется от автономного источника или от сети, которая не зависит от рабочего освещения. На светильниках должны быть нанесены специальные знаки или надписи.

В осветительных установках различают системы общего и комбинированного освещения. Система общего освещения может быть равномерной и локализованной. Использование в помещениях только системы местного освещения не допускается.

### **3.2.3. Выбор нормированной освещенности**

Нормированная освещенность – это наименьшая допустимая освещенность в "наихудших" точках рабочей поверхности. Значение этой освещенности устанавливают в зависимости от характера зрительной работы, размеров объекта различения, фона и контраста объекта с ним, вида и системы освещения, типа источника света. Все нормы освещенности приведены в отраслевых нормативах, справочной литературе [7-9], СНиП и инструктивных материалах.

### **3.2.4. Выбор коэффициента запаса и добавочной освещенности**

Снижение светового потока осветительной установки из-за загрязнения светильников и источников света (даже при регулярной чистке) и их старения при расчетах учитывают коэффициентом запаса, представляющим собой отношение светового потока нового светильника с новой лампой к световому потоку того же светильника в конце срока службы лампы. Коэффициент запаса выбирают в зависимости от характеристики помещения и типа источника света по отраслевым нормам освещения, специальной справочной литературе [7-9]. При расчете освещенности в любой точке учитывают световые потоки только ближайших светильников. Для учета действия удаленных светильников и отраженных потоков в расчетной формуле используют коэффициент добавочной освещенности [6; 8; 9].

### 3.2.5. Выбор типа светильников

От правильного подбора светильников зависят надежность работы осветительной установки, ее эффективность и экономичность. Поэтому необходимо учитывать условия окружающей среды (табл.3.1) [5]; светораспределение светильников, необходимое для проектируемой осветительной установки; экономическую целесообразность применения; эстетические требования к конструктивному исполнению светильников. Тип светильников также можно выбирать по справочной литературе [5-9] (Приложения П1-П5).

Табл.3.1 – Категории сельскохозяйственных помещений по условиям окружающей среды

Категория помещения	Характеристика окружающей среды	Примерный перечень помещений
1	2	3
Сухие	Относительная влажность – не более 60 %. Конденсация паров влаги практически невозможна	Инкубатории, котельные, отопливаемые склады негорючих материалов, электрощитовые, тепловые узлы, вентиляционные камеры, конторы, помещения для обслуживающего персонала ферм
Пыльные	По технологическим условиям производства выделяется пыль в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т.п.	Цеха по дроблению и приготовлению сухих концентрированных кормов, склады сыпучих негорючих материалов, пункты послеуборочной обработки зерна
Влажные	Относительная влажность – более 60 %, но не превышает 75 %. Пары или конденсирующая влага выделяются лишь временно и в небольших количествах	Неотопливаемые склады негорючих материалов, лестничные клетки, помещения для холодильного оборудования, помещения для ремонта оборудования
Сырые	Относительная влажность – более 75 %. Имеются пары влаги, способные конденсироваться при небольших понижениях температуры	Помещения для теплогенераторов, цеха по переработке продуктов животноводства, лаборатории для анализа молока, помещения для ветосмотра и санобработки коров, родильные отделения, ветпункты, помещения для содержания животных, вакуумнасосные
Особо сырые	Относительная влажность близка к 100 %. Потолок, стены, пол и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой	Кормоприготовительные цеха для влажных кормов, овоще- и фруктохранилища, парники, теплицы, моечные отделения, молочные блоки.
Особо сырые с химически активной средой	Относительная влажность близка к 100 %. постоянно или длительное время в помещении содержатся пары аммиака, сероводорода или других газов не взрывной концентрации или же образуются отложения, действующие разъедающе на изоляцию и токоведущие части электрооборудования	Помещения для содержания крупного рогатого скота, свиней, птицы и других животных при отсутствии в них установок по созданию микроклимата; склады минеральных удобрений, помещения для протравливания семян.
Пожароопасные класса П–I	Применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки 61 °С	Склады минеральных масел, установки по регенерации минеральных масел

1	2	3
Пожароопасные класса П–II	Выделяются горючие пыль и волокна, переходящее во взвешенное состояние. Возникающая при этом опасность ограничена пожаром (но не взрывом).	Деревообделочные цеха, малозапыленные помещения мельниц, элеваторов, зернохранилища
Пожароопасные класса П–IIа	Содержатся твердые или волокнистые горючие вещества, причем признаки, перечисленные для помещений П–II, отсутствуют	Производственные и складские помещения и зоны, содержащие твердые или волокнистые горючие вещества
Пожароопасные класса П–III	Применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 45 °С, а так же твердые вещества	Склады открытые или под навесом для минеральных масел, угля, торфа, дерева и др.
Взрывоопасные класса В–Iа	При номинальной эксплуатации взрывоопасные смеси горючих паров или газов с воздухом или другими окислителями не имеют места, а возможны только в результате аварий или неисправностей.	Хранилища легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, аккумуляторные
Взрывоопасные класса В–IIа	По условиям технологии могут образовываться взрывоопасные смеси горючих пыли или волокон с воздухом	Комбикормовые заводы, мельницы, склады сыпучих горючих материалов.

### 3.2.6. Размещение светильников в освещаемом пространстве

Светильники в плане обычно располагают по вершинам прямоугольников, квадратов или ромбов [5; 9]. В первом случае соотношение сторон прямоугольников не должно быть более 1,5. В последнем случае ромбы должны иметь острый угол 60° (это даст шахматное расположение светильников).

Необходимое расстояние между светильниками:

$$L = \lambda_{отн} h_p, \quad (3.2)$$

где  $\lambda_{отн}$  – относительное расстояние между светильниками;  $h_p$  – расчетная высота, м.

При этом  $L$  определяют из выражения:

$$\lambda_{отн.с} h_p \leq L \leq \lambda_{отн.э} h_p, \quad (3.3)$$

где  $\lambda_{отн.с}$  и  $\lambda_{отн.э}$  — относительные светотехническое и энергетическое наимыгоднейшие расстояния между светильниками (табл.3.2).

Расчетная высота осветительной установки (рис.3.1) определяется:

$$h_p = H - h_{св} - h_{p.n} \quad (3.4)$$

где  $h_0$  – высота помещения, м;  $h_{св}$  – высота свеса светового прибора (СП) [5; 9];  $h_{p.n}$  – высота рабочей поверхности, м.

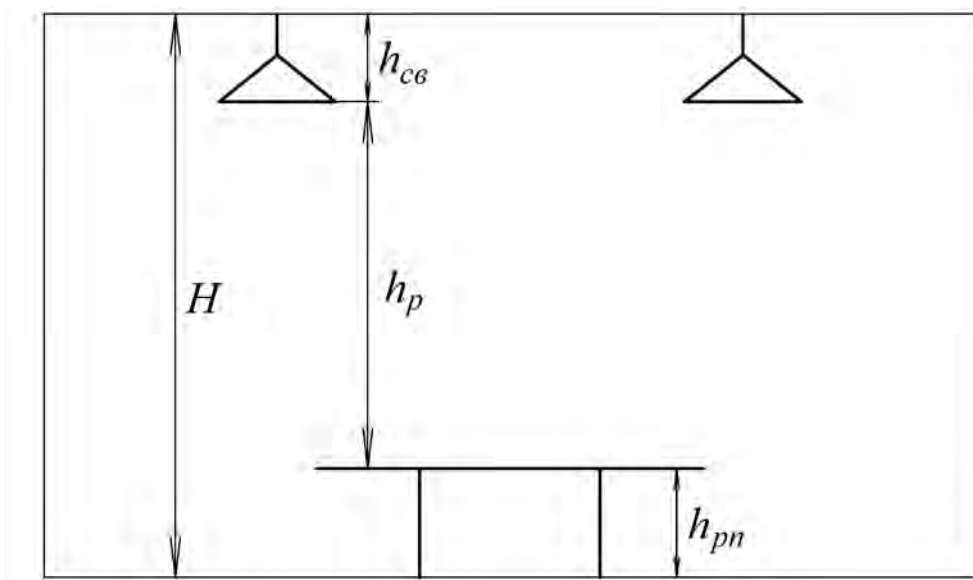


Рис.3.1. Определение расчетной высоты.

Табл.3.2. – Рекомендуемые относительные расстояния между светильниками

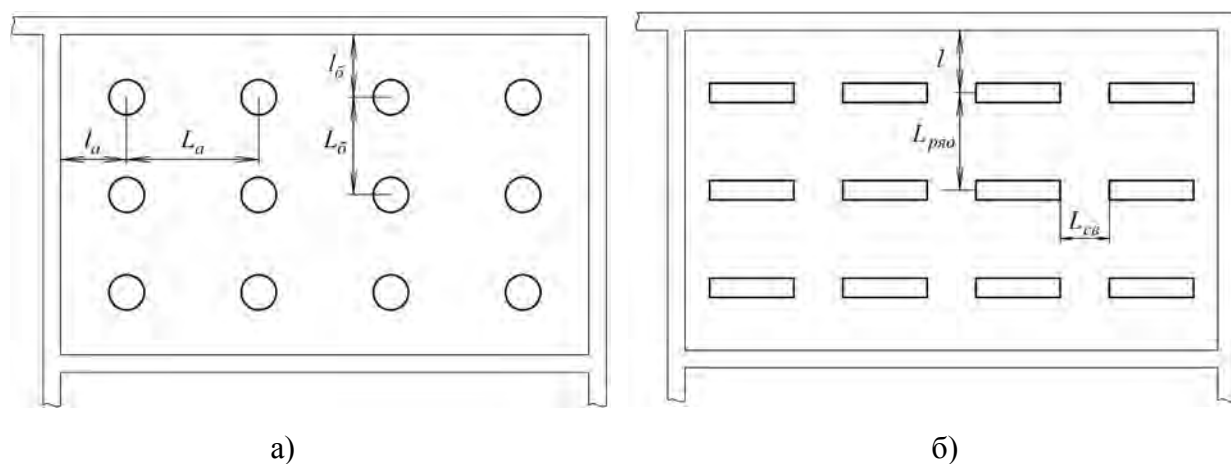
Рекомендуемые $\lambda_{отн.}$ светильников с типовыми КСС		
Типовая кривая силы света (КСС)	$\lambda_{отн.с}$	$\lambda_{отн.э}$
Концентрированная(К)	0,6	0,6
Глубокая (Г)	0,9	1,0
Косинусная(Д)	1,4	1,6
Полуширокая(Л)	1,6	1,8
Равномерная (М)	2,0	2,6

Ближе к стенам светильники устанавливают на расстоянии:

$$l=(0,3...0,5)L, \quad (3.5)$$

меньшее значение берут при наличии рабочих мест вблизи стен (рис.3.2).

Определив  $L$ , на плане помещения отмечают места установки светильников и определяют их общее число  $N$ .



а)

б)

Рис.3.2. План помещения с расположением светильников с компактными люминесцентными лампами (а), с трубчатыми люминесцентными лампами (б).

При люминесцентных лампах светильники располагают рядами параллельно стенам с окнами или длинной стороне помещения (рис.3.2,б). Длина разрыва  $l_{св}$  между лампами должна удовлетворять условию:

$$L_{св} \leq 0,5h_p \quad (3.6)$$

### 3.2.7. Расчет и выбор мощности источников света

Задача светотехнического расчета – определить потребную мощность источников света для обеспечения нормированной освещенности. В результате расчета находят световой поток источника света, устанавливаемого в светильнике. По этому потоку выбирают стандартную лампу. Отклонение светового потока выбранной лампы от расчетного значения допускается в пределах – 10...+20 % [1; 2; 4; 5]. Если расхождение больше, то необходимо изменить число светильников, их размещение, тип и выполнить перерасчет, чтобы это расхождение укладывалось в указанные допустимые пределы. Так проводят прямой расчет осветительной установки. При проектировании делают поверочный расчет, цель которого – определить фактическую освещенность в расчетных точках рабочих поверхностей по светильникам известных типов и световым потокам установленных в них ламп. Расчеты обоих видов выполняют на основе одних и тех же методов.

В инженерной практике применяют метод удельной мощности, метод коэффициента использования светового потока и точечный метод.

### 3.2.8. Метод удельной мощности

Метод удельной мощности является частным случаем метода коэффициента использования светового потока. Под удельной мощностью понимают отношение суммарной мощности источников света к площади освещаемой поверхности.

Мощность источника света, Вт,

$$P_{л} = \frac{P_{уд} S}{Nn}, \quad (3.7)$$

где  $P_{уд}$  – удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup> [6; 9] или по приложениям П6-П7, служит функцией переменных: нормированной освещенности, коэффициента использования светового потока, типа источника света, типа и размещения светильников, размеров помещения, коэффициентов отражения его поверхностей [6; 7];  $S$  – площадь помещения, м<sup>2</sup>;  $N$  – число светильников,  $n$  – число ламп в светильнике.

Его можно использовать при примерном предварительном определении числа источников света, преобразовав выражение:

$$N = \frac{P_{уд} S}{P_{л}} . \quad (3.8)$$

Подбирая стандартные мощности лампы  $P_{л}$  [6; 8; 9] или по приложениям (10-11), можно менять количество световых приборов в зависимости от геометрических размеров помещения и равномерности распределения светового потока. Данные по расчету методом удельной мощности заносятся в табл.3.3.

Табл.3.3 – Таблица данных по расчету методом удельной мощности

№ п/п	Наименование помещения	$P_{уд}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$P_{уст}$ , Вт	$P_{л}$ , Вт	Кол-во, шт.
1					
2					
...					

При необходимости применяют метод коэффициента использования светового потока с проверкой точечным методом.

### 3.2.9. Метод коэффициента использования светового потока

Этот метод применяют для расчета осветительных установок закрытых помещений, в которых нормирована горизонтальная освещенность.

Метод применим только для расчета общего равномерного освещения.

Световой поток, лм, источника света в светильнике определяется выражением

$$F = \frac{E_n S k_z z}{N n \eta} , \quad (3.9)$$

где  $E_n$  – нормированная освещенность, лк;  $S$  – площадь помещения, м<sup>2</sup>;  $z$  – коэффициент неравномерности освещенности,  $z=1,0...1,3$ ;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока (приложение 8), который учитывает долю светового потока источника света, доходящего до рабочей поверхности;  $N$  – число светильников,  $n$  – число ламп в светильнике.

Коэффициент  $\eta$  зависит от индекса помещения

$$i = \frac{A \cdot B}{h_p (A + B)} , \quad (3.10)$$

где  $A$  и  $B$  – длина и ширина помещения, м;  $h_p$  – расчетная высота, м, а также от коэффициентов отражения ограждающих конструкций (стен –  $\rho_{ст}$ , потолка –  $\rho_n$ , рабочей поверхности –  $\rho_{pn}$ ) и типа светильника. Численные значения  $\eta$  приведены в таблицах [4,5] и в зависимости от типа светильника составляют 10...73 %.

По найденному световому потоку из таблиц [6] определяют мощность источника света  $P_{л}$ , Вт.

### 3.2.10. Точечный метод расчета

Точечный метод применяют при расчете открытых пространств, местного освещения, горизонтальных и наклонных поверхностей, локализованного освещения, освещения помещений, в которых нормирована негоризонтальная освещенность, и как проверочный.

Световой поток, лм, источника света в каждом светильнике определяется по выражению:

$$F = \frac{1000 E_n k_a}{\mu \sum e_i}, \quad (3.11)$$

где  $1000$ —световой поток условного источника, лм;  $E_n$  — нормированная освещенность, лк;  $k_a$  — коэффициент запаса;  $\mu$  — коэффициент, учитывающий влияние удаленных светильников,  $\mu=1,0\dots1,2$ ;  $e_i$  — условная освещенность от  $i$ -го светильника в контрольной точке, лк, выбирается по кривым изолюкс ( $d-h$ ) [6; 8], в зависимости от типа светильника, высоты подвеса, расстояния от светильника до контрольной точки.

Условную освещенность  $e_i$ , можно рассчитать и по выражению:

$$e_i = I_{\alpha}^{1000} \cos \alpha / h_p^2, \quad (3.12)$$

где  $I_{\alpha}^{1000}$ —сила света от условного источника ( $F=1000$  лм) в направлении расчетной точки (выбирается по кривым силы света (КСС)) [8] или по приложению (9), кд;  $\alpha$  — угол между вертикалью из точки расположения светильника и линией, соединяющей источник света с расчетной точкой (рис.3.4).

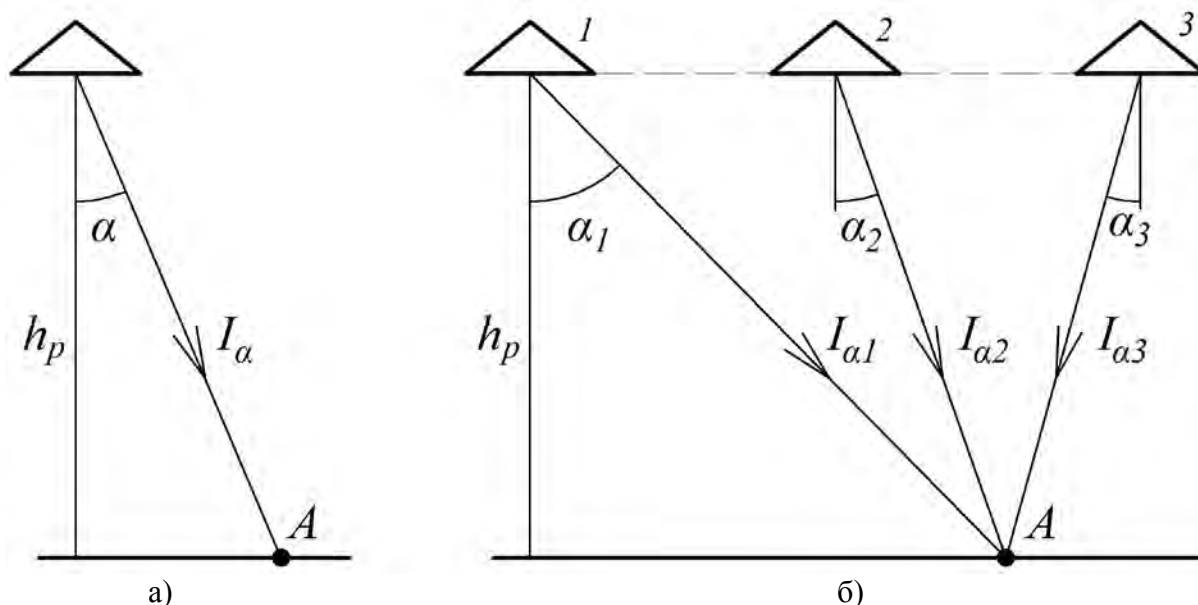


Рис.3.4. К расчету условной освещенности в точке. а) от одного СП, б) от нескольких СП

Приводится фрагмент помещения с указанием на нем контрольных точек  $A$  и  $B$ . (рис.3.5). Определяется расстояние от точек до светильников, и заносят данные в табл.3.4.



Табл.3.4 – Таблица данных при расчете точечным методом

Точка	Номера светильников	Расстояние $d$ , м	Условная освещенность $e_i$ , лк.	
			от одного светильника	от всех све- тильников $\Sigma e_i$
A				
B				

За расчетную точку принимают такую, в которой условная освещенность меньше. Подставляя данные в выражение (3.11), находят световой поток.

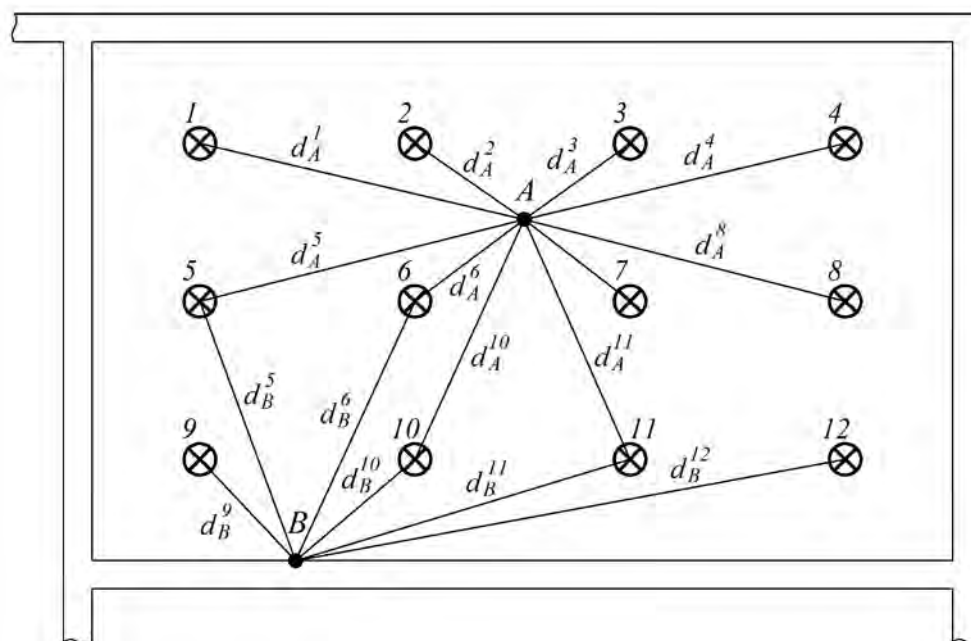


Рис.3.5. Фрагмент помещения с контрольными точками.

По найденному значению потока  $F$  по каталогам на источники света определяют мощность источника света  $P_{\text{л}}$ , Вт. При этом отклонение расчетного потока от указанного в каталоге должно быть в пределах  $-10$  до  $+20$  %. Если это условие не выполняется, то следует изменить количество светильников, расстояние между светильниками  $L$  и повторить вычисления.

### 3.2.11. Расчет осветительных установок с люминесцентными лампами

Для расчета таких установок применяют все три метода. Если длина лампы меньше половины расчетной высоты, то линейные источники принимают за точечные. Если же длина лампы или линии из ламп превышает половину расчетной высоты, то лампы рассматривают как светящиеся линии и осветительную установку рассчитывают по формуле определения светового потока для единицы длины светящейся линии

$$F_v' = 1000 E_{\min} k h_p / (\mu \sum_{i=1}^{i=n} e_i), \quad (3.13)$$

где  $\sum_{i=1}^{i=n} e_i$  – сумма условных относительных освещенностей определяемых по графикам линейных изолюкс [6; 8; 9].

Линейные изолюксы строят исходя из следующих условий: принимают, что 1 м длины люминесцентной лампы дает световой поток в 1000 лм; высота подвеса люминесцентной лампы над рабочей поверхностью равна 1 м; длину  $L$  светящей линии от люминесцентных ламп заменяют относительной длиной  $L' = L / h_p$ ; расстояние от расчетной точки до линии проекции ламп на рабочую поверхность заменяют относительным расстоянием  $p' = p / h_p$ ; расчетную точку намечают на линии, проходящей через конец проекции люминесцентной лампы на рабочую поверхность и перпендикулярной к этой проекции.

Когда точка находится напротив светящей части ламп, то линию разбивают на две части так, чтобы точка располагалась напротив концов обеих частей. Освещенность в точке определяют как сумму освещенностей от обеих частей линии. Когда точка находится за пределами светящей линии, то линию продолжают так, чтобы точка оказалась напротив ее конца. Условную освещенность в точке находят как разность освещенностей от линии с добавленным участком и от добавленного участка.

Если расстояние между светильниками в ряду меньше половины расчетной высоты, то ряд следует рассматривать как непрерывный, т. е. поток рассчитывают без учета разрывов. При больших разрывах освещенность в контрольной точке вычисляют как сумму всех непрерывных участков светильников.

Полный световой поток светящей линии, необходимый для создания в контрольной точке нормированной освещенности  $E_{\min}$  определяют как  $F_v = F_v' L$ , а число ламп в светящей линии

$$N = F_v / F_{vl}, \quad (3.14)$$

где  $F_{vl}$  – световой поток принятой лампы, лм.

Дробное число округляют до большего целого (приложения П7-П9).

### 3.2.12. Расчет наружного освещения

Наружное освещение обеспечивает необходимые условия видимости перед входами в здания, на дорогах, на площадках и охраняемых участках. Освещение входов в здания рассчитывают точечным методом по контрольной точке на углу входной площадки. Если размеры этой площадки не заданы, то их принимают равными 2×3 м. Минимальная освещенность на площадке должна быть не менее 0,5 лк [6].

Световой поток лампы для освещения дорог, строительных и других площадок и охраняемых территорий рассчитывают по формуле:

$$F_v = 1000 E_{\min} k h_p^2 / \left( \sum_{i=1}^{i=n} e_i \right), \quad (3.15)$$

где  $\sum_{i=1}^{i=n} e_i$  – сумма относительных условных освещенностей от ближайших светильников, лк.

Условные относительные освещенности при этом определяют по кривым, построенным для лампы с потоком 1000 лм и для высоты 1 м в функции отношения расстояния от проекции светильника до расчетной точки к расчетной высоте [6; 84 9], если светильник круглосимметричен. Для некруглосимметричных светильников относительную освещенность находят по условным изолюксам.

Рассчитанный по формуле (3.15) поток в общем случае не совпадает с потоком стандартной лампы. Поэтому при расчете вычисляют не поток лампы, а расстояние между светильниками. Задают стандартную для светильника выбранного типа мощность лампы и по формуле (3.15) определяют  $\sum_{i=1}^{i=n} e_i$ . По значению  $\sum_{i=1}^{i=n} e_i$  из кривых относительной освещенности находят расстояние между светильниками. При этом считают, что светильники установлены на типовых опорах высотой 6...10 м.

Наружное освещение прожекторами рассчитывают методом компоновки изолюкс в следующей последовательности.

Выбирают нормированную освещенность. Определяют предварительное приближенное значение мощности прожекторной установки по формуле:

$$P_{\text{л}} = P_{\text{уд}} A = m k E_{\min} A, \quad (3.16)$$

где  $P_{\text{уд}}$  – удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  $A$  – площадь освещаемого объекта, м<sup>2</sup>;  $m$  – коэффициент пропорциональности, который для прожекторов с газоразрядными лампами (ДРЛ, галогенными) 0,12...0,16;  $k$  – коэффициент запаса;  $E_{\min}$  – нормированная освещенность объекта, лк.

По справочным таблицам [6; 8; 9] находят тип прожекторов, их число. При этом суммарная мощность должна соответствовать рассчитанной приближенной мощности. Выбирают высоту  $h$  мачт, а также намечают их расположение относительно объекта. Для прожектора данного типа определяют оптимальный угол наклона  $\theta$  его оси к горизонтали. Рассчитывают и строят или берут из справочной литературы готовые кривые изолюкс для оптимального и нескольких смежных значений  $\theta$ .

План освещаемого объекта вычерчивают в том же масштабе, что и изолюксы. Вырезанные изолюксы накладывают на объект и komponуют их так, чтобы они не перекрывали одна другую и закрывали план объекта при наименьшем числе прожекторов. Подобранные расположение прожекторов фиксируют и окончательно определяют расстояние от мачты каждого прожектора до объекта, углы наклона прожекторов и высоту их установки.

Наивыгоднейший угол наклона оси к горизонту для некоторых прожекторов определяют по показателю

$$eh^2 = kEh^2 \quad (3.17)$$

При отсутствии готовых изолюкс их рассчитывают по справочным изолюксам [8; 9] для условной плоскости, перпендикулярной оси прожектора и удаленной от него на 1 м, в следующей последовательности.

На плане освещаемой территории через основание прожектора проводят оси  $x$  и  $y$ . Ось  $x$  при этом лежит в одной плоскости с осью прожектора. Задают значения  $x$ , кратные  $h/2$ , и находят отношение  $x/h$ . По значениям  $\theta$  и  $x/h$  определяют ординату  $\xi$  изолюксы на условной плоскости и вспомогательные значения  $\rho$  и  $\rho^3$ . Рассчитывают относительную освещенность на условной плоскости

$$e_m = E_{\min} h^2 \rho^3. \quad (3.18)$$

По графикам изолюкс [8; 9] для  $\xi$  и  $e_m$  определяют абсциссу  $\eta$  и рассчитывают ординату уже на освещаемой поверхности

$$y = \eta h \rho. \quad (3.19)$$

Это дает сразу координаты двух точек изолюксы ( $x$ ,  $+y$  и  $x$ ,  $-y$ ) на освещаемой поверхности. Результаты расчетов записывают в таблицу. По значениям  $x$  и  $y$  строят изолюксу. Нагрузки уличного освещения принимаются в соответствии с шириной проезжей части, качеством покрытия проезжей части и типом используемого источника света:

$$P_{yl} = P_{y\partial} L 10^{-3}, \quad (3.20)$$

где  $P_{yl}$  – установленная мощность уличного освещения, кВт,  $P_{y\partial}$  – удельный норматив на освещение 1 м длины улицы, Вт/м;  $L$  – длина улицы, м.

Значения удельной мощности для освещения улиц приведены табл.3.5.

Табл.3.5 – Нормы нагрузок уличного освещения

Характеристика улицы	Норма средней освещенности, лк:	Рекомендуемые светильники	Удельная мощность установки, Вт/м
1	2	3	4
Поселковые улицы с асфальтобетонными и переходными типами покрытий с шириной проезжей части 5...7 м 9...12м 5...7м 9...12м	4  4	СЗПР-250 РКУ-250 НСУ-200 ЗПО-500	4,5...6,5 6,0... 8,0 11,0 13,0
Поселковые дороги и улицы с покрытиями простейшего типа с шириной проезжей части 5...7м 9...12м	2	СПО-200 НСУ-200 НКУ-200	5,5 7,0
Улицы и дороги местного значения и переходные с шириной проезжей части 5...7м 9...12 м	1	СПО-200 НКУ-200	3,0 4,5

Примечания:

1. При использовании газоразрядных светильников типа СЗПР, РКУ и др. меньшая норма берется при высоте подвеса светильников 8,5 м, большая – при 10 м и выше.
2. Установленная мощность осветительных установок с газоразрядными источниками света рассчитана с учетом потерь в пускорегулирующей аппаратуре (ПРА).
3. Покрытия переходного типа – грунт-асфальтовые, грунтощебеночные, грунтогравийные, щебеночные, гравийные и шлаковые, обработанные вяжущими материалами; мостовые из булыжного и колотого камня.

Табл.3.6 – Расчет осветительной нагрузки на вводах в помещения

№ пп	Наименование помещения	Количество помещений	Общая площадь, м <sup>2</sup>	Удельная мощность, $P_{уд}$	Установленная нагрузка на вводе, кВт	Рекомендуемая мощность источника, Вт	Число светоточек	Коэффициент одновременности, $K_o$	Коэффициент участия в дневном (вечернем) максимуме		Максимальная нагрузка на ввод		Число часов использования максимальной мощности	Годовое потребление электроэнергии
									$K_d$	$K_e$	$P_d$	$P_e$		
1														
2														
...														

ИТОГО:

Уличное освещение ...  
 Главные улицы ...  
 Второстепенные улицы ...  
 Итого по объекту ...

Табл.3.7 – Выбор марки провода, способа прокладки, типа светильников

№ п.п.	Наименование помещения	Категория помещения	Марка провода	Способ прокладки	Тип осветительной арматуры
1.					
2.					
3.					
...					

Все исходные данные и результаты расчетов сводят в светотехническую ведомость (табл.3.8).

Табл.3.8 – Светотехническая ведомость

№ п/п	Характеристика помещения						Вид освещения	Система освещения	$E_n$ , лк	$k$	Светильник		Лампа		Розетка, шт.	$P_{уд}, \text{Вт/м}^2$	$P_{уст}, \text{кВт.}$	
	Наименование помещения	$S, \text{м}^2$	$H, \text{м}$	Класс по среде	Коэфф-т отражения, %						Тип	Число	Тип	Мощность, Вт				
					$\rho_c$ ,	$\rho_n$ ,												$\rho_{pn}$ ,
1																		
2																		

### 3.2.13. Выбор напряжения источников питания

Источниками питания осветительных установок сельскохозяйственных объектов чаще всего служат трансформаторные подстанции, подключаемые к энергосистемам, а в отдельных случаях местные электрические станции, питающие осветительные силовые нагрузки.

Напряжение источников, применяемых в сельскохозяйственных установках составляет, как правило, 380/220В при заземленных нейтралях сетей. Такие значения допустимы в любых помещениях для установок общего освещения при высоте подвеса светильников более 2,5 м, при меньшей высоте – только в помещениях без повышенной опасности поражения электрическим током. В помещениях с повышенной опасностью осветительную сеть прокладывают в металлических трубах, а светильники снабжают защитными сетками [8].

Для питания установок местного освещения в помещениях без повышенной опасности применяют напряжение до 220 В, с повышенной опасностью – до 42 В от специальных понижающих трансформаторов [8].

### **3.2.14. Выбор мест ввода и установки щитков**

Осветительные щитки следует располагать вблизи основного рабочего входа в здание; по возможности в центре питаемых нагрузок; в местах, удобных для обслуживания и с благоприятными условиями среды, недоступных для случайных повреждений (чтобы были видны хотя бы частично управляемые светильники); с учетом ввода от воздушных линий.

Питание рабочего освещения проектируют от отдельного ввода. Однако допускается питание осветительных щитков от общего с силовой нагрузкой ввода при условии, что питающая линия обеспечит на вводе отклонения напряжения от номинального, не выходящие за допустимые пределы  $\pm 5$  и  $-2,5$  % [1; 6-9].

### **3.2.15. Компоновка осветительной сети**

После размещения осветительных щитков все светильники делят на группы. При этом всю нагрузку вначале делят равномерно на три части (по числу фаз питающей сети), а затем нагрузку каждой фазы делят на группы с учетом рекомендаций [7]:

- каждая групповая линия должна иметь на фазе не более 20 светильников с лампами накаливания, ДРЛ, ДРИ, натриевыми и не более 50 светильников с люминесцентными лампами;
- групповые линии целесообразно выполнять однофазными в жилых, административных и бытовых помещениях небольшой площади или освещаемых лампами накаливания мощностью до 100 Вт, а также в помещениях с малым числом светильников с люминесцентными лампами;
- каждая групповая линия с лампами накаливания, люминесцентными лампами и штепсельными розетками должна быть защищена автоматом или предохранителем на ток не более 25 А;
- светильники дежурного и аварийного освещения объединяют в отдельные самостоятельные группы: аварийная группа либо от отдельного источника питания, либо непосредственно от ввода в здание; дежурная группа от системы общего освещения;
- штепсельные розетки в жилых помещениях устанавливают по одной на каждые  $6 \text{ м}^2$  жилой площади и на  $10 \text{ м}^2$  площади коридоров, а также до трех розеток на кухню. Мощность розетки принимают по мощности подключаемого токоприемника, или полагают равной 500 Вт.

На плане объекта наряду со светильниками изображают групповые и питающие щитки, выключатели, штепсельные розетки. После этого токоприемники, выделенные в группы, соединяют групповыми линиями и для каждой группы составляют расчетную схему. В схеме указывают длины участ-

ков от щитка до разветвлений и между токоприемниками, а также мощности токоприемников. Все схемы должны быть приведены в расчетно-пояснительной записке.

Марку проводов осветительной сети и способ их прокладки определяют в соответствии с условиями окружающей среды [5-8] или по приложению 12.

### 3.2.16. Расчет сечения проводов осветительной сети

Расчет и выбор сечения проводов осветительной сети обеспечивают:

- отклонение напряжения у источников света в допустимых пределах;
- нагрев проводов не выше допустимой температуры;
- достаточную механическую прочность проводов.

Сечение проводов обычно рассчитывают по длительно допустимому току, а затем проверяют по допустимой потере напряжения:

$$I_p \leq I_\partial;$$

$$\Delta U_p \leq \Delta U_\partial.$$

Расчетный ток группы определяется выражением:

$$I_p = \frac{P_{\Sigma p}}{U \cos \varphi}, \quad (3.21)$$

где,  $P_{\Sigma p}$  – мощность группы, Вт;  $U$  – напряжение сети, В;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности, для ламп накаливания  $\cos \varphi = 1$ . При расчете групп с газоразрядными лампами, кроме мощности ламп, учитывают потери в ПРА, принимаемые в размере 10 % от мощности ламп типа ДРЛ, 25 % от мощности люминесцентных ламп в стартерных схемах и 35 % для тех же ламп в бесстартерных схемах.

По расчетному току из приложений П10-П12 подбирают допустимое сечение проводов осветительной сети  $S$ , мм<sup>2</sup>.

Проверку выполняют по допустимой потере напряжения  $\Delta U$ , %:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^{i=n} M_i / (Cs) = \sum_{i=1}^{i=n} P_i L_i / (Cs), \quad (3.22)$$

где  $\sum_{i=1}^{i=n} M_i$  – сумма электрических моментов нагрузки, кВт·м (рис.6.6);  $C$  – коэффициент сети, зависящий от ее напряжения и материала жил (определяют по справочным таблицам [5] или по приложению П13).

Для внутренних осветительных сетей при номинальном напряжении на вводе допустимая потеря равна 2,5 %, кроме жилых зданий, для которых это значение, как и для наружного и аварийного освещения, равно 5 % [6; 8; 9]. Если полученное значение  $\Delta U_p > \Delta U_\partial$ , то сечение провода увеличиваем или



уменьшаем сумму электрических моментов нагрузки, разбивая группу на части.

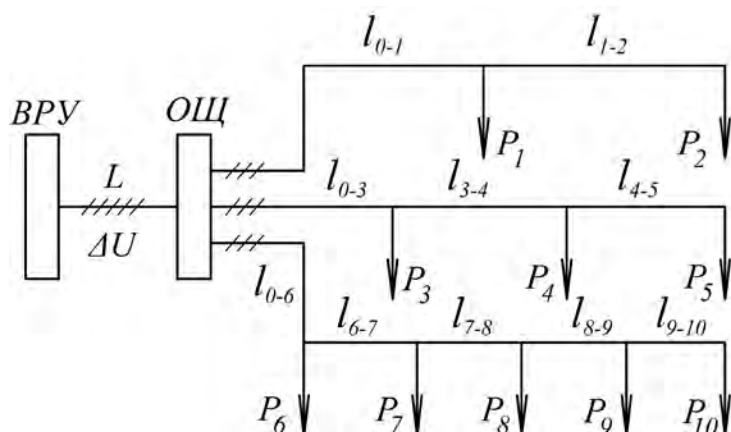


Рис.3.6. Расчетная схема для определения электрических моментов нагрузки

Расчёт сечения вводного кабеля производится аналогично.

Значение тока определяется выражением:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3}U_l \cos \varphi}, \quad (3.23)$$

где  $I_p$  – расчётный ток, А;  $P_p$  – расчётная мощность, Вт;  $U_l$  – линейное напряжение, В.

Мощность  $P_p$  находим выражением:

$$P_p = k_c P_{уст}, \quad (3.24)$$

где  $k_c$  – коэффициент спроса, выбирается из литературы [5,6], равняется (0,6–1),  $P_{уст}$  – установленная мощность, Вт, находится как сумма мощностей всех групп.

### 3.2.17. Выбор щитков, коммутационной и защитной аппаратуры

Осветительные щитки выбирают из справочных таблиц [6; 7], по условиям окружающей среды, в которых им предстоит работать; конструктивному исполнению в зависимости от схемы сети и числа отходящих групп; аппаратуре управления и защиты, установленной в щитке.

Для сельскохозяйственных объектов обычно применяют щитки типов ОЩ, ОЩВ, УОЩВ, ОП, ЯОУ и др. Все осветительные установки должны быть защищены от коротких замыканий и перегрузок плавкими предохранителями или автоматами с тепловыми или комбинированными нерегулируемыми расцепителями.

Токи уставок автоматов или плавких вставок предохранителей рассчитывают по соотношению

$$I_3 \geq k_3 I_p, \quad (3.25)$$

где  $I_z$  – ток аппарата защиты, А;  $I_p$  – расчетный ток защищаемой группы, А;  $k_z$  – отношение номинального тока плавкой вставки или уставки теплового расцепителя автомата к рабочему току линии.

Защитные аппараты и коммутационная аппаратура в основном входят в комплект щитков. Если же они некомплектные, то аппаратуру защиты выбирают по приложениям П15-П16 или по справочным каталогам.

При расчете групповых линий, кроме мощности ламп, учитывают потери в ПРА: 10 % от мощности ламп типа ДРЛ, 20-25 % от мощности люминесцентных ламп в стартерных схемах и 30-35 % для тех же ламп в бесстартерных схемах.

### 3.2.18. Мероприятия по технике безопасности

Для проектируемой осветительной установки должны быть приведены рекомендации по защите эксплуатирующего и обслуживающего данную установку персонала от поражения электрическим током при замене ламп и очистке арматуры, периодических осмотрах, контрольных измерениях освещенности, измерениях изоляции, текущих ремонтах, ревизиях и т.д.

При определении класса помещения в зависимости от наличия признака опасности в нем руководствоваться указаниями, приведенными в табл.3.9.

Табл.3.9 – Классификация помещений по степени опасности поражения электрическим током

Класс	Характеристика
С повышенной опасностью	Наличие в помещениях одного из условий, создающих повышенную опасность: сырости; токопроводящей пыли; токопроводящих полов (металлических, земляных, железобетонных, кирпичных и т.д.); высокой температуры; возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам, с одной стороны, и металлическим корпусам электрооборудования – с другой
Особо опасные	Наличие одного из условий, создающих особую опасность: особой сырости; химически активной среды; одновременно двух или более условий повышенной опасности
Без повышенной опасности	Отсутствие условий, создающих повышенную или особую опасность

В табл.3.10 приведены характеристики степеней защиты персонала и электрооборудования. Все результаты по электротехнической части должны быть сведены в расчетную схему – таблицу электрической сети, которую размещают на чертеже (пример, приложение П17).

Табл.3.10 – Характеристика степеней защиты персонала и электрооборудования

Условное обозначение	Степень защиты	
	персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями оборудования от попадания внутрь оболочки посторонних твердых тел	оборудования от проникновения воды внутрь оболочки
0	Защита отсутствует	Защита отсутствует
1	Защита от случайного прикосновения большого участка поверхности тела человека с токоведущими или движущимися частями внутри оболочки. Защита оборудования от попадания посторонних крупных твердых тел диаметром не менее 52,5 мм.	Защита от капель сконденсировавшейся воды. Капли сконденсировавшейся воды, вертикально падающие на оболочку не должны оказывать воздействия на оборудование, помещенное в оболочку.
2	Защита от возможности соприкосновения пальцев персонала с токоведущими или движущимися внутри оболочки частями. Защита оборудования от попадания посторонних крупных твердых тел диаметром не менее 12,5 мм.	Защита от капель воды. Капли воды, падающие на оболочку, наклоненную под углом не более 15° к вертикали, не должны оказывать воздействия на оборудование, помещенное в оболочку.
3	Защита от соприкосновения инструмента или других подобных предметов, толщина которых превышает 2,5 мм, с токоведущими или движущимися частями. Защита оборудования от попадания посторонних крупных твердых тел диаметром не менее 2,5 мм.	Защита от дождя. Дождь, падающий на оболочку, наклоненную под углом не более 60° к вертикали, не должны оказывать воздействия на оборудование, помещенное в оболочку.
4	Защита от соприкосновения инструмента, проволоки или других подобных предметов, толщина которых превышает 1 мм, с токоведущими или движущимися внутри оболочки частями. Защита оборудования от попадания посторонних крупных твердых тел диаметром не менее 1 мм.	Защита от брызг. Брызги воды любого направления, попадающие на оболочку, не должны воздействовать на оборудование, помещенное в оболочку.
5	Полная защита персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри оболочки. Защита оборудования от вредных отложений пыли.	Защита от водяных струй. Вода, выбрасываемая через наконечник на оболочку в любом направлении при условиях, указанных в стандартах или ТУ на отдельные виды электрооборудования, не должна оказывать воздействия на оборудование, помещенное в оболочку.
6	Полная защита персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри оболочки. Полная защита оборудования от попадания пыли.	Защита от воздействий, характерных для палубы корабля. При захлестывании морской волной вода не должна попадать в оболочку при условиях, указанных в стандартах или ТУ на отдельные виды электрооборудования.

Условное обозначение	Степень защиты	
	персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями оборудования от попадания внутрь оболочки посторонних твердых тел	оборудования от проникновения воды внутрь оболочки
7	То же	Защита от погружения в воду. Вода не должна проникать в оболочку при давлении в течение времени, указанного в стандарте или ТУ на отдельные виды электрооборудования
8	То же	Защита при неограниченно длительном погружении в воду при давлении, указанном в стандарте или ТУ на отдельные виды электрооборудования

### 3.3 Выбор электропривода машин для переработки и приготовления корма

Вначале производят выбор кормоперерабатывающих и кормоприготовительных машин в соответствии с потребной производительностью. Качество корма, в значительной мере зависит от технологии переработки и приготовления и является основным фактором, определяющим продуктивность животных и птицы.

Исходными данными для расчета и выбора кормоприготовительных машин являются: количество животных, способ их содержания и раздачи кормов, рацион и время кормления.

Выбор кормоприготовительных машин и электропривода к ним производят в следующем порядке.

Определяют суточное потребление каждого вида корма всеми животными

$$Q_{\text{сут}} = \sum q_i \cdot N_i, \quad (3.25)$$

где  $q_i$  – суточная норма корма на одно животное данного вида;  $N_i$  – число животных.

По принятой технологии обработки кормов составляют таблицу, в которой указывают виды животных, типы перерабатываемых кормов, суточное потребление кормов каждого типа всеми животными данного вида в соответствии с кормовым рационом.

В соответствии с распорядком дня работы фермы определяют продолжительность работы кормоприготовительных машин за сутки.

По суточному потреблению корма  $Q_{\text{сут}}$  и по продолжительности работы машины  $t$  для каждого способа переработки определяют количество кормов, перерабатываемых за час, и фактическое время работы машины за сутки:

а) для машин, перерабатывающих нескоропортящиеся корма

$$Q_{\text{час}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{t}. \quad (3.26)$$

По расчетной производительности выбирают соответствующую машину с учетом условия:

$$Q_{\text{кат}} > Q_{\text{час}},$$

и по каталожной производительности определяют фактическое время работы:

$$t_{\text{фак}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{Q_{\text{кат}}}. \quad (3.27)$$

б) для машин, перерабатывающих скоропортящиеся корма:

$$Q_{\text{час}} = \frac{Q_{\text{max раз}}}{Q_{\text{кат}}}, \quad (3.28)$$

где  $Q_{\text{max раз}}$  – максимальная разовая дача корма.

$$Q_{\text{max раз}} = \frac{K_{\text{д}} \cdot Q_{\text{сут}}}{100},$$

где  $K_{\text{д}}$  – процентное количество корма, выдаваемое за один раз;  $t_{\text{дон}}$  – допустимое время переработки максимальной разовой дачи корма (принимается 1,5...2,0 ч).

После этого также выбирают соответствующую машину с каталожной производительностью  $Q_{\text{кат}}$  и определяют фактическое время ее работы  $t_{\text{фак}}$ .

Определяют потребную мощность электродвигателя, кВт, выбранной по каталогу машины для данного вида перерабатываемого корма:

$$P_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{м}}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (3.29)$$

где  $P_{\text{м}}$  – потребная мощность рабочей машины, кВт;  $\eta_{\text{пер}}$  – КПД передачи.

По потребной мощности, характеру работы машины и условиям окружающей среды из [3-5] выбирают электродвигатель соответствующей марки с учетом условия:

$$P_{\text{уст}} \geq P_{\text{пот}}. \quad (3.30)$$

По установленной мощности двигателя  $P_{\text{уст}}$  и его КПД  $\eta_{\text{дв}}$  определяют присоединенную к сети мощность, кВт:

$$P_{\text{прис}} = \frac{P_{\text{уст}}}{\eta_{\text{дв}}}. \quad (3.31)$$

По присоединенной мощности электродвигателя находят его максимальную мощность, кВт:

$$P_{\text{max}} = K_{\text{к}} \cdot K_{\text{з}} \cdot P_{\text{прис}}, \quad (3.32)$$

или мощность для группы двигателей, если агрегат приводится в работу несколькими электродвигателями:

$$P_{\max} = K_o K_z \sum_1^n P_{уст}, \quad (3.33)$$

где  $K_k$  – коэффициент каталожной неувязки,  $K_k = P_{ном}/P_{уср}$ ,  $K_z$  – коэффициент загрузки (табл.3.11),  $K_z = P_{фак}/P_{уст}$ ,  $P_{фак}$  – фактическая мощность электродвигателя;  $K_o$  – коэффициент одновременности.

Табл.3.11 – Коэффициент загрузки электроприемников

№ п.п.	Наименование электроприемника	$K_z$
1.	Измельчитель зерновых	0,8
2.	Измельчитель корнеплодов, сочных и грубых кормов	0,6...0,5
4.	Транспортеры: скребковые	0,7
	шнековые	0,4
5.	Смесители кормов	0,6
6.	Кормораздатчики	0,5
7.	Доильные установки, вентиляторы	0,6...0,8
8.	Навозоуборочные транспортеры	0,5
9.	Насосы, компрессоры	0,7
10	Нагревательные и осветительные установки	1,0

Определяют годовое потребление электрической энергии для той или иной операции по переработке или обработке корма:

$$A_{год} = Q_{год} \cdot A_{уд} \text{ или } A_{год} = P_{\max} \cdot T_{\phi}, \quad (3.34)$$

где  $Q_{год}$  – годовая потребность в том или ином виде корма, т;  $A_{уд}$  – удельные затраты электроэнергии на переработку единицы корма, кВт·ч/т;  $T_{\phi}$  – фактическое время работы машины в течение года, ч.

$$T_{\phi} = \frac{Q_{год}}{q_{кат}}. \quad (3.35)$$

В случае, если  $A_{уд}$  неизвестно, то его можно определить через  $P_{\max}$  и  $q_{кат}$ , кВт·ч/т(м):

$$A_{уд} = \frac{P_{\max}}{q_{кат}} \quad (3.36)$$

### 3.4. Расчет и выбор электрооборудования для водоснабжения

Вода необходима для производственно-технических нужд любого сельскохозяйственного объекта. Электромеханизация и автоматизация позволяют сократить затраты труда на доставку воды из различных источников, улучшают ее качество, дают возможность повысить продуктивность животных и птицы на фермах. Вода нужна для тушения пожаров и других нужд.

### 3.4.1. Определение расчетных расходов воды

Нормы расхода воды для скота, птицы, на производственные нужды для машиноремонтной мастерской, гаража, на тушение пожаров и пр. устанавливаются в соответствии с [5; 7]. В табл.3.12. приводятся нормы водопотребления для различных видов сельскохозяйственных животных и птицы в условиях их содержания на фермах. Расход воды на производственные нужды промышленных и сельскохозяйственных предприятий должен определяться на основании технологических данных.

Табл.3.12 – Нормы расхода воды на фермах и промышленных комплексах

№п.п.	Наименование потребителей	Нормы расхода воды на одну голову, л/сут.
1	2	3
1.	Коровы:	
	молочные	100
	мясные	70
2.	Быки и нетели	60
3.	Молодняк крупного рогатого скота в возрасте до 2 лет	30
4.	Телята в возрасте до 6 мес.	20
1	2	3
5.	Лошади рабочие, верховые, рысистые и некармливающие матки	60
6.	Лошади племенные и кормящие матки	80
7.	Жеребцы-производители	70
8.	Жеребята в возрасте до 1,5 лет	45
9.	Овцы взрослые	10
10.	Молодняк овец	6
11.	Хряки-производители, свиноматки супоросные холостые	25
12.	Свиноматки с поросятами	60
13.	Поросята-отъемыши	5
14.	Ремонтный молодняк, свиньи на откорме	15
15.	Куры, индейки, утки, гуси	1...2
16.	В ветеринарной лечебнице на одно крупное животное	100
17.	В ветеринарной лечебнице на одно мелкое животное	50

Примечания: для молодняка птицы нормы следует уменьшать вдвое; в жарких и сухих районах указанные нормы допускается увеличивать на 25 %; в нормы включен расход воды на мойку помещений, клеток, молочной посуды, приготовление кормов, охлаждение молока и пр.; на удаление навоза принимается дополнительный расход воды в размере от 4 до 10 л на голову в зависимости от способа его удаления; коэффициент часовой неравномерности водопотребления для животных, зверей и птиц следует принимать равным 2,5.

Табл.3.13 – Нормы расхода воды для некоторых подсобных производств

№ п.п.	Наименование потребителя	Расход воды, м <sup>3</sup> /сут.
1.	Машиноремонтные мастерские, гараж и т.п.	80...150
2.	Грунтовые зимние теплицы, на 1 м <sup>2</sup>	0,015
3.	Весенние парники всех видов, на 1 м <sup>2</sup>	0,006

Нормы расхода воды на технические нужды машиноремонтных мастерских, гаражах, на полив посадок в грунтовых зимних теплицах, в парниках всех видов и пр. приведены в табл.3.13.

Расчетный расход воды на тушение одного пожара сельскохозяйственного производственного здания или сооружения должен приниматься от 5,0 до 10 л/с. При этом нужно учитывать, что за расчетное количество одновременных пожаров принимается число пожаров в зависимости от площади производственного комплекса: до 150 га – 1, свыше 150 га – 2 пожара.

### 3.4.2 Методика расчета водонасосной установки

Среднесуточное потребление воды, л/сут, по объекту проектирования в целом определяют следующим образом:

$$Q_{\text{сут}} = q_1 N_1 + q_2 N_2 + \dots + q_n N_n, \quad (3.37)$$

где  $q_1, q_2, \dots, q_n$  – нормы водопотребления на одного  $n$ -го потребителя, л/сут;  $N_1, N_2, \dots, N_n$  – число единиц данного потребителя.

Максимальный часовой расход воды рассчитывают с учетом коэффициента суточной  $k_{\text{сут}}$  и часовой неравномерности  $k_{\text{ч}}$  водопотребления:

$$Q_{\text{max.ч}} = \frac{k_{\text{сут}} (k_{\text{ч}1} \cdot q_1 \cdot N_1 + k_{\text{ч}2} \cdot q_2 \cdot N_2 + \dots + k_{\text{ч}n} \cdot q_n N_n)}{24}. \quad (3.38)$$

Значения коэффициента суточной неравномерности  $k_{\text{сут}}$  принимают равным 1,1...1,3, а значения коэффициента часовой неравномерности  $k_{\text{ч}}$  из табл.3.14.

Табл.3.14 – Коэффициент часовой неравномерности водопотребления

№ п.п.	Потребители:	Коэффициент $k_{\text{ч}}$
1.	Коровы	2,5
2.	Молодняк	2,5
3.	Свиньи на откорме	2,5
4.	Рабочие лошади	2,5
5.	Куры мясные	2,0
6.	Пункт первичной переработки молока на 2000 л	2,0
7.	Механическая мастерская	2.0

На основании максимального часового расхода воды определяют расход воды за секунду:

$$Q_c = \frac{Q_{\text{max.ч}}}{3600} + Q_n, \quad (3.39)$$

где  $Q_n$  – дополнительный противопожарный расход, принимаемый в зависимости от размеров объекта ( $Q_n = (2,5 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Полный расчетный напор находят из следующего выражения:

$$H = H_z + h_{\text{л}} + h_{\text{м}} + h_{\text{с}},$$



где  $H_c$  – геодезическая высота всасывания, т.е. расстояние по вертикали от уровня воды до оси рабочего колеса насоса, м;  $h_l$  – линейные потери напора на преодоление трения, м;  $h_m$  – линейные потери напора в местных сопротивлениях, м;  $h_c$  – свободный напор, м.

Минимальный свободный напор в сети водопровода населенного пункта при хозяйственно-питьевом водопотреблении на вводе в здание над поверхностью земли должен приниматься при одноэтажной застройке не менее 10 м, при большей этажности на каждый этаж следует добавлять 4 м. Свободный же напор в сети у водоразборных колонок должен быть не менее 10 м.

Линейные потери напора на преодоление трения:

$$h_l = \frac{L \cdot v^2}{2d_m} \alpha, \quad (3.40)$$

где  $L$  – длина трубы, м;  $v$  – скорость движения воды в трубе, м/с;  $d_T$  – диаметр трубы, м;  $\alpha$  – коэффициент линейного сопротивления, принимаемый для чугунных и стальных труб 0,02, для бетонных – 0,22, для асбоцементных – 0,025, для полиэтиленовых – 0,01.

Для выбора диаметра труб, фасонных частей и определения линейных потерь напора следует принимать скорости движения воды (табл.3.15)

Табл.3.15 – Скорость движения воды в трубопроводах

Диаметр труб, мм	Скорость движения воды в трубопроводах, м/с	
	во всасывающем	в напорном
До 250	0,7-1,0	1,0-1,5
От 300 до 800	1,0-1,5	1,2-2,0
Более 800	1,5-2,0	1,8-3,0

Местные потери определяют по формуле:

$$h_m = \sum \beta \frac{v^2}{2}, \quad (3.41)$$

где  $\beta$  – коэффициент местного сопротивления. Значение  $\beta$  для различных элементов водопроводной сети приведено в табл.3.16.

Насос выбирают из [7] по максимальному секундному расходу воды и полному расчетному напору с соблюдением следующих условий:

$$Q_{нас} \geq Q_{max}; H_{нас} \geq H. \quad (3.42)$$

По значениям  $Q_{нас}$  и  $H_{нас}$  определяют мощность насоса  $P_{нас}$ :

$$P_{нас} = \frac{Q_c H \chi}{\eta_n}, \quad (3.43)$$

где  $\chi$  – плотность воды ( $\chi \approx 1000$  кг/м<sup>3</sup>);  $\eta_n$  – КПД насоса (для центробежных насосов  $\eta_n = 0,5 \dots 0,8$ ; вихревых  $\eta_n = 0,25 \dots 0,5$ ; поршневых  $\eta_n = 0,5 \dots 0,6$ ).

Табл.3.16 – Значения коэффициента местного сопротивления

Место потерь	Коэффициент местного сопротивления
Стальные отводы под углом 90° диаметром 38...400 мм	0,16...0,21
то же чугунные	0,16...0,39
Вентили проходные	
нормального типа	3,9
свободного хода	0,6

Расчетную мощность  $P_{\text{дв}}$  электродвигателя к насосу определяют по выражению:

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{нас}} k_{\text{зан}}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (3.44)$$

где  $k_{\text{зан}}$  – коэффициент запаса, зависящий от мощности насоса [7];  $\eta_{\text{пер}}$  – КПД передачи (для ременных  $\eta_{\text{пер}}=0,96$ ; зубчатых  $\eta_{\text{пер}}=0,98$ ; при непосредственном соединении  $\eta_{\text{пер}}=1$ ).

По каталогу подбирают соответствующий двигатель с соблюдением условия:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{дв}}, \quad (3.45)$$

где  $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт. Для водоснабжения сельскохозяйственных объектов наиболее предпочтительными являются вихревые и центробежные насосы. Для подъема воды из скважин широко применяются погружные насосы типа ЭЦВ.

Исходя из среднесуточного потребления воды  $Q_{\text{сут}}$  по объекту и количества дней в году  $T_{\text{год}}$  определяют годовую потребность в воде:

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{сут}} \cdot T_{\text{год}} \quad (3.46)$$

и находят годовое потребление электроэнергии на цели водообеспечения:

$$A_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{год}}}{Q_{\text{нас}}} P_{\text{мах.н}}, \quad (3.47)$$

где  $P_{\text{мах.н}}$  – максимальная мощность электродвигателя для привода насоса.

$$P_{\text{мах.н}} = P_{\text{прис}} \cdot k_3 \cdot k_{\text{к}}, \quad (3.48)$$

где  $P_{\text{прис}}$  – присоединенная мощность электродвигателя;  $k_3$  – коэффициент загрузки электродвигателя;  $k_{\text{к}}$  – коэффициент каталожной неувязки,  $k_{\text{к}} = P_{\text{н}}/P_{\text{дв}}$ .

$$P_{\text{прис}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{дв}}}, \quad (3.49)$$

где  $\eta_{\text{дв}}$  – КПД электродвигателя.

### 3.5. Электрический подогрев воды

Данные по расходу и потреблению горячей воды на молочных фермах приведены в табл.3.16[5; 7].

Табл.3.16 – Нормы расхода горячей воды на фермах

Вид животных	Суточная норма расхода горячей воды, л/гол	Вид животных	Суточная норма расхода горячей воды, л/гол
Коровы молочные	15	Свиньи откормочные	9
Быки и нетели	5	Ремонтный молодняк	9
Телята	2	Поросята-отъемыши	4
Молодняк	2	Свиноматки	25

Температура воды для приготовления кормов равна 40...65 °С, для мойки посуды, молокопроводов и другого оборудования – 55...65 °С, для подмывания вымени у коров – 37...39 °С. Обычно воду нагревают до температуры 70...90 °С, которую смешивают с холодной чтобы получить воду с нужной температурой.

В зимнее время возникает необходимость подогрева воды для поения животных. Температура воды в поилках для крупного рогатого скота должна быть 5...7 °С; для дойных коров – 12...14 °С, свиней на откорме – 1...3 °С, кур-несушек 10...13 °С. Воду для поения животных на фермах подогревают в групповых автопоилках АГК-4, АГК-24 или в водонагревателях типа ВЭП-600.

Животноводческие фермы являются также крупными потребителями пара. Удельные нормы расхода пара для некоторых процессов в животноводстве приведены в табл.3.17.

Табл.3.17 – Удельный расход пара для технологических процессов в животноводстве

Наименование процесса	Единица измерения	Расход пара на ед. измерения, кг
Варка зерновых	1 кг	0,12...0,15
Запаривание:		
корнеклубнеплодов	1 кг	0,16...0,2
смешанных кормов	1 кг	0,3...0,4
Пропаривание различных кормов	1 кг	0,4
Пастеризация молока	1 кг	0,12...0,15
Отопление помещения кормоцеха и молочной	1 м <sup>3</sup> /сут	0,5...0,75
Пропаривание молочных флаг	1 кг	0,1...0,2
Подогрев воды от 10 до 90°С	1 кг	0,18...0,2

Для определения мощности водонагревателей строят суточный график потребления горячей воды. Особенно рассматривают возможность подогрева воды в часы провалов в графиках нагрузок электропотребителей (ночное время, обеденный перерыв).

Массу горячей воды  $G_2$ , необходимую для получения заданного количества смешанной воды  $G_{см}$  с температурой  $T_{см}$ , определяют по формуле:

$$G_2 = G_{см} \frac{T_{см} - T_x}{T_2 - T_x} \quad (3.50)$$

где  $G_2$  и  $G_{см}$  – соответственно масса горячей и смешанной воды, кг;  $T_2$ ,  $T_{см}$ ,  $T_x$  – соответственно температура горячей, смешанной и холодной воды, °С. Количество теплоты (кДж), необходимое для нагрева воды, определяют по формуле:

$$Q = cG_2(T_2 - T_x), \quad (3.51)$$

где  $c$  – теплоемкость воды, кДж/кг °С;  $G_2$  – масса горячей воды, кг;  $T_2$  и  $T_x$  – температура горячей и холодной воды. °С.

За температуру горячей воды может быть принята конечная температура нагрева воды. Нагревательное устройство выбирают с учетом производительности и условий окружающей среды.

Мощность электронагревательной установки, кВт:

$$P = \frac{Q}{\tau \cdot \eta}, \quad (3.52)$$

где  $\tau$  – время нагрева, с;  $\eta$  – КПД нагревателя ( $\eta=0,9...0,98$ ).

Водонагреватели выбирают по типу, мощности, производительности температуре нагрева воды, напряжению питающей сети и др.

Технические данные элементных электроводонагревателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве, приведены в табл.3.18.

Табл.3.18 – Технические данные электроводонагревателей

Тип	Мощность, кВт.	Производительность. л/ч, кг/ч	Температура воды (пара), °С
1	2	3	4
накопительные электроводонагреватели			
ВЭТ-200	6	30...40	85...90
ВЭТ-400	10,5	60...80	85...90
ВЭТ-800	16,5	120	85...90
ВЭТ-1600	33	240	85...90
УАП-100/0,2	2	100	16...20
УАП-200/0,4	6	100	40...45
УАП-200/0,9	6	60	85...90
УАП-400/0,9	12	100	85...90
УАП-600/0,2	6	300	16...20
УАП-800/0,2	18	160	85...90
УАП-1600/0,2	6	230	25...30
УАП-1600/0,9	30	260	85...90
УНС-10	1,25	10	80...85
УНС-40	1,25	13	80...85
УНС-60	1,25	12	80...85

1	2	3	4
проточные водонагреватели			
ЭПВ-1	6	80	85...90
ЭПВ-2А	9	120	85...90
ЭПВ-3	12	160	85...90
ВНС-300/0.2	6	300	16...20
1ВН0600/0,2	12	600	16...20
ВЭП-600	10,5	600	10

### 3.6. Расчет и выбор установок микроклимата в помещении

В воздушной среде производственных помещений, в которых находятся люди, животные, оборудование, материалы и т.д., всегда есть некоторое количество вредных примесей (углекислого газа, влаги, аммиака, сероводорода, пыли и др.), которые необходимо удалять, а также поддерживать требуемую температуру. Несоблюдение этих требований отрицательно влияет на состояние здоровья людей, продуктивность животных, долговечность электрооборудования. Неудовлетворительный температурно-влажностный режим и состав воздуха снижают продуктивность коров на 10... 15 %, уменьшают привес свиней на 20...30 %, снижают яйценоскость кур-несушек на 15... 20 %, увеличивают расход корма на 20...24 %.

В создании микроклимата важную роль играют вентиляция и отопление помещений. Система вентиляции и отопления должна обеспечивать воздушную среду в помещениях с параметрами, указанными в табл. 3.19 и 3.20.

Табл.3.19 – Параметры воздуха в животноводческих помещениях

Помещения	Расчетные параметры воздуха в помещении			
	температура, °С	относительная влаж-	скорость движения воздуха,	воздухообмен на 1 ц массы животного, м <sup>3</sup> /ч
Коровники для беспривязного содержания	5	85 %	0,5... 1	17
Коровник для привязного содержания	10	70 %	0,5... 1	17
Родильное отделение	10	70 %	0,3...0,5	17
Телятник для откорма	10	70 %	0,5	20
Телятник для выращивания и доращивания	10	70 %	0,5	20
Свинарники для холостых, легкосупоросных маток и хряков-производителей	12	75 %	0,4	Зимой – 20, летом – 45
Свинарники для подсосных маток с поросятами	18 (для поросят 24...30)	70 %	0,15...0,4	Зимой – 15, летом – 45
Свинарник для поросят-отъемышей	18	70 %	0,2...0,6	Зимой – 15, летом – 45

Табл.3.20 – Параметры воздуха в птичниках

Вид и возрастные группы птиц	Расчетные параметры воздуха		
	температура при содержании птицы, °С		относительная влажность, %
	на полу	в клетках	
Взрослая птица			
Куры	12...16	16	60...70
Утки	14	-	70...80
Индейки	12...16	-	60...70
Молодняк птицы			
Куры:			
от 1 до 30 дней	24...22	24	60...70
от 31 до 60 дней	18	20	60...70
от 31 до 70 дней	16...18	18	60...70
от 61 до 150 дней	14...16	16	60...70
от 71 до 150 дней	14...16	16	60...70
от 151 до 180 дней	12...16	16	60...70
от 151 до 210 дней	12...16	16	60...70
Утки:			
от 1 до 10 дней	22	22	65...75
от 11 до 30 дней	20	-	65...75
от 31 до 55 дней	14	-	65...75
от 56 до 180 дней	7...14	-	65...75
Индейки:			
от 1 до 20 дней	22	24	60...70
от 21 до 120 дней	20... 18	-	60...70
от 121 до 180 дней	16	-	60...70

Примечания: температура воздуха при напольном содержании под брудерами для цыплят от 1 до 30 дней и для индюшат от 1 до 20 дней – 35...22 °С; для утят от 1 до 10 дней – 28... 26 °С, от 11 до 30 дней – 26...22°С; допускается концентрация углекислоты в помещениях для взрослой птицы и ремонтного молодняка 1,8...2.0 л/м<sup>3</sup>, в помещениях для выращивания цыплят – 1,0 л/м<sup>3</sup>; аммиака – 0,01 мг/л для взрослой птицы, 0,005 мг/л для молодняка; сероводорода – 0,005 мг/л.

В системах вентиляции используют центробежные и осевые вентиляторы. Их выбор производится в следующем порядке.

Определяют необходимый воздухообмен  $L$ , м<sup>3</sup> /ч для зимних условий:

1. По допустимому содержанию водяных паров:

$$L_{вл} = \frac{\Sigma G}{d_g - d_n}, \quad (3.53)$$

где  $\Sigma G$  – суммарное количество водяных паров в животноводческом помещении, г/ч·гол,

$$\Sigma G = G_1 + G_2, \quad (3.54)$$

$G_1$  – количество влаги, выделяемой через дыхание и кожу животного, г/ч·гол;

$G_2$  – количество влаги, испаряемой со стен, пола, потолка, кормушки, г/ч·гол,

принимается  $G_2=0,14G_1$ ;  $d_v$  – допустимое содержание влаги в воздухе помещений, г/м<sup>3</sup>,  $d_n$  – содержание влаги в наружном воздухе, г/м<sup>3</sup>,

$$d_v = d_{\text{нас.в}} \frac{\varphi_v}{100}, \quad (3.55)$$

$$d_n = d_{\text{нас.н}} \frac{\varphi_n}{100}, \quad (3.56)$$

$d_{\text{нас.в}}$  и  $d_{\text{нас.н}}$  – влагосодержание внутреннего и наружного воздуха в насыщенном состоянии при расчетных температурах (табл.3.21), г/м<sup>3</sup>;  $\varphi_v$  и  $\varphi_n$  – относительная влажность внутреннего и наружного воздуха,  $\varphi_v$  – принимается по табл.3.21 для того или иного вида животных,  $\varphi_n = 95 \%$ .

Табл.3.21 – Физические свойства влажного воздуха при давлении 101,3 кПа

Температура, °С	Плотность сухого воздуха, кг/м <sup>3</sup>	Влагосодержание воздуха в насыщенном состоянии г/м <sup>3</sup>	Температура, °С	Плотность сухого воздуха, кг/м <sup>3</sup>	Влагосодержание воздуха в насыщенном состоянии г/м <sup>3</sup>
-20	1,396	0,88	6	1,265	7,3
-18	1,385	1,05	8	1,256	8,3
-17	1,379	1,15	9	1,252	8,8
-16	1,374	1,27	10	1,248	9,4
-15	1,368	1,38	11	1,243	10,0
-14	1,363	1,51	12	1,239	10,7
-13	1,358	1,65	13	1,235	11,4
-12	1,353	1,80	14	1,230	12,1
-11	1,348	1,96	15	1,226	12,8
-10	1,342	2,14	16	1,222	13,6
-9	1,337	2,33	17	1,217	14,5
-8	1,332	2,54	18	1,213	15,4
-7	1,327	2,76	19	1,209	16,3
-6	1,322	2,99	20	1,205	17,3
-5	1,317	3,24	21	1,201	18,3
-4	1,312	3,51	22	1,197	19,4
-3	1,308	3,81	23	1,193	20,6
-2	1,303	4,13	24	1,189	21,8
-1	1,298	4,47	25	1,185	23,0
0	1,293	4,84	26	1,181	24,4
1	1,288	5,22	27	1,177	25,8
2	1,284	5,60	28	1,173	27,2
3	1,279	5,98	29	1,169	28,7
4	1,275	6,40	30	1,165	30,3
5	1,270	6,84			

Количество всех видов вредностей, выделяемых животными и птицами, приводится в табл. 3.22 и 3.23.

2. По допустимому содержанию углекислого газа:

$$L_{\text{ук}} = \frac{k_2 G_{\text{ук}}}{C_{\text{в}} - C_{\text{н}}}, \quad (3.57)$$

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий выделение углекислого газа микроорганизмами и подстилкой ( $k_2=1,2$ );  $G_{\text{ук}}$  – общее количество углекислоты, выделяемой животными в помещении (см. табл. 5.13, 5.14), л/ч;  $C_{\text{в}}$  – допустимое содержание углекислого газа в воздухе помещения ( $C_{\text{в}}=2,5\ldots3,0\%$ );  $C_{\text{н}}$  – содержание углекислого газа в наружном воздухе ( $C_{\text{н}}=0,03\%$ ).

Минимально допустимый воздухообмен,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , необходимый для нормальной жизнедеятельности животных и птиц определяется по выражению

$$L_{\text{min}} = \frac{mNa}{100}, \quad (3.58)$$

где  $m$  – масса одного животного, кг;  $N$  – число животных;  $a$  – минимально допустимый воздухообмен на 1 ц живой массы животных и птицы,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

В качестве расчетного принимается наибольший воздухообмен из полученных значений  $L_{\text{вл}}$ ,  $L_{\text{ук}}$ .

Табл. 3.22 – Количество теплоты, углекислого газа, водяных паров, выделяемых животными

Вид животных	Живая масса	Количество выделяемых веществ на одну голову		
		свободного тепла, кДж/ч	углекислоты, л/ч	водяных паров, г/ч
1	2	3	4	5
Коровы сухостойные	400	2380	110	350
	600	2800	138	440
Коровы лактирующие: с удоем 10 л в сутки  с удоем 30 л в сутки	400	2300	114	364
	600	2880	143	455
	400	3540	175	560
	600	4050	200	642
	800	4550	225	721
Телята в возрасте: до 1 месяца  от 1 до 3 месяцев  от 3 до 4 месяцев	30	302	15	47
	50	524	25	83
	80	775	38	121
	60	650	32	102
	100	850	42	135
	130	1150	57	182
	90	747	37	118
	150	1150	57	183
	200	1520	75	240



1	2	3	4	5
Молодняк в возрасте от 4 месяцев до года	120	973	43	153
	250	1500	74	236
	350	1970	97	310
Свиноматки супоросные	100	790	40	110
	150	940	46	129
	200	1120	52	147
Свиноматки подсосные с поросятами	100	1780	87	242
	150	2030	99	276
	200	2350	114	320
Свиньи откормочные	100	970	47	132
	200	1290	63	175
	300	1700	83	230

Табл. 3.23 – Количество теплоты, углекислого газа, водяных паров, выделяемых птицей

Вид и возрастные группы	Живая масса, кг	Количество выделяемых веществ на одну голову		
		свободного тепла, кДж/ч	углекислоты, л/ч	водяных паров, г/ч
1	2	3	4	5
Взрослая птица				
Куры яичных пород в клетках	1,5...1,7	28,5	1,7	5,1
Напольное содержание кур				
яичная порода	1,5...1,7	33,1	2,1	5,8
мясная порода	2,5...3,0	30,2	1,8	5,2
1	2	3	4	5
Индейки	6,8	28,1	1,7	5,0
Утки	3,5	20,1	1,2	3,6
Молодняк птицы				
Куры яичного направления				
от 1 до 10 дней	0,06	56,6	2,3	3,5
от 11 до 30 дней	0,25	36,9	2,2	6,6
Куры мясного направления				
от 1 до 10 дней	0,08	54,2	2,2	4,0
от 11 до 30 дней	0,35	34,0	2,0	6,3
Утки				
от 1 до 10 дней	0,3	58,8	3,5	10,5
от 11 до 30 дней	1,0	42,4	2,5	7,5
Индейки				
от 1 до 10 дней	0,1	44,0	2,0	4,2
от 11 до 30 дней	0,6	35,2	2,1	6,6

В летний период определяют расход воздуха (воздухообмен), необходимый для удаления избыточной теплоты:

$$L_t = \frac{Q_{изб}(1 + \alpha \cdot t_g)}{C(t_g - t_n)}, \quad (3.59)$$

где  $Q_{изб}$  – избыточная теплота, удаляемая с вентилируемым воздухом, кДж/ч;  $t_в$  и  $t_n$  – температуры внутреннего и наружного воздуха, °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент, равный 1/273;  $C$  – теплоемкость 1 м<sup>3</sup> воздуха, принимается равной 1,3 кДж/(м<sup>3</sup>·°С).

Часовая кратность обмена воздуха в помещении

$$k = \frac{L}{V_n}, \quad (3.60)$$

где  $L$  – расчетный воздухообмен, м<sup>3</sup>/ч;  $V_n$  – внутренний объем помещения, м<sup>3</sup>.

При  $k < 3$  обычно принимают вентиляцию с естественным побудителем, а при  $k > 3$  – с искусственным побудителем. Кратность воздухообмена без подогрева воздуха должна быть не более 5. Максимальное значение кратности  $k = 15$ . При больших значениях возникают сквозняки.

Расчет отопления ведут следующим образом. Количество избыточной теплоты в летний период или мощность отопительного устройства в зимний период определяют на основании уравнения теплового баланса помещения:

$$Q_{жс} + Q_{от} = Q_{огр} + Q_в + Q_{исп}, \quad (3.61)$$

где  $Q_{жс}$  – количество теплоты, выделяемое животными кДж/ч,  $Q_{от}$  – теплопроизводительность системы отопления, кДж/ч;  $Q_{огр}$  – теплопотери помещения через ограждающие конструкции здания (стены, окна, двери, потолок и т.д.), кДж/ч;  $Q_в$  – количество теплоты, необходимое для нагревания приточного воздуха, кДж/ч,  $Q_{исп}$  – теплота, расходуемая на испарение с поверхности влажного пола.

Количество теплоты, необходимое для нагревания приточного воздуха:

$$Q_в = L \cdot C_в \cdot \rho_в \cdot (t_в - t_n), \quad (3.62)$$

где  $L$  – расчетный воздухообмен (принимается из расчета вентиляции), м<sup>3</sup>/ч;  $C_в$  – теплоемкость 1 м<sup>3</sup> воздуха, кДж/(кг·°С);  $\rho_в$  – плотность воздуха при расчетной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $t_в$  – температура внутри животноводческого помещения, принимается на основании зоогигиенических требований,  $t_n$  – наружная температура в зимний период времени, °С.

Теплота, выделяемая животными:

$$Q_{жс} = Q'_{жс} n \cdot k_t, \quad (3.63)$$

где  $Q'_{жс}$  – норма тепловыделения животных, кДж/ч·гол;  $n$  – число животных в помещении, гол.;  $k_t$  – коэффициент, учитывающий изменение тепловыделения животного с изменением температуры.

Для птицы формула (3.63) имеет вид:

$$Q_{nm} = Q'_{nm} G \cdot k_t \quad (3.64)$$

где  $Q'_{nm}$  – норма тепловыделения птицей, кДж/ч·кг;  $G$  – живая масса птицы, кг;

$k_t$  – коэффициент, учитывающий изменение тепловыделения птицы с изменением температуры. Значение коэффициента  $k_t=1+0,0135 \cdot (16-t_6)$ .

Количество теплоты, расходуемое на испарение влаги в помещении:

$$Q_{исп}=2,5G_{исп}, \quad (3.65)$$

где  $G_{исп}$  – количество влаги, испаряемой с пола, из поилок и других конструкций, г/ч; 2,5 – скрытая теплота испарения 1 г воды, кДж/г.

Потери теплоты через ограждения, кДж/ч, определяют по тепловой характеристике помещения, по выражению:

$$Q_{огр}=q_o V(t_6-t_n), \quad (3.66)$$

где  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>. Величина  $q_o$  зависит от конструкции здания, степени его утепленности и принимается из табл.3.24.

Табл.3.24 – Значения тепловых характеристик животноводческих помещений

№ пп	Классификация помещений	Тепловая характеристика, кДж/м <sup>3</sup>	Примечание
1.	Неутепленные	5,03...3,93	Каркасно-железобетонные
2.	Средней утепленности	3,92...2,93	Кирпичные в 2 кирпича
3.	Утепленные	2,91...2,1	Деревянные рубленые

Мощность отопительной установки (калорифера), кВт, будет:

$$P_{от} = \frac{Q_{от}}{3600\eta_m}, \quad (3.67)$$

где  $\eta_m$  – тепловой КПД отопительной установки ( $\eta_m=0,95 \dots 1,0$ ).

Вентиляционно-отопительные установки подразделяются на установки для вентиляции и отопительные.

В качестве отопительных установок рекомендуется принимать электрокалориферы типа СФОА, а в систему приточной вентиляции включать центробежные вентиляторы типа Ц4-70.

Промышленность выпускает комплектное вентиляционное оборудование типа «Климат-2», «Климат-3», а также «Климат-4» в трех исполнениях: «Климат-44» с осевыми вентиляторами ВО-4 (до 24 шт.), «Климат-45» с вентиляторами ВО-5,6 (до 12 шт.) и «Климат-47» с вентиляторами ВО-7 (до 10 шт.). Установки по обеспечению микроклимата в животноводческих помещениях подробно рассмотрены в [7].

### 3.7. Расчет установки местного электрообогрева

К таким установкам, прежде всего, относятся электрообогреваемые полы. Они используются для обогрева молодняка животных и птицы, что уменьшает поголовье с простудными заболеваниями. Животные быстро растут, набирают вес. При этом экономится электроэнергия на обогрев за счет снижения общей

температуры воздуха в помещении. Как правило, обогреваются отдельные участки пола, где чаще пребывают животные и птица. В бетонную подготовку закладывается обогревательный провод типа ПОСХВШ или стальная проволока, напряжение питания – от сети 380/220 В с глухозаземленной нейтралью.

Расчет нагревательных устройств пола ведется по следующей методике.

1. Определяют размер обогреваемой площади помещения, м<sup>2</sup>:

$$S = N \cdot f, \quad (3.68)$$

где  $N$  – число животных, гол.;  $f$  – удельная обогреваемая площадь, м<sup>2</sup>/гол., выбирается из табл.3.25. Рассчитывают общую мощность установки, кВт:

$$P = S \cdot P_o \cdot 10^{-3} = P_i \cdot N \cdot f \cdot 10^{-3}, \quad (3.69)$$

где  $P_o$  – удельная мощность из табл.3.25, Вт/м<sup>2</sup>.

Определяют общую длину нагревательного провода, м:

$$L = \frac{S}{a}, \quad (3.70)$$

где  $a$  – шаг укладки провода в бетоне, определяется как расстояние между соседними нагревательными проводниками, м. Для цыплят  $a=0,05...0,1$  м, для свинарников-маточников, где содержатся поросята-сосуны,  $a=0,15$  м.

Табл.3.25– Рекомендации для устройства электрообогреваемых полов

№ п/п	Вид животных и птицы	Рекомендуемая температура пола, °С	Удельная мощность $P_o$ , Вт/м <sup>2</sup>	Удельная обогреваемая площадь, м <sup>2</sup> /гол
1.	Цыплята: суточные в возрасте 30...40 суток в возрасте 60...70 суток	35...40 35 35	150...300	0,015...0,017 0,03...0,04 0,07...0,08
2.	Поросята-сосуны	25...30	160...250	1...1,2 м <sup>2</sup> на приплод
3.	Поросята-отъемыши	20...25	150 ...200	–
4.	Поросята на откорме при массе 15...30 кг 30...45 кг 45...60кг	25 20 15...20	90... 150	1,2...1,8
5.	Свиноматки	18...20	80...150	2,0...2,5
6	Коровы больные (мастит, артрит)	26...29	150...200	3,5...3,8

Полученное значение греющей длины провода проверяют по допустимой удельной мощности:

$$L' = \frac{P \cdot 10^{-3}}{\Delta P_{уд}^{max}} \leq L = \frac{S}{a}. \quad (3.71)$$

Значение допустимой удельной мощности  $\Delta P_{уд}^{max}$  принимают в зависимости от типа нагревательного провода из табл.3.26.

Табл.3.26 – Характеристики электрообогревательных проводов

Провод	Наружный диаметр, мм	Диаметр жилы, мм	Материал жилы	Изоляция	Допустимая рабочая температура жилы, °С	Электрическое сопротивление в нагретом состоянии, $T_m$ , Ом	Наибольшая удельная мощность, $P_{уд}$ , Вт/м
ПОСХВ	2,9	1,1	Телеграфная катанка	Полихлорвинил	60	0,174	9... 10
ПОСХП	2,9	1,1	Телеграфная катанка	Полиэтилен	90	0,194	12...13
Стальная проволока	1,8...5,0	1,8...5,0	Сталь	–	300	0,15... 0,02	20...30

## 2. Электрический расчет.

Определяют число параллельных секций  $Z$ , на которые нужно разделить общую длину провода  $L$ , чтобы обеспечить заданный нагрев жилы:

$$Z = \frac{P \cdot 10^3}{P_0} = \frac{P \cdot 10^3}{U_\phi I_p}, \quad (3.72)$$

где  $I_p$  – расчетный (греющий) ток в нагревательном проводе, А.

Расчетный ток определяется из выражения:

$$I_p = \sqrt{\frac{\Delta P_{уд}}{r_{1м}}} \quad (3.73)$$

где  $P_{уд}$  – принятое значение удельной погонной мощности для выбранной марки провода, Вт/м;  $r_{1м}$  – электрическое сопротивление 1 м провода в нагретом состоянии, Ом.

## 3.8. Расчет и выбор облучательных установок

Спектр ультрафиолетовых лучей (УФЛ) делится на три области:  $A$  – 380...320 нм,  $B$  – 320...280 нм,  $C$  – короче 280 нм. Излучение в области  $A$  используют для люминесцентного анализа сельхозпродуктов. Излучение в области  $B$  обладает способностью преобразовывать имеющийся в организме животного неактивный витамин (провитамин)  $D$  в его активную форму – витамин  $D$ , который является регулятором фосфорно-кальциевого обмена веществ в организме. Это предупреждает рахит – тяжелое заболевание животных и, особенно, молодняка. Излучение в области  $C$  обладает сильным бактерицидным эффектом. Его используют для обеззараживания воздуха в животноводческих помещениях, воды, молочной посуды и т.п.

УФ-излучение должно строго дозироваться. Действие УФЛ определяется расстоянием от источника до объекта, временем облучения. Для оценки воздействия УФЛ на живые организмы пользуются, как правило, эритемной системой величин: эритемным потоком – ЭР(мЭР), силой эритемного излучения ЭР(мЭР)/ср; количеством эритемного облучения, т.е. эритемной экспозицией ЭР(МЭР)ч/м<sup>2</sup>. Источники УФЛ - газоразрядные ртутные лампы низкого и высокого давления типа ЛЭ, ЛЭР, ДБ, ДРВ, ДРТ и др. В табл.3.27 приведены параметры некоторых газоразрядных ламп, применяемых в сельскохозяйственном производстве.

Доза УФ-облучения зависит от вида животных, их возрастных групп и определяется режимом работы облучателя. В табл.3.28 приведены значения суточных доз УФ-облучения для некоторых видов животных.

Для расчета подвижных облучательных установок задаются в метрах длина  $a$ , ширина  $b$  и высота  $h$  помещения, где предполагается разместить установку, а также длины  $l$  туловища животного или же ширина облучаемого ряда, где содержатся животные и над которыми проходят облучатели.

Табл.3.27 – Технические данные ламп для УФ-облучения животных и птицы

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение, В	Ток, А	Световой поток, лм	Эритемный поток, мэр	Бактерицид- ный поток, мб	Срок службы, ч	Габаритные размеры, мм	
								диа- метр	длина
Источники низкого давления									
ЛЭ-15	15	127	0,33	40	300	55	5000	30	452
ЛЭ-30	30	220	0,35	ПО	750	125	5000	30	909
ЛЭР-30	30	220	0,36	100	750	–	3000	30	909
ДБ-15	15	127	0.33	60	–	2000	2000	30	452
ДБ-30	30	220	0.36	140	35	6000	3000	30	909
Источники высокого давления									
ДРВЭД 220-160	160	220	0.8	2.1	350	–	1500	127	190
ДРТ-230	230	127	3.8	4.4	2800	6.2	1500	20	190
ДРТ-400	400	220	3.2£	5 7.9	4750	10.5	2700	22	265
ДРТ-1000	1000	220	7.5	33.0	16500	39,5	1500	32	350

Из табл.3.28 выбирают для заданного вида животных дозу облучения  $H$ , допустимую неравномерность облучения  $Z$ , допустимую облученность  $E_{дон}$ .

Принимают тип облучательной установки и соответствующий ей тип УФ-лампы (табл.3.29).

Определяют высоту, м, подвеса облучателя по формуле

$$H_p = \frac{l}{2\sqrt{Z-1}} \quad (3.73)$$

Табл.3.28 – Суточные дозы УФ-облучения для сельскохозяйственных животных

Вид и возрастная группа животных	Суточная доза облучения $H$ , мэр·ч/м <sup>2</sup>	Допустимая неравномерность, $Z$	Допустимая облученность $E_{доп}$ , мэр/м <sup>2</sup>
Коровы и быки	270...290	1,34	950
Телки и нетели	180...210	1,35	650
Телята старше 6 мес.	160...180	1,28	570
Телята до 6 мес.	120...140	1,36	430
Овцематки	245...260	1,30	440
Ягнята 3-дневного возраста	220...240	1,27	480
Свиньи на откорме и свиноматки	80... 90	1,70	250
Поросята-отъемыши	60... 80	1,76	230
Поросята-сосуны	20...25	1,50	83
Цыплята			
в клетках	20...25	1,57	75
на полу	15...20	1,76	58
Куры-несушки			
в клетках	20...25	1,57	75
на полу	40...50	1,57	150

Табл.3.29 – Технические данные установок для УФ-облучения животных и птицы

Тип установки	Тип лампы	Кол-во ламп, шт	Мощность лампы, Вт	Напряжение, В	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ОБУ1-30М	ДБ-30	1	37	220	1025x265x167	6
ББП01-30М	ДБ-30	1	37	220	985x270x120	4
ББП01-30	ЛЭ-30	1	37	220	1041x250x200	5,5
ЭО1-30М-001	ЛЭ-30	1	37	220	985x270x120	4
ОРК-2	ДРТ-400	1	450	220	340x305x215	10
ОРКШ	ДРТ-400	1	450	220	480x480x181	25
УО-4М	ДРТ-400	4	2000	380/220	480x480x181	64,5
УОК-1	ДРТ-400	2	1400	380/220	480x480x181	180
ОЭСП02	ЛЭР-40	1	96	220	1325x270x215	10,8
	ЛБР-40	1	96	220	1325x270x215	10,8

Определяют высоту подвеса облучателя над уровнем пола, м:

$$H_0 = H_p + \frac{h}{2}, \quad (3.74)$$

где  $h$  – рост (по линии спины) животного, м.

Вычисляют длину хода облучателя, м:

$$L = \frac{\alpha}{N} \cdot 0,58 H_p, \quad (3.75)$$

где  $N$  – число облучателей в одном ряду (для подвижных установок  $N=2$ ). Рассчитывают среднюю облученность, мэр/м<sup>2</sup>:

$$E_{cp} = \frac{2K_{\phi} I_n}{K_3 H_p \sqrt{L^2 + (2H_p)^2}}, \quad (3.76)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы облучаемой поверхности ( $K_\phi=0,5...0,64$ );  $K_z$  – коэффициент запаса, учитывающий снижение УФ-потока за счет старения лампы, ее запыленности в зависимости от продолжительности эксплуатации установки (табл.3.30);  $I_n$  – сила эритемного потока УФ-источника, мэр/ср (табл.3.31).

Табл.3.30 – Зависимость  $K_z$  от продолжительности работы УФ-установки

Продолжительность работы, ч	0	100	200	400	600	1000
$K_z$ , о.е.	1.0	1,25	1,43	1,67	1,82	2.0

Табл.3.31 – Значение силы эритемного потока для косинусного облучателя

Тип лампы	ДРТ-1000	ДРТ-400	ДРТ-230	ЛЭ-30	ЛЭ-15
$I_n$ , мэр/ср	2180	950	550	60	30

Во избежание местных ожогов у животных и слепящего действия источников следует сравнить полученную расчетную облученность  $E_{cp}$  с допустимой  $E_{дон}$ :

$$K_z \cdot Y_{cp} \cdot Z \leq E_{дон}. \quad (3.77)$$

Если неравенство не выполняется, то необходимо принять новую высоту подвеса облучателей и заново провести все расчеты.

Рассчитывают продолжительность облучения лампами в конце срока их службы, мин:

$$t_{cp} = \frac{H_{cp}}{E_{cp}} + 0,7t_{раз}, \quad (3.78)$$

где  $H_{cp}$  – среднее значение суточной дозы облучения животных (табл.3.28), мэр·ч/м;  $t_{раз}$  – время, необходимое для полного разгорания лампы ( $t_{раз}=10$  мин); 0,7 – коэффициент, учитывающий снижение эффективного потока лампы при ее разгорании.

Рассчитываем продолжительность облучения новыми лампами:

$$t_m = \frac{t_{cm} - 0,7t_{раз}}{2} + 0,7t_{раз}. \quad (3.79).$$

Число проходов облучателей с новыми  $n_n$  и старыми  $n_{cm}$  лампами:

$$n_n = \frac{Vt_n}{a}; \quad n_{cm} = \frac{Vt_{cm}}{a}, \quad (3.80)$$

где  $a$  – длина помещения, м;  $V$  – паспортная скорость движения облучателя, м/мин.

### 3.9. Расчет аэроионизатора коронного разряда

Легкие аэроионы с отрицательным зарядом оказывают благоприятное воздействие на живой организм. Их достаточная концентрация в воздухе способствует



быстрому росту и развитию молодняка, хорошей прибавке продуктивности у взрослого поголовья, снижению затрат корма на единицу продукции. Однако в закрытых помещениях источники естественной ионизации практически отсутствуют, что отрицательно сказывается на продуктивности и здоровье животных. Нужна искусственная генерация отрицательных аэроионов.

Искусственную ионизацию воздуха осуществляют при помощи установок коронного униполярного разряда – аэроионизаторов (АИ), которые состоят из высоковольтного источника постоянного тока и системы коронирующих электродов. Последние подключаются к отрицательному зажиму источника высокого напряжения, положительный полюс заземляется. Как правило, применяют коронирующие электроды протяженного типа. Они состоят из проволок, протянутых на изоляторах над зоной пребывания животных и птицы.

Последовательность расчета аэроионизатора коронного разряда следующая.

Определяют полезный объем животноводческого помещения  $V$ , м<sup>3</sup>, в котором будет смонтирована аэроионизационная установка. Принимают среднее значение концентрации легких аэроионов внутри помещения в зависимости от вида животных и их возрастных групп,  $n_l$ , ион/см<sup>3</sup>. Эти значения берутся по зоотехническим рекомендациям из табл.3.32.

Табл.3.32 – Режимы искусственной ионизации воздуха в животноводческих и птицеводческих помещениях

Вид и возраст животных и птицы	$n_l \cdot 10^3$ , ион/см <sup>3</sup>	$t_k$ , сут	$t_n$ , сут	$t_c$ , сут
Коровы	300	30	10...20	5
Телята до 30 дней	150...250	30	–	6...8
Свиньи взрослые	400...500	28...30	21...28	0,5
Поросята-отъемыши	350...400	28...30	21...28	0,5
Поросята-сосуны	300...350	28...30	21...28	0,5
Куры-несушки	100...150	30	30	4...8
Бройлеры	60...70	30	30	9...12
Ремонтный молодняк				
60...80 суток	20...50	5	5	0,5...4
81...100 суток	20...50	5	5	5...10
101...120 суток	20...50	5	5	4...5

В табл.3.32 приведены рекомендуемые режимы аэроионизации, включающие в себя следующие параметры:  $n_l$  – концентрация легких отрицательных ионов в зоне дыхания животных;  $t_k$  – продолжительность коронного разряда;  $t_n$  – продолжительность паузы между разрядами;  $t_c$  – суточная продолжительность аэроионизации.

Находят необходимое значение удельной силы тока коронного разряда

$$I_v = 0,44 \cdot 10^{-12} n_l^2. \quad (3.81)$$

Определяют общую силу тока всех коронирующих электродов в данном помещении:

$$I = I_v V \cdot 10^{-6}, \quad (3.82)$$

где  $V$  – внутренний объем помещения.

Рассчитывают удельную, на единицу длины коронирующего электрода, силу тока короны по выражению:

$$I_l = I / l, \quad (3.83)$$

где  $l$  – общая длина коронирующих электродов.

Начальную напряженность коронного разряда определяют по эмпирической формуле Пика:

$$E_0 = 30,3 \cdot 10^5 \delta \left( 1 + \frac{0,0298}{\sqrt{\delta \cdot r_0}} \right), \quad (3.84)$$

где  $r_0$  – радиус коронирующего электрода;  $\delta$  – относительная плотность воздуха ( $\delta=1,0$ ).

Начальное напряжение коронного разряда определяют по формуле:

$$U_0 = E_0 \cdot r_0 \cdot A, \quad (3.85)$$

где  $A$  – функция геометрических параметров системы коронирующих электродов ( $A=2h/r_0$ , где  $h$  – высота подвеса коронирующего провода над полом).

Напряжение на коронирующих электродах, обеспечивающее заданную концентрацию аэроионов, определяется по формуле:

$$U = U_0 + 3 \frac{A I_l^2 h^4}{5,52 \cdot \pi K^2 \varepsilon_0^2 U_0}, \quad (3.86)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная ( $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м);  $K$  – подвижность отрицательных ионов кислорода ( $K=1,81 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/В·с).

### 3.10 Расчет электрического обогрева сооружений защищенного грунта

Установки защищенного грунта делятся на парники и теплицы. Парник – легкое сооружение защищенного грунта, предназначенное для ранней высадки рассады овощей.

В качестве нагревателей используют: в парниках – обогревательные провода ПОСХВ(II), заложенные в грунт или подвешенные на кронштейнах в воздухе; в теплицах – провода ПОСХВ(II) в грунте, воздушная среда обогревается электрокалорифером.

Мощность нагревательной установки для парника и теплицы определяют по формуле:

$$P = KF(t_e - t_n) \cdot 10^3 \quad (3.87)$$

где  $K$  – коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости ветра,  $F$  – площадь покрытия (остекления);  $t_{\theta}$  – минимально допустимая температура воздуха в помещении (при выращивании огурцов  $t_{\theta}=+12$  °С; помидоров  $t_{\theta}=+10$  °С; рассады овощей  $t_{\theta}=+5$  °С);  $t_n$  – расчетная температура наружного воздуха.

Температура наружного воздуха определяется по формуле:

$$t_n = t_{cp} + 0,6(t_{\min} - t_{cp}), \quad (3.88)$$

где  $t_{cp}$  – средняя температура наиболее холодного месяца данной климатической зоны;  $t_{\min}$  – минимальная температура наиболее холодного месяца.

Коэффициент теплоотдачи  $K$  от покрытия в окружающую среду зависит от вида сооружения и скорости ветра. При малых скоростях значения  $K$  для теплицы в 1,5...2,0 раза больше, чем для парника. При больших скоростях значения  $K$  для этих сооружений примерно равны. Зависимость тепловпотерь от скорости ветра для парников и теплиц представлена в таблице 3.33.

Табл. 3.33 – Зависимость тепловпотерь от скорости ветра для сооружений защищенного грунта стандартных типов

Вид сооружения	Коэффициент $K$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С, в зависимости от скорости ветра $v$ , м/с					
	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Теплица	2,0	6,0	7,7	9,3	10,5	12,0
Парник	4,5	4,7	5,6	7,03	9,5	11,9

Расчетная мощность обогрева делится между почвой  $P_n$  и воздухом  $P_{\theta}$  в следующем соотношении: для теплиц  $P_n:P_{\theta}=1:1$  или 1:2; для парников  $P_n:P_{\theta}=1:1$  или 2:1. Исходя из этих пропорций, производится расчет и выбор нагревательных проводов или электрокалорифера.

## 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

### 4.1. Проектирование электроприводов с двигателями вращательного движения

#### 4.1.1. Приводные характеристики сельскохозяйственных машин

*Приводные характеристики сельскохозяйственных машин* используют в процессе проектирования рационального электропривода. Сюда входят технологические, кинематические, энергетические, механические, нагрузочные и инерционные.

*Технологические характеристики* изображают в виде технологических схем. Они определяют требования к электроприводу со стороны качества продукции (допустимые колебания скорости, удельные расходы энергии, необходимость регулирования режимов работы и необходимость автоматизации) и условия работы электропривода в зависимости от характера окружающей среды, рода помещения (сухое, сухое неотапливаемое, пожароопасное, взрывоопасное и др.).

*Кинематические схемы* дают представление о траекториях и скоростях движения всех элементов машин, а также о путях распределения энергетического потока от двигателя.

*Энергетические характеристики* показывают общий (кВт·ч) и удельный (кВт·ч на единицу продукции) расход электрической энергии на выполнение технологического процесса, а также распределение энергии между отдельными узлами машины.

*Механические характеристики* определяют зависимость установившейся скорости машины от момента сил сопротивления. Они могут быть изображены графически или записаны аналитически [5; 7]:

$$M_c = M_0 + (M_{c.n.} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (4.1)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления производственного механизма при угловой скорости  $\omega$ ;  $M_0$  – момент сопротивления трения в движущихся частях машины, принимаемый постоянным;  $M_{c.n.}$  – момент сопротивления при номинальной угловой скорости  $\omega_n$ ;  $x$  – показатель степени характеризующий изменение момента сопротивления при изменении угловой скорости; для типичных машин может принимать значения: 0, 1, 2, –1.

При  $x=0$  момент сопротивления не зависит от угловой скорости и определяется в основном моментом трения. Такой характеристикой обладают подъемные краны, лебедки, транспортеры, поршневые насосы, механизмы подачи металлорежущих станков и других сельскохозяйственных машин.

При  $x=1$  момент сопротивления в основном линейно возрастает с увеличением скорости. Такой характеристикой обладают генератор независимого возбуждения, работающий на постоянное внешнее сопротивление, зерноочистительные машины и др.

При  $x=2$  момент сопротивления в основном пропорционален квадрату скорости. Такой характеристикой обладают вентиляторы, центробежные насосы; молотильные барабаны, сепараторы.

При  $x=-1$  момент сопротивления уменьшается обратно пропорционально угловой скорости. Такой характеристикой обладают некоторые металлообрабатывающие станки, зерновые норы под нагрузкой и др.

Механические характеристики используются при анализе переходных процессов, режимов работы машин совместно с электродвигателем, определении возможности пуска и устойчивой работы электропривода, построении нагрузочных диаграмм.

*Нагрузочные диаграммы* машин показывают зависимости момента сопротивления  $M_c$ , мощности сопротивления  $P_c$  и угловой скорости  $\omega_m$  рабочей машины от времени:  $M_c(t)$ ,  $P_c(t)$ ,  $\omega_m(t)$  и отражают характер и режим работы электропривода. Нагрузка рабочей машины может быть постоянной и переменной. С постоянной нагрузкой работают вентиляторы и центробежные насосы при постоянных производительности и напоре; зерновые элеваторы, когда неизменны подача и угловая скорость; сепараторы и др. С переменной нагрузкой работают машины, в которые перерабатываемая масса поступает не равномерно (дробилки, молотильные барабаны и др.), а также машины, у которых скорости рабочих органов переменна (например, поршневые насосы, поршневые прессы, лесопильные рамы).

*Инерционные характеристики* определяют значение и характер изменения момента инерции подвижных частей машины. У машин с вращательным движением рабочих органов момент инерции – величина постоянная. У машин со сложным движением отдельных органов (с возвратно-поступательным у лесопильных рам, компрессоров, прессов) момент инерции – величина переменная. Значение и степень изменения момента инерции обычно используют при определении продолжительности пуска и оценке равномерности хода машин при работе.

Помимо приводных характеристик машин, для выбора рационального электропривода необходимо учитывать условия окружающей среды и электроснабжения. Ряд сельскохозяйственных помещений отличается высоким содержанием химически активных веществ в сочетании с высокой влажностью окружающей среды (животноводческие помещения), запыленностью (мельницы, кормоцеха, зернотока и др.). Кроме того, электродвигатели часто работают

на открытом воздухе, подвергаясь непосредственному воздействию атмосферных влияний. Электрооборудование для животноводческих помещений должно быть рассчитано на работу в среде с относительной влажностью до 100 % при содержании паров аммиака до 0,2 мг/л.

#### 4.1.2. Расчет мощности электроприводов

Мощность электродвигателя выбирают, исходя из необходимости обеспечения пуска, преодоления всех сопротивлений во время работы, соблюдения нормального теплового режима электродвигателя.

Нагрев электродвигателя вызывается потерями энергии. При длительной работе двигателя с постоянной нагрузкой, а, следовательно, с постоянными потерями, температура двигателя превышает температуру охлаждающей среды на определенное значение и наступает тепловое равновесие. Если считать теплоотдачу двигателя пропорциональной разности температур двигателя и среды (температуре перегрева  $\theta$ ), то

$$\theta_y = \frac{\Delta P}{A}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности, Вт;  $A$  – удельная теплоотдача двигателя. Вт/°С.

Установившаяся температура перегрева  $\theta_y$ , прямо пропорциональна потерям мощности и обратно пропорциональна теплоотдаче двигателя.

Удельная теплоотдача определяется по выражению

$$A = \frac{\Delta P_n}{\theta_{y.n.}}, \quad (4.3)$$

где  $\Delta P_n$  – номинальные потери мощности, Вт;  $\theta_{y.n.}$  – номинальная установившаяся температура, °С.

При включении двигателя в работу или при изменении нагрузки наблюдается тепловой переходный процесс.

Для определения температуры  $\theta$  перегрева двигателя в переходном процессе воспользуемся уравнением теплового баланса электродвигателя как однородного твердого тела, все точки которого имеют одинаковую температуру [5; 7]:

$$\Delta P dt = A \theta dt + C d\theta. \quad (4.4)$$

Разделив все члены уравнения (4.4) на  $A dt$ , получим:

$$\frac{\Delta P}{A} = \theta + \frac{C}{A} \cdot \frac{d\theta}{dt}. \quad (4.5)$$

Полагая, что  $\theta_y = \frac{\Delta P}{A}$ , и обозначив буквой  $T$  отношение  $C/A$ , запишем выражение (4.5) в виде:

$$\theta - \theta_y = -T \frac{d\theta}{dt}. \quad (4.6)$$

Это дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс, аналогично уравнению механического переходного процесса в электроприводе с линейной механической характеристикой двигателя.

Тогда температура перегрева двигателя в переходных режимах:

$$\theta = \theta_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \theta_{нач} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4.7)$$

а время нагрева до заданной температуры

$$t = T_m \ln \frac{\theta_{нач} - \theta_y}{\theta_{кон} - \theta_y}. \quad (4.8)$$

Величина  $T$  выражается в секундах или минутах и называется постоянной времени нагрева двигателя. Она представляет собой время, в течение, которого температура двигателя достигнет значения установившейся температуры при постоянных потерях и отсутствии отдачи теплоты в окружающую среду. Для двигателей небольшой мощности  $T=10...20$  мин. Значение  $T$  больше у двигателей тихоходных закрытого исполнения и возрастает с увеличением номинальной мощности.

Постоянную времени нагрева и охлаждения можно определить графически [5; 7] или аналитически, пользуясь равенством  $T=C/A$ . Приняв удельную теплоемкость материалов электродвигателя равной 420 Дж/кг, с учетом (4.4) получим

$$T = \frac{420 m \theta_{y.n}}{\Delta P_n}. \quad (4.9)$$

Так как в электродвигателе наименьшей нагревостойкостью обладают изоляционные материалы, то в основном применяют изоляционные материалы с классами нагревостойкости  $E, B, F, H$ .

В частности, в электродвигателях серии 5А применяют изоляцию из синтетических и неорганических материалов (классы  $E, B, F$ ). Они имеют температурный индекс соответственно 120, 130, 155 °С. Еще более нагревостойкие материалы класса  $H$  применяют во взрывобезопасных двигателях большой мощности.

Срок службы изоляции зависит от температуры, при которой она работает. Повышение рабочей температуры на 10 °С по сравнению с предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое. При температуре более 200 °С двигатель выходит из строя в течение нескольких минут. Вследствие этого

нагрев электродвигателей, как и другого электрооборудования, является основным критерием допустимой нагрузки.

Кроме предельно допустимой температуры нагрева, указывают предельно допустимое превышение температуры двигателя над окружающей средой. Эта величина получается при вычитании из предельно допустимой температуры двигателя номинальной температуры окружающей среды, которая принята равной 40 °С.

Нагрев электродвигателя определяется режимами работы, которые классифицируются на восемь режимов с условными обозначениями от  $S1$  до  $S8$ . Основные номинальные режимы работы: продолжительный  $S1$ , кратковременный  $S2$ , повторно-кратковременный  $S3$ . Дополнительные номинальные режимы: повторно-кратковременный с частыми пусками  $S4$ , повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением  $S5$ , перемежающийся  $S6$ , перемежающийся с частыми реверсами  $S7$ , перемежающийся с изменением частоты вращения  $S8$ .

*Продолжительный режим* ( $S1$ ) характеризуется тем, что температура всех частей электродвигателя при работе с постоянной нагрузкой достигает установившегося значения (рис.4.1). Температуру считают установившейся, если в течение часа работы она изменяется не более чем на 1 °С. Такое состояние в электродвигателе наступает при работе с постоянной нагрузкой в течение времени, равного  $4T$ . При длительности работы, составляющей  $4T$  и более, режим работы продолжительный.

Рассмотрим методику расчета мощности двигателя при продолжительном режиме работы.

Если момент и мощность производственного механизма не изменяются, то должен быть выбран двигатель с номинальной мощностью  $P_n$ , равной мощности нагрузки с учетом потерь в передаче:

$$P_n = \frac{P_M}{\eta_n}, \quad (4.10)$$

где  $\eta_n$  – КПД передачи.

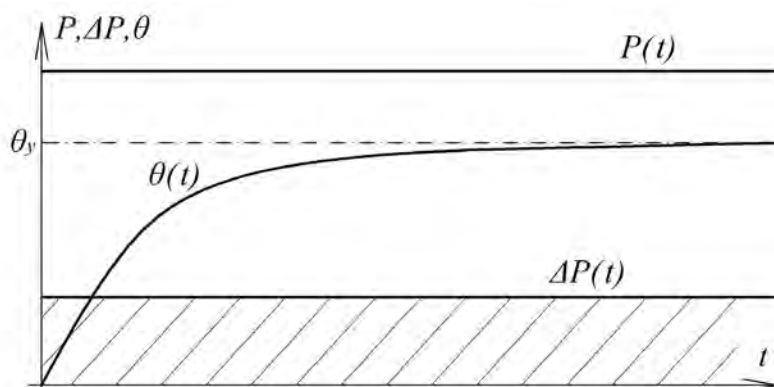


Рис.4.1 Характеристики продолжительного режима работы электродвигателей



Нагрузка на валу электродвигателя может периодически изменяться, при этом периодически меняются потери в двигателе и его температура. Через некоторое время температура двигателя начинает колебаться около средней установившейся температуры:

$$\theta_{y.c} = \frac{\Delta P_c}{A}, \quad (4.11)$$

где  $\Delta P_c$  – среднеарифметическая мощность потерь.

Выбирая электродвигатель по нагреву полагают, что средняя температура двигателя равняется номинальной. Для этого необходимо, чтобы средняя мощность потерь электродвигателя, работающего с переменной нагрузкой, была равна потерям мощности при номинальной нагрузке, то есть

$$\Delta P_n = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (4.12)$$

В практических расчетах этим методом, называемым методом средних потерь, предварительно выбирают двигатель по среднему значению нагрузки, а затем определяют потери для номинальной и частичных нагрузок, пользуясь равенством [5; 8]:

$$\Delta P = \frac{P(1 - \eta)}{\eta}. \quad (4.13)$$

Более удобным является метод среднеквадратичных величин. Считая потери, состоящими из постоянных и переменных, которые пропорциональны квадрату тока, представим выражение для определения эквивалентного тока  $I_\vartheta$ , под которым понимают некоторый по значению продолжительный ток, вызывающий такой же нагрев двигателя, как и действительный изменяющийся ток в рассматриваемый промежуток времени [5; 8]:

$$I_\vartheta = \frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (4.14)$$

В двигателях с неизменным магнитным потоком момент  $M_\vartheta$  электродвигателя прямо пропорционален току, и для них эквивалентный момент вычисляют по формуле [5; 8]:

$$M_\vartheta = \frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (4.15)$$

В асинхронных, синхронных, с независимым возбуждением двигателях мощность практически прямо пропорциональна моменту [5; 8], поэтому

$$P_\vartheta = \frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (4.16)$$

Номинальный момент электродвигателя, требуемый по условиям нагрева,  $M_n \geq M_{\Sigma}$ . Номинальная мощность по условиям нагрева  $P_n \geq P_{\Sigma}$ .

Более подробно методика расчета и выбор мощности электродвигателей продолжительного режима работы представлены в [5; 8].

*Кратковременный режим (S2)* характеризуется тем, что в рабочий период температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а пауза столь продолжительна, что температура двигателя снижается до температуры окружающей среды (рис.4.2). В этом случае продолжительность работы  $t_p < 4T$ , а продолжительность паузы  $t_n > 4T_0$ .

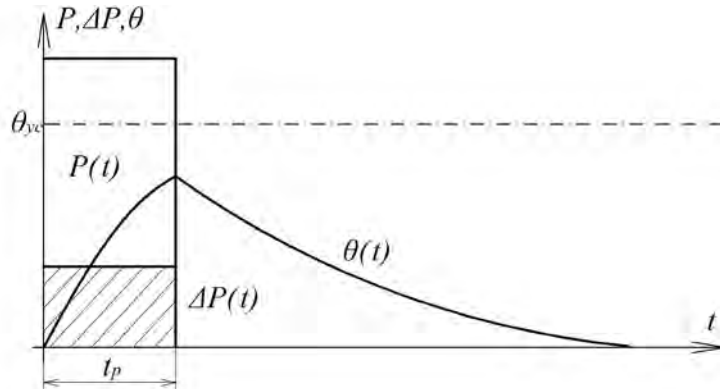


Рис.4.2 Характеристики кратковременного режима работы электродвигателей

Двигатели, специально предназначенные для такого режима, выбирают так, чтобы их номинальная мощность равнялась мощности рабочей машины при соответствующей продолжительности работы.

Для механизмов малой и средней мощности применяют обычные двигатели, предназначенные для продолжительного режима. при этом по условиям нагрева за счет кратковременности работы номинальная мощность их может быть меньше мощности нагрузки.

Считая установившуюся температуру пропорциональной квадрату соответствующих токов и моментов, получим:

$$M_n \geq M_{кр} \sqrt{1 - e^{-t_p / T}}, \quad (4.17)$$

или

$$P_n \geq P_{кр} \sqrt{1 - e^{-t_p / T}}, \quad (4.18)$$

где  $M_{кр}$ ,  $P_{кр}$  — момент и мощность при кратковременной нагрузке;  $t_p$  — продолжительность работы.

Необходимый момент, требуемый по условиям пуска, получается обычно больше, чем момент, вычисленный по условиям нагрева, поэтому окончательный выбор номинальной мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором чаще делают по условиям обеспечения надежного пуска по равенству (4.18).

При *повторно-кратковременном режиме (S3)* кратковременные периоды нагрузки чередуются с непродолжительными периодами отключения двигателя (рис.4.3). При этом  $t_p < 4T$ ;  $t_n < 4T_0$ , то есть ни в одном из периодов температура не достигает установившегося значения, но среднее ее значение  $\theta_{yc}$  устанавливается неизменным. Данный режим характеризуется относительной продолжительностью рабочего периода  $\varepsilon$  и длительностью цикла  $t_u$ :  $\varepsilon = t_p / t_n$   $t_u = t_p + t_n$ . Относительная продолжительность рабочего периода, выраженная в процентах, называется относительной продолжительностью включения и обозначается ПВ%. Номинальной длительностью цикла считают 10 мин.

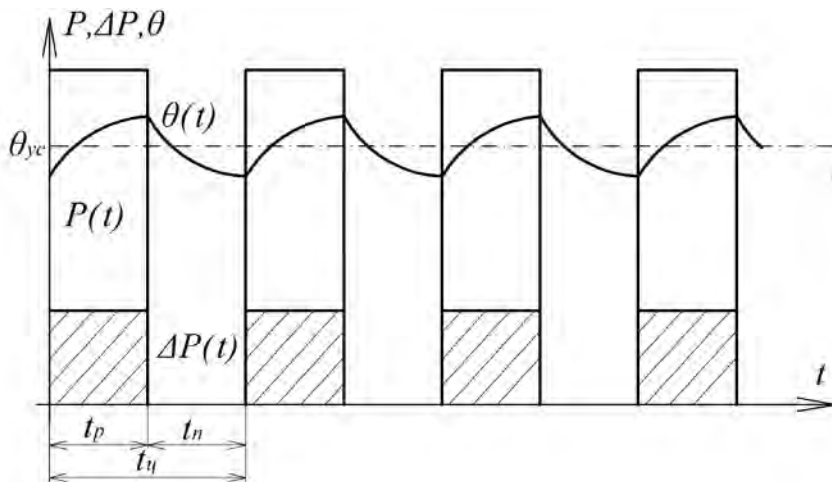


Рис.4.3 Характеристики повторно-кратковременного режима работы электродвигателей

Двигатели для повторно-кратковременного режима могут быть выбраны из серии нормального исполнения либо из серии крановых, специально предназначенных для такой работы.

Двигатели такого режима рассчитаны на стандартные продолжительности работы  $\varepsilon_n$ : 0,15; 0,25; 0,40; 0,60 с длительностью цикла не более 10 мин.

При выборе двигателей мощность их принимают равной мощности нагрузки при соответствующей относительной продолжительности работы рабочей машины. Если относительная продолжительность работы отличается от стандартной, делают перерасчет по выражению

$$P_n = P \sqrt{\varepsilon / \varepsilon_n}, \quad (4.19)$$

где  $P$ ,  $\varepsilon$  — мощность и относительная продолжительность работы машины;  $\varepsilon_n$  — стандартная продолжительность работы.

Для механизмов с повторно-кратковременным режимом работы можно также использовать электродвигатели, рассчитанные по условиям нагрева для продолжительной работы [5; 8]. В этом случае потребную мощность электродвигателей определяют по формуле (4.19) при условии  $\varepsilon_n = 1$ , то есть

$$P_n = P \sqrt{\varepsilon}. \quad (4.20)$$

Однако, чтобы учесть ухудшение охлаждения двигателя во время остановок, паузы сокращают вдвое. При этом обязательно делают проверку по условиям пуска и допустимой перегрузке.

Для выбранного двигателя определяется допустимое число включений в час

$$z = 3600 \frac{(\Delta P_n - \Delta P)\varepsilon + 0,5(1 - \varepsilon)\Delta P_n}{\Delta W}, \quad (4.21)$$

где  $\Delta P_n$  и  $\Delta P$  – мощность потерь при номинальной и фактической нагрузке;  $\Delta W$  – потери энергии в переходных процессах пуска и торможения

Кроме мощности, электродвигатели выбирают по номинальной частоте вращения, принципу работы, роду тока, исполнению по защите от окружающей среды, способу установки [5; 8; 9].

#### **4.1.3. Выбор аппаратуры управления электроприводами**

Аппаратура управления электроприводами служит для пуска, регулирования скорости, торможения, реверсирования и поддержания режима работы привода в соответствии с требованиями технологического процесса. Выбор аппаратов для управления определяется требованиями к электроприводу и теми функциями, которые он должен выполнять. Следовательно, надежная работа электропривода зависит не только от электродвигателя, но и от аппаратуры управления.

Для нерегулируемого электропривода с редкими включениями используют аппаратуру ручного управления: рубильники, переключатели, кнопки управления, кнопочные станции и пр. В автоматизированных электроприводах используется аппаратура автоматического управления с использованием релейно-контактных аппаратов, а также бесконтактных устройств, выполненных на современной элементной базе, компьютеров. Наиболее часто для электроприводов сельскохозяйственного назначения используют контакторы, магнитные пускатели, тиристорные коммутаторы и преобразователи, программируемые логические контроллеры, различные реле [5; 7; 10].

Контакторы переменного тока предназначены для коммутации токов включения и отключения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР), в системах управления электроприводами. Они позволяют также дистанционно управлять цепями освещения, электронагревательными устройствами и прочими потребителями электроэнергии.

Если контактор укомплектован тепловым реле, кнопками управления, то такое устройство называют магнитным пускателем. Контакторы в комплекте с тепловыми реле служат для защиты электродвигателей от перегрузок недопу-

стимой продолжительности и сверхтоков, возникающих при обрыве одной из фаз.

Коммутационная износостойкость магнитных пускателей составляет 0,2...1,7 млн. циклов; механическая износостойкость – 1...2 млн. циклов; время срабатывания при замыкании – 35...80 мс, при размыкании – 20...200 мс.

Конструкции контакторов различны. В настоящее время продолжается выпуск и использование серий ПМЛ с тепловым реле РТЛ, ПМА – с РТТ [10-13]. Выпускается и новое поколение (торговая марка ИЭК): малогабаритные контакторы КМИ с тепловым реле РТИ (ток нагрузки 9 – 95 А), «тяжелые» контакторы КТИ (ток нагрузки 115 – 630 А), а также изделия торговой марки *Dekraft* [5; 7; 10; 12].

Для увеличения числа контактов цепей управления современные серии контакторов снабжаются легкоъемными контактными приставками.

Выбор контакторов производится по:

- типу, степени защиты от воздействия окружающей среды, климатическому исполнению и категории размещения;
- номинальному напряжению  $U_{н.м.н.} \geq U_{сети}$ ;
- номинальному току  $I_{н.м.н.} \geq I_{расч}$ ;
- наличию реверса и теплового реле;
- напряжению втягивающей катушки;
- наличию дополнительных контактов.

Для трехфазного АД с КЗР расчетный ток  $I_{расч}$ , А

$$I_{расч} = \frac{k_3 P_n 10^3}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \eta_n},$$

где  $k_3$  – коэффициент загрузки;  $P_n$  – номинальная мощность, кВт;  $\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности;  $\eta_n$  – номинальный КПД.

Кроме контактных аппаратов в настоящее время успешно используются бесконтактные устройства – тиристорные пускатели [12; 13].

Бесконтактная аппаратура управления электродвигателями, выполненная на базе тириستоров, имеет существенные преимущества перед релейно-контактной аппаратурой: повышенный срок службы и надежность, отсутствие движущихся частей и разрывных контактов, высокая механическая прочность, бесшумность в работе, возможность работы в самых сложных климатических условиях. Тиристорные пускатели обеспечивают быструю замену съемных блоков управления, защиты, индикации в случае неисправности. После монтажа практически не требуют проведения предпусковой наладки [14; 15].

К недостаткам тиристорных коммутаторов можно отнести малую перегрузочную способность, необходимость в высокочувствительной защите, жесткие

требования к тепловому режиму. Электрическая схема, поясняющая принцип действия тиристорного пускателя, представлена на рис.4.4.

При нажатии на кнопку *SB1* возникает ток в цепи управления тиристора *VS1*. Он открывается и ток протекает через нагрузку *M* по фазам *L1* и *L2*. Одновременно формируется сигнал для создания достаточной величины тока в цепи управления тиристора *VS2*, он открывается и ток потечет по фазам *L2* и *L3* нагрузки. Аналогично откроется тиристор *VS3*, что обеспечит ток нагрузки по фазам *L3* и *L1*. Отключение схемы производится кнопкой *SB2*.

*Реле* – это электромагнитные, электромеханические или электронные устройства, предназначенные для коммутации цепей в схемах автоматического управления электроприводами и технологическими процессами.

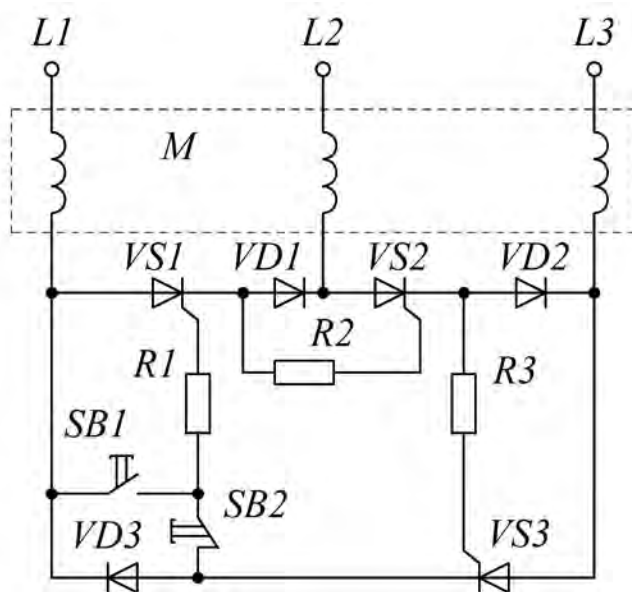


Рис.4.4 Схема тиристорного пускателя

В зависимости от функционального назначения и устройства реле, их можно классифицировать по следующим признакам:

- по функциональному: реле времени, тока, напряжения, мощности, промежуточные, сигнальные и др.;
- по признаку устройства: электромагнитные, электромеханические, магнитоуправляемые (герконы), электронные, электронно-магнитные или комбинированные;
- по роду тока: реле постоянного или переменного тока.

Электромагнитные реле состоят из магнитной системы с катушкой, расположенной на ее неподвижной части, якоря, механически связанного с контактной системой. При подаче напряжения на катушку якорь притягивается и переключает контакты.

Электромеханические реле имеют небольшой исполнительный двигатель, связанный через редуктор с контактной системой. При включении двигателя редуктор вращает барабан, который специальными выступами переключает контакты по заданной программе.

Герконы (герметизированные магнитоуправляемые контакты) представляют, как правило, запаянные в герметизированный баллон контакты, которые могут замыкаться или размыкаться под действием внешнего магнитного поля [11-13].

Электронные реле – бесконтактные устройства, представляющие собой электронные схемы, в которых роль контактов выполняют полупроводниковые приборы, работающие в ключевом режиме: транзисторы, тиристоры и др.

Комбинированное реле – совокупность электронной схемы управления и электромагнитного или электромеханического реле в качестве исполнительного органа.

*Реле времени.* В эту группу входят реле типа ВС, ВЛ, РВ, РВМ, РВП, РЭВ. В схемах управления электроприводами часто используются реле времени типа ВЛ, которые являются комбинированными. Однокомандное с выдержкой времени на включение реле ВЛ-64 предназначено для коммутации электрических сетей с предварительно установленными выдержками времени диапазоном 1-10 с [11-13].

Реле промежуточные постоянного и переменного тока предназначены для работы в цепях управления электроприводами, защиты и автоматики. По признаку устройства являются электромагнитными. В эту группу входят реле типа ПЭ, РЭП, РП, РЭ. РПУ, РПГ, РПЛ. Реле РП-21 предназначено для применения в цепях управления электроприводами переменного тока напряжением до 380 В и в цепях постоянного тока до 220 В. Зарубежным аналогом этого устройства является реле ТР-514, оно имеет четыре замыкающих и четыре размыкающих контакта. Механическая износостойкость не менее 20 млн. циклов [11-13].

*Программируемый логический контроллер (ПЛК)* – компьютеризированное программное управляющее устройство, предназначенное для автоматизации управления технологическими процессами во всех отраслях хозяйства.

Логика работы ПЛК определяется потребителем в процессе программирования контроллера. Программирование осуществляется с помощью программного обеспечения *CoDeSys*. При этом поддерживаются все языки программирования, указанные в МЭК 61131-3.

Контроллер может быть использован как:

- специализированное устройство управления выделенным локализованным объектом;

- устройство мониторинга локализованного объекта в составе комплексной информационной сети;
- специализированное устройство управления и мониторинга группой локализованных объектов в составе комплексной информационной сети.

В контроллере реализованы следующие функции:

- выполнение пользовательской программы работы контроллера (созданной в среде *CoDeSys*);
- снятие измеренных значений со встроенных аналоговых и дискретных входов с последующей передачей их в пользовательскую программу;
- управление встроенными выходными устройствами контроллера из пользовательской программы;
- расширение количества выходных устройств с использованием модуля MP1, подключаемого к контроллеру по специальному интерфейсу;
- обмен данными по интерфейсам *RS-485* и *RS-232*;
- отображение символьных данных, формируемых в пользовательской программе, на ЖКИ;
- отсчет реального времени встроенными часами с автономным источником питания;
- настройка параметров функционирования встроенных входов, выходов и прочего периферийного оборудования контроллера и сохранение значений конфигурационных параметров в энергонезависимой памяти;
- изменение значений конфигурационных параметров контроллера на ЖКИ с помощью встроенной клавиатуры;
- изменение значений параметров из среды программирования *CoDeSys*.

#### **4.1.4. Выбор аппаратуры защиты электроприводов**

В зависимости от характера возможных повреждений и аварийных режимов работы различают несколько основных, наиболее распространённых видов электрической защиты асинхронных двигателей:

*Защита от токов короткого замыкания* в соответствии с [3-5] обязательна для всех электроприёмников. Она должна действовать с минимальным временем отключения, быть отстроенной от пусковых токов.

*Защита от токов перегрузки* обеспечивает отключение двигателя с небольшой выдержкой времени. Двигатель должен отключаться тем быстрее, чем больше его перегрузка по току.

*Защита от понижения или исчезновения напряжения* (нулевая защита) должна предусматриваться для электродвигателей, самозапуск которых после исчезновения и последующего восстановления напряжения недопустим по тех-



нологическим причинам и представляет опасность для обсуживающего персонала; для электродвигателей с фазными ротором, включение которых в сеть при роторе, замкнутом накоротко, недопустимо.

*Защита от работы на двух фазах* предохраняет двигатель от перегрева, а также от “опрокидывания” (остановки под током вследствие снижения момента, развиваемого двигателем при обрыве одной из фаз главной цепи). Защита действует на отключение двигателя. Обычно этот вид защиты совмещают с защитой от недопустимой несимметрии питающего напряжения по фазам сети.

От правильного выбора аппаратуры защиты в значительной степени зависит надежность и сохранность оборудования, электробезопасность людей и животных. Всегда следует стремиться к тому, чтобы защита была по возможности простой и надежной в эксплуатации.

### **Предохранители.**

*Предохранитель* – самый простой и дешевый аппарат защиты от коротких замыканий и токовых перегрузок. Они характеризуются следующими параметрами: номинальным напряжением и током, номинальным током плавкой вставки, предельно отключаемым током [4; 5].

Существует большое количество различных конструкций предохранителей низкого напряжения. В схемах электроприводов наиболее широкое распространение получили предохранители типа ПР, ПН, быстродействующие предохранители типа ППБ [4; 5 12].

Выбор плавких предохранителей производится по:

- номинальному напряжению  $U_{н.н} \geq U_{сети}$ ;
- номинальному току предохранителя  $I_{н.н} \geq I_{раб}$ , где  $I_{раб}$  – рабочий ток;
- номинальному току плавкой вставки  $I_{н.в}$ :
  - для защиты одиночного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР)  $I_{н.в} = I_n / \alpha = K_i I_{н.дв} / \alpha$ , где  $I_n$  – пусковой ток, А;  $K_i$  – кратность пускового тока;  $I_{н.дв}$  – номинальный ток АД, А;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от длительности пуска;
  - для защиты одиночного АД с фазным ротором, пускаемого с использованием реостата в цепи ротора  $I_{н.в} = (1...1,25) I_{н.дв}$ ;
  - для защиты группы АД с КЗР –  $I_{н.в} = (\sum_l^{n-1} I_{н.дв} + I_{n\max}) / \alpha$ , где  $\sum_l^{n-1} I_{н.дв}$  –

сумма номинальных токов одновременно работающих АД без учета двигателя с наибольшим пусковым током, А;  $I_{n\max}$  – наибольший пусковой ток АД этой группы, А.

Стандартную плавкую вставку выбирают на ток, ближайший к расчетному значению.

При проверке предохранителей обязательно учитывают требования селективности: при коротком замыкании должна сгореть плавкая вставка ближайшего к месту аварии предохранителя. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы ток вставки следующего в направлении источника питания предохранителя был бы как минимум на ступень выше предыдущего.

### **Тепловые реле.**

Тепловые реле серии РТЛ, РТТ, РТИ, РТ [4; 5; 10; 11] предназначены для защиты трёхфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от токов перегрузок недопустимой продолжительности и токов, возникающих при обрыве одной из фаз.

Основной составной частью тепловых реле являются нагревательные элементы, которые включаются последовательно в каждую фазу силовой цепи АД. Нагревательный элемент содержит биметаллическую пластину со спиралью. При протекании по ней тока нагрузки пластина нагревается, изгибается и воздействует на размыкающий (или переключающий) контакт реле. АД отключается. Тепловое реле содержит регулятор тока уставки, позволяющий изменять ток срабатывания.

Номинальный ток теплового элемента реле выбирают по номинальному току защищаемого двигателя так, чтобы последний находился в зоне регулирования тока уставки:

$$I_{\min p} < I_{H.ДВ} < I_{\max p},$$

где  $I_{\min p}$ ,  $I_{\max p}$  – границы изменения тока уставки теплового реле, А;  
 $I_{H.ДВ}$  – номинальный ток электродвигателя, А.

### **Реле максимального тока.**

Эти реле предназначены для защиты мощных АД от токов короткого замыкания и перегрузки.

Преимущество защиты с помощью реле максимального тока перед плавкими предохранителями состоит в том, что эти реле обладают многократностью действия, обеспечивают одновременное отключение всех трех фаз главной цепи. Они позволяют осуществить отстройку защиты от пусковых и тормозных токов двигателя без снижения быстродействия и надежности срабатывания [5; 10; 11].

Реле максимального тока представляет собой электромагнитный механизм с подвижным якорем. Когда через катушку реле протекает ток, превышающий по величине ток срабатывания, якорь реле притягивается. При этом контакт реле обеспечивает отключение двигателя.

Ток уставки реле максимального тока с учетом неточности их срабаты-

ния и возможных отклонений действительного пускового тока АД с КЗР от паспортного значения  $I_{пуск}$  определится по формуле:

$$I_{уст} \geq (1,3...1,5)I_{пуск}.$$

Для двигателей с фазным ротором

$$I_{уст} \geq (2,25...2,5)I_{н.дв.}$$

В случае включения катушки реле через трансформатор тока

$$I_{уст} \geq \frac{(1,3...1,5)I_{пуск}}{K_T},$$

где  $K_T$  – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Реле максимального тока применяются также для защиты двигателей (в основном при повторно-кратковременном режиме работы) от чрезмерных перегрузок, вызванных пиками технологической нагрузки, от затянувшегося пуска и заклинивания ротора двигателя. При этом защита выполняется по-разному для короткозамкнутых двигателей и для двигателей с фазным ротором. Чтобы защита от перегрузки не срабатывала при нормальном пуске короткозамкнутого двигателя (в реверсивных схемах – при реверсе), а также при кратковременных пиках нагрузки, она должна действовать с замедлением.

#### **Универсальная встроенная температурная защита (УВТЗ).**

Наиболее совершенным устройством защиты электродвигателей от коротких замыканий и перегрузок является универсальная встроенная температурная защита. Защита типа УВТЗ предназначена для отключения электродвигателей при любых аварийных режимах: короткое замыкание, длительная перегрузка, обрыв фазы, заклинивание механизмов, повышенная температура окружающей среды, нарушение охлаждения. Во всех этих случаях температура статорных обмоток двигателя достигает опасных значений.

Разработано несколько модификаций устройств УВТЗ, работающих совместно с позисторами, встроенными в статорные обмотки электродвигателей. В каждую фазу обмотки статора встраивается по одному позистору, которые соединяются последовательно.

#### **Автоматические воздушные выключатели (автоматы).**

*Автоматы* – это электрические аппараты, предназначенные для автоматического отключения цепей при аварийных режимах работы (короткие замыкания, перегрузки, понижение напряжения), а также для нечастых включений и отключений номинальных токов нагрузки при нормальных режимах работы.

В отличие от плавких предохранителей автоматы при срабатывании не создают неполнофазных режимов, обеспечивают повторное включения после срабатывания, а также совмещают функции рубильника, предохранителя и теплового реле.

Основными элементами конструкции автоматических выключателей яв-

ляются: контактная система, дугогасительная система, привод, механизм свободного расцепления, расцепители.

Контактная система автомата должна длительно без перегрева пропускать номинальные токи и быть способной выключать большие токи короткого замыкания.

Выбор автоматов производится по:

- номинальному напряжению  $U_{н.ав} \geq U_{сети}$ ;
- номинальному току автоматического выключателя  $I_{н.ав} \geq I_{расч}$ .

Проверить пригодность автоматического выключателя для защиты от коротких замыканий можно, используя кривые отключения  $B, C, D$  [7; 15]:

- кривая  $B$  – автомат срабатывает при появлении в цепи тока в 3-5 раз больше номинального;
- кривая  $C$  – ток в цепи в 5-10 раз больше номинального;
- кривая  $D$  – ток в цепи в 10-14 раз больше номинального.

В сельскохозяйственном производстве наибольшее распространение получили автоматы торговых марок ДЕКraft, ИЭК, АВВ и др. [5; 10; 12; 15].

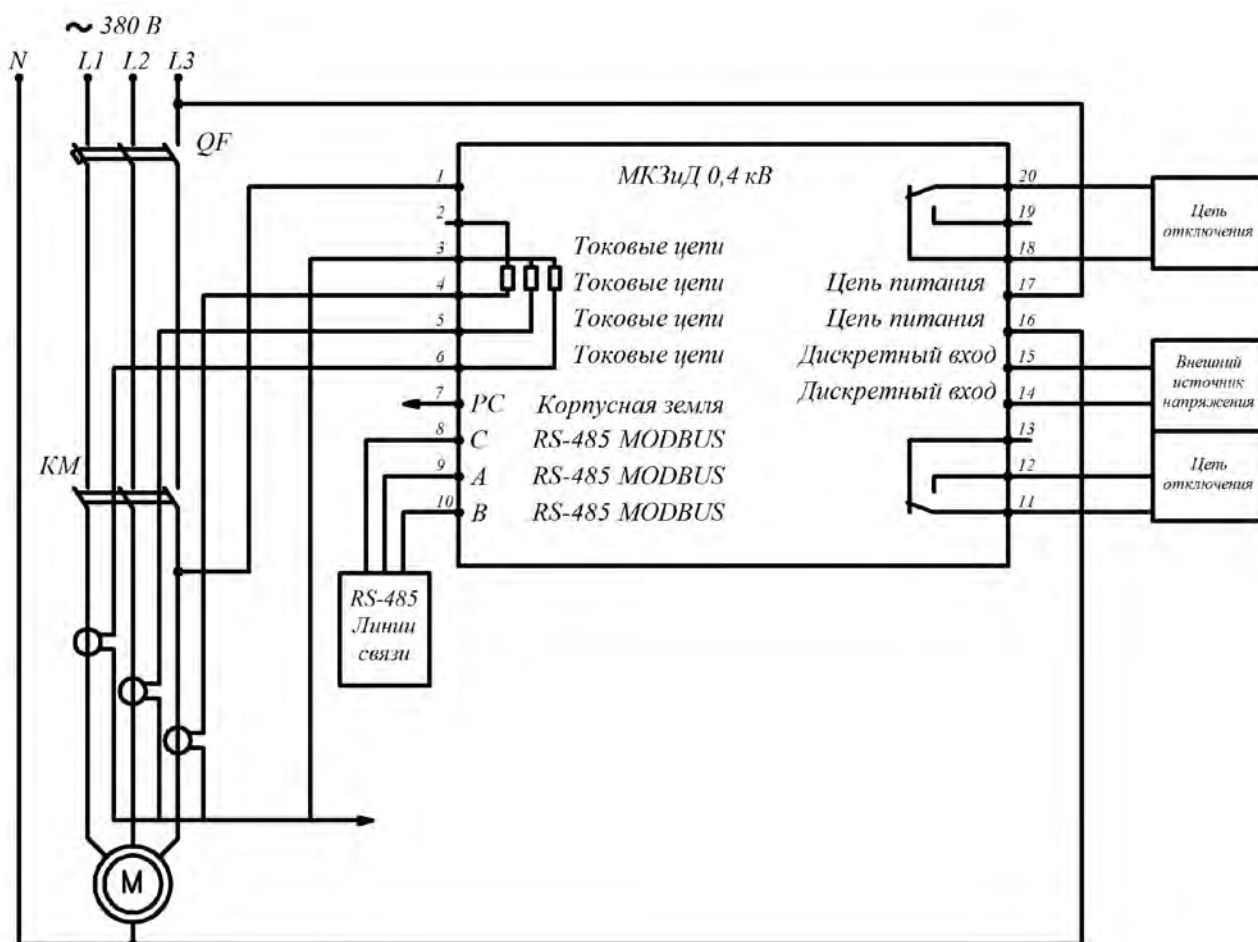


Рис.4.6 Схема подключения устройства защиты асинхронных электродвигателей

## **Устройство микроконтроллерное для защиты асинхронных электродвигателей.**

Микроконтроллерное устройство защиты и диагностики электродвигателей 0,4 кВ (МКЗиД-0,4) предназначено для защиты асинхронных электродвигателей 0,4 кВ и диагностики агрегатов «электродвигатель-механизм» [12]. Схема подключения МКЗиД-0,4 показана на рис.4.5.

Применение МКЗиД-0,4 позволяет:

- своевременно отключать поврежденный электродвигатель от питающей сети во избежание развития аварийного режима;
- уменьшить размеры разрушения электродвигателя путем его отключения на ранней стадии повреждения;
- предупредить повреждения электродвигателя при его работе в ненормальных режимах;
- вести диагностику рабочих механизмов путем анализа электрических параметров электродвигателя.

Основные характеристики защиты:

1. Защита от симметричной перегрузки:
  - имеет интегрально-зависимую характеристику срабатывания, максимально приближенную к перегрузочной характеристике электродвигателя;
  - после отключения электродвигателя (устранения перегрузки) имитирует охлаждение электродвигателя, запрещая повторный пуск при остаточном тепловом импульсе, превышающем контрольное значение;
  - осуществляет диагностику агрегата «электродвигатель-механизм» при очередном пуске путем сравнения приращения теплового импульса за время пуска с контрольным значением;
  - имеет возможность программного изменения характеристики срабатывания в зависимости от параметров электродвигателя, изменения тока срабатывания, постоянной времени охлаждения.
2. Защита от несимметрии фазных токов и витковых замыканий:
  - действует по единому алгоритму, не идентифицируя отдельно режим виткового замыкания и режим несимметричной перегрузки;
  - имеет независимую выдержку времени, согласованную с максимальной выдержкой времени защит от несимметричных коротких замыканий прилегающей сети.
3. Защита от междофазных коротких замыканий (токовая отсечка) действует без выдержки времени (собственное время срабатывания 0,03-0,04 с), отстраивается от пусковых токов электродвигателя.
4. Защита от недопустимой пульсирующей нагрузки:

- предназначена для предупреждения повреждения агрегата «электродвигатель – механизм» при возникновении устойчивого пульсирующего момента на валу электродвигателя, величина которого превышает допустимое для рабочего механизма значение;
  - выявляет периодически действующий с частотой вращения агрегата ( $<25$  Гц) пульсирующий момент, амплитуда которого превышает постоянно действующий момент на валу электродвигателя;
  - действует с выдержкой времени на сигнал или отключение.
5. Контроль уровня изоляции обмотки статора относительно корпуса отключенного электродвигателя:
- устройство обеспечивает автоматический переход в режим измерения сопротивления изоляции при отключении электродвигателя;
  - устройство предотвращает включение электродвигателя при снижении сопротивления изоляции ниже допустимого уровня (500 кОм).
6. Возможность передачи контролируемых параметров и логических сигналов по последовательному каналу связи (интерфейс RS-485) на расстояние до 1,5 км.

## **4.2. Проектирование электроприводов с двигателями линейного движения**

### **4.2.1. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в технологиях сельхозпроизводства**

В настоящее время импульсные и вибрационные методы интенсификации технологических процессов получили широкое распространение в технике и применяются, в том числе, на предприятиях и объектах АПК. Несмотря на то, что технологии сельскохозяйственной отрасли отличаются значительным разнообразием и во многих случаях сложнее промышленных, считается доказанным, что применение механических импульсов и колебаний снижает энергозатраты и повышает эффективность обработки почвы, внесения удобрений, уборочных и послеуборочных процессов, операций в животноводстве, проведения ремонта сельскохозяйственной техники. Результативность такого применения существенно зависит от обоснованности и рациональности выбора и использования средств возбуждения колебаний и импульсов.

Оценить уровень и определить тенденции развития и применения силовых систем с импульсными машинами в технике, в технологиях и процессах АПК, в частности, позволяет их систематизация. В основу обобщенной классификации, предложенной, например, в [12; 15], положено шесть основных признаков:

- принцип действия инструмента и технологическое назначение машины;
- способ применения, передвижения и масса машины;
- вид подводимой энергии и тип двигателя;
- взаимосвязь двигателя с импульсным механизмом;
- принцип действия импульсного механизма;
- способ передачи механической энергии двигателя инструменту.

Сопоставление данных различных источников [4; 5; 15-17], сравнение характерных свойств множества конструктивных схем пневматических, гидравлических и электрических импульсных машин позволяет представить классификацию в виде рис.4.7.

Широкие номенклатура, области и масштабы применения гидро- и пневмоимпульсных машин в различных отраслях производства обусловлены их неоспоримыми достоинствами, такими как относительно высокая мощность при малых габаритных размерах и массе, возможность эксплуатации в самых неблагоприятных условиях, безопасность, мобильность, надежность, большой технический ресурс.

К особенностям, сдерживающим или ограничивающим их использование, следует отнести:

- громоздкую и дорогую систему приготовления рабочего тела (энергоносителя) с высокими показателями, содержащую маслостанцию, стационарное компрессорное оборудование (передвижной компрессор), пневмосеть и др.;
- низкий общий КПД системы (0,12...0,15);
- требования к качеству масел;
- высокий уровень шума при выхлопе сжатого воздуха;
- значительное усилие поджатия, необходимое для нормальной работы некоторых типов ручных машин и др.

При оценке возможности или предпочтительности применения силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС) в тех или иных технологиях или на объектах АПК их следует условно разделить на стационарные и мобильные; навесного исполнения, переносные и ручные; импульсные ударного действия и безударные, силовые; редкоударные (менее 0,1 Гц) или с относительно большой (до 10 Гц) необходимой частотой повторений рабочих циклов; по значению перемещений рабочего органа машины – короткоходовые (до 100 мм) и длинноходовые (>500 мм).

Обобщенная структурная схема СЭМИС представляется энергетической и информационной частями (каналами). Источник питания и преобразователи энергии – электрический, электромеханический и механический – образуют

энергетический (силовой) канал; устройства управления преобразуемой энергией составляют информационный канал (рис.4.8) [17].

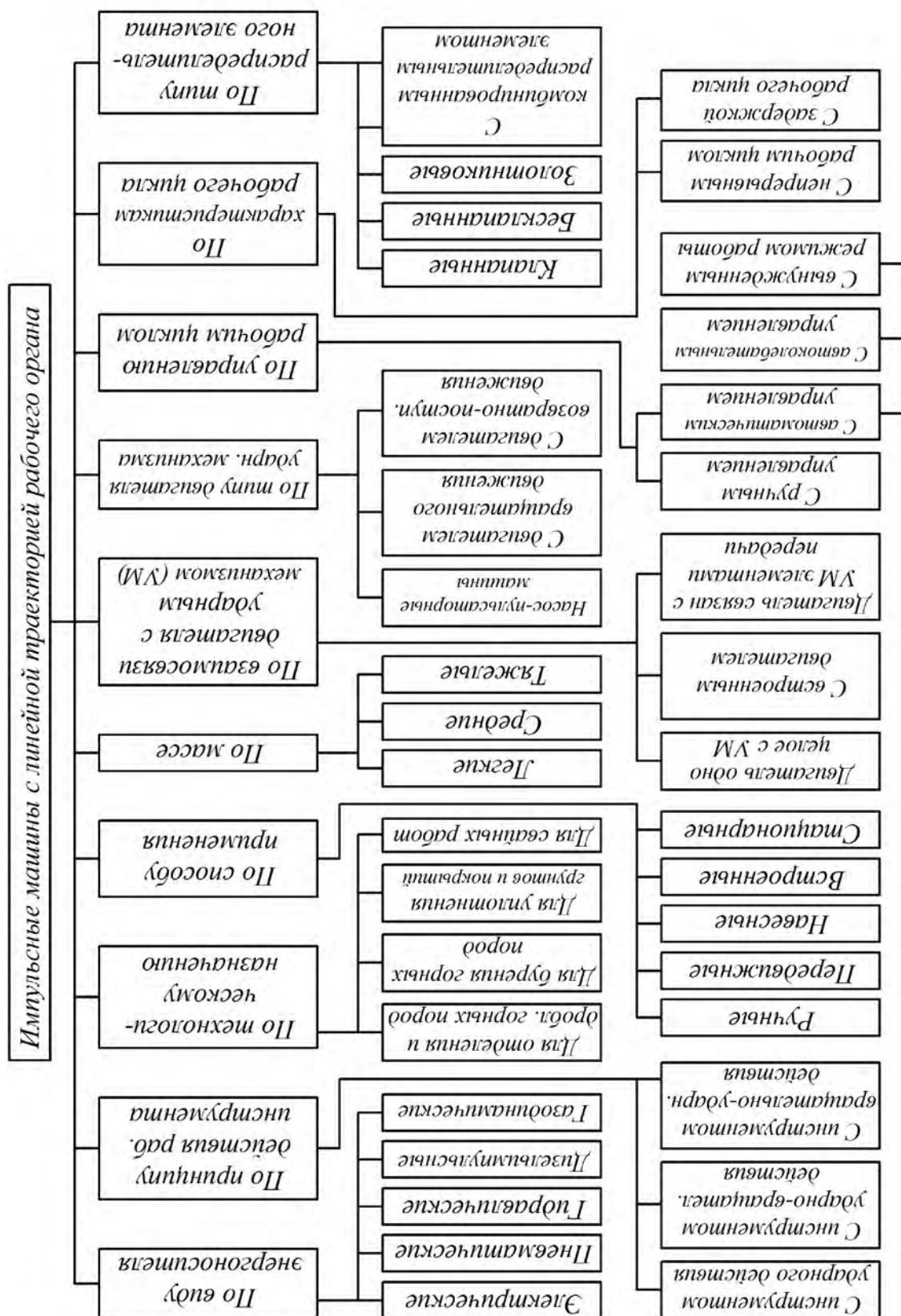


Рис. 4.7 Классификация машин ударного действия



Выделенными линиями показан минимально необходимый (базовый) набор структурных элементов, без которых СЭМИС существовать и функционировать не может. Включение в схему остальных блоков либо придает системе новые потребительские свойства и расширяет области её применения, либо позволяет повысить эффективность работы частей или всей системы, например, за счет дополнительных управляющих воздействий. Двухнаправленные стрелки отражают возможность передачи энергии между структурными элементами, в общем случае, в любом направлении.

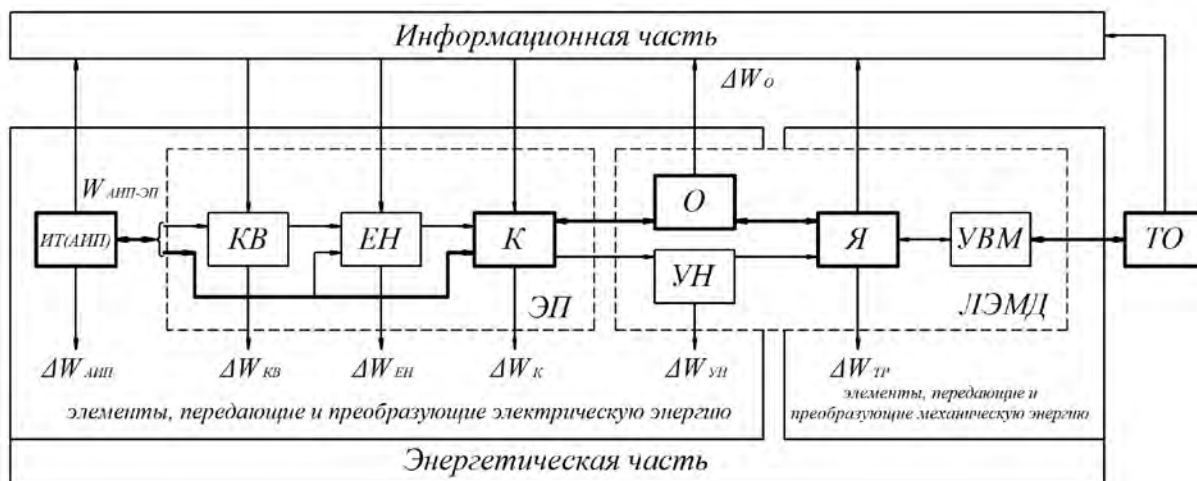


Рис.4.8 Обобщенная структурная схема СЭМИС

Импульсная машина с линейным электромагнитным двигателем (ЛЭМД) осуществляет в СЭМИС главную энергетическую функцию системы – преобразует электрическую энергию источника в механическую энергию подвижной части (якоря  $Я$ ) и обеспечивает необходимые характеристики движения. При этом электромагнитомеханическим преобразователям свойственны двухступенчатые энергопреобразовательные циклы, в которых на первом этапе поступающая в обмотку  $О$  электрическая энергия источника частично превращается в энергию магнитного поля и аккумулируется в магнитной системе, создавая возрастающую пондеромоторную силу, которая и обеспечивает перемещение и механическую мощность подвижной части на втором этапе цикла. Роль и значение показанных на структурной схеме других функциональных блоков представлены в [17].

#### 4.2.2. Определение геометрических соотношений магнитных систем ЛЭМД

При обосновании конструкций приводов импульсных машин необходимо выбрать рациональный тип магнитной системы ЛЭМД, который в значительной мере определяет конструкцию и параметры машины. Наиболее предпочти-

тельным в приводе ударных машин является цилиндрический броневой электромагнитный двигатель, обладающий высокими энергетическими показателями, простотой и технологичностью изготовления [18].

При этом, из существующего относительного многообразия типов магнитных систем таких двигателей здесь представлены лишь три характерные конфигурации магнитной системы ЛЭМД: с притягивающимся якорем, с втягивающимся и с комбинированным (рис.4.9).

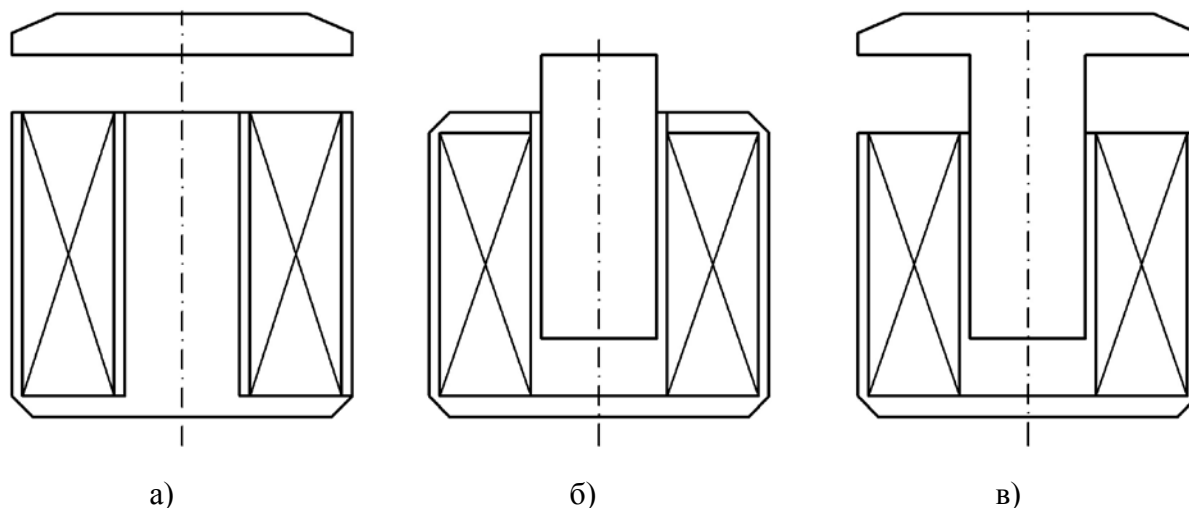


Рис.4.9 Типы магнитных систем цилиндрических ЛЭМД; а – с притягивающимся якорем, б – с втягивающимся якорем, в – с комбинированным якорем.

Потенциальные возможности двигателей с представленными магнитными системами удобно сопоставить, сравнив, например, механизм формирования пондеромоторной силы и наиболее показательные силовые и энергетические характеристики статического режима ЛЭМД. Результаты таких исследований подробно рассмотрены в [17-19]. В частности, в [19] показано, что сила тяги ЛЭМД с притягивающимся якорем (рис.4.9,а) обусловлена магнитным потоком в рабочем зазоре и потоками выпучивания. Потоки рассеяния между средним полюсом и ярмом не участвуют в создании тягового усилия и приводят к потере МДС.

В ЛЭМД втяжного типа (рис.4.9,б) тяговое усилие обусловлено магнитными потоками: в рабочем зазоре, рассеяния и выпучивания. Площадь рабочего зазора вдвое меньше, чем у ЛЭМД с притягивающимся якорем.

С целью максимального использования магнитного потока системы, увеличения запасаемой магнитной энергии, исключения паразитных зазоров, увеличения поверхности якоря, взаимодействующего с ярмом, предложены ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами (рис.4.9,в) [19].

Исследование и анализ статических характеристик магнитных систем трех типов [18; 19] показывают, что двигатели с притягивающимся и втягивающимся

якорем существенно уступают по тяговому усилию ЛЭМД с комбинированным якорем (рис.4.9,в) в начале хода в 4 раза, в конце хода 1,2 раза.

Сравнение магнитных систем по интегральной работе  $A_u$  [18; 19] выявило, что высокое значение  $A_u$  имеет ЛЭМД с комбинированным якорем, превосходящее  $A_u$  двигателя с притягивающимся якорем в 3 раза.

При одинаковой массе  $m_3$  удельные, на единицу массы активных материалов, показатели (максимальное усилие  $F_{эм}$  и интегральная работа  $A_3$ ) ЛЭМД с притягивающимся и втягивающимся якорем существенно уступают аналогичным показателям двигателя с комбинированным якорем (таблица 4.1) [18; 19].

Таблица 4.1

Удельные показатели электромагнитных двигателей

Тип магнитной системы	Критерии, %	
	$F_{эм}/m_3$	$A_u/m_3$
С притягивающимся якорем	80	32,4
С втягивающимся якорем	52	43,6
С комбинированным якорем	91	66,4

Анализ зависимости магнитного КПД исследуемых линейных двигателей в функции рабочего зазора и тока показал, что магнитный КПД ЛЭМД с комбинированным якорем на 10 – 15% выше, чем у ЛЭМД с притягивающимся якорем.

Исследования и сравнительный анализ магнитных систем свидетельствуют, что импульсные машины с ЛЭМД с комбинированным якорем обладают необходимыми удельными энергетическими показателями, позволяют получать высокую частоту ударов бойка, имеют приемлемые габариты и массу.

Применение в приводе импульсных машин линейных электромагнитных двигателей предполагает расчет их основных конструктивных параметров (геометрических размеров магнитопровода, обмоточных данных и т.д.) по заданным выходным параметрам машины. Оптимальные соотношения этих параметров оказывают непосредственное влияние на процессы энергопреобразования в ЛЭМД, на показатели использования его активных материалов и на величину совершаемой им механической работы.

Важнейшим энергетическим показателем машин с ЛЭМД, в частности, машин ударного действия служит выходная механическая энергия  $A_y$  (энергия удара якоря), которая определяется его кинетической энергией в момент соударения с нагрузкой.

Для примера здесь приведен краткий расчет импульсной машины с энергией  $A_y=25...50$  Дж [18; 19], который выполнен при следующих допущениях: сечение стали вдоль магнитной цепи неизменно; магнитопровод при нулевом

рабочем зазоре ( $\delta=0$ ) насыщен, при начальном ( $\delta=\delta_H$ ) не насыщен; ток во время движения якоря остается неизменным, режим работы ЛЭМД кратковременный.

В качестве базисного размера магнитопровода двигателя принят радиус втяжной части якоря  $r_I$  (рис.4.10).

$$r_I = \sqrt[3]{(A_H / 3\pi B_B a_1 b_1 b_2)^2}, \quad (4.22)$$

где  $A_H$  – интегральная работа ЛЭМД;  $B_B$  – базисное значение магнитной индукции ( $B_B=1\text{Тл}$ );  $a_1, b_1, b_2$  – постоянные коэффициенты.

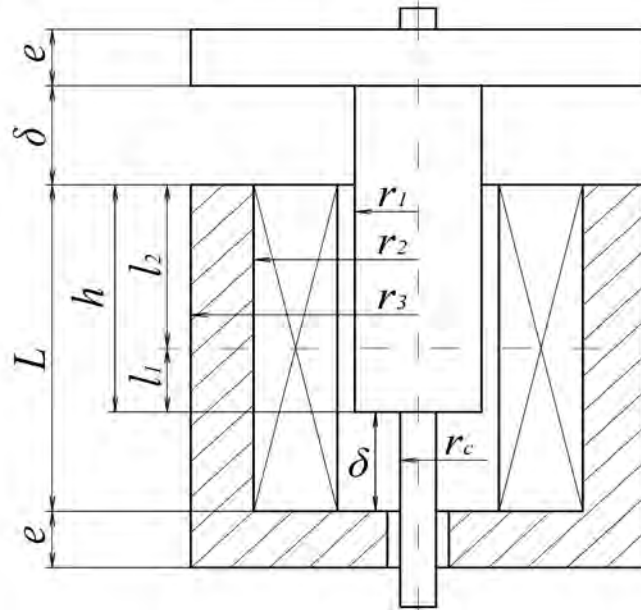


Рис.4.10 Расчетная конструктивная схема импульсного ЛЭМД

Поскольку интегральная работа  $A_H$  является показателем статического режима, а геометрические размеры ЛЭМД должны определяться исходя из показателей  $A_y=25\ldots 50$  Дж динамического режима, то для установления соотношения между  $A_H$  и  $A_y$  удобно использовать принцип взаимности [20], являющийся одним из обобщенных методов научного познания физических процессов в динамических системах:

$$A_y = 0,5 A_H, \text{ или } A_H = 2 A_y, \quad (4.23)$$

$$a_I = \sqrt{2K_T K_{3M} \tau \alpha' / (ПВ \rho_\tau)}; b_I = \sqrt{(x-1)[1+(x-1)/y]}; b_2 = \bar{B}_k (1-q) - 0,5 \bar{\psi}_H, \quad (4.24)$$

где  $K_T$  – коэффициент теплоотдачи;  $K_{3M}$  – коэффициент заполнения обмотки;  $\rho_\tau$  – удельное сопротивление провода;  $\tau$  – превышение температуры;  $ПВ$  – продолжительность включения;  $\alpha'$  – эмпирический коэффициент, учитывающий условия теплоотдачи ( $\alpha'=0,9\ldots 2,4$ );  $x, y$  – безразмерные параметры ( $x=r_2/r_I=1,5\ldots 1,6$ ;  $y=l_K/r_I=2\ldots 3$ );  $\bar{B}_k$  – относительное значение индукции магнитопровода при  $\delta=0$ ;  $\bar{\psi}_H$  – относительная величина начального потокоцепления;  $q$  – постоянный коэффициент.

$$q=0,5(\alpha+\beta\bar{B}_k^4/3+\xi\bar{B}_k^8/5)/(\alpha+\beta\bar{B}_k^4+\xi\bar{B}_k^8), \quad (4.25)$$

где  $\alpha, \beta, \xi$  – коэффициенты аппроксимации.

Для рассматриваемых в работе [17-19] значений параметров  $x$  и  $y$  внешний радиус обмотки  $r_2$  и ее длина  $l_k$ :

$$r_2=(1,5\dots 1,6)r_1; \quad l_k=3r_1. \quad (4.26)$$

Наружный радиус статора и толщина фланца:

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad e=0,5r_1. \quad (4.27)$$

Радиус нижнего направляющего стержня [17-19]:

$$r_c=0,32r_1. \quad (4.28)$$

Объемы активных материалов двигателя  $V_d$ , обмотки  $V_M$ , магнитопровода  $V_{CT}$  и якоря  $V_Y$ :

$$V_d = \pi r_l^3 (x^2 + 1)(y + 2\bar{e}); \quad V_M = \pi r_l^3 y(x^2 - 1); \quad V_{CT} = \pi r_l^3 (x^2 + 2y + 1); \\ V_Y = \pi r_l^2 (l_k + e(1 + x^2)). \quad (4.29)$$

#### 4.2.3. Тепловые процессы в ЛЭМД

Энергопреобразование в линейных электромагнитных двигателях сопровождается необратимыми потерями, проявляющимися в виде теплоты, образование которой в их активных частях нарушает тепловую однородность. Это ведет к перетоку теплоты от токоведущих частей к другим элементам ЛЭМД во внешнюю среду. При этом работа ЛЭМД сопровождается движением воздуха внутри него, а отвод теплоты осуществляется за счет перемещения внешней среды. Таким образом, двигатель является не только электромеханической, но и тепловой и гидравлической системой [17].

Обеспечение определенного температурного режима является основной задачей организации охлаждения ЛЭМД импульсных машин. Решение ее состоит в обеспечении рационального сочетания источников тепловыделения и стоков теплоты [17].

Основными источниками тепловыделения в ЛЭМД являются активные части – обмотка и статор.

Потери в меди двигателя определяются сопротивлением обмотки и квадратом тока:

$$\Delta P_m = I^2 r = I^2 \rho \frac{l}{S}, \quad (4.30)$$

где  $\rho = \rho_{293}[1 + \beta(T - 293)]$  – удельное сопротивление медного проводника;  $\rho_{293}$  – удельное сопротивление медного проводника при  $T=293$  К;  $\beta$  – температурный коэффициент сопротивления;  $T$  – температура обмотки;  $l$  – длина проводника;  $S$  – поперечное сечение проводника [17].

Потери в стали зависят, в частности, от геометрии деталей якоря и статора ЛЭМД и не превышают 7 % [19].

Для достижения установившегося температурного режима двигателя систему теплоисточников необходимо дополнить стоком теплоты, мощность которого равна суммарной мощности источников. Такой сток обеспечивается путем контакта границ тепловыделяющих элементов с внешней средой, имеющей постоянную температуру. Исследование такого стока определяет наличие в тепловой системе двух видов теплопереноса: теплопроводности в твердых телах и конвекции на границе их с внешней средой [17].

Перенос теплоты теплопроводностью определяется законом Фурье:

$$q_{\lambda} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (4.31)$$

который связывает плотность теплового потока  $q_{\lambda}$  в направлении нормали  $n$  к изотермической поверхности с градиентом температуры  $\theta$ . При этом интенсивность теплопереноса характеризуется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ .

Конвективный перенос теплоты описывается законом Ньютона-Рихмана:

$$q_{\alpha} = \alpha (\theta_{cp} - \theta_{окр}), \quad (4.32)$$

устанавливающим связь плотности теплового потока на границе  $q_{\alpha}$  с разностью температур этой границы  $\theta_{cp}$  и окружающей среды  $\theta_{окр}$ . Интенсивность теплопереноса характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

Как видно из выражений (4.31), (4.32), чем больше расстояние между источником и стоком теплоты, тем выше температура источника при фиксированной температуре стока, а чем больше поверхность, соответствующая границе системы, тем меньше перепады температуры. Следовательно, при организации и размещении теплостоков необходимо разделять их на несколько в соответствии с числом источников теплоты. При этом стоки следует размещать в непосредственной близости от источников, избегая наличия между ними пассивных элементов [17].

Для получения значений температур, позволяющих определить зоны наибольшего нагрева ЛЭМД, и формулирования обоснованных рекомендаций по совершенствованию систем принудительного охлаждения важным является тепловой и гидравлический расчет двигателя.

Наиболее строгим является метод температурного поля, при котором решается дифференциальное уравнение (4.33) при граничных условиях (4.34)-(4.36) для электромашины в целом или для части ее, определяемой тепловой симметрией или периодичностью [17].

$$\nabla(\lambda \nabla T) + \frac{P_a}{V_a} = 0, \quad (4.33)$$

$$q(x, y, z)_{zp} = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{zp}, \quad (4.34)$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{zp} = \alpha (T_{zp} - T_0), \quad (4.35)$$

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{z,k} = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_{z,k}, \quad (4.36)$$

где  $P_a$  – тепловыделение;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T$  – температура;  $x, y, z$  – координаты.

В общем случае необходимо учитывать зависимость тепловыделения  $P_a$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от температуры  $T$  и координат  $x, y, z$  при граничном условии III рода на поверхностях, обдуваемых воздухом переменной температуры  $T_0$ , и условия  $\partial T / \partial n = 0$  на остальных поверхностях.

Решение такой задачи возможно только с применением численных методов, например метода конечных разностей и метода конечных элементов [17]. Принципиальных трудностей расчет этим методом трехмерного поля температуры в электромашинах не имеет, однако он не применяется. В настоящее время трехмерную задачу расчета температурного поля электромашин сводят к двумерной и решают её численно или аналитически (в последнем случае вводятся ряд дополнительных допущений). В ЛЭМД с естественной вентиляцией приходится учитывать взаимное влияние всех элементов и расчетная область получается слишком сложной. Поэтому здесь ограничиваются расчетом поля в наиболее теплонапряженных элементах – в обмотке и статоре.

Характерными для теплового расчета электромагнитных двигателей являются методы: температурных полей, эквивалентных греющих потерь, тепловых схем замещения [17] и др. С достаточной для практических целей точностью расчет удобно производить методом тепловых схем замещения (ТСЗ) со следующими допущениями:

- коэффициент теплопроводности не зависит от температуры;
- теплоотдающие поверхности считаются теплоэквивалентными;
- источники теплоты в обмотке равномерно распределены по ее объему;
- температурное поле считается близким к стационарному.

При расчете линейный электромагнитный двигатель целесообразно представить совокупностью различающихся по тепловым характеристикам элементов (рис.4.11,а): электрические – обмотка 1, элементы магнитной системы – статор 2 и якорь 5, конструктивные элементы – крышки 4, 6, прокладка 3 и др.

Тепловая схема замещения ЛЭМД (рис.4.11,б) составлена на основе конструктивной схемы (рис.4.11,а) и учитывает тепловые сопротивления изоляции

обмотки, паразитных зазоров, воздушных промежутков между статором и обмоткой и т.д.

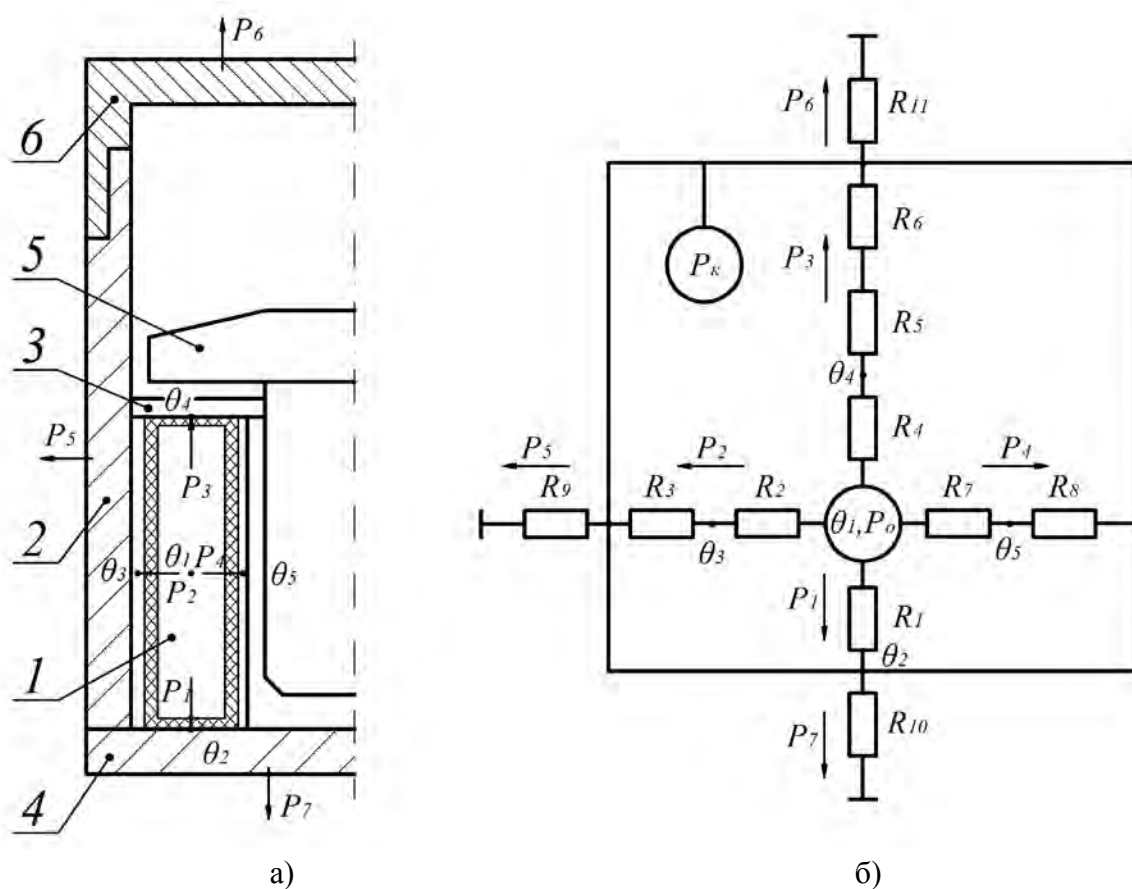


Рис.4.11 Конструктивная схема линейного электромагнитного двигателя (а) и тепловая схема замещения (б)

Распределение тепловых потоков  $P$  целесообразно рассматривать отдельно для обмотки  $P_o$  (рис.4.12,а) и корпуса  $P_k$  (рис.4.12,б).

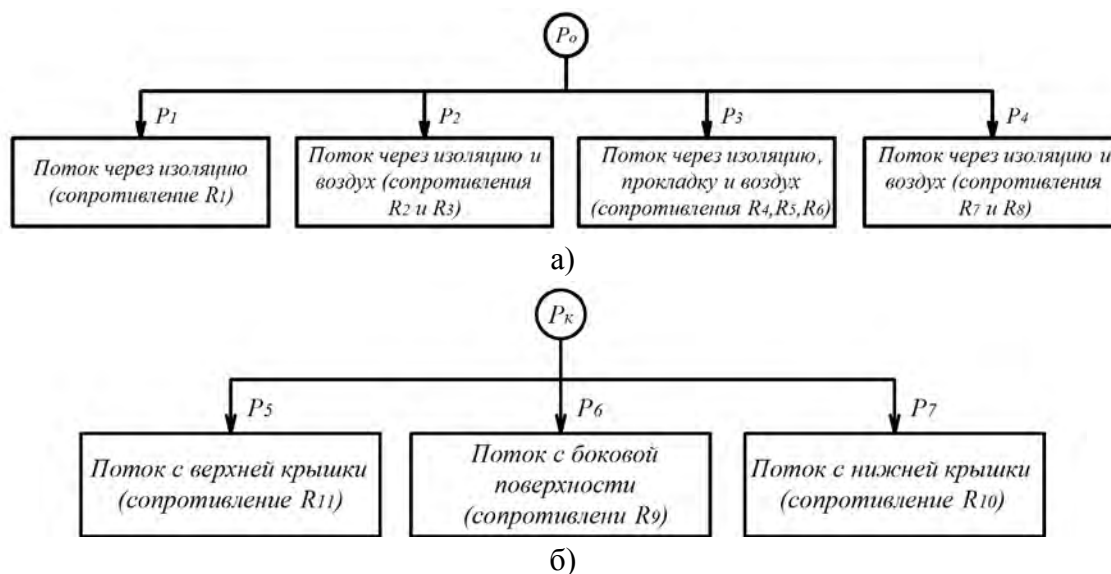


Рис.4.12 Распределение тепловых потоков обмотки (а) и корпуса (б)



В тепловых сопротивлениях, входящих в схему, учтены сопротивления теплопроводности и теплоотдачи [17]. Сопротивление теплопроводности  $R_{mn}$  определяется свойством материала и его размерами:

$$R_{mn} = \frac{\delta}{\lambda S}, \quad (4.37)$$

где  $\delta$  – толщина материала;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала.

Сопротивление теплоотдачи  $R_{mo}$  определяется по выражению:

$$R_{mo} = \frac{1}{\alpha S_o}, \quad (4.38)$$

где  $S_o$  – теплоотдающая поверхность;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Значение  $\alpha$  определяется суммой коэффициентов теплоотдачи излучением  $\alpha_{из}$  и конвекцией  $\alpha_{кон}$ :

$$\alpha = \alpha_{из} + \alpha_{кон}. \quad (4.39)$$

Пренебрегая величиной  $\alpha_{из}$ , которая мала по сравнению с  $\alpha_{кон}$ , определим коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{кон}$ :

$$\alpha_{кон} = k_n \sqrt[4]{\frac{\theta_k - \theta_{oc}}{L}}; \quad (4.40)$$

где  $k_n$  – поправочный коэффициент;  $\theta_k$ ,  $\theta_{oc}$  – температуры корпуса и окружающей среды соответственно;  $L$  – определяющий размер.

Величина  $L$  зависит от формы и расположения в пространстве теплоотдающих поверхностей.

Для определения температур отдельных точек тепловой схемы замещения воспользуемся первым законом Кирхгофа [17]:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0,$$

где  $n$  – число узлов ТСЗ;  $P_i$  – тепловой поток в  $i$ -ой ветви.

$$P_{in} = \frac{\theta_i - \theta_n}{R_{in}} = (\theta_i - \theta_n) g_{in}, \quad (4.41)$$

где  $g_{in}$  – проводимость  $i$ -ой ветви;  $\theta_i$ ,  $\theta_n$  – температуры отдельных точек ТСЗ.

Подстановка  $g_{in}$  и  $P_i$  позволяет получить систему линейных алгебраических уравнений, которую удобно представить в виде матричного уравнения:

$$G\Theta = P, \quad (4.42)$$

где  $G = \|g_{in}\|$  – квадратная матрица коэффициентов;  $\Theta = \|\theta_i\|$  – матрица-столбец неизвестных;  $P = \|P_i\|$  – матрица-столбец свободных членов.

Для определения температур  $\theta_i$  приведем (4.42) к виду

$$\Theta = G^{-1}P, \quad (4.43)$$

где  $G^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $G$ .

В настоящее время расчет температурных полей ЛЭМД успешно реализуется на персональном компьютере с использованием современного комплекса программ, основным достоинством которого является возможность рассчитывать тепловые характеристики электромагнитных двигателей с различной геометрией. Примером современного программного обеспечения может служить *Elcut*, в основу которого положен метод геометрической декомпозиции, являющийся расширением традиционной конечно-элементной техники, и позволяющий добиваться оптимальных проектных решений в минимальные сроки. *Elcut* дает возможность решать задачи теплопередачи (стационарные и нестационарные) в линейный и нелинейной постановках [21].

При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности в одном из видов:

– для линейных задач:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – осесимметричная конструкция;}$$

– для нелинейных задач:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – осесимметричная конструкция;}$$

где  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\lambda_{x(y,z,r)}$  – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке);  $q$  – удельная мощность тепловыделения, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;  $c(T)$  – удельная теплоемкость, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;  $\rho$  – плотность.

В стационарной задаче последнее слагаемое в правой части уравнений равно нулю.

При анализе результатов расчета температурного поля *Elcut* позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами.

Локальные величины [17]:

– температура  $T$ ;

– вектор плотности теплового потока  $F = -\lambda \text{grad} T$

$$F_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}, F_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$F_z = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}, F_r = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \text{ – осесимметричная конструкция.}$$

Интегральные величины:

$$\Phi = \int F \cdot n ds,$$

где  $n$  – единичный вектор нормали к поверхности.

### **Расчет тепловых процессов ЛЭМД импульсных машин длительного режима работы.**

Тепловой режим импульсных ЛЭМД машин длительного режима работы, например, формователей колбасных изделий [17], в значительной степени определяется как конструктивными (геометрией и сопротивлением обмотки, величиной охлаждающей поверхности статора), так и режимными (формой импульсов тока, количеством и длительностью импульсов) параметрами. В зависимости от длительности работы подобных машин представляется важным выбор класса изоляции обмотки ЛЭМД.

При рассмотрении процессов нагрева и охлаждения ЛЭМД используем метод конечных элементов [17; 21]. В его основе лежит разбиение объекта исследования на множество элементарных объемов (рис.4.13) и использование закона сохранения энергии.

При дискретном поступлении однополярных импульсов тока в обмотку 3 ЛЭМД ее нагрев происходит только в интервале рабочего хода  $t_{px}$ . Поскольку интервал холостого хода  $t_{xx}$  якоря 1, когда ток двигателя  $i=0$ , мал по сравнению с постоянной времени охлаждения  $T_{об}$  обмотки, процесс нагрева ЛЭМД будем считать непрерывным.

Составим уравнение теплопроводности единичного объема  $V_i = h_x \cdot h_y \cdot h_z$  для тепловых потоков:

$$(\zeta_x^+ - \zeta_x^-) h_y h_z \tau + (\zeta_y^+ - \zeta_y^-) h_x h_z \tau + (\zeta_z^+ - \zeta_z^-) h_x h_y \tau = C \Delta T, \quad (4.44)$$

где  $\zeta$  – удельные плотности тепловых потоков;  $h_x, h_y, h_z$  – элементарные конечные размеры;  $C$  – теплоемкость материала;  $\Delta T$  – разность температур в начале  $T_{i,j,k}^m$  и конце  $T_{i,j,k}^{m+1}$  временного интервала  $\tau$ .

Преобразуем выражение (4.44), приведя количество теплоты в левой и правой части к единичному объему и к единице времени, разделив все члены на объем элемента  $V_i$  и интервал времени  $\tau$ :

$$\frac{\zeta_x^+ - \zeta_x^-}{\tau} + \frac{\zeta_y^+ - \zeta_y^-}{\tau} + \frac{\zeta_z^+ - \zeta_z^-}{\tau} + q = C \frac{T_{i,j,k}^{m+1} + T_{i,j,k}^m}{\tau}, \quad (4.45)$$

где  $q$  – удельное тепловыделение;  $m$  – координата по времени.

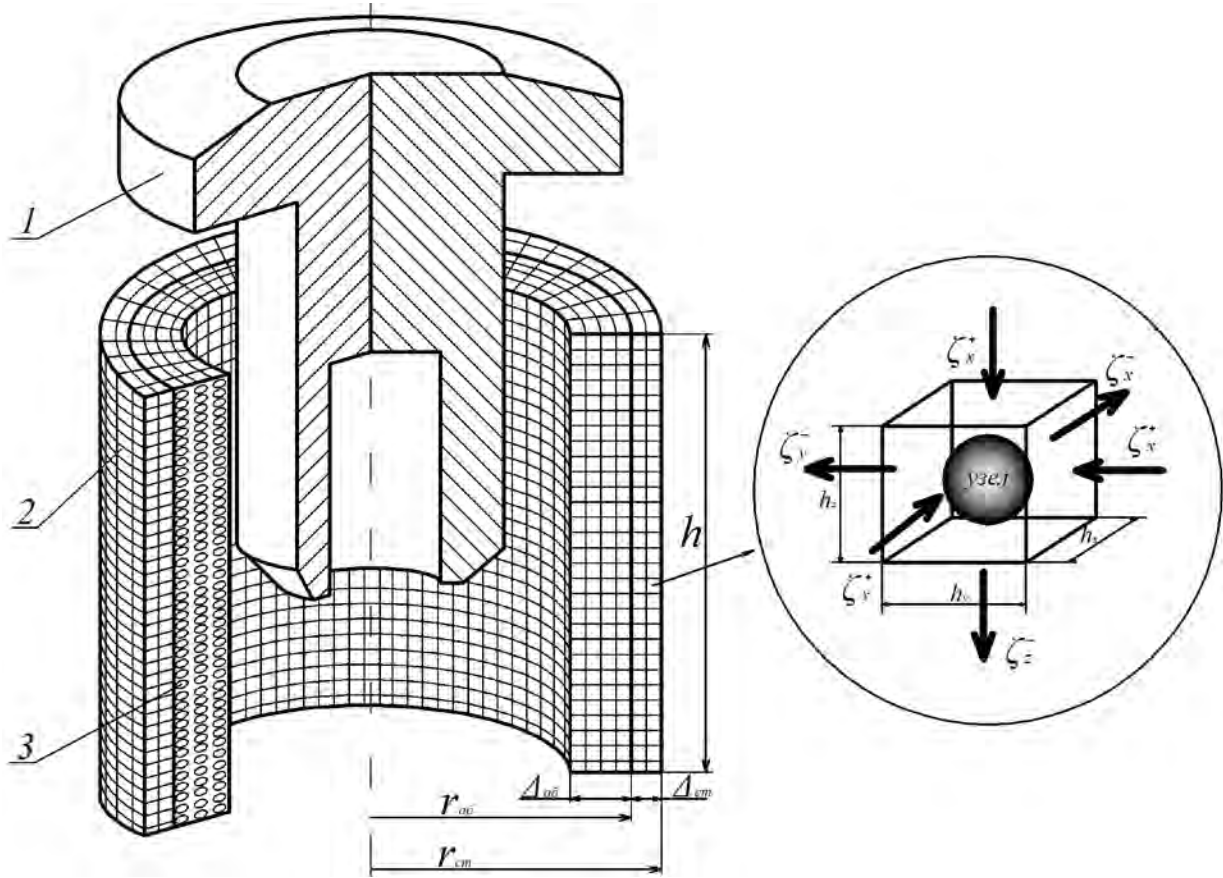


Рис.4.13 Конечно-сеточная модель ЛЭМД.

Правая часть уравнения (4.45) представляет собой теплоемкость вещества рассматриваемого элемента и определяет количество теплоты, накапливающейся в единичном объеме  $V_i$  в единицу времени  $\tau_i$  в том месте теплового поля, где расположен рассматриваемый элемент.

Выразим плотность теплового потока  $\zeta$  через температуру в узлах сетки пользуясь гипотезой о линейности свойств среды [17], тогда:

$$\left. \begin{aligned} \zeta_x^+ &= \lambda \frac{T_{i+1,j,k}^m - T_{i,j,k}^m}{h_x}; & \zeta_x^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i-1,j,k}^m}{h_x}; \\ \zeta_y^+ &= \lambda \frac{T_{i,j+1,k}^m - T_{i,j,k}^m}{h_y}; & \zeta_y^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i,j-1,k}^m}{h_y}; \\ \zeta_z^+ &= \lambda \frac{T_{i,j,k+1}^m - T_{i,j,k}^m}{h_z}; & \zeta_z^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i,j,k-1}^m}{h_z}; \end{aligned} \right\} \quad (4.46)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества.

При подстановке значений плотностей тепловых потоков  $\zeta$  в уравнения (4.45), получим уравнение Фурье в разностной форме [17].

Для удобства расчетов в уравнение (4.45) введем безразмерный множитель  $\tau/C$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} H_x^+ &= \frac{\tau}{Ch_x} \zeta_x^+; & H_x^- &= \frac{\tau}{Ch_x} \zeta_x^-; \\ H_y^+ &= \frac{\tau}{Ch_y} \zeta_y^+; & H_y^- &= \frac{\tau}{Ch_y} \zeta_y^-; \\ H_z^+ &= \frac{\tau}{Ch_z} \zeta_z^+; & H_z^- &= \frac{\tau}{Ch_z} \zeta_z^-. \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

Тогда, после преобразований, выражение (4.16) примет вид:

$$\begin{aligned} A_x [T_{i+1,j,k}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i-1,j,k}^m] + A_y [T_{i,j+1,k}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j-1,k}^m] + \\ + A_z [T_{i,j,k+1}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j,k-1}^m] + Q = \Delta T \end{aligned} \quad (4.48)$$

где  $A = \frac{\lambda \tau}{h^2 C}$  – безразмерный множитель.

Определим коэффициент  $A$ , задавшись шагом по времени  $\tau_i$ , учитывая что сумма всех коэффициентов  $A \leq 1$ .

Так как ЛЭМД имеет осесимметричную конструкцию, полученные результаты представлены в виде графика  $T = f(\Delta; \tau)$ , где  $\Delta$  – толщина материала, по которому протекает тепловой поток,  $\Delta_{об}$ ,  $\Delta_{ст}$  – толщина обмотки 3 и статора 2 соответственно (рис.4.14).

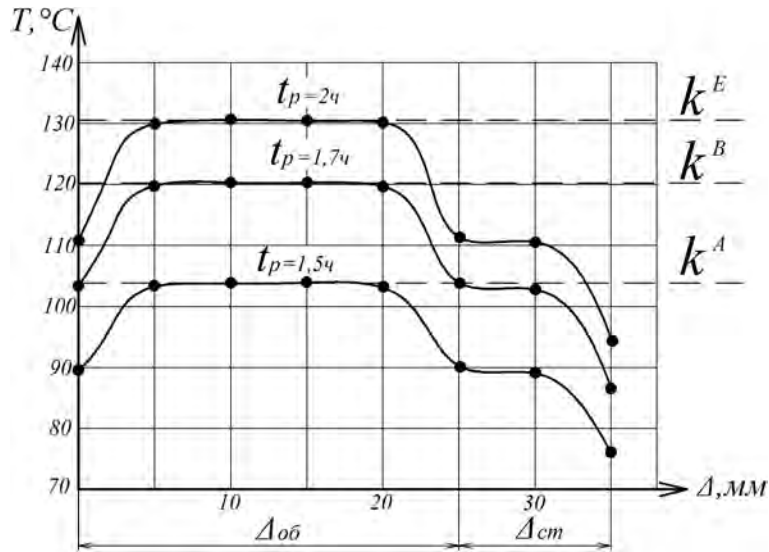


Рис.4.14 График изменения температуры в зависимости от времени работы

Поскольку  $k^A \approx 1,12k^B \approx 1,25k^E$ , переход с класса нагревостойкости изоляции  $A$  ( $k^A$ ) обмотки ЛЭМД на класс  $B$  ( $k^B$ ) позволяет увеличить время работы

на 12 %, а для класса  $E$  ( $k^E$ ) – ещё на 13 % по сравнению с классом  $B$  и на 25 % по сравнению с классом  $A$ .

### Определение стационарного температурного поля ЛЭМД.

Проектирование ЛЭМД импульсных машин предполагает оценку температуры конструктивных элементов, позволяющую определить зоны наибольшего нагрева и сформулировать обоснованные рекомендации по совершенствованию систем принудительного охлаждения.

Для определения температурного поля ЛЭМД воспользуемся методом тепловых схем замещения [17].

Тепловая схема замещения ЛЭМД (рис.4.11,б) составлена на основе конструктивной схемы (рис.4.11,а) и учитывает потери энергии в обмотке  $P_o$  и корпусе  $P_k$  двигателя, тепловые сопротивления изоляции обмотки, паразитных зазоров, воздушных промежутков между статором и обмоткой и т.д.

Так как тепловой режим ЛЭМД близок к стационарному, то теплопередачей в сторону якоря можно пренебречь  $P_4=const$  и  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $\theta_5$  в расчетах не учитываются. Расчеты тепловых сопротивлений изоляции обмотки показали, что  $R_1=R_4$ . Таким образом, температуры на нижней 4 и верхней 6 торцевых поверхностях (рис.4.11,а) одинаковы и равны  $\theta_2$ , а тепловые потоки  $P_1$  и  $P_3$  можно считать равными. Тепловые сопротивления прокладки 3  $R_5$  и воздуха  $R_6$  заменяем эквивалентным  $R_{56}=R_5+R_6$ .

Для определения тепловых сопротивлений  $R_9...R_{11}$  воспользуемся рекомендациями [17]:

$$R=1/\alpha S. \quad (4.49)$$

Тогда с учетом упрощений тепловая схема замещения на рис.4.1,б примет вид (рис.4.15).

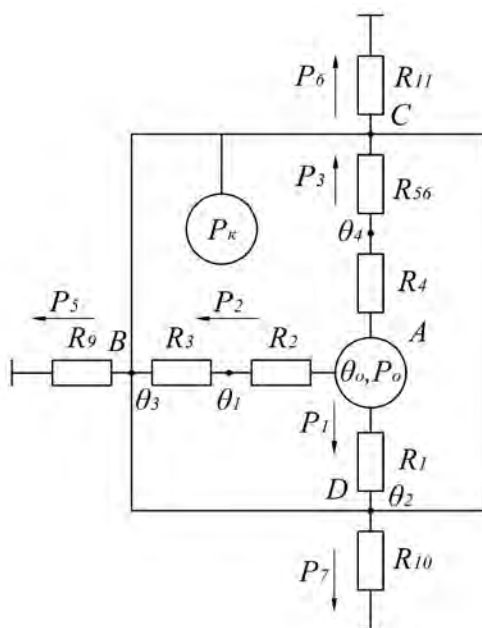


Рис.4.15 Упрощенная тепловая схема замещения ЛЭМД

По первому закону Кирхгофа для схемы рис.4.15 запишем

$$\left. \begin{aligned} m. A - P_o &= P_1 + P_2 + P_3 = 2P_1 + P_2; \\ m. B - P_5 &= P_\kappa + P_2; \\ m. C - P_6 &= P_\kappa + P_3; \\ m. D - P_7 &= P_\kappa + P_1. \end{aligned} \right\} \quad (4.50)$$

Составим систему линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_o &= 2 \frac{\theta_0 - \theta_2}{R_1} + \frac{\theta_0 - \theta_1}{R_2}; \\ P_\kappa + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_3} &= \frac{\theta_3 - \theta_{окр}}{R_9}; \\ P_\kappa + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{56}} &= \frac{\theta_4 - \theta_{окр}}{R_{10}}; \\ P_\kappa + \frac{\theta_0 - \theta_2}{R_1} &= \frac{\theta_2 - \theta_{окр}}{R_{11}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.51)$$

Выражая проводимость  $g=1/R$ , приведем систему (4.51) к виду

$$\left. \begin{aligned} P_o &= 2\theta_0 g_1 - 2\theta_2 g_1 + \theta_0 g_2 - \theta_1 g_2; \\ P_\kappa + \theta_1 g_3 - \theta_2 g_3 &= \theta_3 g_9 - \theta_{окр} g_9; \\ P_\kappa + \theta_2 g_{56} - \theta_4 g_{56} &= \theta_4 g_{10} - \theta_{окр} g_{10}; \\ P_\kappa + \theta_0 g_1 - \theta_2 g_1 &= \theta_2 g_{11} - \theta_{окр} g_{11} \end{aligned} \right\} \quad (4.52)$$

или

$$\left. \begin{aligned} g_2 \theta_1 + 2g_1 \theta_2 &= (2g_1 + g_2) \theta_0 - P_o; \\ -g_3 \theta_1 + (g_9 + g_3) \theta_3 &= P_\kappa + g_9 \theta_{окр}; \\ -g_{56} \theta_2 + (g_{10} + g_{56}) \theta_4 &= P_\kappa + g_{10} \theta_{окр}; \\ (g_{11} + g_1) \theta_2 &= P_\kappa + g_{11} \theta_{окр} + g_1 \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.53)$$

Представим систему уравнений (4.53) в матричной форме

$$G\Theta = P, \quad (4.54)$$

где  $G=(g_{ij})$  – матрица проводимостей

$$G = \begin{pmatrix} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (4.55)$$

$P=(P_i)$  – матрица тепловых потоков

$$P = \begin{pmatrix} (2g_1 + g_2)\theta_0 - P_o \\ P_\kappa + g_9\theta_{окр} \\ P_\kappa + g_{10}\theta_{окр} \\ P_\kappa + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0 \end{pmatrix}; \quad (4.56)$$

$\Theta=(\theta_i)$  – матрица температур

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix}. \quad (4.57)$$

Для определения значений температур  $\theta_1$ – $\theta_4$  решим матричное уравнение (4.54) методом Гаусса. Введем обозначения

$$\left. \begin{aligned} A &= P_\kappa + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0; \\ a &= g_{11} + g_1, \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{(2g_1 + g_2)\theta_o a - 2Ag_1 - aP_o}{ag_2}; \\ \theta_2 &= \frac{A}{a}; \\ \theta_3 &= \frac{ag_2P_\kappa + ag_9g_2\theta_{окр} + g_3[(2g_1 + g_2)\theta_o a - aP_o - 2Ag_1]}{ag_2(g_9 + g_3)}; \\ \theta_4 &= \frac{a(P_\kappa + g_{10}\theta_{окр}) + g_{56}A}{a(g_{10} + g_{56})}. \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

В качестве примера на рис.4.16 представлены кривые распределения температур для элементов ЛЭМД переносной ударной машины [17], построенные по предлагаемой методике с учетом классов нагревостойкости изоляции.

Кривые (рис.4.16) позволяют определить зоны наибольшего нагрева машины и сформулировать обоснованные рекомендации по совершенствованию систем принудительного охлаждения импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями.

Тепловой режим ЛЭМД определяется совокупностью факторов, основными из которых являются параметры питающих импульсов, частота ходов якоря, свойства обмотки, особенности её монтажа и крепления в расточке статора, определяющие интенсивность и распределение внутренних источников тепловыделения и условия теплопередачи. Решение об использовании в ЛЭМД активной системы охлаждения, например, для увеличения продолжительности включения, основывается на оценке теплового состояния машины и предполагает



определение теплового потока. При этом характеристики контактирующих и участвующих в теплопередаче поверхностей оказывают значительное влияние на величину термических сопротивлений, температурный напор и нагрев обмотки и корпуса двигателя.

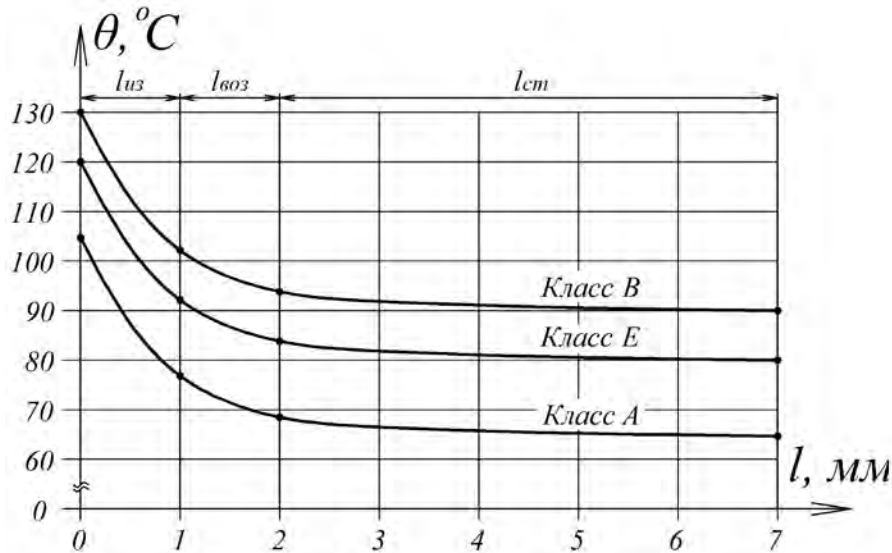


Рис.4.16 Распределение температур для элементов ЛЭМД:  
 $l_{из}$  – толщина изоляции;  $l_{воз}$  – воздушный зазор;  $l_{ст}$  – толщина статора

При определении значения  $Q$  будем полагать режим передачи теплоты близким к стационарному, температуру поверхности обмоточного провода  $\theta_{обм}$  и статора  $\theta_{ст}$  ЛЭМД известной и меняющейся лишь в радиальном направлении  $x$  при  $\theta_{обм} > \theta_{ст}$ ; температурное поле будем считать одномерным, а изотермические поверхности – цилиндрическими.

На рис.4.17 представлена часть корпуса ЛЭМД – статор 1 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2$ , внутренним  $r_2$  и внешним  $r_3$  радиусами и обмоткой 2 высотой  $h$  и внешним радиусом  $r_1$ . Полагая плотное прилегание обмотки 2 к статору 1, и толщину изоляции  $\Delta_{из}$  провода обмотки с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1$ , будем считать систему двухслойной.

При стационарном режиме количество теплоты  $Q$ , проходящей через слой изоляции  $\Delta_{из}$  и статора  $\Delta_{ст}$ , одинаково и постоянно, поэтому согласно [17]

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{2\pi h \cdot (\theta_{обм} - \theta_{из})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}}, \\ Q &= \frac{2\pi h \cdot (\theta_{из} - \theta_{ст})}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}, \end{aligned} \right\} \quad (4.60)$$

где  $\theta_{из}$  – температура на поверхности изоляции.

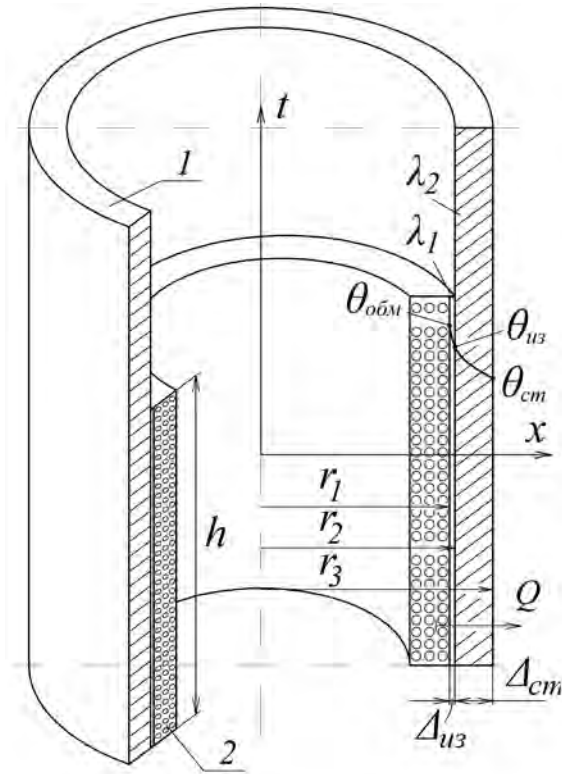


Рис.4.17 Эскиз корпуса ЛЭМД без воздушных зазоров

Из уравнений (4.60) определим изменение температуры в изоляции  $\Delta\theta_{из} = \theta_{обм} - \theta_{из}$  и статоре  $\Delta\theta_{ст} = \theta_{из} - \theta_{ст}$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{из} &= \theta_{обм} - \theta_{из} = \frac{Q}{2\pi h \lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}; \\ \Delta\theta_{ст} &= \theta_{из} - \theta_{ст} = \frac{Q}{2\pi h \lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.61)$$

Сумма изменений температуры  $\Delta\theta_{из}$  и  $\Delta\theta_{ст}$  определяет полный температурный напор  $\Delta\theta_{полн}$

$$\Delta\theta_{полн} = \Delta\theta_{из} + \Delta\theta_{ст} = \theta_{обм} - \theta_{ст} = \frac{Q}{2\pi h} \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right). \quad (4.62)$$

Таким образом, значение полного теплового потока  $Q$  через статор  $\Delta_{ст}$  и слой изоляции обмотки  $\Delta_{из}$  составляет

$$Q = \frac{2\pi h \cdot \Delta\theta_{полн}}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (4.63)$$

Выражение (4.63) адекватно характеризует значение  $Q$  при условии плотного контакта обмотки 2 и статора 1 (рис.4.17). Однако на практике вследствие шероховатости прилегающих поверхностей между слоями образуются воздуш-

ные зазоры, значительно уменьшающие полный тепловой поток  $Q$ . Аналогичное влияние оказывает и оксидная пленка на статоре 1.

На рис.4.18 представлена многослойная стенка корпуса ЛЭМД с учетом толщины окисной пленки и воздушных зазоров между обмоткой 2 и статором 1. По аналогии с (4.60) – (4.63) представим выражение для определения полного теплового потока  $Q$  для  $n$ -слойной стенки цилиндрического линейного электромагнитного двигателя [17]:

$$Q = \frac{2\pi h(\theta_1 - \theta_n)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}, \quad (4.64)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопередачи  $i$ -го слоя;  $r_i$  – радиус  $i$ -го слоя.

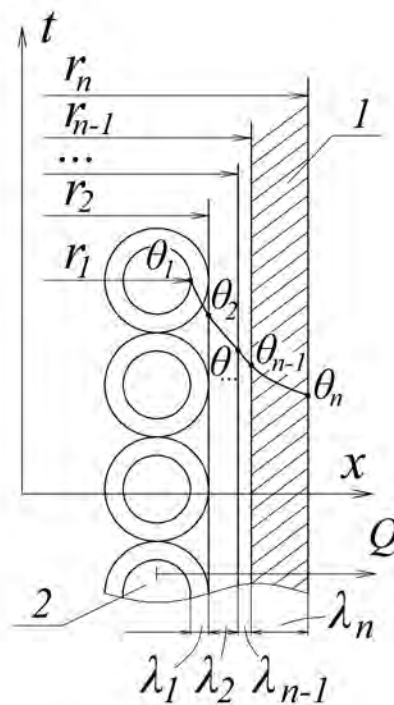


Рис.4.18 Эскиз корпуса ЛЭМД с учетом воздушных зазоров и окисла металла статора

Для визуализации зависимости полного теплового потока от приращения температуры  $\Delta\theta_{полн}$  для различных значений  $r_{n-1}/r_2$  на рис.4.19 представлена зависимость  $Q^* = f(\Delta\theta_{полн})$ , где  $Q^* = Q/Q_{\max}$ . При этом  $Q_{\max}$  – максимальный тепловой поток двухслойной стенки корпуса ЛЭМД для случая без воздушных зазоров и окисной пленки статора.

При увеличении  $\Delta\theta_{полн}$  значение теплового потока  $Q^*$  возрастает прямо пропорционально и в значительной степени определяется отношением  $r_{n-1}/r_2$ . Так, даже тонкий воздушный зазор между обмоткой и статором с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_в=0,02$  ( $r_{n-1}/r_2=1,02$ ) снижает полный тепловой поток на 50 % по сравнению с идеальной двухслойной стенкой магнитопровода.

Внешняя поверхность обмотки, изготовленной для форсированной электромагнитной машины из проводов большого сечения, отличается от цилиндрической. При этом невозможно обеспечить плотный, без воздушных радиальных зазоров или промежутков, монтаж обмотки в статоре, что ухудшает тепловой контакт, снижает тепловой поток  $Q$  и увеличивает температуру обмотки. В этом случае, при естественном охлаждении машины, монтажу обмотки должно предшествовать удаление окисной пленки на статоре, а для улучшения теплового контакта целесообразно применять кремнийорганические теплопроводные пасты, например, СИЛОТЕРМ ЭП, *SILARM* и др.

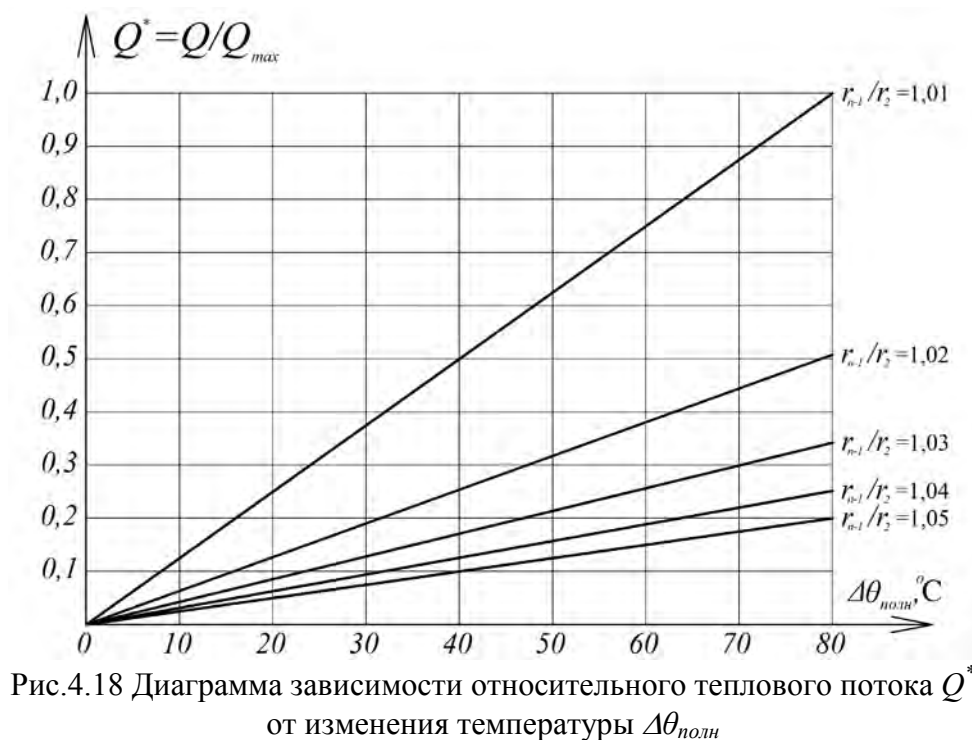


Рис.4.18 Диаграмма зависимости относительного теплового потока  $Q^*$  от изменения температуры  $\Delta\theta_{полн}$

Для форсированных импульсных машин с ЛЭМД продолжительного режима необходима принудительная система охлаждения, в которой, например, в предусмотренный радиальный зазор «расточка статора – обмотка» подается охлаждающий воздух с помощью вентилятора. При этом требования к подготовке внутренней поверхности статора снижаются.

В зависимости от назначения и вида технологической операции ЛЭМД могут отличаться по конструкции, габаритам и по режимам питания, а основными выходными показателями принято считать энергию  $A_{уд}$  и частоту  $n$  ходов якоря для прессов и ударных машин [17-19], начальное  $F_n$  или конечное  $F_k$  тяговые усилия для тросошайбовых транспортеров или формователей колбасных изделий и клипсаторов, соответственно.

Относительное многообразие конструкций и способов питания импульсных ЛЭМД выдвигают задачу выработки рекомендаций по интенсификации процессов теплопередачи.

Способы интенсификации процесса охлаждения электромагнитных двигателей целесообразно классифицировать по характерным признакам (рис.4.20):

– с естественным охлаждением (рис.4.21,а) – не имеющие специальных вентиляторов;

с искусственным охлаждением за счет вытяжной или нагнетательной вентиляции (рис.4.22,б,в), в которых движение охлаждающего нагретые части воздуха обеспечивается искусственно, например, с помощью вентилятора.

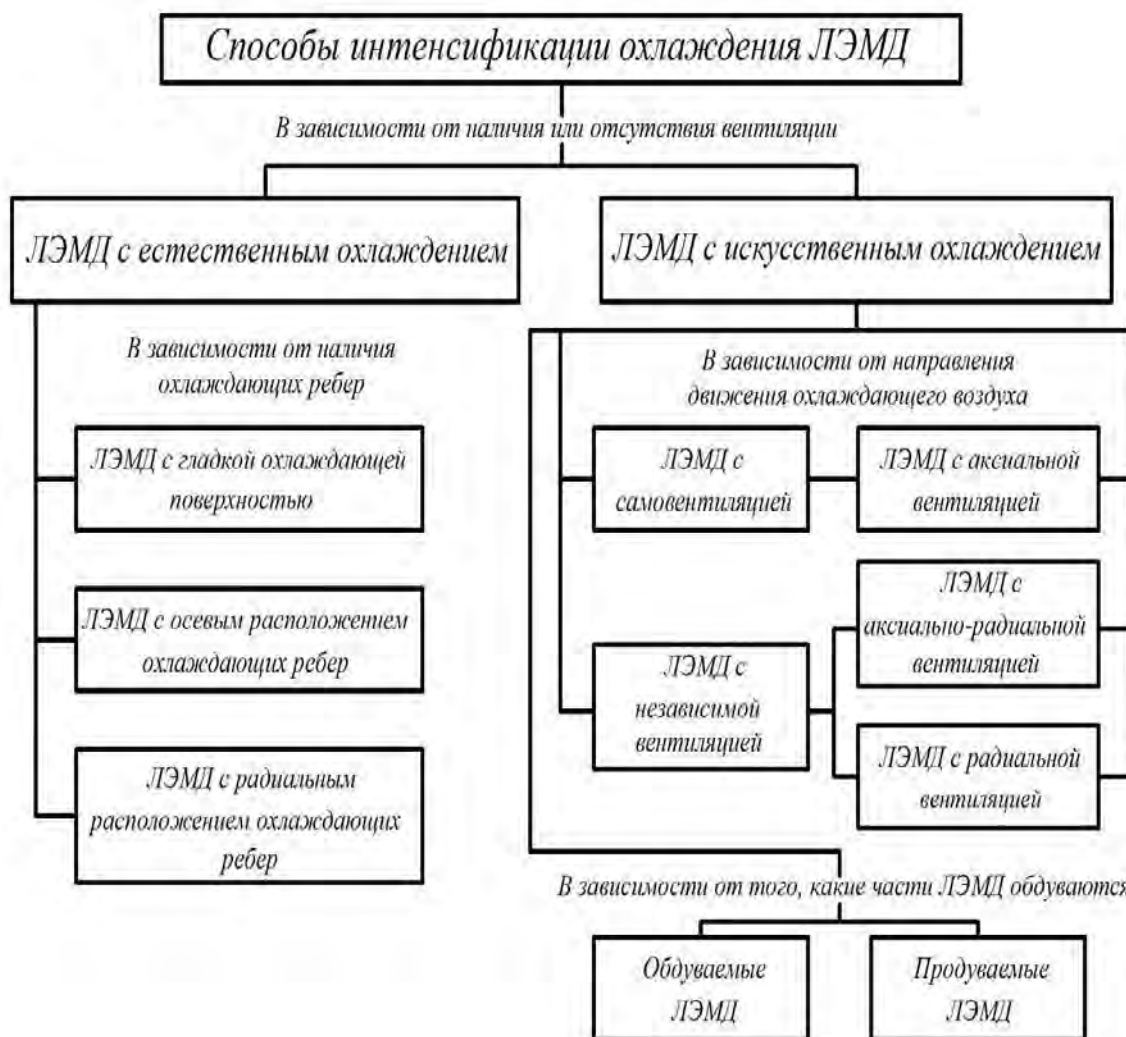


Рис.4.20 Классификация способов интенсификации охлаждения ЛЭМД

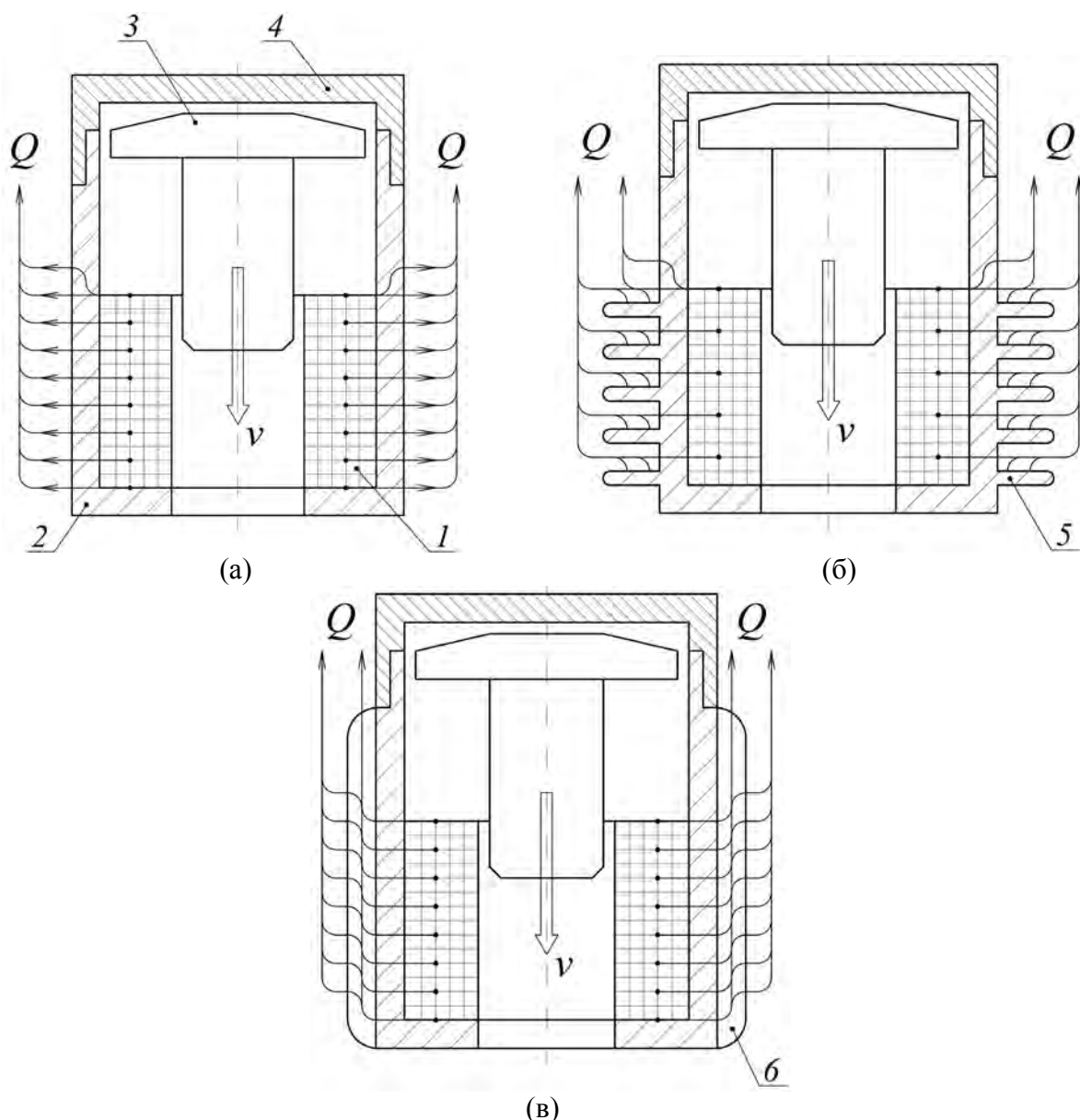


Рис.4.21 Линейные электромагнитные двигатели с естественным охлаждением: ЛЭМД с гладкой охлаждающей поверхностью (а); ЛЭМД с радиальным (б) и осевым (в) расположением охлаждающих ребер; 1 – обмотка; 2 – статор; 3 – комбинированный якорь; 4 – крышка; 5 – радиальные ребра охлаждения; 6 – осевые ребра охлаждения.

Для повышения надежности ЛЭМД при работе в повторно-кратковременном режиме, когда  $\theta_{об} \geq \theta_{об}^{don}$ , необходимо увеличить его поверхность охлаждения. Оребрение корпуса двигателя производится с целью интенсификации процесса теплопередачи. Различают ЛЭМД с радиальным 5 (рис.4.21.б) и осевым 6 (рис.4.21,в) расположением охлаждающих ребер.

Для количественной оценки увеличения площади ребристой поверхности используется коэффициент оребрения  $k_F = F_{op} / F_{gl}$ , где  $F_{op}$  и  $F_{gl}$  – соответственно площадь оребренной и гладкой поверхностей.

При создании и совершенствовании импульсных электромагнитных машин с жесткими требованиями по минимизации массы устройства, например, для пе-

реносных ударных приводов, представляется эффективным увеличение охлаждающей поверхности ЛЭМД путем его оребрения, при этом значение величины  $k_F$  должен находиться в пределах до  $k_F = 2,5$ . Увеличение коэффициента оребрения в диапазоне  $k_F = 2,5 \dots 4,0$  приводит к снижению относительных удельных потерь не более чем на 15 % и представляет интерес для стационарных импульсных электромагнитных машин, в частности, для формователей колбасных изделий. Дальнейшее увеличение коэффициента  $k_F = 4,0 \dots 5,5$  представляется нецелесообразным ввиду значительного увеличения металлоемкости всего электропривода.

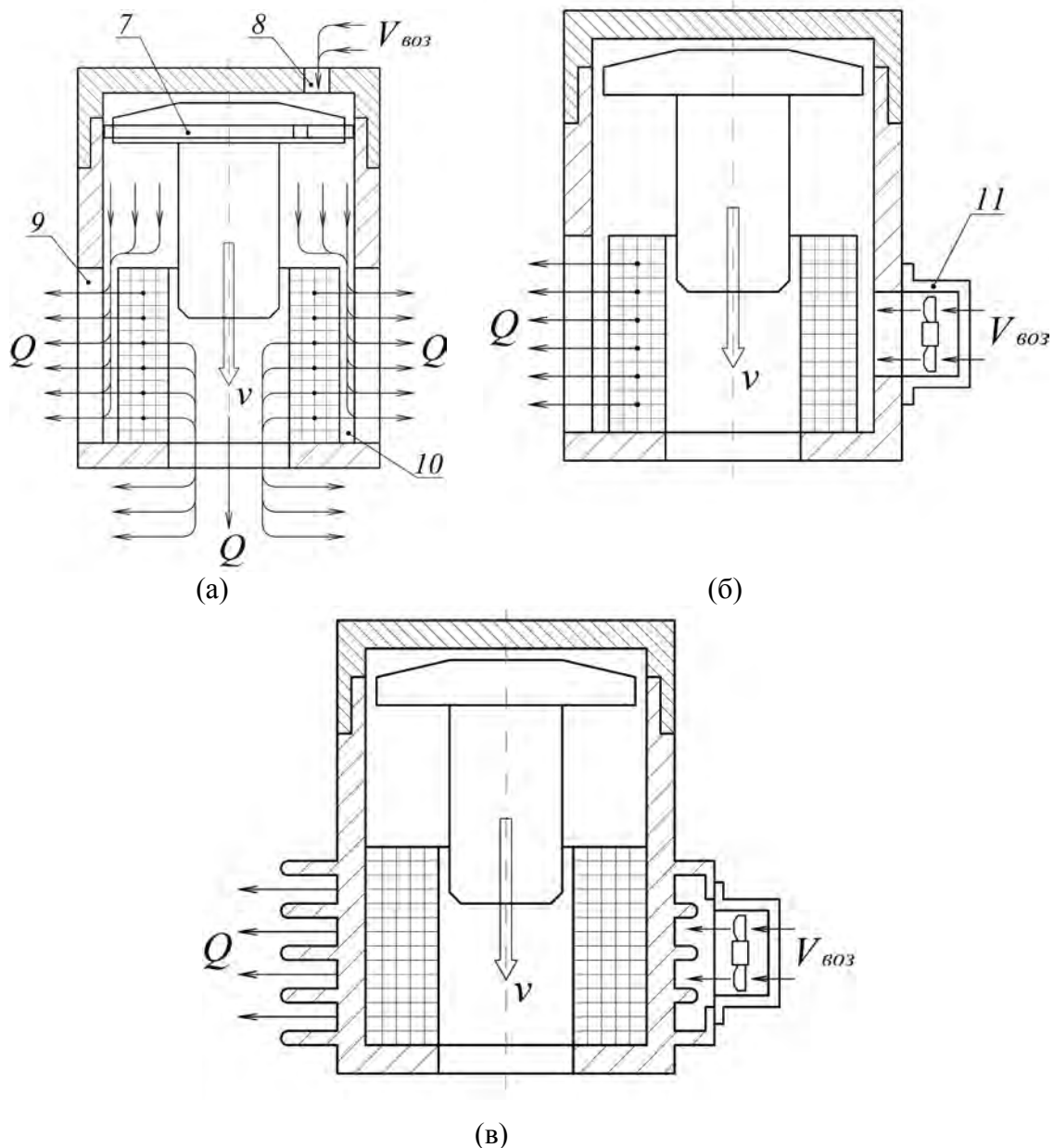


Рис.4.22 Линейные электромагнитные двигатели с искусственным охлаждением: ЛЭМД с самовентиляцией (а); продуваемый (б) и обдуваемый (в) ЛЭМД; 7 – компрессионное кольцо; 8 – вентиляционное отверстие; 9 – аксиальные вентиляционные пазы; 10 – зазор между обмоткой и статором; 11 – вентилятор.

Линейные электромагнитные двигатели с искусственным охлаждением могут подразделяться на ЛЭМД с самовентиляцией (рис.4.12,а) и независимой вентиляцией, вентилятор которых приводится во вращение вспомогательным двигателем (рис.4.12,д,е). В электромагнитных двигателях с самовентиляцией охлаждающие воздушные потоки побуждаются комбинированным якорем 3 с компрессионным кольцом 7 и, охлаждая обмотку 1, выходят через аксиальные вентиляционные пазы 9.

В зависимости от направления движения охлаждающего воздуха относительно обмотки двигателя различают ЛЭМД с аксиальной (рис.4.12,а), аксиально-радиальной и радиальной (рис.4.12,б,в) вентиляцией.

В зависимости от того, какие части в электромагнитном двигателе с искусственным охлаждением обдуваются воздухом, различают продуваемые (рис.4.12,а,б) и обдуваемые (рис.4.12,в) ЛЭМД. К первому типу относятся ЛЭМД, в которых воздух попадает извне, омывает поверхность обмотки и затем выбрасывается наружу. В обдуваемых двигателях осуществляется принудительное охлаждение только внешней развитой при помощи выступающих ребер поверхности статора.

Таким образом, при проектировании и создании импульсных машин с ЛЭМД, с учетом режимов работы, представляется важным выбор способа интенсификации охлаждения.

### **Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с развитой теплоотдающей поверхностью и искусственным охлаждением.**

Важным фактором, влияющим на теплопередачу, является величина охлаждающей поверхности корпуса двигателя.

Оребрение поверхности корпуса ЛЭМД производится с целью интенсификации процесса теплопередачи. При этом в задачу расчета оребрения входит распределение температуры по ребру, количества снимаемого тепла, вес и стоимость оребренной поверхности охлаждения. Кроме того, к ребристым поверхностям корпуса двигателя предъявляется ряд дополнительных требований: минимализация их габаритных размеров и веса, эффективное использование материалов и др. В полном объеме такая задача может быть разрешена только на основе эксперимента.

При сравнительной оценке ребристой поверхности будем использовать коэффициент оребрения  $k_F$  [17]

$$k_F = \frac{F_{op}}{F_{zl}}, \quad (4.65)$$

где  $F_{op}$  и  $F_{zl}$  – соответственно площадь оребренной и гладкой поверхностей.



Величина коэффициента  $k_F$  будет определяться удельными потерями в меди ЛЭМД, зависящими, в свою очередь, от параметров обмотки (сечения  $S$  обмоточного провода, количества  $n$  витков, размеров  $l, h$ ), формы питающего импульса тока и поверхности охлаждения корпуса двигателя  $F_{охл}$ :

$$\Delta P_{y\partial} = \frac{\Delta P}{F_{охл}}, \quad (4.66)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в обмотке.

$$\Delta P = I^2 R, \quad (4.67)$$

где  $I$  – ток в обмотке рабочего хода якоря;  $R$  – сопротивление обмотки.

Для определения значений  $\Delta P$  воспользуемся, в частном случае, осциллограммами тока  $i(t)$ , напряжения  $u(t)$  и перемещения  $\delta(t)$  якоря за один рабочий ход (рис.4.23) [17].

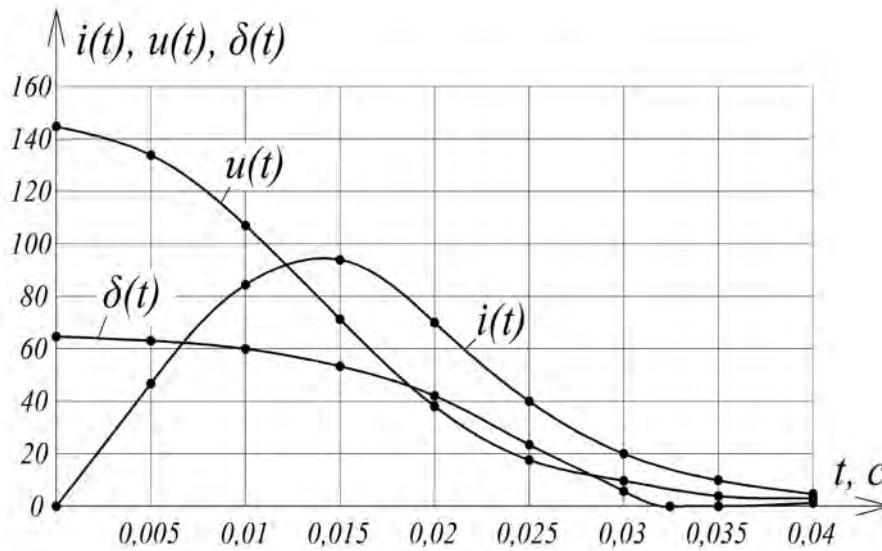


Рис.4.23 Динамические характеристики ЛЭМД ударной машины

Эквивалентный ток  $I_{экв}$  на интервале рабочего хода

$$I_{экв} = \sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt}, \quad (4.68)$$

где  $t_{px}$  – время рабочего хода.

С учетом (4.41) выражение (4.40) преобразуется к виду

$$\Delta P = R \left( \sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt} \right)^2. \quad (4.69)$$

Удельные потери  $\Delta P_{y\partial}$  на рабочем ходе якоря ЛЭМД

$$\Delta P_{y\partial} = \frac{R \left( \sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt} \right)^2}{F_{охл}}. \quad (4.70)$$

При дискретном поступлении однополярных импульсов тока в обмотку ЛЭМД ее нагрев происходит только на интервале рабочего хода  $t_{px}$ . Поскольку интервал холостого хода  $t_{xx}$  якоря, когда ток в двигателе равен  $i=0$ , мал по сравнению с постоянной времени охлаждения  $T_0$  обмотки, процесс нагрева ЛЭМД будем считать непрерывным. Зависимость относительных удельных потерь в меди  $\Delta P^* = (\Delta P_{y\partial} / \Delta P_{y\partial}^{max}) \cdot 100\%$ , где  $\Delta P_{y\partial}^{max}$  – удельные потери при  $k_F = 1$  (без оребрения), от коэффициента оребрения  $k_F$  представлена в виде диаграммы  $P^* = f(k_F)$  (рис.4.24).

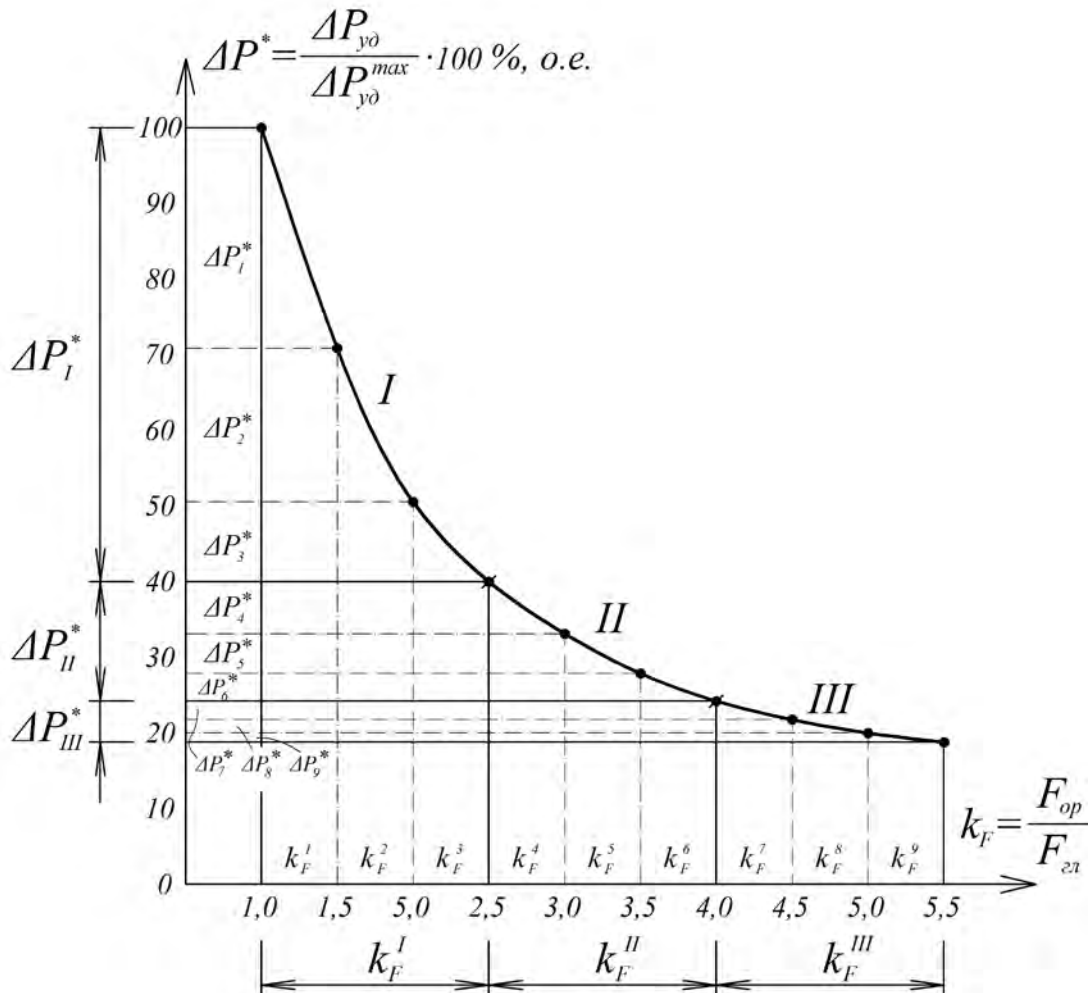


Рис.4.24 Зависимость относительных удельных потерь  $\Delta P^*$  от величины коэффициента оребрения  $k_F$

Для сравнения участков диаграммы воспользуемся средним значением коэффициента передачи  $k_{cp}$  на интервалах

$$\left. \begin{aligned} I - k_F &= 1,0 \dots 2,5; \\ II - k_F &= 2,5 \dots 4,0; \\ III - k_F &= 4,0 \dots 5,5, \end{aligned} \right\}$$

$$k_{cp} = \frac{\sum k_i}{i}, \quad (4.71)$$

где  $k_i$  – коэффициент передачи  $i$ -го участка диаграммы  $P^* = f(k_F)$ .

$$\left. \begin{aligned} k_{cp}^I &= \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_1^*}{\Delta k_F^1} + \frac{\Delta P_2^*}{\Delta k_F^2} + \frac{\Delta P_3^*}{\Delta k_F^3} \right); \\ k_{cp}^{II} &= \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_4^*}{\Delta k_F^4} + \frac{\Delta P_5^*}{\Delta k_F^5} + \frac{\Delta P_6^*}{\Delta k_F^6} \right); \\ k_{cp}^{III} &= \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_7^*}{\Delta k_F^7} + \frac{\Delta P_8^*}{\Delta k_F^8} + \frac{\Delta P_9^*}{\Delta k_F^9} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

где  $k_{cp}^I$ ,  $k_{cp}^{II}$ ,  $k_{cp}^{III}$  – коэффициенты передачи соответственно  $I$ ,  $II$  и  $III$  участков,  $\Delta k_F$  – приращение коэффициента оребрения;  $\Delta P^*$  – приращение относительных удельных потерь.

С учетом (4.72) имеем

$$k_{cp}^I \approx 3,64 k_{cp}^{II} \approx 8 k_{cp}^{III}. \quad (4.73)$$

Таким образом, при создании и совершенствовании импульсных электромагнитных машин с жесткими ограничениями массы устройства, например, для переносных ударных приводов, представляется эффективным увеличение охлаждающей поверхности ЛЭМД за счет оребрения двигателя, при этом значение  $k_F$  следует принимать  $k_F = 2,5$ .

Увеличение значений  $k_F = 2,5 \dots 4,0$  приводит к снижению относительных удельных потерь не более чем на 15 % и представляет интерес для стационарных импульсных электромагнитных машин.

Дальнейшее повышение  $k_F = 4,0 \dots 5,5$  представляется нецелесообразным ввиду значительного увеличения металлоемкости всего электропривода.

На рис.4.25 показана конструктивная схема ЛЭМД с самовентиляцией, особенностью которого является непосредственное охлаждение окружающим воздухом токоведущих частей двигателя (обмотки) через вентиляционные каналы [17].

При рабочем ходе (рис.4.25,а), побуждаемые комбинированным якорем 3 с компрессионным кольцом 1 воздушные потоки 7, движущиеся по аксиальным

каналам 4, охлаждают обмотку 6 и выходят наружу через вентиляционные отверстия 8. На холостом ходе (рис.4.25,б) якорь 3 под действием возвратной пружины 5 перемещается в верхнюю часть цилиндрического статора 2. При этом окружающий воздух засасывается через отверстия 8 и, проходя по вентиляционным каналам, охлаждает обмотку 6, а при следующем рабочем ходе удаляется наружу.

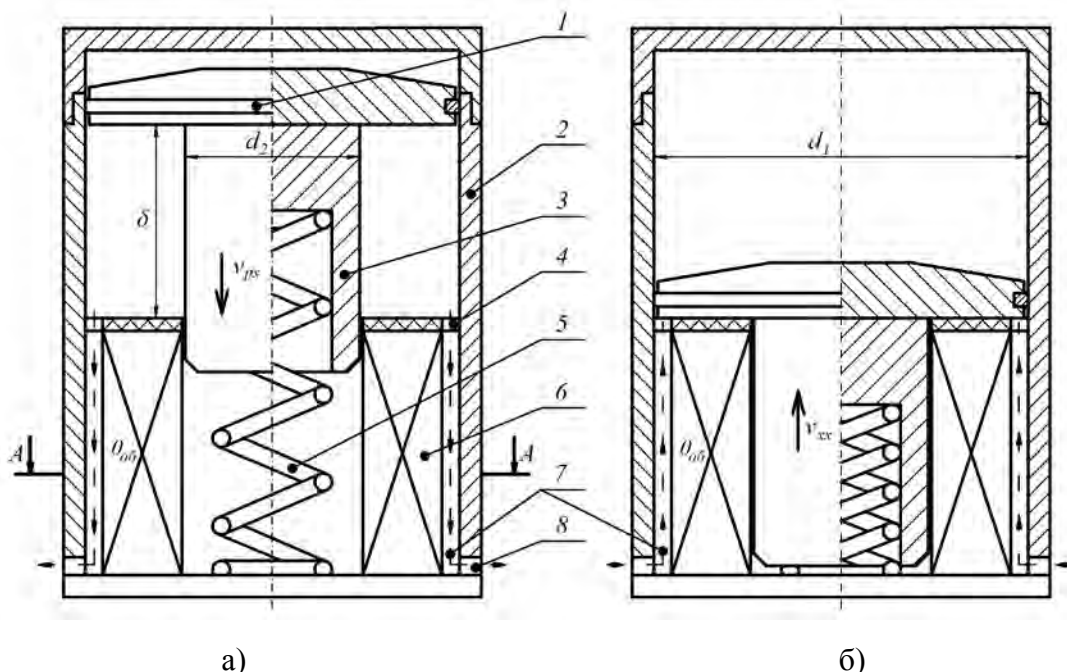


Рис.4.25 Конструктивные схемы ЛЭМД с самовентиляцией:  
а) рабочий ход; б) холостой ход

Важным для оценки теплового состояния ЛЭМД является определение в зоне охлаждающего канала коэффициента теплоотдачи, например, по рекомендациям [17]:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}, \quad (4.74)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности рабочей среды, Вт/м·°С;  $d$  – диаметр входного канала, м;  $Nu$  – критерий Нуссельта, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и теплопроводности.

Обобщенная зависимость процесса теплоотдачи при движении воздуха внутри закрытых каналов представляется выражением [17]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}, \quad (4.75)$$

где  $Re = \frac{v_6 \cdot d}{\nu}$  – критерий Рейнольдса;  $v_6$  – скорость движения воздуха в охлаждающем канале, м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

При рассмотрении течений охлаждающего воздуха в вентиляционных каналах необходимо знать среднюю расходную скорость  $v_{6,cp}$ , определяемую как

отношение объемного расхода воздуха  $Q_\delta$  к площади поперечного сечения канала  $S$ :

$$v_{\delta, cp} = \frac{Q_\delta}{S}. \quad (4.76)$$

Объёмный расход  $Q_\delta$  воздуха для ЛЭМД с самовентиляцией определяется изменением объема пространства, ограниченного поверхностью якоря 3 с компрессионным кольцом 1, внутренней поверхностью статора 2 и частью наружной поверхности обмотки 6 в каналах 4, отнесенному ко времени соответственно рабочего  $t_{px}$  и холостого хода  $t_{xx}$  якоря 3. При этом утечкой воздуха через компрессионное кольцо 1 можно пренебречь.

$$Q_\delta^{px} = \frac{\pi \delta}{4 t_{px}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (4.77)$$

$$Q_\delta^{xx} = \frac{\pi \delta}{4 t_{xx}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (4.78)$$

где  $Q_\delta^{px}$ ,  $Q_\delta^{xx}$  – объемный расход воздуха при рабочем и холостом ходе соответственно, м<sup>3</sup>/с;  $\delta$  – величина рабочего хода якоря, м;  $d_1$  – внутренний диаметр статора в надобмоточном пространстве, м;  $d_2$  – диаметр якоря, м.

Таким образом, с учетом (4.75)-(4.77) и (4.78) выражение (4.74) примет вид:

$$\alpha_{px} = 0,0045 \pi^{-0,2} \frac{\lambda \left( \frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left( \frac{\delta (d_1^2 - d_2^2)}{t_{px} v} \right)^{0,8} \cdot \left( 2a + b \left( 1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}; \quad (4.79)$$

$$\alpha_{xx} = 0,0045 \pi^{-0,2} \frac{\lambda \left( \frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left( \frac{\delta (d_1^2 - d_2^2)}{t_{xx} v} \right)^{0,8} \cdot \left( 2a + b \left( 1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}, \quad (4.80)$$

где  $\alpha_{\delta\delta}$  и  $\alpha_{\delta\delta}$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно при рабочем и холостом ходах якоря ЛЭМД.

При проектировании подобных систем охлаждения (рис.4.28,а) важным является определение количества  $n_{кан}$  и длины  $l_{кан}$  вентиляционных каналов 7 (рис.4.28,б). Для эффективности процесса охлаждения и предотвращения перегрева обмотки ЛЭМД должно соблюдаться условие, при котором объем охлаждающего воздуха  $V_{воз}^{\partial\phi}$ , проходящего через вентиляционные каналы за один ход якоря должен быть не меньше суммарного объема воздуха  $\Sigma V_{кан}$  в аксиальных вентиляционных каналах:

$$V_{воз}^{\partial\phi} \geq \Sigma V_{кан}, \quad (4.81)$$

где  $\Sigma V_{кан} = n V_{кан}$ ;  $n$  – количество каналов;  $V_{кан}$  – объем воздуха в одном аксиальном вентиляционном канале.

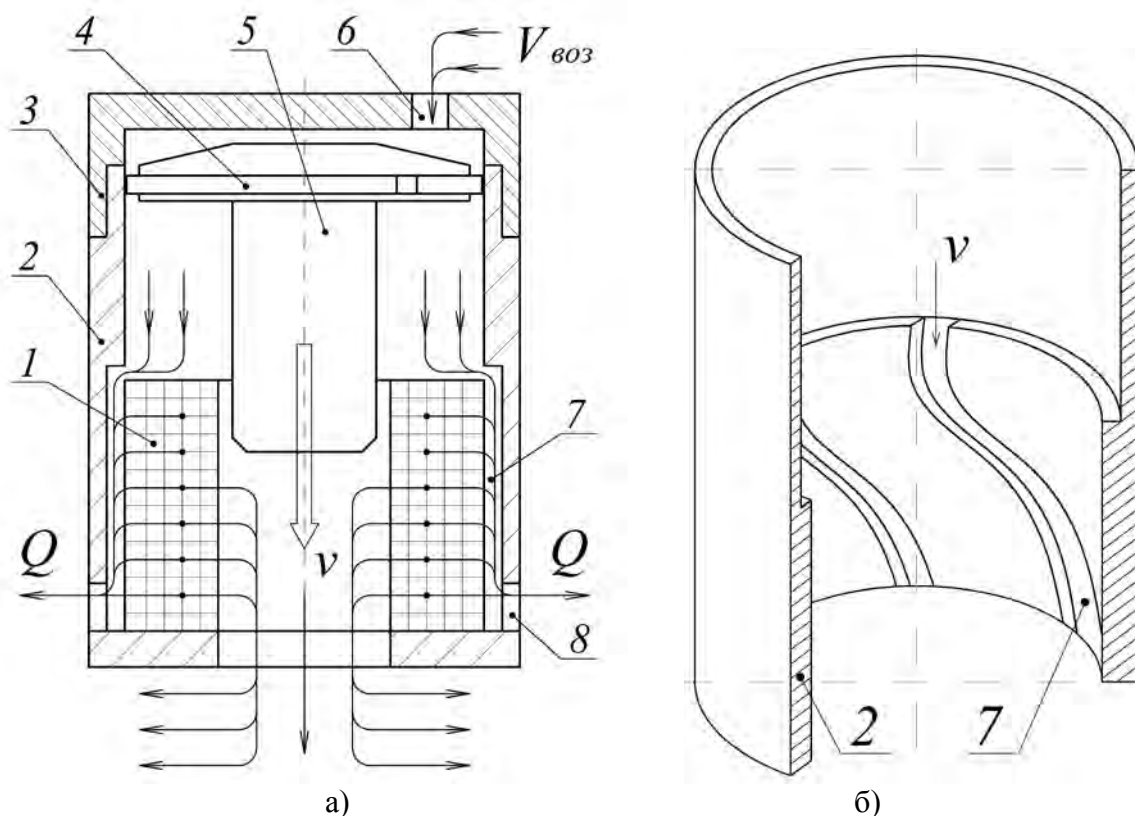


Рис.4.28 Линейный электромагнитный двигатель с самовентиляцией (а), эскиз статора с аксиальными вентиляционными парами: 1 – обмотка; 2 – статор; 3 – крышка; 4 – компрессионное кольцо; 5 – комбинированный якорь; 6,8 – вентиляционные отверстия; 7 – аксиальные вентиляционные каналы.

Для определения значения  $V_{кан}$  полагаем, что аксиальные вентиляционные каналы выполнены таким образом, что при развертке цилиндрического статора 2 по образующей оно будет иметь вид рис.4.29. Тогда

$$V_{кан} = l_{кан} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}, \quad (4.82)$$

где  $l_{кан} = \frac{h_{кан}}{\sin \beta}$  – длина канала;  $h_{кан}$  – высота вентиляционного канала;  $\beta$  – угол наклона вентиляционного канала к продольной оси.

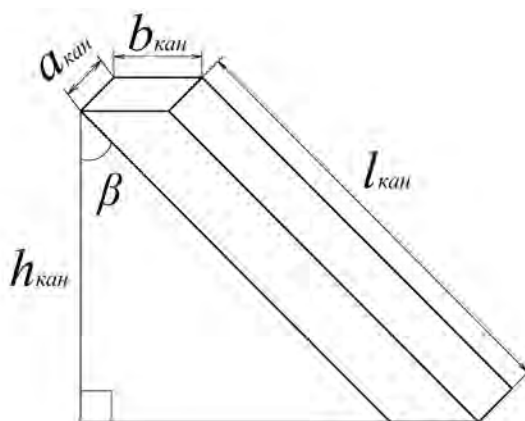


Рис.4.29 Эскиз аксиального вентиляционного канала

Определим объем охлаждающего воздуха  $V_{воз}^{эф}$ , проходящего через вентиляционные каналы за один ход якоря

$$V_{воз}^{эф} = \left[ \frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right] - \left( \frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right), \quad (4.83)$$

где  $h, d$  – соответственно длина и внутренний диаметр ЛЭМД;  $d_{я1}, l_{я1}$  – диаметр и длина цилиндрической части якоря;  $d_{я2}, l_{я2}$  – диаметр и длина торцевой части якоря.

Представим (4.81) с учетом (4.82) и (4.83) в виде

$$\left[ \frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right] - \left( \frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right) \geq n_{кан} \frac{h_{кан}}{\sin \beta} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}. \quad (4.84)$$

Тогда угол наклона  $\beta$  вентиляционного канала к продольной оси

$$\beta = \arcsin \left[ \frac{n_{кан} \cdot h_{кан} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}}{\left( \frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right) - \left( \frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right)} \right], \quad (4.85)$$

Таким образом, при известных значениях  $a_{кан}$  и  $b_{кан}$ , варьированием угла наклона  $\beta$  вентиляционного канала можно добиться эффективного процесса интенсификации охлаждения обмотки ЛЭМД дискретных машин.

Подробная оценка влияния вентиляционных пазов на тепловое сопротивление ЛЭМД приведена в [17].

#### 4.2.4. Конструкции машин с ЛЭМД

Результаты исследований использованы при разработке конструкций импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями – сводообрушителей, переносных ударных машин для погружения стержней, приводных двигателей тросошайбовых транспортеров, устройств наложения металлических скоб на упаковку и др.

Примеры конструкций ударных машин с ЛЭМД – сводообрушителя, ударника с осевым каналом для забивания стержней показаны на рис.4.30, 4.31 [17-18].

Основные элементы конструкций (рис.4.30, 4.31): якорь 1, пружина 2, обмотка 3, корпус-статор 4, наковальня 5.

В обмотку 3 подается электрический импульс от источника питания. Якорь 1, сжимая пружину 2, втягивается в обмотку 3 под действием электромагнитной силы и, ускоряясь, производит удар по наковальне 5.

Окончание питающего импульса соответствует моменту соударения якоря 1 и наковальни 5, который силой сжатой пружины 2 возвращается в исходное положение и цикл повторяется.

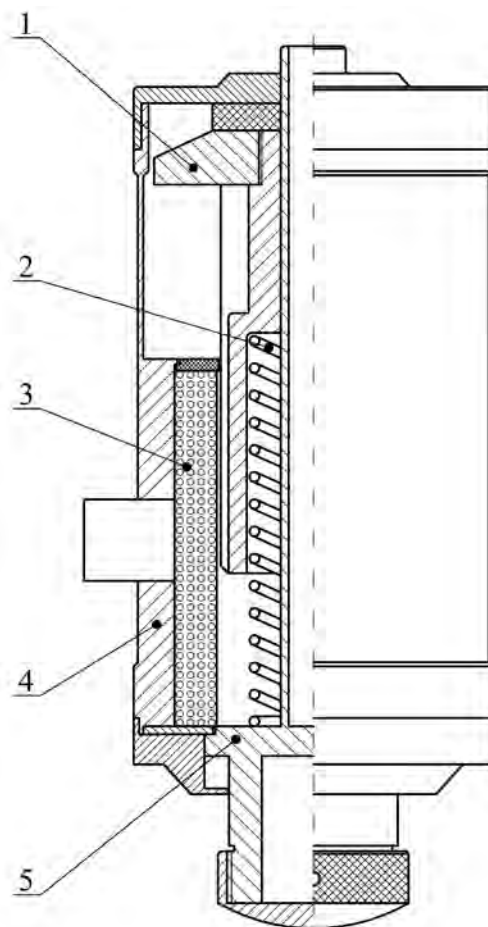


Рис.4.30 Сводообрушитель с ЛЭМД: 1 – якорь; 2 – пружина; 3 – обмотка; 4 – корпус-статор; 5 – наковальня.

Передача энергии для разрушения или предотвращения свода от сводообрушителя к бункеру производится через его боковую поверхность. Частичная кинематическая развязка корпуса и направляющей призвана улучшить соотношение соударяющихся масс «боек – бункер» и повысить эффективность передачи ударных воздействий.

Отличительной особенностью конструкции ударника для неторцевого забивания продольно-неустойчивых стержней является сквозной осевой канал (рис.4.31). Забиваемый стержень 9 пропускается по направляющей 7 сквозь ударную машину между заклинивающими элементами 6 до упора в поверхность грунта. Удерживая стержень прижатым к грунту, поднимают по нему вверх ударную машину на высоту, при которой продольная устойчивость гибкого стержня еще сохраняется, и удерживают УМ в вертикальном положении за рукоятку 8. Заклинивающие элементы 6 под действием силы тяжести ударной машины зажимают стержень и предотвращают ее соскальзывание вниз по стержню 9.



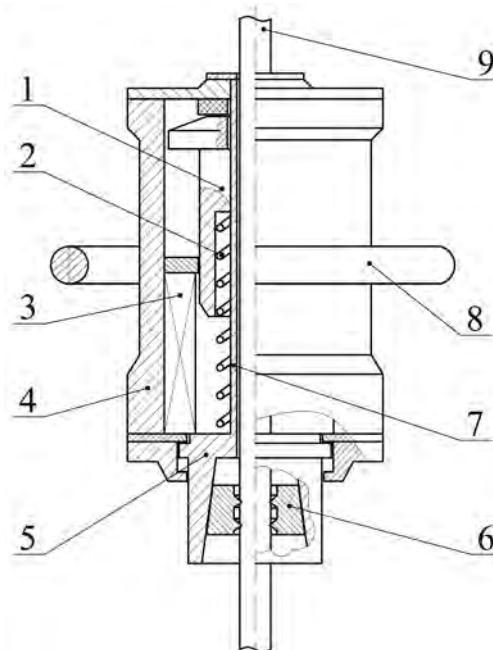


Рис.4.31 Ударник с ЛЭМД для неторцевого забивания продольно-неустойчивых стержней: 1 – якорь; 2 – пружина; 3 – обмотка; 4 – корпус-статор; 5 – наковальня; 6 – заклинивающие элементы; 7 – направляющая; 8 – рукоятка; 9 – стержень.

При ударе якоря 1 по наковальне 5 корпус зажимного приспособления перемещается вниз относительно корпуса 4 машины и заклинивающие элементы 6, касающиеся острыми гранями стержня 9, проскальзывают по конической поверхности корпуса, сближаясь и надежно заклинивая забиваемый стержень. Окончание питающего импульса соответствует моменту соударения якоря 1 и наковальни 5, который при этом силой сжатой пружины 2 возвращается в исходное положение и цикл повторяется.

При каждом ударе якоря 1 по наковальне 5 зажимное приспособление вместе с заклиненным стержнем смещается вниз в осевом направлении относительно корпуса 4 машины и вдавливают стержень в грунт.

Регулярно переставляя электромагнитную ударную машину по длинному забиваемому стержню 9, обеспечивают его погружение в грунт.

Для реализации нереверсивного движения тросошайбовых транспортеров разработана конструкция ЛЭМД, осуществляющего перемещение рабочего органа через осевой канал двигателя с захватом за шайбы (рис.4.32).

Двигатель содержит корпус-статор 2 с крышками 1,3 и обмоткой 4, якорь 5, упругие элементы 6, 7, протяжное устройство 11 с подпружиненными зацепами 8. Рабочий орган (трос) 9, с шайбами (дисками) 10 пропущен в осевой канал протяжного устройства 11. На рабочем ходе силовое сочленение якоря 5 с шайбами (дисками) 10 рабочего органа обеспечивается зацепами 8.

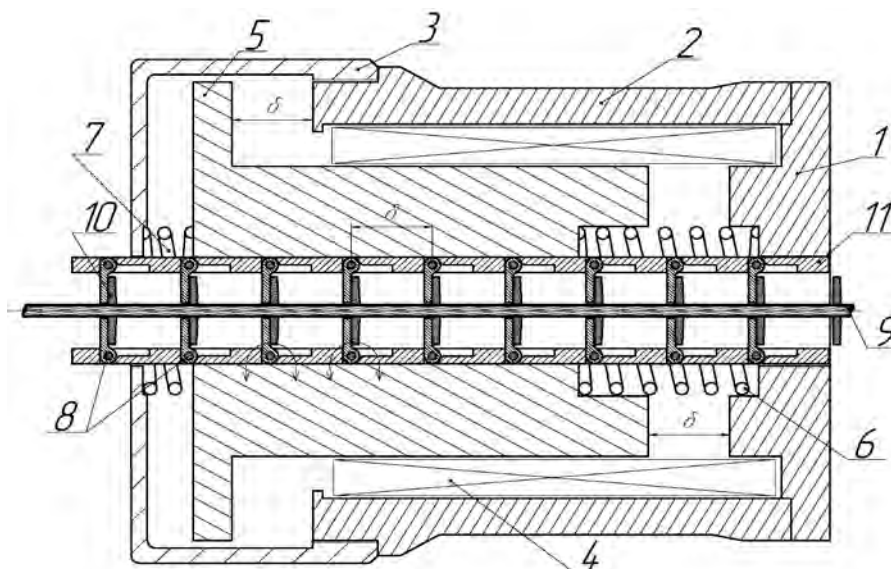


Рис.4.32 Конструкция ЛЭМД с осевым каналом и протяжным устройством с зацеплением за шайбы

При подаче в обмотку 4 питающего электрического импульса от источника якорь 5 с жестко связанным протяжным устройством 11, под действием электромагнитной силы втягивается в обмотку и сжимает возвратную пружину 6. Зацепы 8, передавая усилие шайбам 10, перемещают рабочий орган на величину рабочего хода якоря  $\delta$ . По окончании питающего импульса якорь с протяжным устройством, возвращаются пружиной 6, на величину  $\delta + \delta_{x.x}$ , сжимая пружину 7. При этом зацепы 8, тыльной стороной упираются в шайбы 10, складываются и занимают соосное с тросом 9 положение, не препятствуя возврату якоря. Под действием сжатой пружины 7 якорь перемещается на величину  $\delta_{x.x} \ll \delta$  в направлении рабочего хода, осуществляя плотный контакт вернувшихся в рабочее положение зацепов 8 с шайбами 10. Далее цикл повторяется.

Клипсатор с ЛЭМД для наложения металлических скоб на упаковку запечатываемого продукта показан на рис.4.33. Устройство содержит цилиндрический статор 5 с верхней крышкой 6 и обмоткой 9, комбинированный якорь 8, сочлененный с толкателем 11, скользящим по направляющим 12 и 13, возвратную пружину 10, магазин П-образных металлических скоб 4 и груз 7 магазина, матрицу 14, концевой выключатель 3 с толкателем 2, основание 1.

В исходном состоянии якорь 8 поджат пружиной 10 к верхней крышке 6 цилиндрического статора 5. Оболочка запечатываемого продукта подается в рабочую зону матрицы 14, воздействуя на толкатель 2 концевой выключателя 3. При подаче в обмотку 9 питающего электрического импульса напряжения якорь 8 с толкателем 11 под действием электромагнитной силы, сжимая пружину 10, перемещается по направляющим 12 и 13 и совершает рабочий ход.

Толкатель 11 обеспечивает подачу из магазина 4 и обжатие в матрице 14 П-образных металлических скоб.

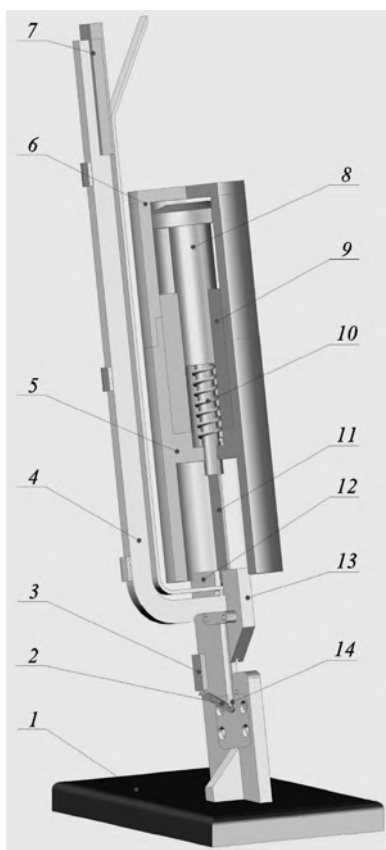


Рис.4.33 Клипсатор с дискретным ЛЭМД для наложения металлических скоб на упаковку запечатываемого продукта

Окончание технологической операции клипсования совпадает с окончанием питающего импульса напряжения на обмотке 9 электромагнитного двигателя. Под действием запасенной механической энергии в возвратном упругом элементе 10 якорь 9 возвращается в исходное положение. Далее цикл повторяется.

Сравнение традиционных и предлагаемого клипсаторов приводом показало, что применение линейного электромагнитного двигателя позволит улучшить массогабаритные характеристики устройства, снизить энергоемкость и стоимость.

#### **4.2.5. Управляющие электрические преобразователи**

Линейные электромагнитные двигатели, осуществляющие дискретное потребление и преобразование электрической энергии в механическую работу, для источника питания представляют собой нагрузку импульсного характера. Формирование в обмотке ЛЭМД униполярных импульсов напряжения и тока необходимой амплитуды, формы, длительности и частоты осуществляется с помощью специальных электрических преобразователей (ЭП). В работах [17-19] показано, что устройство ЭП оказывает решающее влияние на энергию

удара, КПД и надежность машины. Параметры источника питания и габариты (мощность) ЛЭМД определяют, главным образом, схему и конструкцию ЭП.

Классификация электрических преобразователей ЛЭМД ударных машин рассмотрена, например, в работах [17-19]. Из всего многообразия импульсных электрических преобразователей интерес, с точки зрения совершенствования существующих или разработки новых для ЛЭМД ударной машины, представляют устройства, обеспечивающие:

- возможность формирования алгоритмов управления, повышающих выходные показатели за счет интенсивности энергопреобразовательных процессов в ЛЭМД;
- возможность регулирования и стабилизации выходной механической энергии УМ;
- наличие в ЭП промежуточных накопителей энергии.

На рис.4.34 представлена классификация импульсных электрических преобразователей. Основными классификационными признаками для них являются параметры источника питания, способы гашения магнитного поля, способы управления движением якоря ЛЭМД, наличие промежуточных накопителей энергии.

Большинство ЭП предназначены для подключения к сети переменного тока стандартного напряжения (220 – 380В) и промышленной частоты (50 Гц); при этом для электрических преобразователей ЛЭМД средней и большой мощности целесообразно использовать трехфазную сеть, малой мощности – однофазную. При отсутствии сети переменного тока, применяются автономные источники питания, например, аккумуляторы и др.

В зависимости от типа применяемых в силовой части преобразователя коммутационных элементов (КЭ), различают ЭП на тиристорах или полностью управляемых элементах – транзисторах [19].

По способу управления движением якоря ЛЭМД электрические преобразователи подразделяются на управляющие в функции времени и в функции положения якоря. Управление в функции времени осуществляется от генераторов импульсов, которые формируют управляющие импульсы логического уровня. Управление в функции положения якоря-бойка предполагает наличие контактных или бесконтактных датчиков, устанавливаемых непосредственно на ЛЭМД.

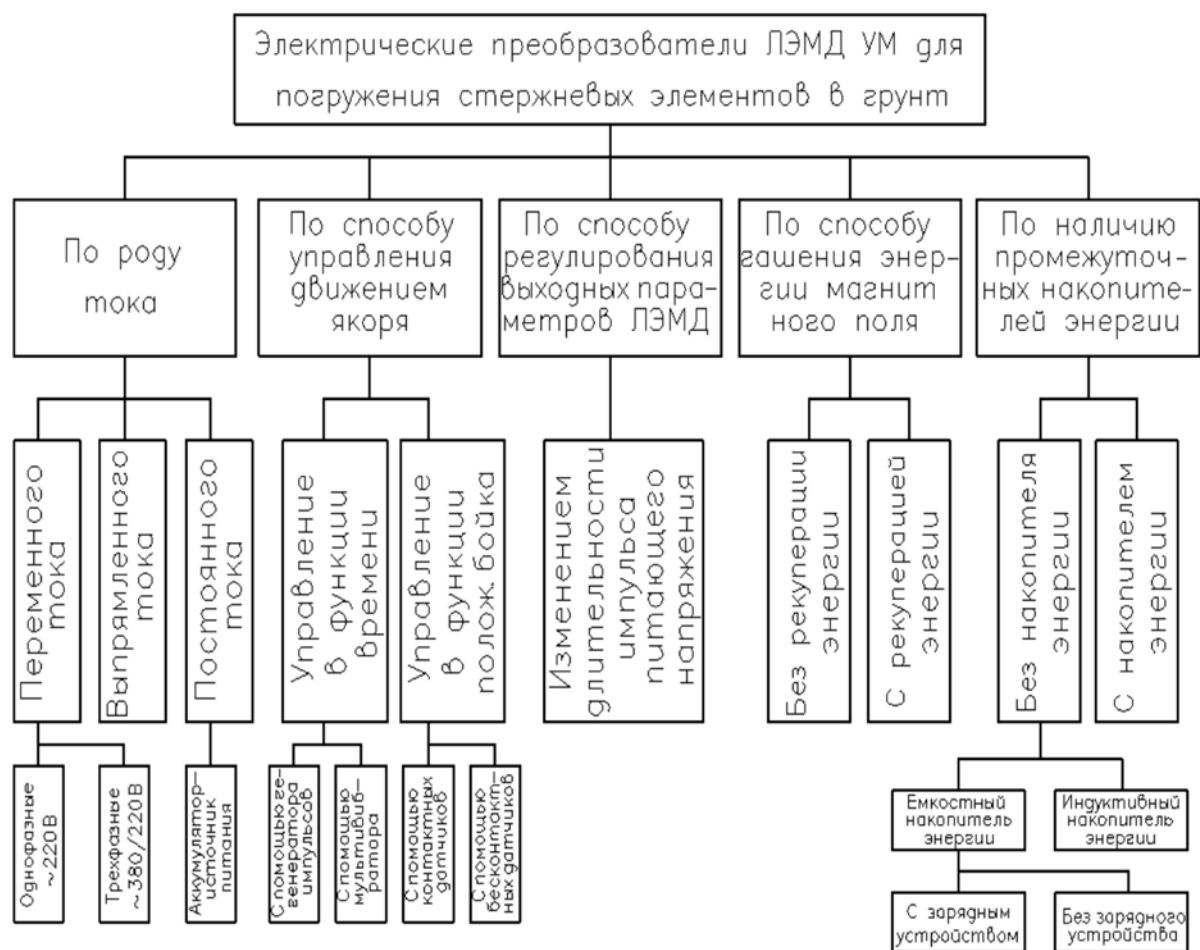


Рис.4.34 Классификация импульсных электрических преобразователей ЛЭМД УМ.

Структурные схемы импульсных электрических преобразователей, используемых, например, с аккумуляторными источниками питания показаны на рис.4.35, 4.36. Дозирование энергии, передаваемой аккумулятором в обмотку ЛЭМД ударной машины (УМ), производится либо тиристорным, либо транзисторным прерывателем постоянного тока (ППТ). Применение тиристорных в качестве бесконтактных коммутационных аппаратов значительно усложняет схему, что приводит к увеличению габаритов и массы ЭП [18].

Широкое распространение в силовых импульсных преобразователях получили транзисторы *MOSFET* и *IGBT*, обладающие следующими явными преимуществами: полной управляемостью, малыми габаритами и массой; надежностью; работоспособностью при низких температурах; мгновенным запуском; высоким КПД; малой стоимостью; небольшими эксплуатационными расходами [17; 18].

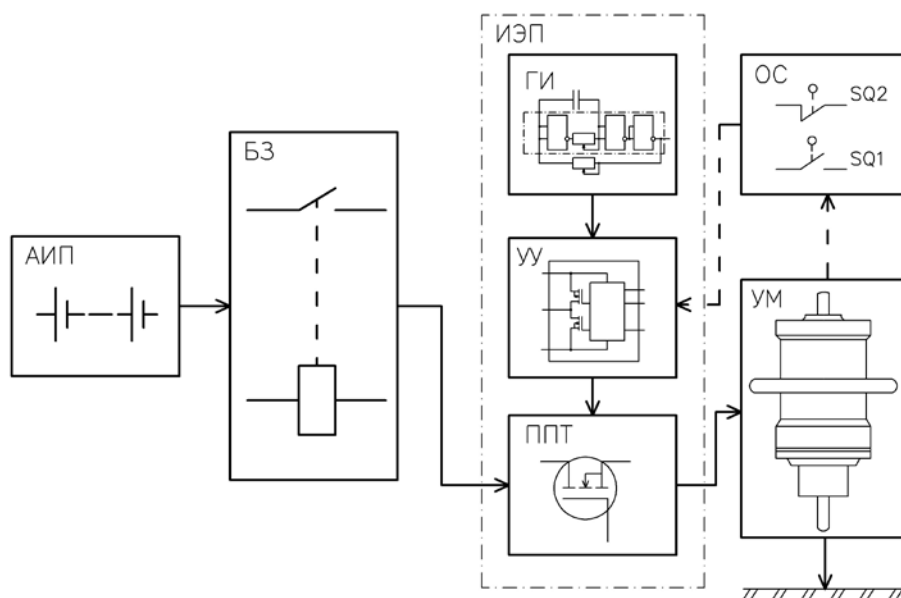


Рис. 4.35 Структурная схема импульсного преобразователя для УМ с аккумуляторным питанием

В общем случае ППТ состоит из одного или нескольких коммутационных элементов (КЭ) – транзисторов и схемы их управления. Периодическое включение КЭ прерывателя формирует в обмотке ЛЭМД питающие импульсы тока с требуемыми параметрами.

Включение и выключение КЭ увязывается с началом и окончанием рабочего хода бойка УМ. Необходимую последовательность переключений прерывателя в соответствии с выбранным алгоритмом управления движением бойка машины осуществляет устройство управления УУ (рис.4.35). Аккумуляторный источник питания обладает значительным запасом энергии и малым внутренним сопротивлением. При возникновении аварийных режимов работы резко возрастает ток, что приводит к выходу из строя самого источника и элементов электрического преобразователя. Поэтому обязателен блок защиты БЗ (рис.4.35), который обеспечивает механическое отключение силовой цепи.

Для ЭП, подключаемых к аккумуляторным источникам питания, характерным является: сравнительно низкое напряжение питания (до 100 В); большие токи нагрузки (50...150 А); широкий диапазон изменения входного и выходного напряжений; резкое понижение напряжения источника питания при больших токах нагрузки и разряде аккумуляторной батареи; активно-индуктивная нагрузка с противо-ЭДС. Такие электрические преобразователи должны удовлетворять следующим требованиям:

- коммутировать большие токи (до 200 А) при низком входном напряжении;
- система управления должна обеспечивать подачу управляющих импульсов при больших колебаниях входного напряжения
- схема должна иметь высокий КПД.

Характеристики импульсной нагрузки (ЛЭМД) и аккумуляторного источника как правило, не согласованны, так как эти источники рассчитаны не на импульсный, а на непрерывный и относительно равномерный отбор мощности. Включения между источником питания и ЛЭМД ударной машины накопителя, например, емкостного типа позволяет устранить это противоречие.

Обобщенная структурная схема ЭП с емкостным накопителем энергии показана на рис.4.36. Ударная машина УМ питается от аккумуляторного источника питания АИП через электрический преобразователь ИЭП с ЕНЭ. Энергетическая часть ИЭП включает в свой состав три функциональные части: собственно, емкостный накопитель энергии ЕНЭ, зарядное устройство ЗУ и прерыватель постоянного тока ППТ. При этом функцию согласования характеристик с АИП выполняют ЗУ и ЕНЭ, а функцию согласования с режимами и характеристиками ЛЭМД – ЕНЭ и ППТ.

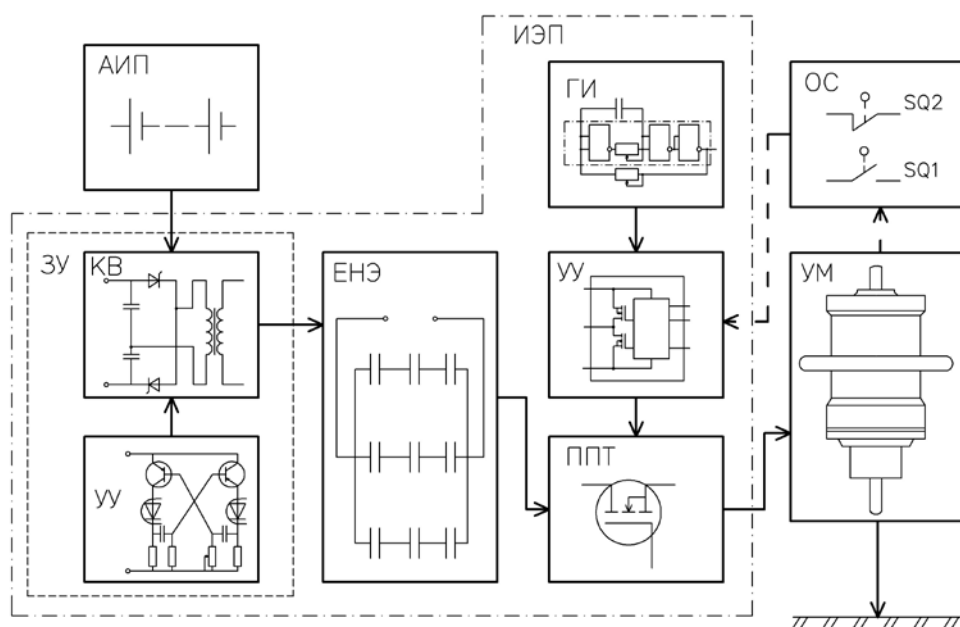


Рис.4.36 Структурная схема электрического преобразователя с емкостным накопителем энергии для питания ударной машины.

В схему зарядного устройства ЗУ включен DC-DC-преобразователь постоянного напряжения КВ (конвертор) [17].

Схемотехнические особенности характерных функциональных блоков известных электрических преобразователей предназначенных для машин с ЛЭМД приведены в [17; 18]

## **5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Повышение производительности труда и снижение энергозатрат на производство единицы продукции, улучшение использования электрооборудования и условий труда работников невозможно без внедрения системной автоматизации в сельскохозяйственное производство. Уровень автоматизации является определяющим фактором, в том числе, себестоимости производимой продукции – важного показателя конкурентоспособности производства в условиях рыночной экономики.

В данном разделе обосновывают целесообразность автоматизации того или иного технологического процесса (ТП) электрифицируемого объекта, представляют его характеристику с описанием технологического оборудования, подлежащего автоматизации. Предлагают мероприятия по автоматизации с указанием степени и формы автоматизации, принимаемых автоматических устройств, контролируемых и регулируемых параметров и пределов их изменений, точности регулирования, намечаемых к использованию приборов и оборудования, а также режимов управления ТП и оборудованием. Размещение принятого автоматического оборудования показывают на планах и разрезах производственных помещений.

Обоснование необходимости разработки раздела следует начинать с определения цели. Например, в животноводстве – это получение больших привесов животных, повышение сохранности молодняка животных и птиц, в полеводстве – это улучшение качества сушки зерна, а также во всех случаях – экономия энергоресурсов.

Намечают пути решения задач по автоматизации технологических процессов, определяя, например, способы поддержания точности температурного режима внутри животноводческого помещения, или при сушке зерна, – точность поддержания температуры теплоносителя.

Приводят характеристику объекта автоматизации, например, технологической линии. При этом, кроме описания с указанием основных параметров, представляют развернутую схему технологического процесса, изображают контуры оборудования, указывают последовательность перемещения обрабатываемого продукта.

Для наглядности следует составить и привести описание структурной и функциональной схем автоматизируемого ТП. Целесообразно привести математическую модель объекта автоматизации и провести ее аналитическое исследование.

На основе динамической структурной схемы из типовых звеньев составляют уравнение движения системы автоматического управления (САУ), опре-



деляют передаточную функцию частотные характеристики, проводят исследование на устойчивость и качество регулирования.

Важной частью раздела является разработка на основе функциональной схемы автоматизации принципиальной электрической схемы управления объектом. Эта схема может содержать релейно-контактные или бесконтактные элементы управления. Следует привести краткое описание элементов схемы управления.

### **5.1. Разработка систем автоматизации технологических процессов**

Разрабатываемые автоматические системы по функциональным признакам можно разделить на:

- системы автоматического контроля;
- системы сигнализации, автоматической защиты и блокировки;
- системы автоматического регулирования.

Системы автоматического контроля обеспечивают получение информации о состоянии объекта и режиме его работы. Контролю подлежат величины, необходимые для осуществления пуска, наладки и ведения технологического процесса. Такие системы и устройства являются разомкнутыми с односторонним направлением воздействий от управляемого объекта к контрольно-измерительным приборам. Выбор контролируемых параметров выбирается так, чтобы при минимальном числе они давали наиболее полное представление о контролируемом процессе [13-14].

Автоматические устройства сигнализации предназначены для автоматического оповещения обслуживающего персонала о наступлении некоторых событий в объекте подачей световых и звуковых сигналов. Различают контрольную сигнализацию (КС), информирующую о состоянии объекта и положении рабочего органа в данный момент и технологическую сигнализацию, оповещающую оператора об отклонениях параметров процесса и возникновении предаварийного и аварийного режимов.

Устройства и схемы автоматической защиты служат для предотвращения аварий на производстве и реагируют на нарушение нормального режима работы установки отключением управляющего воздействия.

Устройства и схемы автоматической блокировки предотвращают неправильную последовательность включений-отключений машин и аппаратов. Эти устройства приобретают большое значение при разработке комплексной автоматизации объектов и при создании автоматизированных поточных линий.

Системы программного управления осуществляют автоматическое управление технологическими процессами по заранее заданной программе, являющейся функцией времени. Их применяют для управления объектами перио-

дического действия или при автоматизации хорошо изученных процессов, где возмущающие воздействия могут быть учтены и компенсированы.

Системы автоматического регулирования (САР) обеспечивают поддержание постоянного значения параметров процесса (стабилизирующие), или изменение их по заранее заданному или неизвестному закону (программные, следящие, адаптивные системы). В САР информация о состоянии параметров при помощи датчиков поступает в управляющее устройство и затем в исполнительные органы, через которые автоматическая система воздействует на объект, изменяя управляемые параметры в требуемом направлении.

При проектировании САР управляемые (регулируемые) величины, как правило, известны. Однако, зачастую, необходимо проводить оценку статических и динамических характеристик объекта, позволяющих выбрать каналы, по которым регулирующие воздействия вносятся наиболее эффективно.

В общем случае проектирование САР включает следующие этапы:

- изучение объекта автоматизации и определение рациональных показателей его работы (состояние параметров, характеристики возмущений, регулирующие воздействия и др.);
- выбор принципа регулирования (по результатам анализа свойств объекта управления, возмущений, требований к точности);
- определение математических моделей основных элементов САР (объекта управления, чувствительного элемента, регулирующего органа);
- выбор и расчет настроечных параметров регулятора;
- оценка качества регулирования при выбранных параметрах настройки регулятора;
- рекомендации по технической реализации регулятора (для регуляторов, не выпускаемых серийно).

## **5.2. Общие сведения об исследовании объекта управления**

### **5.2.1. Основные понятия и определения**

Технологический процесс, как объект управления, характеризуется группой качественных и количественных показателей, на которые оказывают влияние возмущающие и управляющие воздействия. Управляющие воздействия могут контролироваться, а возмущения имеют случайный и неконтролируемый характер [13-14].

*Задающие воздействия  $x(t)$*  осуществляются автоматически или вручную. Они регламентируются расписанием дня, режимом работы технологического оборудования, производственными инструкциями и т.д. Как правило, переменные параметры, входящие в группу управляемых воздействий, измеряются непосредственно с помощью датчиков и обрабатываются вычислительными

устройствами, использующими математическую модель процесса и результаты измерений.

*Возмущающие воздействия  $f(t)$*  характеризуются влиянием внешних условий, технических характеристик оборудования и т.п. на ход выполняемого технологического процесса.

*Управляемые величины  $y(t)$*  характеризуют состояние автоматизированного процесса. Переменные, входящие в эту группу, часто используют для формирования воздействия на процесс с целью управления.

В состав автоматических систем для управления технологическими процессами входят различные приборы и средства автоматизации (рис.5.1). В частности:

- датчики – термометры сопротивления, кондуктометрические датчики, фотоэлементы и т.д.;
- регулирующие органы – заслонки, шиберы и т.п.;
- вторичные приборы – электронные мосты, дифференциально-трансформаторные приборы, логометры и т.д.;
- исполнительные механизмы – для двухпозиционного, непрерывного и изомного регулирования.

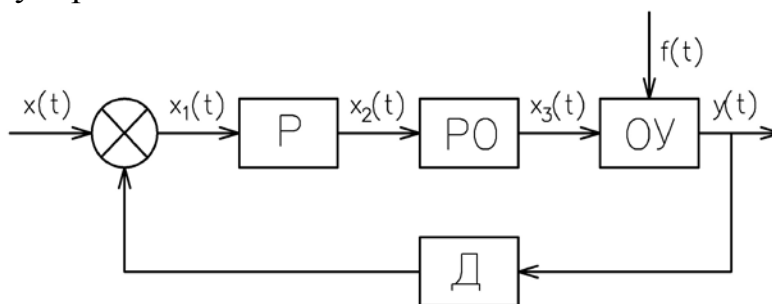


Рис.5.1 Функциональная схема САУ: Р – регулятор; РО – регулируемый орган; ОУ – объект управления; Д – датчик

Статическая характеристика – это зависимость выходного параметра объекта от одного из входных, которая может быть выражена в аналитической форме или графически при установившемся режиме работы (рис.5.2).

С учетом нечувствительности датчиков к малым отклонениям  $\varepsilon$  характеристика управления выражается уравнением:

$$y = C \pm \Delta(y) \pm C \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

где  $C$  – постоянная, равная предписанному значению;  $y$  – регулируемая величина;  $\Delta(y)$  – отклонение регулируемой величины, зависящее от некоторого переменного входного параметра или от нескольких параметров;  $\varepsilon$  – нечувствительность.

Для оценки величины отклонения управляемого параметра служат: коэффициент неравномерности  $\delta$  и коэффициент статизма  $k_{cm}$

$$\delta = \frac{(y_{\max} - y_{\min})}{y_n}; \quad (5.2)$$

$$k_{cm} = \frac{(y_1 - y_2)/y_n}{(x_1 - x_2)/x_n}, \quad (5.3)$$

где  $x_n$  и  $y_n$  – номинальные значения входных и выходных величин;  $y_1$  и  $y_2$  – значения выходных величин,  $x_1$  и  $x_2$  – задающие воздействия.

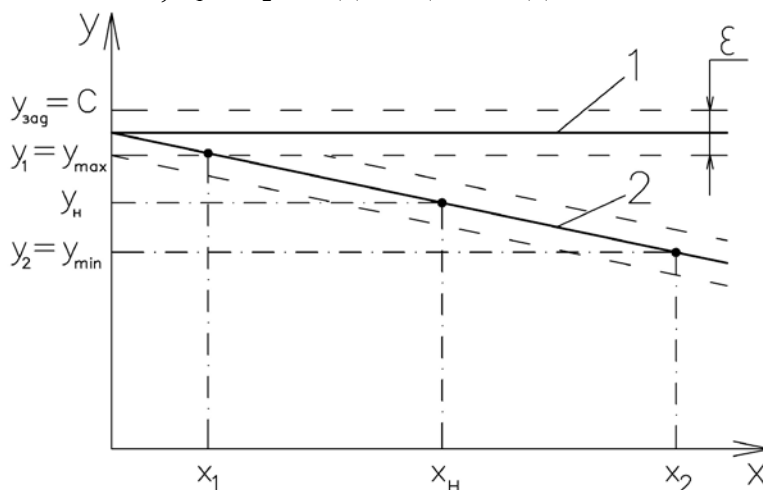


Рис.5.2 Статические характеристики ОУ при астатическом (1) и статическом (2) управлении

При *астатическом* управлении  $\Delta(y)=0$ , то есть управляемая величина независимо от режима работы объекта управления сохраняет неизменное значение, при этом коэффициенты неравномерности и статизма равны нулю:  $\delta=0$ ,  $k_{cm}=0$  во всей зоне управления.

При *статическом* управлении  $\Delta(y) \neq 0$ , что ухудшает качество управления, но обеспечивает более устойчивую работу в переходных режимах, при этом коэффициенты неравномерности и статизма отличны от нуля  $\delta \neq 0$ ,  $k_{cm} \neq 0$  во всей зоне управления.

Движение элементов САУ в переходном режиме описывают дифференциальными уравнениями, передаточными функциями, а также динамическими характеристиками. Под *динамической характеристикой* объекта управления понимается зависимость выходного регулируемого параметра от входной величины в переходном процессе, обусловленным некоторым типовым воздействием. Переходный процесс, вызванный однократным скачкообразным изменением входной величины, представляется временной характеристикой. Переходный процесс, вызванный периодическим изменением определенной частоты, определяется автоколебательной функцией.

При исследовании динамических свойств САУ, САР как правило подразумеваются следующие виды типовых переходных процессов:

- *апериодический процесс* характеризуется минимальным временем регулирования и, отсутствием перерегулирования, а также минимальным регулирующим воздействием. Этот процесс реализуют в тех случаях, когда регулирующее воздействие оказывает влияние на другие регулируемые величины;
- *монотонно убывающий процесс* при котором регулируемая величина за время действия возмущающего воздействия постепенно уменьшается, характеризуется минимальным регулирующим воздействием;
- *процесс с 20%-ым перерегулированием* является промежуточным, он применяется в тех случаях, когда в переходном режиме допустимо положительное и отрицательное отклонение регулируемого параметра;
- *процесс с минимальным интегральным критерием* характеризуется наибольшим регулирующим воздействием и обычно применяется при жестких требованиях к величине отклонений выходной величины объекта управления, так как достигается минимальное значение динамического отклонения.

В общем виде уравнение динамики для характерных процессов можно представить следующим образом:

$$C \frac{dy}{dt} = x \pm \Delta x_{\max}, \quad (5.4)$$

В табл.5.1 приведены дифференциальные уравнения для некоторых физических процессов.

Табл.5.1 – Динамика физических процессов

Технологическая операция	Уравнение динамики	Обобщенные величины		
		C	Y	X
Движение поступательное	$m \frac{dv}{dt} = N$	Масса	Линейная скорость	Сила
Движение вращательное	$J \frac{d\omega}{dt} = M$	Момент инерции	Угловая скорость	Вращающий момент
Нагревание и охлаждение	$G \frac{d\tau}{dt} = Q$	Теплоемкость	Температура	Тепловой поток
Сушка и увлажнение	$G \frac{dm}{dt} = W$	Вес абсолютно сухого материала	Относительная влажность	Поступление влаги
Растворение и осаждение из раствора	$G \frac{dc}{dt} = G$	Объем растворителя	Концентрация вещества раствора	Поступление или осаждение сухого вещества
Выпаривание	$G \frac{d\varepsilon}{dt} = W$	Вес растворенного вещества	Жидкостный коэффициент	Парообразование

При решении задачи автоматического регулирования заданной физической величины важно правильно определить необходимый закон регулирова-

ния с учетом требований к качеству регулирования и характера возмущений. При этом необходимо учитывать канал передачи воздействия на объект управления (рис.5.3).

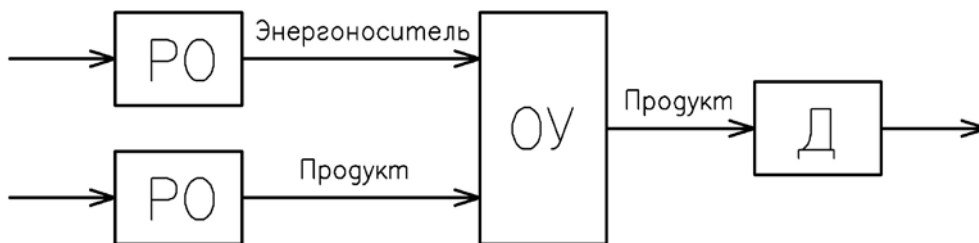


Рис.5.3 Структурная схема передачи воздействий на объект:  
ОУ – объект управления; РО – рабочий орган; Д – датчик

Внесение регулирующего воздействия можно производить как на стороне энергоносителя, так и на стороне продукта. Предпочтительность выбора определяется коэффициентом передачи  $k_{ou}$  и запаздыванием  $\tau_{ou}$  объекта по соответствующему каналу. Если  $k_{ou.эн} = k_{ou.пр}$  – регулирование возможно на любой стороне; при  $k_{ou.эн} > k_{ou.пр}$  – регулирование предпочтительней на стороне энергоносителя; при соотношении  $k_{ou.эн} < k_{ou.пр}$  – регулирование легче осуществить на стороне продукта; при  $k_{ou.эн} = 0$  – регулирование на стороне энергоносителя невозможно.

Таким образом, управляющие воздействия следует обеспечивать по тому каналу, где  $k_{ou}$  имеет наибольшее значение, а запаздывание – наименьшее.

*Полное запаздывание*  $\tau_{ou}$  определяют как промежуток времени от начала воздействия до момента изменения выходного параметра  $y(t)$ .

*Постоянная времени объекта управления*  $T_{ou}$  определяют как интервал, необходимый для изменения регулируемого параметра от момента появления воздействия до установившегося значения при сохранении начальной скорости его изменения. Промежуток времени, в течение которого осуществляется процесс регулирования, называется *временем переходного процесса*, или *временем регулирования*  $t_{рег}$ . Существует определенная зависимость между временем регулирования технологического процесса и постоянной времени объекта управления:  $t_{рег} = (3 \dots 6) T_{ou}$ . По кривой переходной характеристики методом касательной определяют величину постоянной времени объекта управления  $T_{ou}$ . Характер переходного процесса зависит от свойств объекта управления.

Для оценки и сравнения свойств САУ принят ряд показателей качества работы системы.

При *непрерывном регулировании* основными показателями качества регулирования являются быстродействие, определяемое временем переходного

процесса  $t_{рег}$ , максимальное динамическое отклонение параметра  $\Delta u_{дин}$  и статическая ошибка регулирования  $\Delta u_{ст}$ .

*Динамическое отклонение  $\Delta u_{дин}$*  представляет собой наибольшее отклонение выходного параметра от его номинального значения во время переходного процесса (при колебательном переходном процессе его максимальному значению соответствует амплитуда первой полуволны).

*При двухпозиционном регулировании* характерными показателями представляются остаточное отклонение параметра  $\Delta u_{ст}$  и продолжительность цикла  $T_{ц}$ .

*Остаточное отклонение регулируемого параметра  $\Delta u_{ст}$*  – представляет собой отклонение его под действием возмущения от номинального значения, соответствующего установившемуся режиму объекта управления. Это неустраняемое отклонение регулируемого параметра в конце переходного процесса вследствие использования статического регулятора или в результате наличия зоны нечувствительности регулятора называется *статической ошибкой регулирования*.

*Продолжительность цикла  $T_{ц}$*  – представляет собой период времени между двумя одинаковыми последовательными отклонениями регулируемого параметра.

### **5.2.2. Краткие сведения о законах регулирования, типах регуляторов и определению их параметров**

При решении задач автоматического регулирования любого технологического процесса важно правильно определить необходимый закон регулирования с учетом характера возмущений и требований, предъявленных к качеству регулирования. Процесс регулирования начинается с момента отклонения действительного значения выходного параметра от установившегося под действием возмущения и оканчивается в момент приведения его к заданному значению (при применении И-регуляторов) или новому значению с остаточным отклонением (при применении П-регуляторов).

Все регуляторы подразделяются на регуляторы прямого и непрямого действия. Большинство регуляторов прямого действия являются П-регуляторами (пропорциональными), то есть статическими, осуществляющими регулирование со статической ошибкой. В регуляторах прямого действия, как правило, имеются только установочные элементы, позволяющие изменять номинальное значение регулируемой величины. Настраиваемые параметры для изменения качества регулирования в регуляторах прямого действия отсутствуют.

В регуляторах непрямого действия рабочий орган перемещается внешней энергией – электрической или механической (энергия сжатого воздуха или по-

тока рабочей жидкости). В отличие от регуляторов прямого действия в регуляторах непрямого действия может быть осуществлен любой закон регулирования введением в структуру регулятора соответствующих звеньев и обратных связей – жесткой обратной связи для П-регулятора и гибкой обратной связи для ПИ-регулятора. Регуляторы непрямого действия могут иметь и установочные, и настроечные параметры.

Регулятор содержит следующие элементы: датчик, вторичный преобразователь, блок закона регулирования, исполнительный механизм, рабочий орган и настроечные элементы для изменения показателей качества регулирования в зависимости от динамических характеристик объекта управления. Входной величиной регулятора является изменение регулируемой величины – технологического параметра (температура, влажность и т.п.), а выходной – изменение положения рабочего органа регулятора.

Регуляторы различают по виду унифицированной зависимости «выход-вход», определяющей закон регулирования регулятора. На практике распространение получили следующие законы регулирования: пропорциональный, интегральный, пропорционально-интегральный, пропорционально-интегрально-дифференциальный.

В пропорциональном (П) регуляторе отклонение регулируемой величины от заданного значения вызывает пропорциональное по значению и скорости перемещение регулирующего органа. Эти регуляторы, называются статическими, так как в своем действии все время стремятся “догнать” отклонившуюся от заданного значения регулируемую величину и остановить ее, то есть прекратить ее дальнейшее отклонение. Для такого регулятора диапазон регулируемой величины, в пределах которого происходит перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое, является пределом пропорциональности. Этот предел представляет собой величину, обратную чувствительности регулятора. Для получения заданного предела пропорциональности в П-регуляторах обязательно наличие жесткой обратной связи, действие которой зависит только от регулируемой величины и не зависит от времени. Основным недостатком этих регуляторов – проявление в их работе статической ошибки регулирования. П-регуляторы применяются для объектов управления с небольшим запаздыванием и незначительными изменениями нагрузки. Обычно они применяются на одноемкостных, реже – на двухъемкостных объектах и обеспечивают регулирование объектов как с самовыравниванием, так и без самовыравнивания.

*Интегральный (И) регулятор* характеризуется тем, что при любой нагрузке регулирующий орган, занимает положение, обеспечивающее заданное значение регулируемой величины. Если в автоматической системе с таким ре-



гулятором произойдет отклонение регулируемой величины от заданного значения регулирующий орган будет перемещаться до тех пор, пока она не вернется к заданному значению. Подобные регуляторы могут быть с постоянной и переменной скоростью перемещения регулирующего органа. Основным недостаток этих регуляторов – замедленное действие, что позволяет применять их в тех случаях, когда допускается большое время регулирования. Такие регуляторы обладают астатической характеристикой. Их нельзя использовать на объектах управления без самовыравнивания и с запаздыванием, так как процесс регулирования может быть неустойчивым. Если И-регулятор должен обеспечивать работу объекта управления при непрерывно изменяющемся внешнем воздействии, то для устойчивого действия такой системы необходимо, чтобы максимальная скорость регулирующего воздействия была больше скорости изменения внешнего воздействия.

*Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор* совмещает в себе свойства интегрального и пропорционального регуляторов, и поэтому действует без статической ошибки. Если в автоматической системе с ПИ-регулятором произойдет нарушение равновесия, то в работу вступят его статическая и астатическая составляющие. При этом статическая часть будет стремиться «догнать» и «остановить» изменение регулируемой величины при одновременно действующей астатической составляющей. По достижении регулируемой величины первоначального значения, пропорциональная составляющая прекратит свое влияние на регулирующий орган, который займет положение, отличное от прежнего на величину, определяемую статической ошибкой. Действие астатической составляющей на регулирующий орган будет продолжаться, и поэтому он займет такое положение, при котором статическая ошибка будет устранена. В ПИ-регуляторах пропорциональная составляющая обеспечивается жесткой обратной связью, а астатическая – гибкой обратной или изодромной связью, которая проявляется только в переходном режиме, а по его окончании исчезает. ПИ-регуляторы применяются практически при любых требованиях к значению ошибки и при широком диапазоне изменения внешнего воздействия, если время регулирования превышает 6-тикратно время запаздывания.

*У пропорционально-дифференциального (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов* на перемещение регулирующего органа дополнительно к пропорциональному или пропорционально-интегральному действию оказывает влияние скорость изменения регулируемой величины, которая представляет собой первую производную по времени. Введение первой производной в закон регулирования вынуждает регулирующий орган перемещаться с некоторым временным опережением, возрастающим по мере увеличения скорости изменения регулируемой величины. С уменьшением

скорости изменения регулируемой величины уменьшается и опережающее действие, а полностью оно прекращается, когда регулируемая величина перестает изменяться. ПД-регуляторы рекомендуются для объектов управления с большим временем запаздывания, незначительными изменениями воздействий и со средней емкостью. ПИД-регуляторы пригодны для объектов с большими запаздываниями, значительными и резкими изменениями внешних воздействий и с любой емкостью.

К *двухпозиционным регуляторам* относятся такие, у которых выходной элемент имеет только два устойчивых состояния: одно – когда отклонение управляемой величины перейдет установленный положительный предел управляемой величины (выключено), а другое – когда отклонение изменяет знак и достигает отрицательного предела установившегося значения (включено). Управляющее воздействие в обеих позициях одинаково по абсолютной величине, но различно по знаку, причем это воздействие посредством регулятора заставляет регулируемый орган перемещаться таким образом, чтобы абсолютная величина отклонения всегда уменьшалась. Таким образом, двухпозиционные регуляторы являются регуляторами дискретного (релейного) действия. При любом отклонении номинального значения регулируемого параметра рабочий орган полностью перемещается в одно из крайних положений. Таким образом, функциональная зависимость между изменением входной и выходной величины регулятора отсутствует. Изменение зоны неоднозначности регулятора и возмущающих воздействий достигается настройкой диапазона регулирования.

При выборе проверяется возможность применения двухпозиционного регулятора и, если установлена его непригодность, выбирается регулятор непрерывного действия и определяется закон регулирования.

При выборе типа регулятора исходят из отношения времени запаздывания объекта управления  $\tau_{oy}$  к постоянной времени  $T_{oy}$ , определяемых, например, по переходной характеристике:

- при  $\tau_{oy}/T_{oy} < 0,2$  выбирают двухпозиционный закон регулирования;
- при соотношении  $0,2 < \tau_{oy}/T_{oy} < 1$  выбирают регуляторы непрерывного действия.

Тип регулятора удобно определять на основании рассчитанных значений трех безразмерных коэффициентов: коэффициента  $\psi_{oy}$ , выражающего динамические свойства объекта регулирования, коэффициента  $\psi_p$ , характеризующего требования к качеству регулирования в переходном процессе, и динамического коэффициента  $k_{дин}$ , определяющего роль регулятора в устранении последствий возмущений для объекта управления.

Перечисленные коэффициенты определяют по следующим выражениям:

$$\varphi_{oy} = \frac{T_{oy}}{\tau_{oy}}, \quad (5.5)$$

$$\varphi_p = \frac{T_{pez}}{\tau_{oy}}, \quad (5.6)$$

Для статических объектов управления:

$$k_{дин} = \frac{\Delta y}{k_{oy} \cdot (\pm \Delta x_{max})} = \frac{\Delta y_1}{\Delta y}, \quad (5.7)$$

где  $\Delta y_1$  – динамическое отклонение, представляющее собой наибольшее отклонение выходного параметра от его номинального значения во время переходного процесса (при колебательном переходном процессе его максимальное значение соответствует амплитуде 1-й полуволны).

Для астатического объекта управления:

$$k_{дин} = \frac{tg \alpha_{дин}}{tg \alpha_{oy}} = \frac{tg \alpha_{дин}}{k_{oy} \cdot (\pm \Delta x_{max})}. \quad (7.8)$$

По вычисленным значениям коэффициентов  $\psi_{oy}$ ,  $\psi_p$ , являющихся координатами диаграммы (рис.5.4), определяют область использования закона регулирования. Нанесенная штриховка на линиях областей показывает зону, в которой сохраняется данный закон регулирования. При выборе простых регуляторов (И- и П-регуляторов) необходимо соответствие рассчитанного динамического коэффициента  $k_{дин}$  значению, указанному для найденной области закона регулирования. Например, положение т. А (рис.5.4), находящейся в области ПИД-, ПИ- и П-регуляторов позволяет выбрать любой из них. В тех случаях, когда для П- или И-регуляторов рассчитанное значение динамического коэффициента будет равно или больше указанного на диаграмме, следует принимать указанные типы регуляторов; в противном случае необходимо выбрать более сложные ПИ- или ПИД-регуляторы.

Параметрами настройки регуляторов являются: коэффициент передачи или коэффициент пропорциональности  $k_p$ ; постоянная интегрирования или время удвоения, время изодрома  $T_u$ ; постоянная дифференцирования или время предварения  $T_d$ .

Путем соответствующего выбора этих величин можно перенастраивать систему автоматического регулирования и получать необходимое качество переходных процессов. Чем сложнее регулятор, тем лучше обеспечивается качество регулирования в САР с таким регулятором. В системах, содержащих П-регуляторы, имеет место статическая ошибка, поэтому их еще называют статическими регуляторами. Эта ошибка тем меньше, чем больше величина коэффи-

циента пропорциональности  $k_p$ . Но его максимальная величина ограничена условиями устойчивости системы [13-14; 22].

В системах автоматического регулирования с И-, ПИ- и ПИД-регуляторами статическая ошибка отсутствует. Они являются астатическими. И-регулятор имеет один параметр настройки – время интегрирования  $T_u$ . Настраиваемыми параметрами П-, ПИ- и ПИД- регуляторов являются  $k_p$ ,  $T_u$ ,  $T_d$ . В общем случае расчет параметров настройки регулятора представляет собой сложную оптимизационную задачу нелинейного программирования.

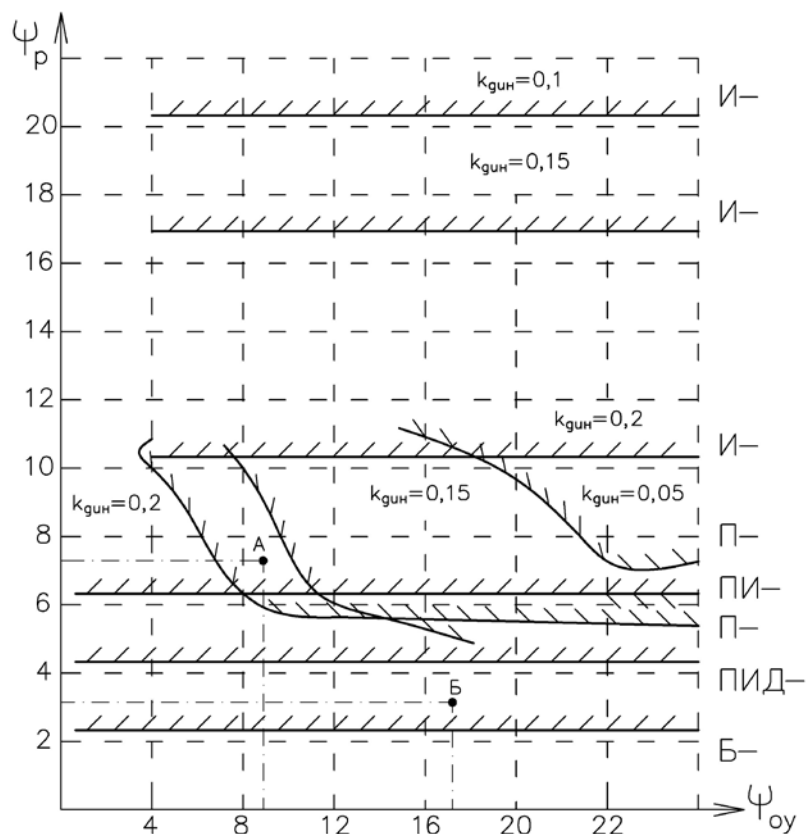


Рис.5.4 Диаграмма А.Я. Лернера для выбора закона регулирования:

Б –быстродействующие; ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальные;  
ПИ – пропорционально-интегральные (изодромные); П – пропорциональные (статические); И – интегральные (астатические)

На практике расчет значений коэффициента пропорциональности  $k_p$  определяют для различных типов переходного процесса регулирования по эмпирическим выражениям табл.5.2.

При изменении параметров настройки регуляторов показатели качества переходного процесса меняются по-разному. При увеличении коэффициента пропорциональности  $k_p$  динамическая ошибка  $\Delta u$  и степень затухания  $\psi$  переходного процесса, уменьшаются, а время регулирования  $T_{рег}$  сначала уменьшается, а затем начинает расти. При увеличении времени удвоения (постоянной интегрирования)  $T_u$  показатели качества меняются аналогично тому, как это

было при увеличении коэффициента пропорциональности  $k_p$ , но степень затухания  $\psi$  уменьшается значительно скорее. Статическая ошибка регулирования при увеличении  $k_p$  уменьшается, а при введении интегральной составляющей исчезает совсем.

Табл.5.2 – Значения коэффициента пропорциональности  $k_p$

Закон регулирования	Апериодический переходный процесс	Переходный процесс с 20% перерегулированием	Переходный процесс с минимальным интегрирующим критерием.
И-	$k_{p\text{ см}}=1/(4,5k_{oy}T_{oy})$	$k_{p\text{ см}}=1/(1,7k_{oy}T_{oy})$	$k_{p\text{ см}}=1/(1,7k_{oy}T_{oy})$
П-	$k_{p\text{ см}}=0,3T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $k_{p\text{ а}}=0,4T_{oy}/\tau_{oy}$	$k_{p\text{ ст}}=0,7T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $K_{p\text{ а}}=0,7T_{oy}/\tau_{oy}$	$k_{p\text{ см}}=0,9T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ -
ПИ-	$k_{p\text{ см}}=0,6T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $k_{p\text{ а}}=0,4T_{oy}/\tau_{oy}$ $T_{уз\text{ см}}=0,6T_{oy}$ $T_{уз\text{ а}}=6\tau_{oy}$	$k_{p\text{ см}}=0,7T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $k_{p\text{ а}}=0,7T_{oy}/\tau_{oy}$ $T_{уз\text{ см}}=0,7T_{oy}$ $T_{уз\text{ а}}=3\tau_{oy}$	$k_{p\text{ см}}=T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $k_{p\text{ а}}=T_{oy}/\tau_{oy}$ $T_{уз\text{ см}}=T_{oy}$ $T_{уз\text{ а}}=4\tau_{oy}$
ПИД-	$k_{p\text{ см}}=0,95T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $T_{уз\text{ см}}=2,4\tau_{oy}$ $T_{\partial\text{ см}}=0,4\tau_{oy}$ $k_{p\text{ а}}=0,6T_{oy}/\tau_{oy}$ $T_{уз\text{ а}}=5\tau_{oy}$ $T_{\partial\text{ а}}=0,2\tau_{oy}$	$k_{p\text{ см}}=1,2T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $T_{уз\text{ см}}=2,0\tau_{oy}$ $T_{\partial\text{ а}}=0,4\tau_{oy}$ $k_{p\text{ а}}=1,1T_{oy}/\tau_{oy}$ $T_{уз\text{ а}}=2\tau_{oy}$ $T_{\partial\text{ а}}=0,4\tau_{oy}$	$k_{p\text{ см}}=1,4T_{oy}/(k_{oy}\tau_{oy})$ $T_{уз\text{ см}}=1,3T_{oy}$ $T_{\partial}=0,5\tau_{oy}$ $k_{p\text{ а}}=1,4T_{oy}/\tau_{oy}$ $T_{уз\text{ а}}=1,6\tau_{oy}$ $T_{\partial\text{ а}}=0,5\tau_{oy}$

Двухпозиционные регуляторы являются наиболее простыми, которые создают в САР режим автоколебаний, амплитуда  $A$  и период  $T$  которых определяются динамическими свойствами объекта управления ( $\tau_{oy}$ ,  $T_{oy}$ ,  $k_{oy}$ ) и настроенными параметрами регулятора: управляющими воздействиями  $B_1$  и  $B_2$ , зоной нечувствительности  $2a$ .

На рис.5.5,а,б представлены диаграммы переключений двухпозиционного регулятора и характер изменения выходной регулируемой величины для статического объекта, у которого переходная характеристика определяется дифференциальным уравнением второго порядка. Минимальному значению  $y_{min}$  выходного параметра соответствует состояние  $B_1$  регулятора и приток энергоносителя в объект. При этом выходной параметр  $y$  будет возрастать по кривой переходной характеристики до точки 2, соответствующей зоне нечувствительности регулятора. При достижении этого значения регулятор прекращает подачу энергии, но при наличии запаздывания  $\tau_z$  выходной параметр продолжает увеличиваться до значения 3, после чего начинается уменьшение в той же последовательности.

Переходный процесс в статических объектах управления в режиме двухпозиционного регулирования определяется уравнением:

$$y = y_o e^{-t/T_{oy}} + y_{ycm} (1 - e^{-t/T_{oy}}), \quad (5.9)$$

где  $y_o$  – начальное значение регулируемого параметра;  $y_{ycm}$  – установившееся значение регулируемого параметра. Тогда продолжительность возрастания регулируемого параметра:

$$T_{(+)} = T_{oy} \cdot \ln(y_{ycm} - y_{\min}). \quad (5.10)$$

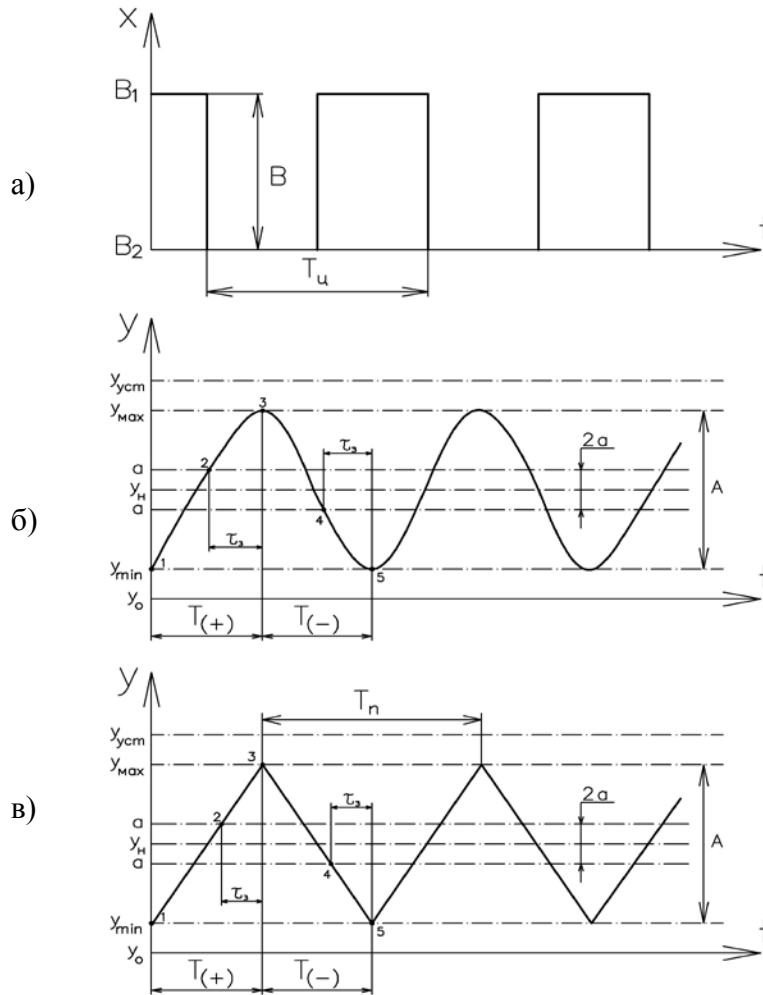


Рис.5.5 Переходные процессы при двухпозиционном регулировании:  
 а) регулятор; б) статический объект; в) астатический объект

Продолжительность убывания регулируемого параметра:

$$T_{(-)} = T_{oy} \cdot \ln(y_{ycm} - y_{\min}). \quad (5.11)$$

Соответственно, полное время цикла составит:

$$T_u = T_{(+)} + T_{(-)}, \quad (5.12)$$

Тогда

$$y_{\max} = -y_{\min} e^{-T_{(+)}/T_{oy}} + y_{ycm} - y_{ycm} e^{-T_{(+)}/T_{oy}}, \quad (5.13)$$

$$y_{\min} = -y_{\max} e^{-T_{(-)}/T_{oy}} + y_{ycm} - y_{ycm} e^{-T_{(-)}/T_{oy}}. \quad (5.14)$$

Для системы регулирования, состоящей из астатического объекта управления и двухпозиционного регулятора (рис.5.5,а,в), основные показатели качества можно определить, как:

$$y = y_o + \frac{x\tau}{T_{oy}}, \quad (5.15)$$

В установившемся режиме двухпозиционного регулирования  $x = \pm 1$ , так как  $y_{max} = y_o$ , тогда при возрастании регулируемого параметра:

$$a = -y_{min} + \frac{\tau_{12}}{T_{(+)}} \quad \text{или} \quad (5.16)$$

$$y_{min} = -a + \frac{\tau_{12}}{T_{(+)}}. \quad (5.17)$$

Ввиду запаздывания регулируемый параметр будет продолжать расти, несмотря на закрытие рабочего органа регулятора. Максимальное значение регулируемого параметра при этом можно определить, как:

$$y_{max} = a + \frac{t}{T_{(+)}}. \quad (5.18)$$

Продолжительность возрастания регулируемого параметра:

$$T_{(+)} = \frac{y_{min} + a}{\tau_{12}} = \frac{y_{max} + a}{t}. \quad (5.19)$$

При уменьшении регулируемого параметра:

$$y_{max} = -a + \frac{\tau_{34}}{T_{(+)}} \quad (5.20)$$

$$y_{min} = -a - \frac{t}{T_{(-)}}, \quad (5.21)$$

$$T_{(-)} = \frac{y_{min} + a}{\tau_{34}} = \frac{-y_{min} - a}{t}. \quad (5.22)$$

Амплитуда колебаний зависит только от времени запаздывания и зоны нечувствительности регулятора. Выбранные параметры регулятора – зона неоднозначности  $2a$  и величина регулирующего воздействия  $B$  должны обеспечивать минимальную амплитуду  $A$  и максимальный период (цикл)  $T_n$  автоколебаний. Однако уменьшение зоны неоднозначности снижает не только амплитуду, но и период автоколебаний, при этом наряду с улучшением эксплуатационных характеристик наблюдается сокращение срока службы регулятора.

Зона неоднозначности должна быть пропорциональна величине управляющих воздействий  $B$  (рис.5.5), для чего должно выполняться неравенство:

$$[(B + \Delta x)k_{oy} + y_o][1 - e^{-t/T_{oy}}] + 2a \cdot e^{-t/T_{oy}} \leq A + y_o, \quad (5.24)$$

где амплитуда автоколебаний  $A$  соизмерима с приложенными к системе воздействиями  $B$ , а выражение  $[(B + \Delta x)k_{oy} + y_o]$  представляет собой установившееся значение регулируемой величины  $y_{уст}$ . Тогда зону неоднозначности можно определить, как:

$$2a = \frac{[(A + y_o) - y_{уст}(1 - e^{-t/T_{oy}})]}{e^{-t/T_{oy}}}. \quad (5.25)$$

Приведенные выражения позволяют определить максимальное положительное и отрицательное отклонение регулируемого параметра, а также длительность как отдельных периодов, так и всего цикла в целом. При этом время периода автоколебаний  $T_u$  должно превышать значение постоянной времени объекта управления  $T_{oy}$ , чтобы обеспечивался установившийся динамический режим. Если этого не происходит, необходимо уменьшить зону неоднозначности  $2a$  или входные воздействия  $B1$  и  $B2$ .

После определения закона регулирования необходимо проверить выбранный регулятор по статической ошибке регулирования:

1. Если система регулирования, состоит из статического объекта управления и статического регулятора (П-регулятора), статическая ошибка регулирования  $\Delta y_{ст}$  пропорциональна приложенному возмущению и уменьшается с увеличением коэффициента передачи разомкнутой системы управления ( $k_{сис} = k_{oy} \cdot k_p$ )

$$\Delta y_{ст} = k_{oy} \frac{(\pm \Delta x_{\max})}{(1 + k_{сис})}. \quad (5.26)$$

2. Если система регулирования, состоит из астатического объекта управления и статического регулятора (П-регулятора), то статическая ошибка  $\Delta y_{ст}$  будет прямо пропорциональна приложенному возмущению и обратно пропорциональна коэффициенту передачи статического регулятора:

$$\Delta y_{ст} = k_{oy} \frac{(\pm \Delta x_{\max})}{k_p}. \quad (5.27)$$

Затем проверяют, обеспечивают ли выбранные типы регуляторов заданное время регулирования:

$$T_{рег} = \psi \cdot \tau_{oy}, \quad (5.28)$$

где  $\psi$  – относительное время регулирования, выбираемое по табл.5.3 для различных видов переходных процессов.

При превышении времени регулирования над заданным значением рекомендуется усложнить закон регулирования. Для этого необходимо в существующий закон регулирования добавить интегрирующее или дифференцирующее звенья.



Табл.5.3. – Относительное время регулирования

Закон регулирования	Объект управления	Апериодический переходный процесс	Переходный процесс с 20% перерегулированием	Переходный процесс с минимальным интегрирующим критерием.
И-	Статический	30	15–30	20–40
	Астатический	—	—	—
П-	Статический	4,5	6,5	9,0
	Астатический	6,0	8,0	—
ПИ-	Статический	8,0	12,0	16,0
	Астатический	14,0	16,0	18,0
ПИД-	Статический	5,5	7,0	10,0
	Астатический	9,0	12,0	13,0

### 5.3. Технические средства автоматизации

#### 5.3.1. Датчики

Датчик – это устройство, преобразующее контролируемую величину в выходной сигнал, удобный для передачи и дальнейшей обработки.

**Датчики положения.** К датчикам положения (бесконтактные конечные выключатели) относятся емкостные, индуктивные, оптические и ультразвуковые устройства [22].

Принцип действия *емкостного бесконтактного выключателя* (КВ) состоит в следующем. Чувствительная поверхность КВ образуется двумя concentric расположенными металлическими электродами, поверхности *A* и *B* (рис.5.6) которых находятся в цепи обратной связи высокочастотного генератора.

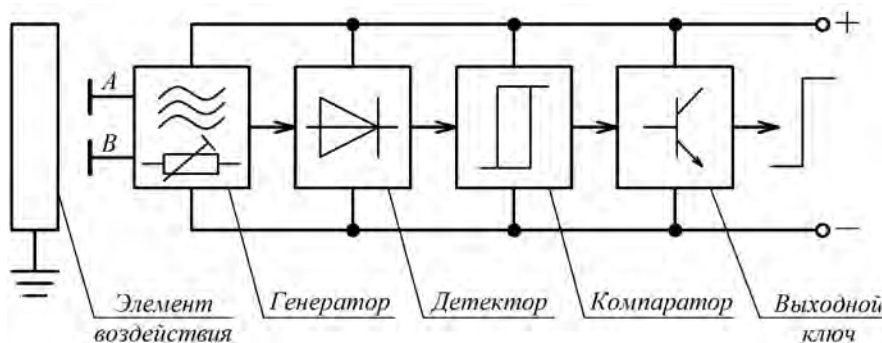


Рис.5.6 Структурная схема емкостного выключателя

При приближении объекта детектирования к чувствительной поверхности датчика такая емкость связи между пластинами *A* и *B* повышается и амплитуда выходного сигнала генератора возрастает. Колебания регистрируются схемой сравнения и преобразуются в логический сигнал включения.

Емкостные выключатели срабатывают как от электропроводящих объектов, так и от диэлектриков. При воздействии объектов из электропроводящих материалов реальное расстояние срабатывания  $S_r$  максимально, а при воздей-

ствии объектов из диэлектрических материалов расстояние уменьшается в зависимости от диэлектрической проницаемости материала  $\varepsilon_r$  (рис.5.7). Номинальное расстояние срабатывания  $S_n$  и гарантированный интервал воздействия  $S_a$ , указанные в технических характеристиках выключателей, относятся к заземленному металлическому объекту воздействия ( $S_r=100\%$ ).

Соотношение для определения реального расстояния срабатывания  $S_r$  представляется в виде:

$$0,9S_n < S_r < 1,1S_n. \quad (5.28)$$

Емкостные бесконтактные конечные выключатели используются, в частности, для контроля уровня наполнения резервуаров, емкостей, контейнеров сыпучими и жидкими материалами, содержимого в упаковке и таре; сигнализации разрыва лент; счета и позиционирования объектов любого рода. Возможно применение емкостных выключателей в пищевой и в химической отраслях промышленности. При этом для исключения непосредственного контакта активной поверхности выключателя с пищевыми продуктами или с химически агрессивными средами следует использовать защитную диэлектрическую перегородку, изготовленную из соответствующих материалов.

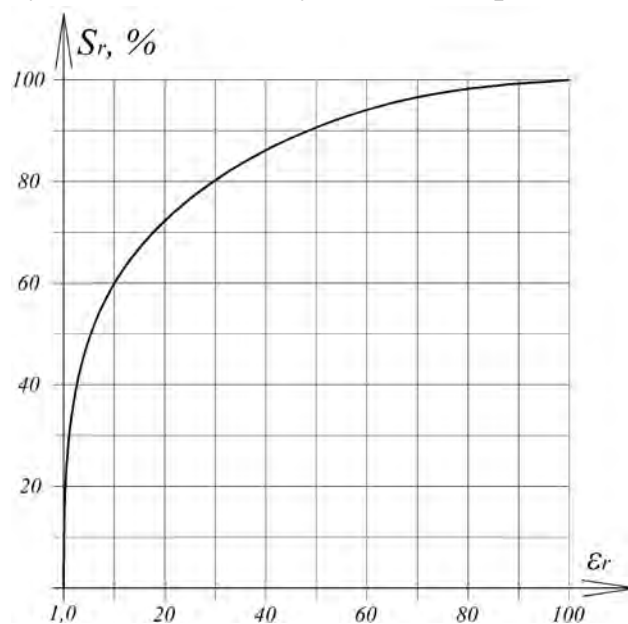


Рис.5.7 Зависимость реального расстояния срабатывания  $S_r$  от диэлектрической проницаемости материала объекта  $\varepsilon_r$

Например, для обнаружения объекта за металлической стенкой емкости или бункера потребуется окно, закрытое диэлектрической перегородкой (оргстекло, стеклотекстолит), перед которым устанавливается емкостной выключатель. В этом случае толщина стенок должна быть меньше расстояния воздействия выключателя. Диэлектрик подбирается с малой диэлектрической проницаемостью (табл.5.4).

Табл.5.4 – Диэлектрическая проницаемость материалов

Материал	$\epsilon_r$	Материал	$\epsilon_r$	Материал	$\epsilon_r$
Бумага	2,3	Дерево	2...7	Спирт этиловый	26
Бензол	2,3	Нефть	2,2	Стекло	5
Винипласт	4,0	Оргстекло	3,2	Стеклотекстолит	5,5
Вода	80	Полипропилен	2,3	Толуол	2,4
Воздух	1,0	Полистирол	3,0	Масло трансформаторное	2,3
Гетинакс	7,5	Полиэтилен	2,3	Цемент	2,0

При монтаже емкостных КВ используют выносное и невыносное исполнение. Выносное исполнение имеет повышенную чувствительность, которая настраивается на определение жидкости в пластиковых емкостях или трубах (рис.5.8,а). Невыносное исполнение устанавливается в местах с повышенной опасностью получения механических повреждений активной поверхности выключателя (рис.5.8,б).

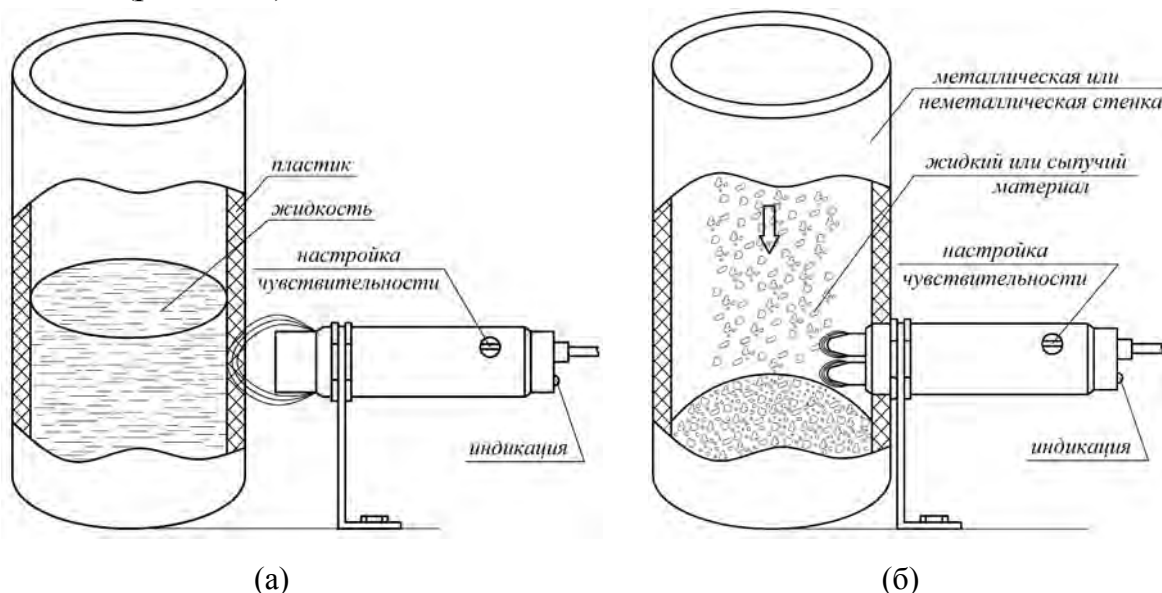


Рис.5.8 Пример установки емкостного выключателя с выносной (а) и невыносной (б) чувствительной поверхностью

Для нормальной работы емкостной выключатель защищен от ложных воздействий, которые вызваны атмосферными осадками (налипание снега, капли дождя), пылью при производстве строительных материалов, случайным прикосновением исполнителя.

Принцип действия *индуктивного бесконтактного выключателя* основан на изменении амплитуды колебаний выходного сигнала генератора при внесении в активную зону датчика металлического, магнитного, ферромагнитного или аморфного магнитного материала определенных размеров. При подаче питания на индуктивный КВ в области его чувствительной поверхности образуется изменяющееся магнитное поле (рис.5.9), наводящее во внесенном материале вихревые токи, которые приводят к изменению амплитуды колебаний генератора. В результате вырабатывается аналоговый выходной сигнал, величина которого изменяется

в зависимости от расстояния между датчиком и контролируемым предметом. Триггер преобразует аналоговый сигнал в логический, устанавливая уровень переключения и величину гистерезиса.

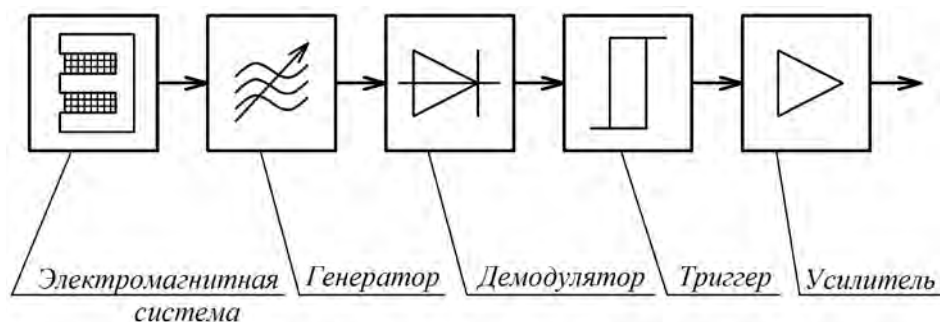


Рис.5.9 Структурная схема индуктивного выключателя

Индуктивные выключатели наиболее эффективно используют в качестве конечных выключателей в автоматических линиях, станках и др., так как они чувствительны к металлам и нечувствительны к остальным материалам. Это увеличивает их защищенность от помех, например, от попадания в зону чувствительности выключателя рук оператора, воды, смазки, что исключает ложное срабатывание. Объектом воздействия для индуктивных выключателей являются металлические детали: зубья шестерен, кулачки, ползуны.

Номинальное расстояние воздействия  $S_n$  и гарантированный интервал воздействия  $S_a$ , указанные в технических характеристиках выключателей, относятся к стандартному объему воздействия – это квадратная пластина из стали Ст40, толщиной 1 мм, сторона квадрата равна большему из значений: диаметру активной поверхности выключателя или значению  $3S_n$ . Соотношение для определения реального расстояния воздействия  $S_r$  (1) – справедливо для стандартного объекта воздействия.

Если объект имеет размеры меньше стандартного или выполнен не из стали (табл.5.5), то расстояния  $S_n$ ,  $S_r$ ,  $S_a$  следует умножить на поправочный коэффициент  $k$  (рис.5.10).

Табл.5.5 – Поправочный коэффициент  $k$  для некоторых металлов и сплавов

Материал	Поправочный коэффициент $k$
Сталь 40	1,00
Чугун	0,93...1,05
Никель	0,65...0,75
Нержавеющая сталь	0,60...1,00
Алюминий	0,30...0,50
Латунь	0,35...0,50
Медь	0,25...0,45

По оси абсцисс на диаграмме (рис.5.10) откладывается отношение площади используемого объекта воздействия  $S_{\text{исп}}$  к площади стандартного  $S_{\text{ст}}$ .

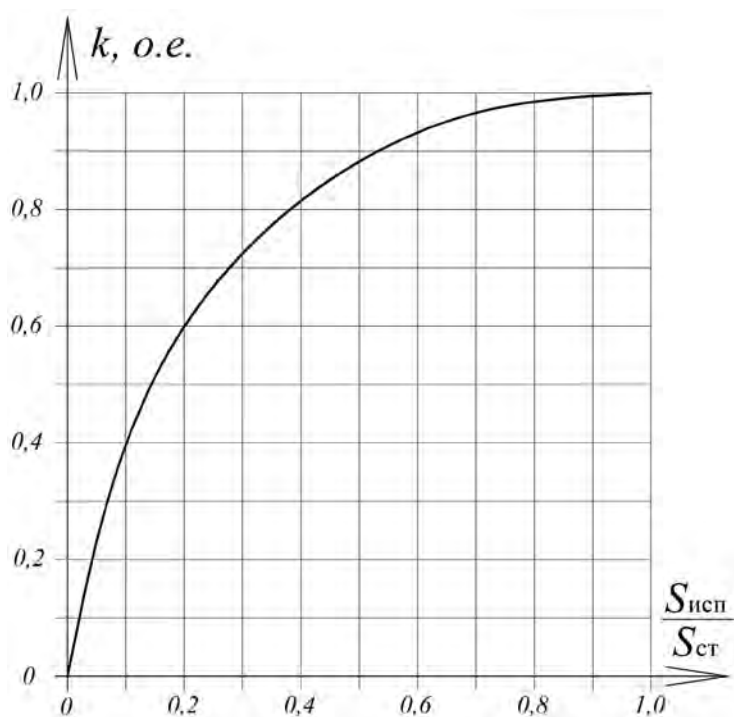


Рис.5.10 Зависимость поправочного коэффициента от площади объекта воздействия

*Оптический бесконтактный выключатель (ОБВ)* – это электронное устройство, которое обнаруживает контролируемый объект, отражающий или прерывающий оптическое излучение, и имеет полупроводниковый или релейный коммутационный элемент. Такие выключатели используют для определения наличия (отсутствия) объекта в заданном пространстве

Оптические выключатели состоят из двух функционально законченных узлов – источника излучения и приемника этого излучения. Источник оптического излучения (излучатель) и приемник могут быть выполнены в одном или в разных корпусах (рис.5.11).

Основными элементами ОБВ являются:

источник излучения:

- *генератор* – вырабатывает последовательность электрических импульсов на излучатель;
- *излучатель* – светодиод, создающий излучение оптического диапазона;
- *индикатор* – показывает наличие напряжения питания на излучателе;
- *оптическая система* – формирует диаграмму направленности излучения и, при необходимости, поляризацию излучения;

приемник излучения:

- *оптическая система* – формирует диаграмму направленности приемника и при необходимости производит поляризационную селекцию;

- *фотоприемник* – воспринимает излучение и преобразует его в электрический сигнал;
- *усилитель* – увеличивает мощность входного сигнала до необходимого значения;
- *пороговый элемент* – обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса;
- *электронный ключ* – обеспечивает коммутацию выходного тока выключателя, определяет схему подключения нагрузки и защиту от перегрузки и короткого замыкания;
- *регулятор чувствительности* – позволяет производить настройку выключателя по фактической контрастности объекта на фоне окружающих предметов;
- *корпус* – обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий и выполняется, например, из латуни или полиамида;
- *светодиодный цветной индикатор* – сигнализирует о состоянии выключателя, позволяет определить функциональный резерв по выбранному объекту, обеспечивает контроль работоспособности.

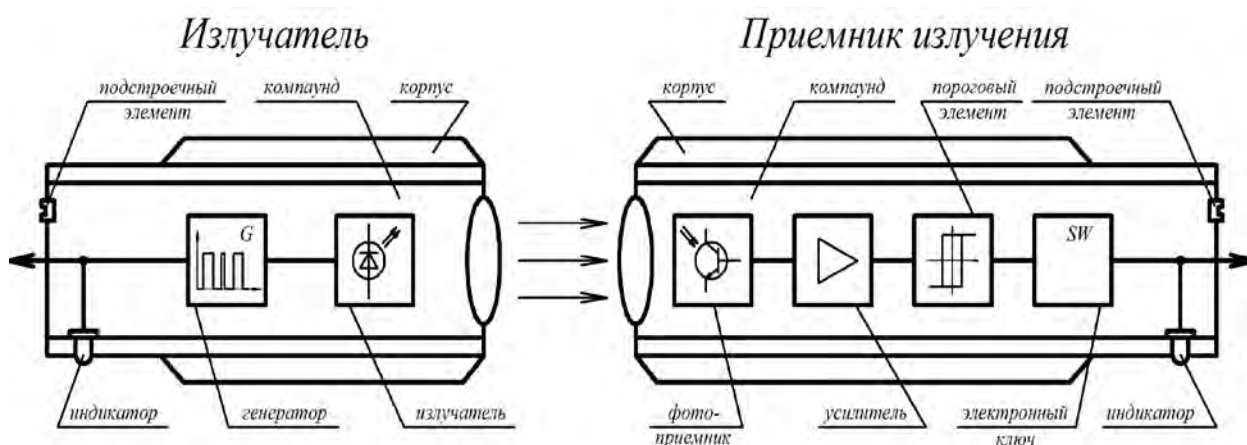


Рис.5.11 Структурная схема оптического конечного выключателя

Функциональный резерв определяется как отношение светового потока, полученного приемником, к минимальному световому потоку, вызывающему срабатывание выключателя, и позволяет компенсировать ослабление сигнала в результате загрязнения оптики и наличия аэрозольных компонентов в окружающем пространстве.

Важной характеристикой оптических конечных выключателей является зона чувствительности  $S_{\text{раб}}$ , под которой понимается зона срабатывания. Она ограничивается максимальным  $S_{\text{max}}$  и минимальным расстоянием  $S_{\text{min}}$  срабатывания (рис.5.12).

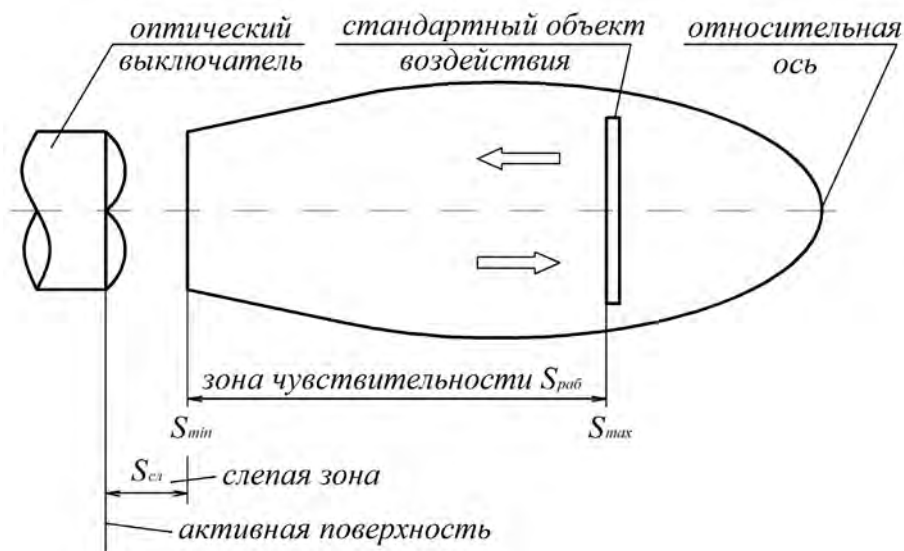


Рис.5.12 Зоны чувствительности оптического конечного выключателя

Минимальное расстояние срабатывания  $S_{min}$  – нижний предел зоны чувствительности бесконтактного оптического выключателя, максимальное расстояние срабатывания  $S_{max}$  – верхний предел зоны чувствительности ОБВ. Слепая зона  $S_{сл}$  – это зона от активной поверхности выключателя до минимального расстояния срабатывания  $S_{min}$ , в которой объект воздействия не обнаруживается.

В соответствии с ГОСТ Р 50030.5.2 оптические бесконтактные выключатели классифицируются на три группы:

- тип  $T$  – с приемом прямого луча от излучателя;
- тип  $R$  – с приемом луча, возвращенного от отражателя;
- тип  $D$  – с приемом луча, рассеянно отраженного от объекта.

Оптические выключатели, работающие на прямом луче (тип  $T$  – барьерный) состоят из приемника и передатчика, выполненных в отдельных корпусах (рис.5.13). При эксплуатации они располагаются соосно друг против друга. Поток излучения от передатчика направлен на приемник. Срабатывание происходит при прерывании луча объектом.

Выключатели, использующие принцип прерывания луча, отличаются большой дальностью действия (до нескольких десятков метров) и большой помехоустойчивостью от воздействия посторонних факторов, например, пыли, воды и других жидкостей. При этом в качестве недостатков следует отметить наличие двух отдельных изделий, усложняющих монтаж и прокладку проводов связи к ним.

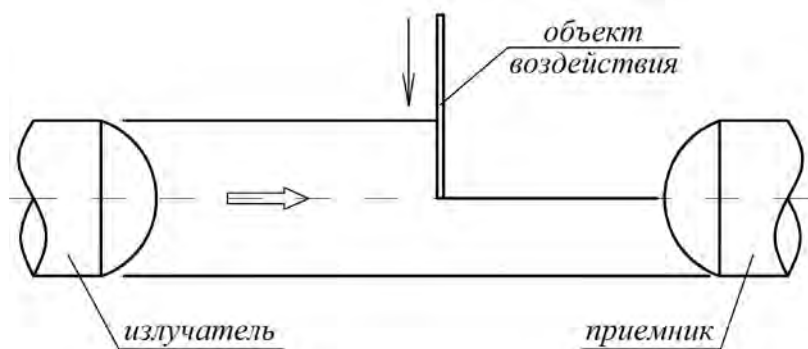


Рис.5.13 Работа оптического бесконтактного выключателя типа *T*

При эксплуатации ОБВ необходимо иметь в виду, что:

- посторонние предметы с высоким коэффициентом отражения, подобные рефлектору, находящиеся в области перекрытия диаграмм направленностей приемника и передатчика, могут вызвать ложное срабатывание;
- прозрачные и полупрозрачные объекты недостаточно ослабляют луч до порога срабатывания.

Для устранения перечисленных особенностей оптические выключатели снабжены регуляторами чувствительности.

В оптических выключателях, использующих эффект диффузного и зеркального отражения потока излучения от объекта (тип *D*), приемник и излучатель выполнены в одном корпусе (рис.5.14). Поток излучения от передатчика попадает на поверхность объекта, от которого происходит его отражение в различных направлениях. Распределение отраженного потока определяется оптическими свойствами объекта. Часть потока возвращается обратно в приемник, вызывая его срабатывание.

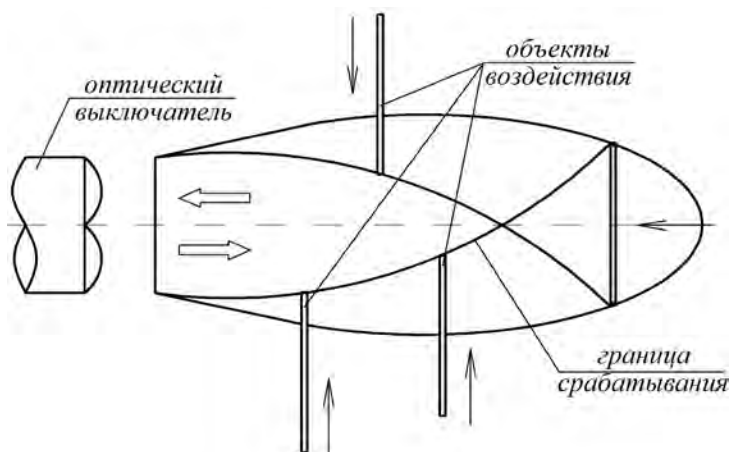


Рис.5.14 Работа оптического бесконтактного выключателя типа *D*

Преимущество данного вида выключателей заключается в простоте применения, при котором не требуется дополнительных приборов. Однако необходимо учитывать возможность ложных срабатываний в случае появления за контролируемым объектом предметов с гораздо большей отражательной способно-



стью. В этих случаях следует применять диффузные выключатели с подавлением фона.

Поскольку различные материалы отражают падающий на них поток излучения по-разному, то для нормирования расстояния срабатывания выбран стандартные объекты воздействия – лист белой бумаги с размерами 100×100 мм (для выключателей с расстоянием срабатывания до 400 мм) и лист белой бумаги с размерами 200×200 мм (для выключателей с расстоянием срабатывания более 400 мм). Однако для сельскохозяйственных предприятий и технологических процессов, где требуется контроль объектов с достаточно низкой отражающей способностью, для пересчета расстояния срабатывания  $S_{\text{раб}}$  следует выбрать тип материала из табл.5.6.

Табл.5.6 – Поправочные коэффициенты ОБВ для определения  $S_{\text{раб}}$

OV A43A-31P-150-LZ	
Материал	Поправочный коэффициент
Бумага белая матовая 200 г/м <sup>2</sup>	1,0
Металл полированный	1,2...1,6
Пенопласт белый	1,0
Ткань хлопчатобумажная	0,6
Поливинилхлорид серый	0,5
Дерево необработанное	0,4
Картон черный блестящий	0,3
Картон черный матовый	0,1

Оптические бесконтактные выключатели *R*-типа (рефлекторные) имеют размещенные в одном корпусе излучатель и приемник (рис.5.15).

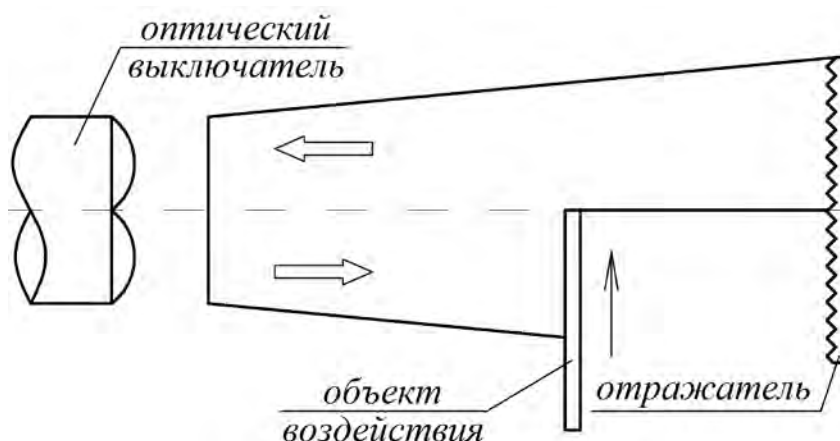


Рис.5.15 Работа оптического бесконтактного выключателя типа *R*

Приемник принимает луч излучателя, отраженный от специального световозвращателя. При этом возможны два варианта использования этих изделий: объект воздействия прерывает луч при неподвижно закрепленном отражателе; отражатель закрепляется на подвижном объекте.

Работа ОБВ *R*-типа представляется следующим образом. Излучение светодиода имеет круговую поляризацию, то есть представляет собой совокупность множества плоскополяризованных пространственных световых колебаний с различными плоскостями поляризации.

Если на пути луча установить оптический поляризационный фильтр (ПФ), то через него пройдут только те волны, плоскость поляризации которых совпадает с плоскостью поляризации фильтра. Таким образом, ПФ формирует луч с плоской поляризацией. При отражении поляризованного луча от различных предметов плоскости поляризации падающего и отраженного луча, как правило, совпадают.

Плоскость поляризации изменяется на  $90^\circ$  при отражении от специальных световозвращателей (угловых отражателей или рефлекторов). Если на пути поляризованного луча расположить еще один ПФ с плоскостью поляризации, развернутой на  $90^\circ$  по отношению к первому фильтру, то луч через него не пройдет. Таким образом, данный фильтр будет для луча барьером.

Если такой рефлектор поместить на пути поляризованного луча, то луч, отразившись от него, изменит плоскость поляризации и свободно пройдет через входной поляризационный фильтр фотоприемника, повернутый на  $90^\circ$  по отношению к ПФ излучателя.

Работая с поляризованным излучением, выключатель воспринимает только поток от световозвращателя, который поворачивает плоскость поляризации на  $90^\circ$ . Все предметы, находящиеся между выключателем и световозвращателем, вызывают прерывание луча и срабатывание выключателя.

*Ультразвуковой конечный выключатель* – это прибор для обнаружения контролируемого объекта звуковыми волнами ультразвукового (УЗ) диапазона. В зависимости от типа датчика частота ультразвуковых колебаний лежит в пределах от 45 до 400 кГц, частота повторения импульсов – 10...200 Гц. В качестве излучателей и приемников УЗ колебаний используют электростатические преобразователи, которые в настоящее время практически не применяются из-за сложности конструкции и необходимости высокого рабочего напряжения, и пьезокерамические (ПЗК) преобразователи. ПЗК преобразователи построены из спекаемых пьезоэлектрических кристаллов, которые имеют свойство изменять размеры (деформироваться) при воздействии на определенные поверхности кристалла электрического напряжения. Таким образом, электрическая энергия может быть преобразована в механическую. И наоборот, когда давление прикладывается к внешней поверхности кристалла, образуется заряд, который может быть преобразован в напряжение.

Для построения ультразвуковых датчиков применяются три схемы:

- *с одним преобразователем*, в которых пьезокерамическая головка используется как излучатель и как приемник. Недостатком этой схемы является относительно большое минимальное расстояние обнаружения: отраженные сигналы от объектов, расположенных очень близко к датчику, поступают раньше окончания среза импульса излучателя и по этой причине не могут быть обработаны;
- *с двумя преобразователями в одном корпусе*, в которых для передачи и приема используются две пьезокерамических головки, расположенные в одном корпусе. Путем применения двух отдельных преобразователей минимальное расстояние обнаружения может быть уменьшено по сравнению со случаем использования единого приемопередатчика;
- *разнесенная схема с двумя преобразователями*, в которых для передачи и приема используются две пьезокерамических головки, расположенные в разных корпусах, располагаемых на одной линии. Ультразвуковые датчики, построенные по такой схеме, используются в методе прерывания луча.

Различают несколько способов построения систем обнаружения объектов с помощью ультразвука:

1. Непосредственное обнаружение системой с одним или двумя отдельными преобразователями. Контролируется пространство перед датчиком на предмет наличия объектов, от которых отражается ультразвуковая волна.
2. Ретрорефлекторный метод. Контролируется пространство между датчиком и стационарным рефлектором. Приемник улавливает ультразвуковой сигнал, отраженный от рефлектора. При пересечении луча объектом происходит срабатывание датчика. Данный метод малоприменим для измерения расстояния до объекта и служит, в основном, для его непосредственного обнаружения в зазоре между датчиком и рефлектором.
3. Метод прерывания луча. Два датчика, излучатель и приемник, устанавливаются на одной линии. Ультразвуковая волна должна пройти расстояние между излучателем и приемником только в одном направлении. Датчики, работающие по прерыванию луча (барьерные) служат для непосредственного обнаружения объекта, помещенного между передатчиком и приемником.

Точность измерения расстояния до объекта для УЗ преобразователей, в общем случае, составляет 3...20 % и зависит как от качества датчика, так и от изменения окружающих условий.

Преимуществами ультразвуковых датчиков по сравнению с другими являются:

- работают в загрязненной и запыленной среде;
- большие рабочие расстояния (для систем с одним преобразователем рабочее расстояние до 15 м);

- взрывозащищенные варианты исполнения;
- обнаруживают объекты из любого материала;

Недостатками УЗ датчиков являются:

- широкая диаграмма направленности;
- невысокая точность, особенно при измерении температуры, давления и состава воздуха;
- чувствительность к случайным препятствиям;
- часто неверная работа от границы сред с пеной на поверхности;
- измерительный луч нельзя увидеть;
- невысокое быстродействие;
- сравнительно дороги.

Наряду с элементарной информацией о наличии или отсутствии объекта в контролируемой (рабочей) зоне, требуется знать расстояние до него, направление и скорость его перемещения. Такие задачи возникают, например, при построении систем регулировки натяжения тросов, проводов, лент, измерении толщины листовых материалов, распознавании неровностей на них и т.д. Выходным в этом случае является уже не бинарный сигнал (включено/ выключено), а непрерывно-монотонный, т.е. аналоговый.

Наиболее простым и надежным представляется способ получения такой информации при помощи тех же физических принципов, которые лежат в основе построения индуктивных датчиков, т.е. зависимости амплитуды синусоидальных колебаний  $LC$ -генератора от расстояния  $S$  между объектом и чувствительной поверхностью датчика. Такие датчики получили достаточное распространение, называются индуктивными датчиками с аналоговым выходом или индуктивными преобразователями перемещения (ИПП).

*Индуктивный преобразователь перемещения (ИПП)* – это электронное устройство, выходное напряжение которого изменяется с изменением положения воздействующего элемента (ВЭ) относительно торца преобразователя.

ИПП предназначен для применения в качестве элемента автоматизированных систем управления технологическими процессами и используется для работы во взрывобезопасной среде, не содержащей агрессивных газов и паров в концентрациях, приводящих к коррозии металлов. Датчик имеет чувствительную поверхность, предназначенную для контроля положения подвижных металлических объектов. Приближение металлического объекта к чувствительной поверхности датчика вызывает плавное уменьшение выходного тока датчика.

Структурная схема индуктивного преобразователя перемещений представлена на рис.5.16.  $LC$ -генератор выполнен по традиционно применяемой в индуктивных датчиках схеме – индуктивная или емкостная трехточка с актив-

ным элементом на транзисторе (биполярном или полевом) или операционном усилителе. Основным требованием к схемотехнике  $LC$ -генератора является необходимость обеспечения монотонности и высокой линейности модуляционной характеристики.

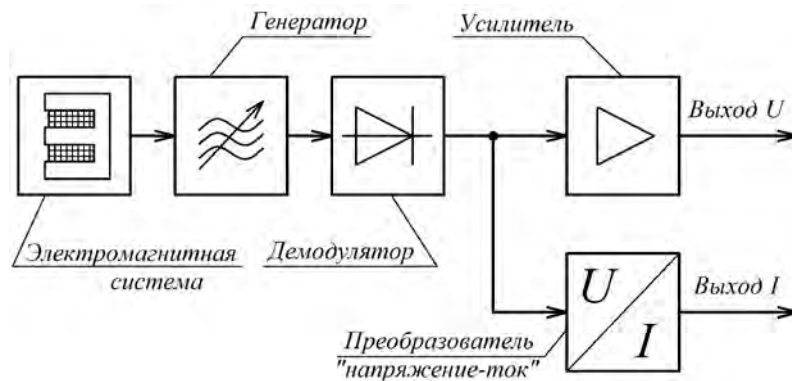


Рис.5.16 Структурная схема индуктивного преобразователя перемещений

Для обеспечения пропорциональности и линейности детектирования *де-модулятор* работает на линейном участке амплитудной характеристики. Согласование демодулятора с выходной нагрузкой (для выхода по напряжению) осуществляет *буферный усилитель*. Буфер представляет собой линейный усилитель с высоким входным и низким выходным сопротивлениями и реализуется на операционных усилителях (ОУ).

*Преобразователь «напряжение-ток»* обеспечивает стандартный токовый выход  $0 \div 20$  мА или  $4 \div 20$  мА и представляет собой схему вида «источник тока, управляемый напряжением» и обычно также выполняется на ОУ.

Типовые характеристики датчика  $U_{вых} = f(S)$  и  $I_{вых} = f(S)$  имеют линейный участок, в пределах которого изменение выходного сигнала пропорционально перемещению объекта (рис.5.17).

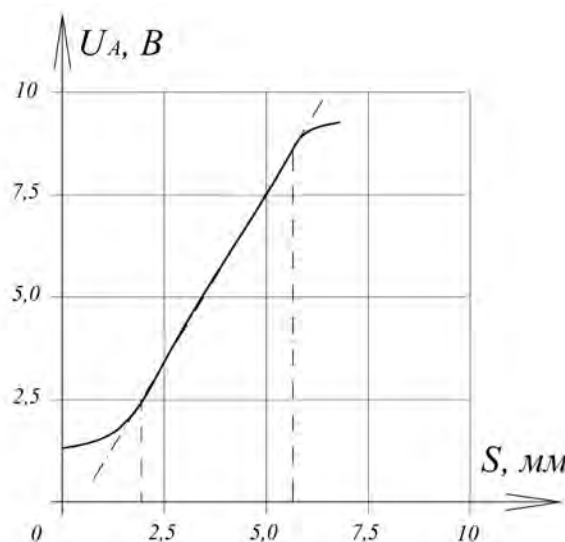


Рис.5.17 Статическая характеристика индуктивного преобразователя перемещения

Схема подключения индуктивного преобразователя представлена на рис.5.18.

Магниточувствительные датчики (МЧД) – предназначены для контроля положения объектов. Магниточувствительные конечные выключатели разделяются на две группы по чувствительному элементу: на основе механических контактов – герконов и немеханических – индуктивные, магниторезистивные и на эффекте Холла.

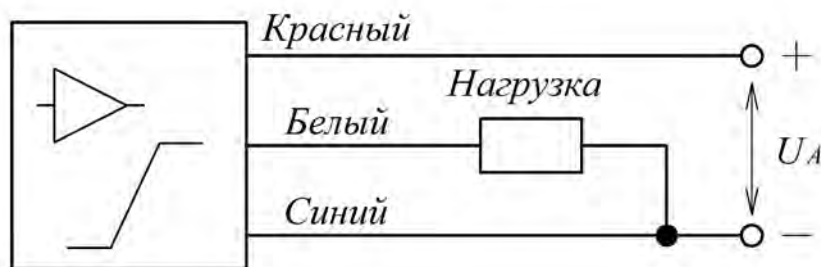


Рис.5.18 Схема подключения индуктивного преобразователя перемещения

Выключатель с механическим чувствительным элементом состоит из геркона, который реагирует на изменения напряженности постоянного магнитного поля и производит коммутацию электрического тока (рис.5.19).

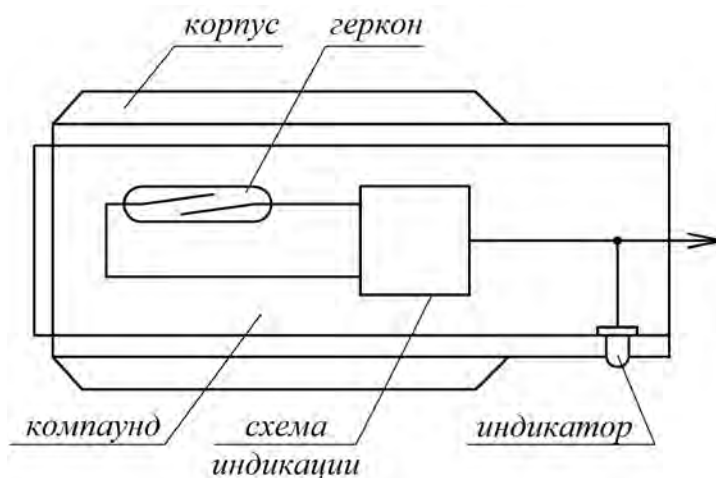


Рис.5.19 Структурная схема магниточувствительного конечного выключателя с герконом

Схемы индикации, обеспечивающей работу индикатора при срабатывании геркона и светодиодного индикатора, показывающего состояние выключателя и обеспечивающего контроль работоспособности, а также оперативность настройки.

Выключатели второй группы состоят из следующих узлов (рис.5.20):

- чувствительный элемент на эффекте Холла воспринимает изменение магнитного поля;

- триггер обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса;
- усилитель увеличивает выходной сигнал до необходимого значения;
- светодиодный индикатор показывает состояние выключателя, обеспечивает контроль работоспособности и оперативность настройки.

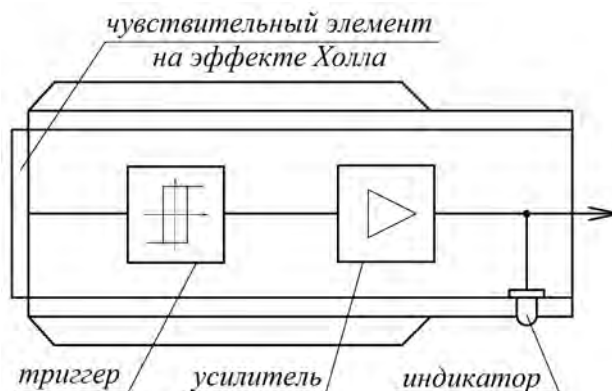


Рис.5.20 Структурная схема магниточувствительного конечного выключателя на эффекте Холла

Не менее важным элементом конструкции является корпус, который обеспечивает монтаж выключателя и защищает от механических воздействий. Изготовлен он, как правило, из латуни или полиамида, комплектуется метизными изделиями. Компаунд, заполняющий внутреннее пространство корпуса, обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды.

Принцип работы таких выключателей основан на изменении характеристик чувствительного элемента при воздействии внешнего магнитного поля. При увеличении напряженности внешнего магнитного поля до некоторого значения, происходит срабатывание триггера и изменение коммутационного состояния выключателя (рис.5.21,а). Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля не влияет на состояние выключателя. При уменьшении напряженности магнитного поля происходит обратный процесс, и выключатель возвращается в исходное состояние.

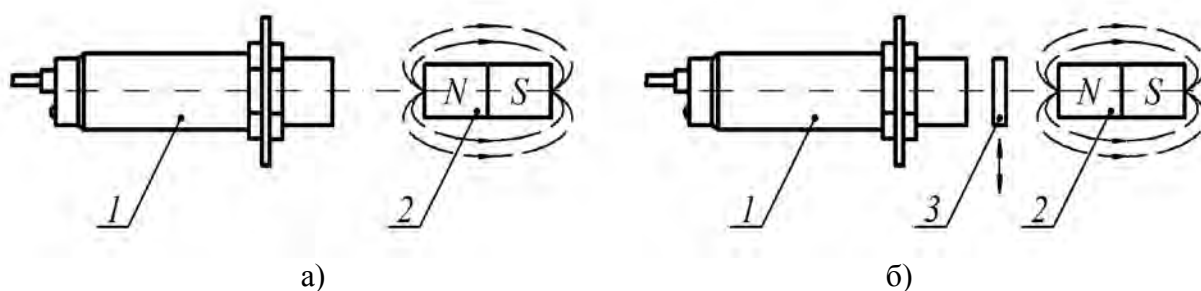


Рис.5.21 Принцип работы магниточувствительного конечного выключателя:  
1 – магниточувствительный датчик; 2 – внешнее магнитное поле; 3 – ферромагнитный управляющий объект

При входе в чувствительную зону управляющего объекта из ферромагнитного материала, уменьшается напряженность внешнего магнитного поля до некоторого значения, происходит срабатывание триггера и изменение коммутационного состояния выключателя (рис.5.21,б). Дальнейшее уменьшение напряженности магнитного поля не влияет на состояние выключателя. При выходе управляющего объекта из чувствительной зоны, напряженность магнитного поля возрастает и происходит обратный процесс – выключатель возвращается в исходное состояние.

В качестве преимущества магниточувствительных конечных выключателей с герконом следует отметить простоту конструкции, возможность работы при переменном и постоянном напряжении до 300 В, низкое (близкое к нулю) падение напряжения. Преимущества магниточувствительных бесконтактных выключателей на эффекте Холла – большой ресурс срабатывания из-за отсутствия механических контактов и большая частота коммутации.

**Датчики линейных перемещений.** Преобразователи линейных перемещений предназначены для информационной связи по положению между позиционируемым объектом и устройством числового программного управления (УЧПУ) или устройством цифровой индикации (УЦИ). К этому классу преобразователей принадлежат оптоэлектронные растровые преобразователи и магнитные датчики.

*Оптоэлектронные преобразователи линейных перемещений* предназначены для информационной связи по положению между позиционируемым объектом и устройством управления или устройством цифровой индикации.

Принцип действия растровых линейных оптоэлектронных преобразователей *инкрементального типа* заключается в использовании в качестве меры длины линейной шкалы, являющейся носителем регулярного раstra. *Растр* – решетка для структурного преобразования светового пучка представляется в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных элементов. Возможность нанесения штрихов растров с субмикронной точностью на материалы с малым коэффициентом линейного расширения, а также стабильность их геометрического положения позволяют создавать преобразователи 3-4 классов точности, с шагом 0,5 мкм. Измерения проводятся посредством головки, которая состоит из фотоизлучателей (ФИ) и фотоприемников (рис.5.22).

В основу работы преобразователей перемещения положен метод оптоэлектронного сканирования штриховых растров. При относительном перемещении шкалы 1 и анализатора 3 сопряжения регулярного раstra шкалы с растрами анализатора модулируют проходящие через них потоки излучения, воспринимаемые соответствующими фотоприемниками 2. Фотоприемники 2 попе-



ременно освещаемые при перемещении на своем выходе выдают сигнал (рис.5.23).

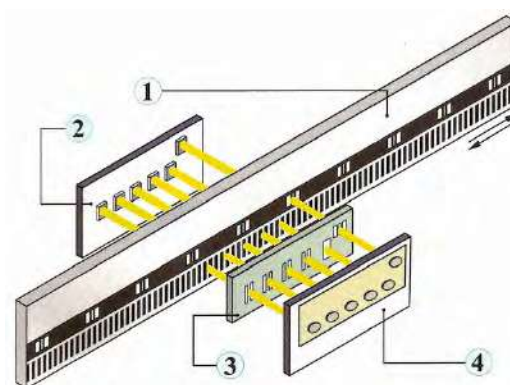


Рис.5.22 Считывающий узел оптоэлектронные преобразователи инкрементального типа:  
1 – шкала; 2 – плата фотоприемников (кремниевые фотодиоды); 3 – растровый анализатор; 4 – плата фотоизлучателей (инфракрасные излучатели).

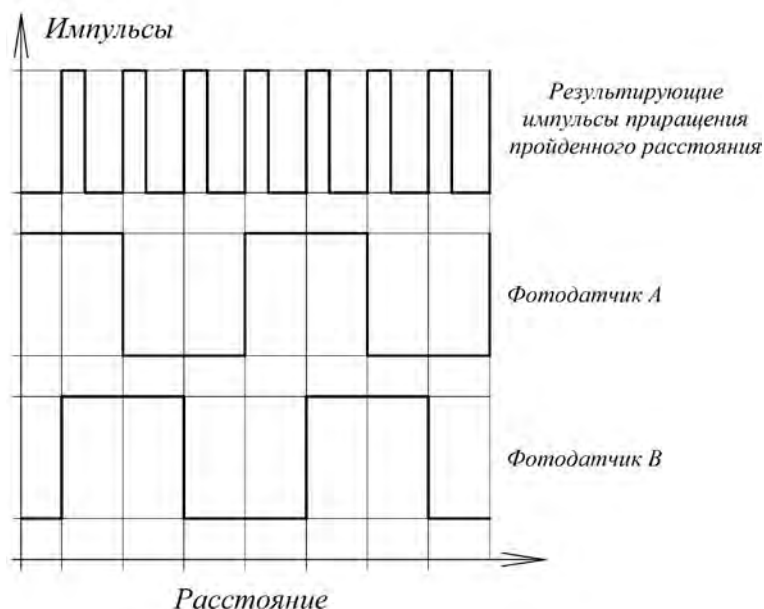


Рис.5.23 Импульсы на выходах фотодатчиков и результирующий сигнал приращения пройденного расстояния.

Полученный сигнал представляет собой прямоугольные импульсы, сдвинутые на  $90^\circ$ . Сдвиг получен конструктивным расположением фотоизлучателей – когда свет от одного ФИ проходит к фотоприемнику (ФП), второй закрывает полоса на растровой шкале, и наоборот. Такая конструкция выполнена с целью определения не только перемещения, но и направления перемещения – прямая последовательность импульсов проходит при перемещении вперед, обратная – при перемещении назад.

Расшифровка направления перемещения производится квадратурным энкодером, задачей которого является получение из двух сигналов фотоприемников импульсов приращения пройденного расстояния и сигнал направления перемещения. Направление перемещения можно определить по фазовому соот-

ношению двух каналов. Кроме того, с помощью двухканального энкодера можно добиться четырехкратного улучшения разрешения посредством системы подсчета задних и передних фронтов каждого канала *A* и *B* (рис.5.23).

Современные квадратурные энкодеры, кроме указанных выше задач, выполняют цифровое шумоподавление и фильтрацию входных сигналов, счет абсолютного положения измерительной головки, обнуление и коррекцию положения при проходе через специальные оптические метки, формирование информационных пакетов о текущем положении по различным промышленным интерфейсам.

К достоинствам оптоэлектронных преобразователей перемещения следует отнести высокую степень защищенности конструктивного исполнения преобразователей и их высокую устойчивость к внешним воздействиям.

Линейные инкрементальные преобразователи перемещения *магнитного типа* состоят из металлической ленты с намагниченными участками и расположенными напротив нее двумя датчиками Холла, чувствительными к напряженности и направлению магнитного поля (рис.5.24). При движении измерительной головки вдоль ленты датчики Холла изменяют свои выходные показатели при изменении магнитного поля на противоположное направление.

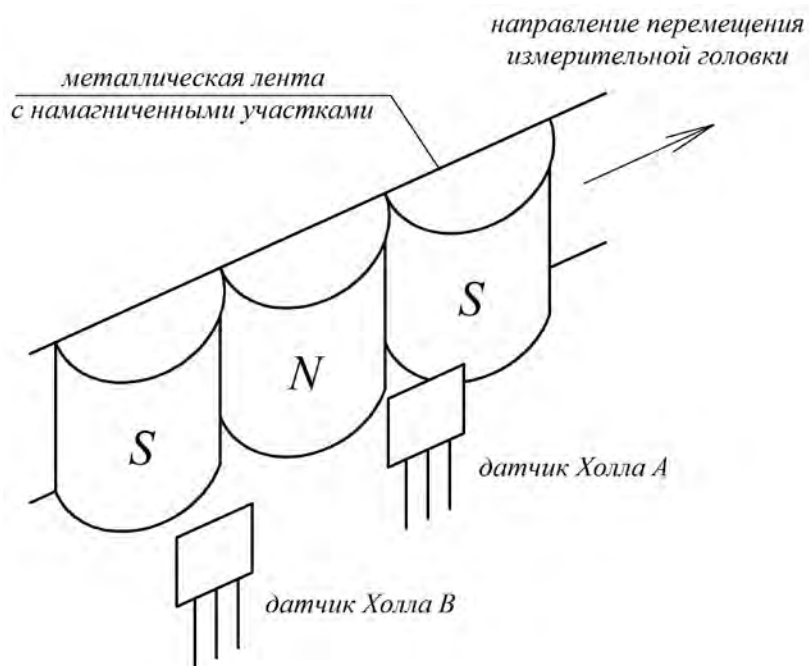


Рис.5.24 Устройство линейного магнитного датчика перемещения

Сигналы на выходах каналов *A* и *B* сдвинуты на  $90^\circ$ , что позволяет как и в оптических датчиках получать значение не только положения, но и направления движения. Сигналы каналов *A* и *B* подают на соответствующие входы квадратурного энкодера для получения количества пройденных шагов и значений абсолютных координат считывающей головки.

Промышленные датчики магнитного типа могут быть повышенной точности до 1 мкм, а магнитные ленты изготавливают протяженностью до 200 м, на которые нанесены корректирующие магнитные метки и метка нулевого положения.

В промышленности и на предприятиях сельхозпроизводства широкое распространение получили оптоэлектронные и магнитные преобразователи перемещений *абсолютного типа*.

Абсолютный линейный преобразователь перемещения (АЛПП) генерирует уникальный код для каждой позиции измерительной головки, что позволяет, в отличие датчиков инкрементального типа, исключить счетчик импульсов, так как координата всегда известна. Абсолютный преобразователь формирует сигнал как во время перемещения, так и в режиме покоя. Оптическая линейка АЛПП отличается от линейки пошагового (инкрементального) преобразователя перемещения наличием нескольких дорожек. Каждой дорожкой формируется уникальный двоичный код для конкретной позиции измерительной головки (рис.5.25).

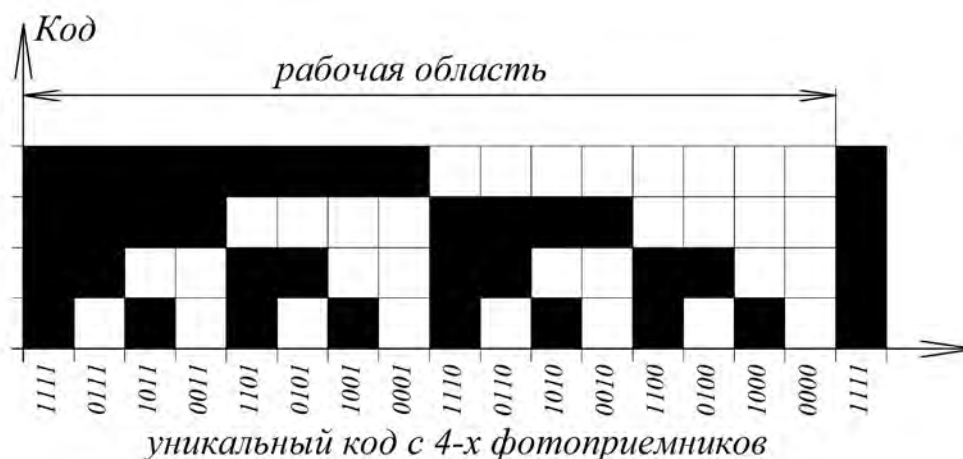


Рис.5.25 Коды фотоприемников измерительной головки четырехразрядного АЛПП

Сигнал абсолютного линейного преобразователя не подвержен помехам. При этом, в случае, когда кодированный сигнал не может быть прочитан фотоприемниками или датчиками Холла, например, измерительная головка перемещается слишком быстро, правильное положение будет зарегистрировано при снижении скорости перемещения.

В абсолютных преобразователях чаще всего используют вместо последовательного двоичного кода, код Грея. Код Грея – двоичная система нумерования, в которой два соседних значения различаются только в одном двоичном разряде. Использование кодов Грея имеет преимущества прежде всего в том, что минимизирует эффект ошибок при преобразовании аналоговых сигналов в цифровые.

При переходе от одного числа к другому (соседнему) лишь один бит информации меняет свое состояние, если число представлено кодом Грея, в то время как в двоичном коде могут менять свое состояние несколько бит одновременно (табл.5.7). Таким образом, Грей-код является одношаговым кодом.

Погрешность при считывании информации с механической растровой линейки при переходе от одного числа к другому приведет лишь к тому, что переход от одного положения к другому будет лишь несколько смещен по времени. При этом выдача совершенно неверного значения положения при переходе исключается. В табл.5.7 биты, меняющие свое состояние, при переходе от одного числа к соседнему, выделены жирно.

Табл.5.7 – Переход от десятичного кода к Грей-коду

Десятичный код	Двоичный код	Код Грея
0	0000	0000
1	000 <b>1</b>	000 <b>1</b>
2	00 <b>10</b>	00 <b>11</b>
3	00 <b>11</b>	00 <b>10</b>
4	0 <b>100</b>	0 <b>110</b>
5	0 <b>101</b>	0 <b>111</b>
6	0 <b>110</b>	0 <b>101</b>
7	0 <b>111</b>	0 <b>100</b>
8	<b>1000</b>	<b>1100</b>
9	<b>1001</b>	<b>1101</b>
10	<b>1010</b>	<b>1111</b>

В лабораторной работе подробно рассматриваются оптический и магнитный датчик линейного перемещения инкрементального типа, как сочетающий простоту и высокую точность при малых габаритах.

**Датчики частоты вращения.** В настоящее время в качестве датчиков частоты вращения используются тахогенераторы, инкрементальные оптические энкодеры и др.

Тахогенераторами называются электрические машины небольшой мощности, преобразующие механическое вращение в электрический сигнал.

Главное требование, предъявляемое к тахогенераторам, заключается в линейности выходной характеристики – пропорциональной зависимости между выходным напряжением  $U$  и угловой скоростью  $n$ :

$$U = kn = k' \frac{d\varphi}{dt},$$

где  $k, k'$  – коэффициенты пропорциональности;  $\varphi$  – угол поворота.

Тахогенераторы в схемах автоматики используются для следующих целей:

- измерения скорости вращения (выходное напряжение подается на вольтметр, шкала которого проградуирована в об/мин);
- осуществления обратной связи по скорости в следящих системах;
- осуществления электрического дифференцирования;
- осуществления электрического интегрирования:

В качестве основных требований, предъявляемых к тахогенераторам, следует выделить следующие:

- высокая линейность выходной характеристики;
- симметрия выходного напряжения;
- минимальное значение нулевого напряжения  $U_{ТГ}$  при  $n=0$  (у тахогенераторов переменного тока) и минимальная зона нечувствительности (у тахогенераторов постоянного тока);
- максимальная выходная мощность при минимальной потребляемой мощности;
- минимальная пульсация выходного напряжения (у тахогенераторов постоянного тока);
- минимальное изменение фазы выходного напряжения (у тахогенераторов переменного тока);
- малый момент инерции ротора и малый момент сопротивления;
- стабильность выходной характеристики при изменении окружающих условий;
- малые габаритные размеры и масса;
- высокие показатели надежности (ресурс, интенсивность отказов и др.).

Различают тахогенераторы и переменного (синхронные и асинхронные) и постоянного тока.

Асинхронные тахогенераторы по своей конструкции не отличаются от двухфазных асинхронных исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором. Так же как и двигатели, они имеют на статоре две фазные обмотки, оси которых смещены в пространстве относительно друг друга на угол  $90^\circ$ . Одна из них  $B$  (рис.5.26,а) подключается к сети и называется обмоткой возбуждения. С другой обмотки  $G$  снимается выходное напряжение тахогенератора. Эта обмотка называется выходной, или генераторной.

В зависимости от места расположения обмоток различают три конструктивные формы асинхронных тахогенераторов:

- с обмотками только на внешнем статоре;
- с обмотками только на внутреннем статоре;
- с одной обмоткой на внешнем статоре и одной, обычно обмоткой возбуждения, – на внутреннем.

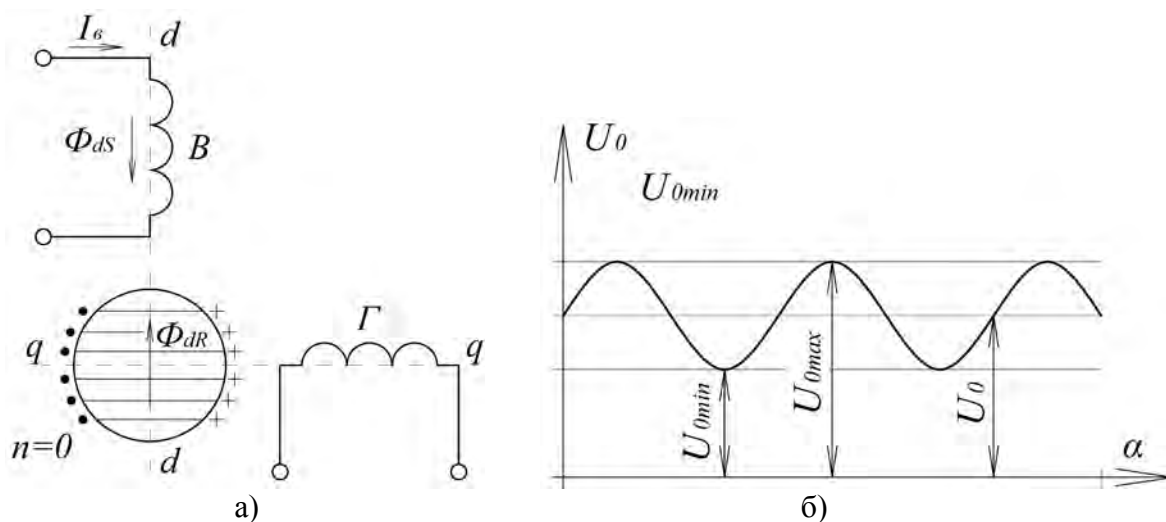


Рис.5.26 Принцип действия асинхронного тахогенератора при  $n=0$ : контуры токов и магнитные потоки (а); зависимость нулевого напряжения от положения ротора (б)

Полый ротор асинхронного тахогенератора в отличие от ротора исполнительного двигателя с целью обеспечения большого активного сопротивления, мало меняющегося при изменении температуры, выполняется (в точных тахогенераторах) из константана, специального манганина, фосфористой или марганцовистой бронзы и т. п.

Рассмотрим физические процессы, протекающие в асинхронном тахогенераторе при  $n=0$  (рис.5.26,б).

При неподвижном роторе ( $n=0$ ) ток обмотки возбуждения создает пульсирующий по продольной оси  $d$  магнитный поток  $\Phi_{\delta s}$ , который, пронизывая ротор, наводит в нем ЭДС трансформации (рис.7.26,а). Контур токов ротора от ЭДС трансформации располагаются в плоскостях, перпендикулярных продольной оси  $d$  – оси потока возбуждения  $\Phi_{\delta s}$ . Эти токи создают магнитный поток ротора  $\Phi_{\delta r}$ , направленный навстречу потоку возбуждения  $\Phi_{\delta s}$  и, который, как в любом трансформаторе, компенсируется возрастающим током первичной обмотки – обмотки возбуждения.

Теоретически при неподвижном роторе ( $n=0$ ) в тахогенераторе магнитный поток имеется только по продольной оси – оси обмотки возбуждения, поэтому в генераторной обмотке, ось которой смещена на  $90^\circ$  к обмотке возбуждения, никаких ЭДС наводиться не должно. Однако у всех тахогенераторов и при  $n=0$  на зажимах генераторной обмотки имеется некоторое незначительное напряжение, которое называется нулевым или остаточным.

Нулевое напряжение  $U_0$  – напряжение при  $n=0$  – явление весьма нежелательное. Причины его возникновения весьма разнообразны:

- неточный сдвиг обмоток;

- несимметрия магнитной цепи из-за разной проводимости стали вдоль и поперек проката, наличия короткозамкнутых контуров, неравномерности воздушного зазора;
- наличие потоков рассеяния;
- наличие емкостных связей между обмотками, особенно заметных в тахогенераторах с повышенной частотой питающего напряжения;
- несимметрия полого ротора и др.

Большинство указанных причин приводят к тому, что в тахогенераторе при  $n=0$  появляется поперечная составляющая магнитного потока, которая наводит ЭДС  $E_0$  в генераторной обмотке.

Значение нулевого напряжения  $U_0$  не остается постоянным при повороте ротора (рис.5.26,б). Его можно разделить на постоянную  $U_{0const}$  и переменную  $U_{0var}$  составляющие.

Постоянная составляющая  $U_{0const}$  у большинства тахогенераторов находится в пределах от 25 до 100 мВ.

Переменная составляющая  $U_{0var}=U_{0max}-U_{0min}$  (рис.5.26,б) зависит в основном от толщины, т.е. неодинаковой электрической проводимости полого ротора в различных направлениях (от его несимметрии). Она обычно составляет 3...7 мВ.

Для исключения постоянной составляющей нулевого напряжения очень часто обмотки возбуждения и генераторную размещают на разных статорах: одну – на внутреннем, другую – на внешнем. При сборке тахогенератора внутренний статор поворачивают относительно внешнего, находят положение, соответствующее  $U_{0min}$ , и в этом положении фиксируют.

В целях исключения переменной составляющей нежелательного нулевого напряжения тщательно обрабатывают и калибруют ротор, добиваясь его максимальной симметрии в электрическом отношении. К уменьшению переменной составляющей остаточного напряжения ведет увеличение числа  $p$  пар полюсов обмоток статора.

Большое распространение в настоящее время получили синхронные тахогенераторы, конструктивно представляющие собой однофазные (а иногда и трехфазные) синхронные генераторы малой мощности с ротором, имеющим явно выраженные полюсы и выполненным в виде постоянного магнита – звездочки. Благодаря выполнению возбуждения постоянным магнитом в синхронном тахогенераторе отсутствуют скользящие контакты, что значительно повышает его надежность.

При вращении ротора тахогенератора в обмотке его статора наводится ЭДС, амплитуда которой прямо пропорциональна частоте вращения  $n$ :

$$E_r = 4,44 f w_r \Phi = 4,44 w_r \Phi \frac{pn}{60} = kn,$$

где  $f$  – частота генерируемой ЭДС;  $w_r$  – эффективное число витков обмотки статора;  $\Phi$  – магнитный поток;  $k$  – постоянный (при  $\Phi = \text{const}$ ) коэффициент, определяемый крутизной выходной характеристики;  $p$  – число пар полюсов.

Применение синхронных тахогенераторов в ряде схем затруднительно вследствие того, что у них одновременно с амплитудой при изменении частоты вращения  $n$  изменяется и частота  $f$  выходного напряжения. Изменение частоты приводит к изменению значения реактивных сопротивлений  $X_L$  как самого тахогенератора, так и нагрузки, на которую он работает. Это ведет к искажению выходной характеристики и к появлению погрешностей. При определенных условиях вследствие возникновения резонансных явлений работа синхронного тахогенератора не удовлетворяет требованиям схем автоматики. В схемах автоматики, работающих на частотном принципе, непостоянство частоты (пропорциональность ее частоте вращения  $n$ ), наоборот, считается положительным качеством синхронного тахогенератора.

Положительным качеством всех без исключения синхронных тахогенераторов является то, что они при малых габаритных размерах имеют большую выходную мощность.

Тахогенераторы постоянного тока по конструкции и принципу действия представляют собой электрическую машину постоянного тока с независимым возбуждением. При этом, чаще всего, магнитоэлектрические с возбуждением основного магнитного поля с помощью постоянных магнитов (рис.5.27,б), реже – с электромагнитным возбуждением, обусловленным МДС обмотки возбуждения, питаемой от независимого источника электрической энергии постоянного напряжения (рис.5.27,а).

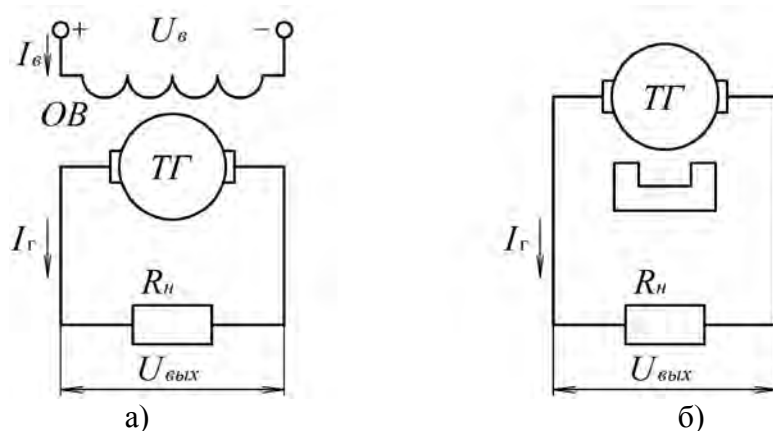


Рис.5.27 Схемы тахогенераторов постоянного тока



Выходные характеристики тахогенератора постоянного тока  $U=f(n)$  представлены на рис.5.27, анализ которых позволяет сделать следующие выводы:

- наблюдается зона нечувствительности, в пределах которой выходное напряжение равно нулю  $U=0$ ;
- характеристики нелинейные с различной крутизной (чем меньше сопротивление нагрузки, тем меньше крутизна).

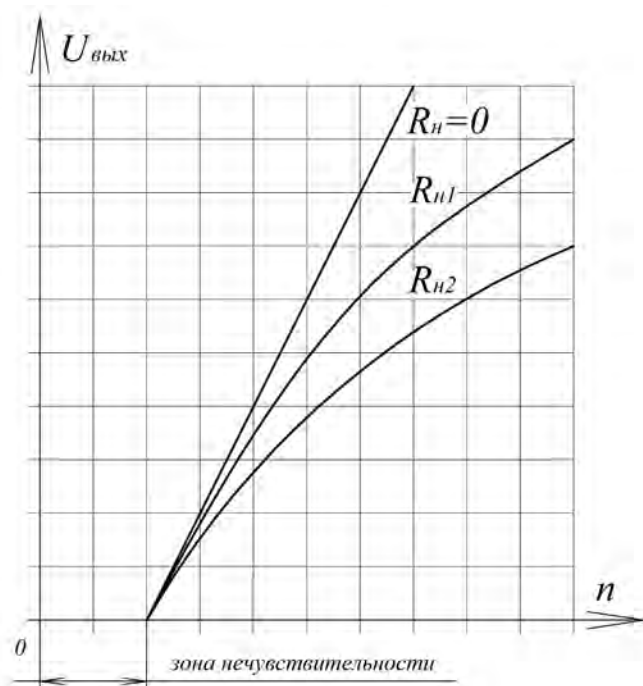


Рис.5.28 Выходные характеристики тахогенератора постоянного тока

При использовании тахогенераторов необходимо учитывать следующие погрешности:

1. *Зона нечувствительности* обуславливается падением напряжения в переходном контакте между щеткой и коллектором. Для ее уменьшения применяют щетки с малым переходным сопротивлением (медно-графитовые или серебряно-графитовые), а в прецизионных тахогенераторах используют проволочные щетки с серебряным, золотым и платиновым покрытием.

2. *Влияние реакции якоря* проявляется в нелинейности выходной характеристики. С целью ее ослабления магнитную цепь тахогенератора выполняют либо слабо, либо сильно насыщенной. И в том, и в другом случае рабочая точка лежит на линейной части характеристики, где размагничивающее действие поперечной реакции якоря сказывается незначительно.

3. *Температурная погрешность* связана с изменением сопротивления обмотки якоря и особенно обмотки возбуждения, если последняя имеется. При увеличении сопротивления обмотки возбуждения уменьшаются ток, магнитный поток и выходное напряжение тахогенератора. Температурную погрешность

можно уменьшить несколькими способами. Например, включением последовательно с обмоткой возбуждения терморезистора, стабилизирующего сопротивление всей цепи. В тахогенераторах с постоянными магнитами подобной проблемы практически не существует, а изменение сопротивления обмотки якоря приводит к незначительным погрешностям.

4. *Асимметрия выходного напряжения* в тахогенераторах возникает из-за смещения щеток с геометрической нейтрали. При сдвиге щеток с нейтрали, возникает продольная реакция якоря, которая носит намагничивающий характер при одном направлении вращения и размагничивающий при другом. Для устранения этой погрешности следует точно устанавливать и надежно закреплять щеточный узел, не допуская люфтов в щеткодержателях.

5. *Пульсация выходного напряжения* является специфической погрешностью тахогенератора постоянного тока. Различают зубцовые, якорные и коллекторные пульсации.

- *Зубцовые пульсации* обуславливаются зубчатым строением якоря, что приводит к периодическому изменению проводимости воздушного зазора. С целью устранения подобных пульсаций выполняют скос пазов и выбирают такую ширину полюсного наконечника, в пределах которой укладывается целое число зубцовых делений.
- *Якорные пульсации* обуславливаются неравномерным воздушным зазором, неодинаковой магнитной проводимостью вдоль и поперек проката. Для ослабления этой причины выполняют относительно большой зазор, по высокому классу точности обрабатывают посадочные поверхности, применяют высококачественные подшипники, выполняют веерообразную шихтовку сердечника якоря.
- *Коллекторные пульсации* возникают из-за конечного числа коллекторных пластин, неплотного прилегания щеток, вибраций щеточного узла. Для их устранения выполняют максимально возможное число коллекторных пластин, тщательно подбирают ширину щеток, улучшают качество изготовления щеткодержателей, коллектора и др.

В табл.5.8 представлены характеристики тахогенератора ТК-1.

Табл.5.8 – Технические характеристики тахогенератора ТК-1

Характеристики	Значения
Масса тахогенератора, кг	0,15
Максимальная скорость вращения, об/мин	7000
Коэффициент трансформации $C_U$ , В/(об/мин)	0,006
Нелинейность изменения выходного напряжения, %	0,8
Асимметрия выходного напряжения $A_T$ , %	1,0
Номинальное сопротивление $R_H$ , кОм	3,0
Температурный коэффициент выходного напряжения, %/°C	0,1
Момент трогания, Н·м	$2 \cdot 10^{-3}$

В настоящее время в качестве датчиков частоты вращения широко применяются *оптические энкодеры* (ОЭ).

Различают несколько видов оптических энкодеров, наиболее используемые из которых – *инкрементальный* (импульсный), где происходит последовательный счет меток перемещения и *абсолютный*, когда для каждого положения вала принят индивидуальный бинарный код.

*Инкрементальные оптические энкодеры* используют в тех случаях, когда сохранение абсолютного угла положения вала при включении питания не требуется, например, для контроля скорости вращения или точного позиционирования объекта.

Основными элементами конструкции инкрементального ОЭ, как правило, являются источник света, пошаговый диск, фотодетекторная сборка, сигнальный процессор и др. Внутри энкодера жестко с валом закреплен прозрачный диск с темными рисками. Количество рисок определяет количество импульсов за поворот. К примеру, если на диске нанесено 1000 отметок, тогда после 250 импульсов вал должен повернуться на  $90^\circ$ . Источник света и фотоприемник расположены по разные стороны от диска.

Принцип работы инкрементального ОЭ основан на пересечении луча оптопары (светодиода и фототранзистора) размеченным диском, установленным на валу (рис.5.29). Количество света, приходящего на фотоприемник, меняется в зависимости от положения рисок. Электронная плата преобразует сигнал с фотоприемника в дискретный выходной сигнал. Количество импульсов сигнала на один оборот вала в самом простом случае совпадает с количеством рисок на диске. Для повышения точности инкрементальных энкодеров используют метод экстраполяции.

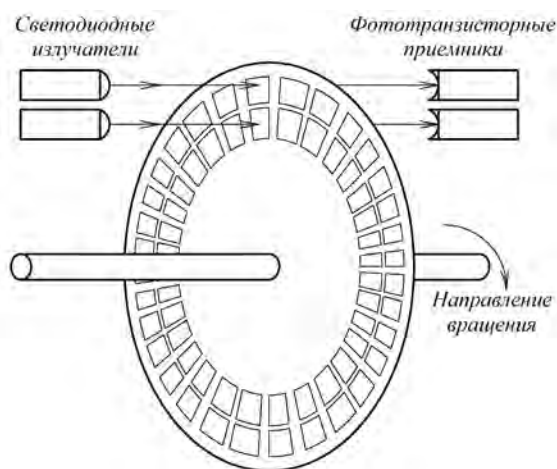


Рис.5.29 Конструкция оптического энкодера

В зависимости от частоты разметки диска определяется разрешающая способность датчика и, как следствие, точность измерения перемещения.

Кодовые диски инкрементальных энкодеров содержат фиксированное число непрозрачных линий, расположенных на равном друг от друга расстоянии, число которых соответствует числу импульсов на оборот. Энкодер с заданным разрешением имеет свой уникальный кодовый диск, который не может быть использован для производства энкодера с другим разрешением. Положение линий и расстояние между ними на диске требует высокой степени точности. Физические факторы определяют максимальное число линий, которые можно нанести на кодовый диск определенного размера.

Широкое распространение в производстве и сельском хозяйстве получили одноканальные (однооборотные) и квадратурные энкодеры.

*Одноканальные ОЭ* используются в оборудовании, которое имеет только одно направление вращения и нуждается в простой информации о его скорости. Скорость можно рассчитать, оперируя одним из показателей: временной интервал между импульсами или число импульсов за определенный интервал времени.

*Квадратурные оптические энкодеры* имеют два канала (А и В), которые электрические сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ . Таким образом, направление вращения можно определить по фазовому соотношению двух каналов. Кроме того, с помощью двухканального энкодера можно добиться четырехкратного улучшения разрешения посредством внешней системы подсчета задних и передних фронтов каждого канала (рис.7.30). Например, энкодер, генерирующий 2500 импульсов на оборот, может производить 10000 отсчетов.

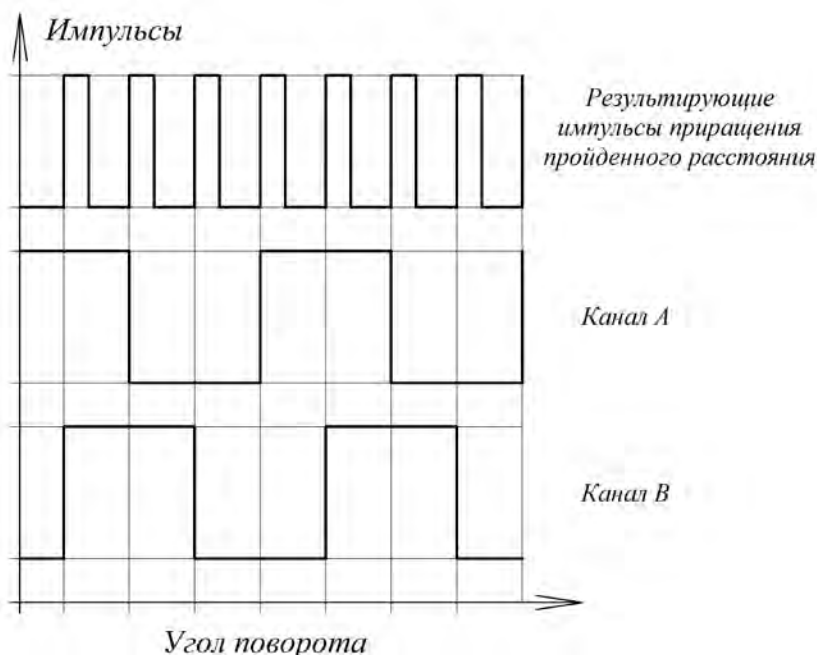


Рис.5.30 Выходные сигналы инкрементального оптического энкодера

Технические характеристики оптического энкодера *TRD-S/SH* представлены в табл.5.9.

Табл.5.9 – Технические характеристики оптического энкодера *TRD-S/SH*

Характеристика	Значение
Напряжение питания, В	5
Тип выхода	Квадратурный+Z-импульс
Максимальная частота, кГц	200
Тип выхода	Линейный драйвер
Тип логического сигнала	Положительный

*Абсолютный энкодер* относится к типу энкодеров, который выполняет уникальный код для каждой позиции вала. Счетчик импульсов в таком энкодере исключается, так как угол поворота всегда известен. Абсолютный энкодер формирует сигнал, как во время вращения, так и в режиме покоя. Диск такого энкодера отличается от диска шагового энкодера, так как имеет несколько концентрических дорожек (рис.5.31). Каждой дорожкой формируется уникальный двоичный код для конкретной позиции вала.

Для абсолютного энкодера не требуется точная установка вала, а его сигнал не подвержен помехам. Кроме того, в случае, когда кодированный сигнал не может быть прочитан энкодером, например, при вращении вала с повышенной частотой, правильный угол поворота будет позиционироваться при уменьшении скорости вращения. Абсолютный энкодер также устойчив к вибрациям

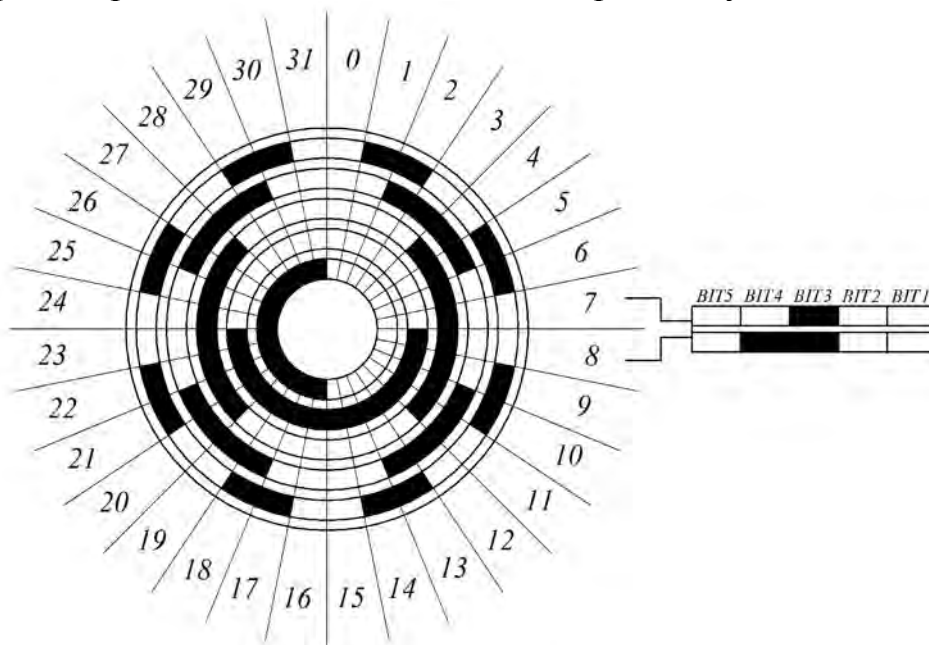


Рис.5.31 Кодовый диск абсолютного энкодера

**Датчики углового положения.** В настоящее время в качестве датчиков углового положения используются вращающиеся трансформаторы, потенциометрические датчики и др.

*Вращающиеся трансформаторы* (ВТ) – это индукционные электрические машины, предназначенные для преобразования механического перемещения (угла поворота ротора) в электрический сигнал – выходное напряжение, амплитуда которого находится в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

Широкое распространение получили двухполюсные ВТ, изготовленные аналогично двухфазным асинхронным двигателям с фазным ротором и контактными кольцами. Статоры и роторы таких вращающихся трансформаторов изготавливают из тщательно изолированных листов электротехнической стали. В пазах статора и ротора располагаются двухфазные обмотки, сдвинутые на  $90^\circ$  в электрическом отношении друг от друга.

Как правило, у большинства вращающихся трансформаторов концы обмотки ротора присоединяются к контактными кольцам, по которым скользят щетки. Кольца и щетки обычно изготавливаются из сплавов серебра. В некоторых ВТ, предназначенных для работы с ограниченным углом поворота ротора, кольца и щетки заменяются пружинами из латуни (аналогично токосъему в измерительных приборах). В ряде случаев бесконтактные ВТ изготавливаются с кольцевыми трансформаторами (по типу сельсинов).

Взаимная индуктивность между первичными обмотками (статора) вращающегося трансформатора и вторичными обмотками (ротора) изменяются строго по синусоидальному или косинусоидальному закону угла поворота  $\alpha$ , что при выполнении некоторых условий обеспечивает такой же закон изменения амплитуды ЭДС.

В зависимости от того, какой функцией угла поворота ротора является выходное напряжение  $U$ , вращающиеся трансформаторы можно разделить на:

- синусно-косинусные ВТ, у которых выходное напряжение одной обмотки пропорционально синусу угла поворота ротора, а другой обмотки – косинусу угла поворота ротора;
- линейные ВТ, у которых выходное напряжение пропорционально углу поворота ротора. Получение линейной в определенном угловом диапазоне выходной характеристики сводится к аппроксимации прямой линии функцией типа

$$f(\alpha) = \frac{\sin \alpha}{(1 + C \cdot \cos \alpha)},$$

где  $C$  – постоянный коэффициент;

- масштабные ВТ, у которых выходное напряжение пропорционально входному, и коэффициент пропорциональности (масштаб) определяется углом поворота ротора;

- датчики и приемники трансформаторных дистанционных передач угла, выполняющие функции, аналогичные трансформаторным сельсинам;
- преобразователи координат, осуществляющие поворот осей декартовой системы координат или переход к полярной системе координат;
- индукционные фазовращатели, осуществляющие преобразование пространственного угла во временной.

Последние четыре функции могут быть реализованы с помощью четырехобмоточных ВТ, имеющих по две обмотки на статоре и роторе. Один и тот же вращающийся трансформатор может выполнять различные функции в зависимости от схемы соединения обмоток.

*Синусный вращающийся трансформатор* (рис.5.32) может работать при наличии всего двух обмоток: обмотки статора  $S$ , подключенной к сети переменного тока (обмотки возбуждения) и обмотки ротора  $A$ , являющейся вторичной выходной обмоткой (рис.5.32,а).

При холостом ходе, когда  $Z_{AH} \rightarrow \infty$  и  $I_A = I_H = 0$ , вследствие того, что взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора изменяется по синусоидальному закону от угла поворота ротора  $\alpha$ , ЭДС  $E_A$  выходной обмотки, наводимая потоком первичной обмотки  $\Phi_S$ , будет синусоидальной функцией угла  $\alpha$ :

$$E_{A0} = E_{Am} \sin \alpha, \quad (5.29)$$

где  $E_{Am}$  – максимальная ЭДС обмотки  $A$ , наводимая в ней в случае совпадения осей обмоток  $A$  и  $S$  ( $\alpha = 90^\circ$ ).

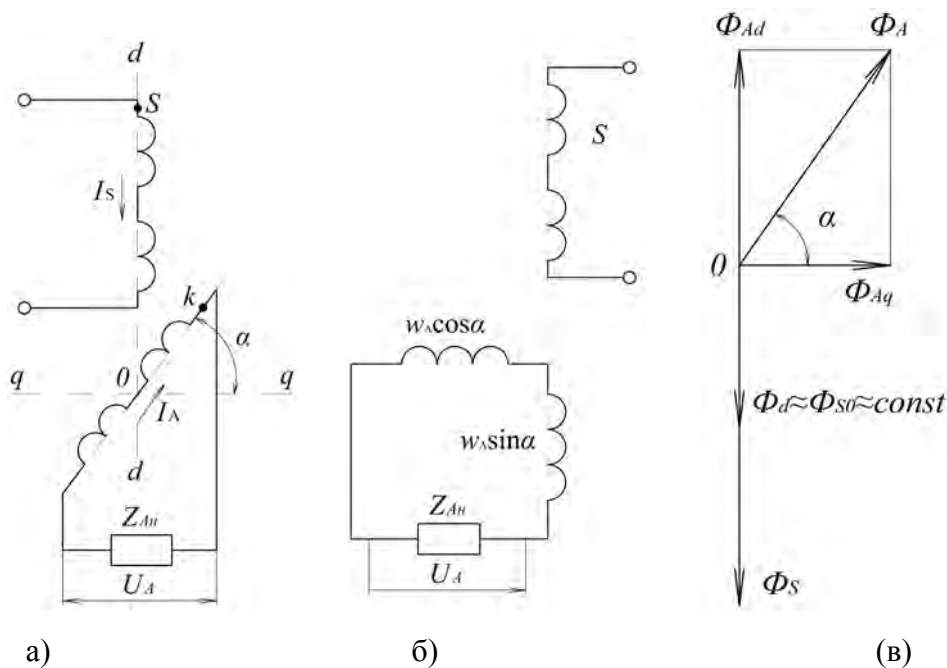


Рис.5.32 Схема включения (а), эквивалентная схема (б) и векторная диаграмма (в) синусного вращающегося трансформатора

Максимальную ЭДС  $E_{Am}$  можно выразить через ЭДС  $E_S$ , наводимую потоком  $\Phi_S$  в первичной обмотке статора  $S$  и отношение эффективных чисел витков  $w_S$  и  $w_A$ . Эффективные числа витков, по сравнению с истинными, равны соответственно:

$$w_S = w'_S k_{o\delta S}, \quad w_A = w'_A k_{o\delta A} \quad (5.30)$$

где  $w'_S$ ,  $w'_A$ ,  $k_{o\delta S}$ ,  $k_{o\delta A}$  – истинные значения количества витков обмоток  $S$  и  $A$  и обмоточные коэффициенты.

Приведем соотношения для вращающегося трансформатора

$$E_{Am} = \frac{w_A}{w_S} E_S, \quad \frac{E_{Am}}{E_S} = \frac{U_A}{U_S} = k_m, \quad (5.31)$$

при этом  $w_A / w_S$  – максимальный коэффициент трансформации.

С учетом (5.31) выражение ЭДС (5.29) при холостом ходе имеет вид:

$$E_{A0} = E_S k_m \sin \alpha = E_S k(\alpha); \quad k(\alpha) = \frac{E_{A0}}{E_S}. \quad (5.32)$$

На основании уравнения (5.29) число витков обмотки  $w_A$  можно рассматривать как геометрическую сумму «продольных витков»  $w_A \sin \alpha$ , ось которых совпадает с осью обмотки  $S$ , и «поперечных витков», ось которых совпадает с осью обмотки  $k$ , что позволяет заменить схему рис.5.32,а на эквивалентную – рис.5.32,б.

Если не учитывать падение напряжения на обмотке возбуждения  $S$ , то

$$E_{A0} \approx U_S k_m \sin \alpha = U_S k(\alpha), \quad (5.33)$$

где  $k(\alpha) = \frac{w_A}{w_S} \sin \alpha$ .

При нагрузке, когда  $Z_{AH} \neq \infty$ , по вторичной обмотке протекает ток  $I_A$ , значение которого определяется величиной ЭДС обмотки  $A$ , а также суммой собственного сопротивления обмотки  $A$  и сопротивлением нагрузки  $Z_{AH}$ :

$$I_A = \frac{E_A}{Z_A + Z_{AH}}. \quad (5.34)$$

Ток  $I_A$  создает поток  $\Phi_A$ , направленный по оси обмотки  $A$  (рис.5.32,в), который можно разложить на два потока: поток  $\Phi_{Ad}$ , образованный током  $I_A$ , протекающим по «продольным виткам» и направленный по продольной оси, и поток  $\Phi_{Aq}$ , образованный током  $I_A$ , протекающим по «поперечным виткам» и направленный по поперечной оси:

$$\Phi_{Ad} = \Phi_A \sin \alpha, \quad \Phi_{Aq} = \Phi_A \cos \alpha. \quad (5.35)$$

Продольный поток  $\Phi_{Ad}$  вторичной обмотки компенсируется возрастающим током первичной обмотки  $I_S$ . Суммарный поток по продольной оси как при холостом ходе, так и при нагрузке остается практически постоянным



( $\Phi_{Ad} \approx \Phi_{S0} = \text{const}$ ). Этот поток наводит в обмотке  $A$  («продольных витках») ЭДС самоиндукции  $E_{AM}$ , приблизительно равную ЭДС холостого хода:

$$E_{AM} = E_{A0} = E_S k_m \sin \alpha = E_S k(\alpha). \quad (5.36)$$

Поперечный поток  $\Phi_{Aq}$  во вращающемся трансформаторе с двумя обмотками ничем не компенсируется, он является потоком самоиндукции для «поперечных витков» и наводит в них ЭДС самоиндукции  $E_{Aq}$ , значение которой можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{Aq} &= -jI_A \omega L_{Aq} = -jI_A \omega w_{Aq}^2 \Lambda_m = -jI_A \omega w_A^2 \cos^2 \alpha \Lambda_m = \\ &= -j \frac{E_A}{Z_A - Z_{AH}} \omega w_A^2 \cos^2 \alpha \Lambda_m = -j \frac{\omega w_A^2 \Lambda_m}{Z_A - Z_{AH}} E_A \cos^2 \alpha = a E_A \cos^2 \alpha; \end{aligned} \quad (5.37)$$

где  $a = -j \frac{\omega w_A^2 \Lambda_m}{Z_A - Z_{AH}}$  – комплексный коэффициент, зависящий от параметров вращающегося трансформатора и частоты сети;  $\Lambda_m$  – магнитная проводимость, которая при равномерном воздушном зазоре не зависит от угла поворота  $\alpha$ .

Таким образом, ЭДС  $E_A$  обмотки  $A$  может быть определена как сумма ЭДС взаимной индукции  $E_{AM}$  и ЭДС самоиндукции  $E_{Aq}$ :

$$E_A = E_{AM} + E_{Aq} = E_S k_m \sin \alpha - a E_A \cos^2 \alpha, \quad (5.38)$$

следовательно:

$$E_A = \frac{E_S k_m \sin \alpha}{1 + a \cos^2 \alpha}. \quad (5.39)$$

Согласно (5.39), ЭДС  $E_A$  обмотки  $A$  при нагрузке не является синусоидальной функцией угла поворота  $\alpha$ , что связано с наличием поперечного потока  $\Phi_{Aq}$ . На рис.5.33 представлены зависимости ЭДС  $E_{A0}$  при холостом ходе, ЭДС  $E_A$  при нагрузке и погрешности  $\Delta E_A$ , вносимой поперечным потоком  $\Phi_{Aq}$ , от угла поворота ротора.

*Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы* имеют четыре обмотки (рис.5.34). При подключении обмотки  $S$  статора к сети переменного тока, ее магнитный поток, сцепляясь с витками обмоток  $A$  и  $B$  ротора, наводит в них ЭДС. Так как обмотка  $B$  сдвинута в пространстве на  $90^\circ$  относительно обмотки  $A$ , то ЭДС обмотки  $B$  изменяется по закону  $\cos \alpha$ .

$$E_{B0} = E_S \frac{w_B}{w_S} \cos \alpha = E_S k_m \cos \alpha, \quad I_B = \frac{E_B}{Z_B + Z_{BH}}. \quad (5.40)$$

Ток  $I_B$  создает магнитный поток  $\Phi_B$ , направленный по оси обмотки  $B$ . Данный поток можно разложить на продольную  $\Phi_{Bd}$  и поперечную  $\Phi_{Bq}$  составляющие (рис.5.34,б):

$$\Phi_{Bd} = \Phi_B \cos \alpha, \quad \Phi_{Bq} = \Phi_B \sin \alpha. \quad (5.41)$$

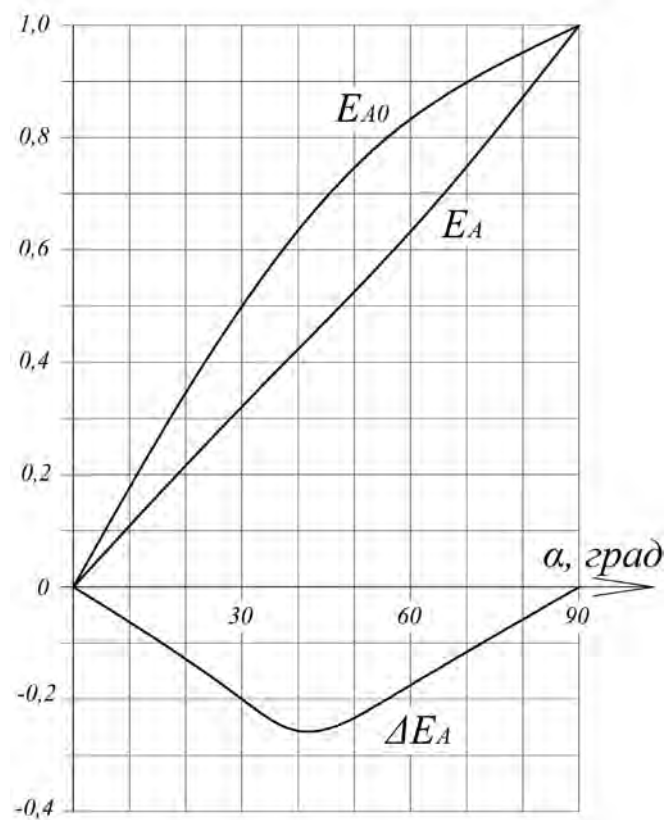


Рис.5.33 Зависимости ЭДС  $E_{A0}$  при холостом ходе, ЭДС  $E_A$  при нагрузке и погрешности  $\Delta E_A$ , вносимой поперечным потоком  $\Phi_{Aq}$ , от угла поворота ротора

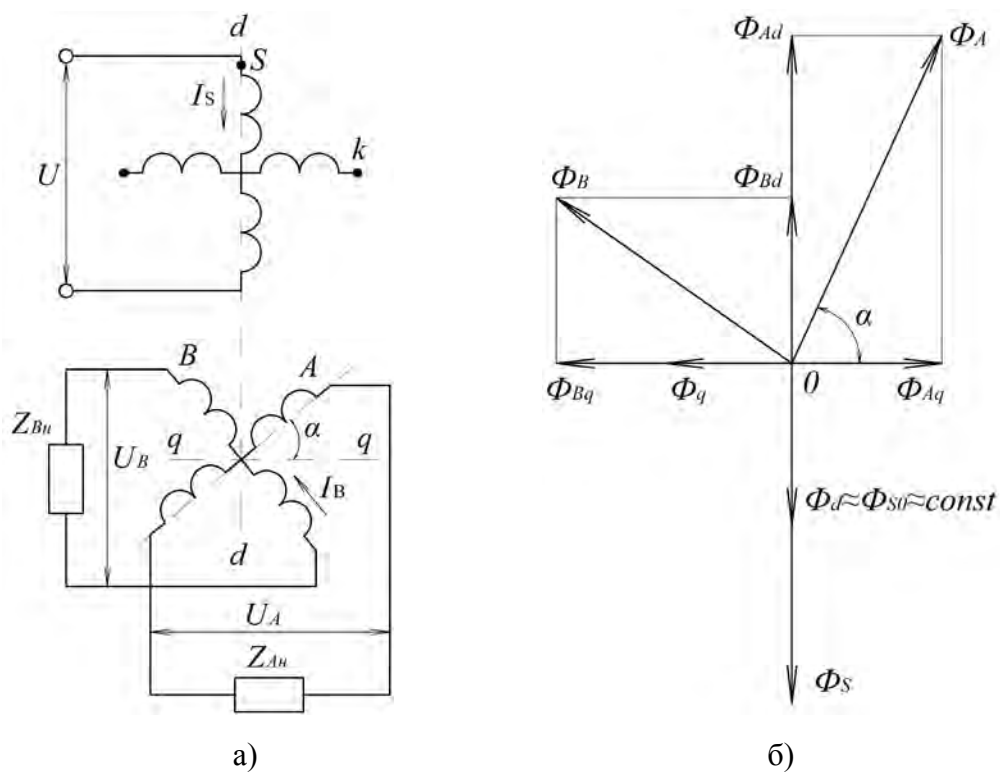


Рис.5.34 Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) синусного-косинусного вращающегося трансформатора

По аналогии с (5.37) и (5.39) для синусно-косинусного вращающегося трансформатора получим

$$E_{Bq} = -bE_B \sin^2 \alpha; E_B = E_S k_m \cos \alpha - bE_B \sin^2 \alpha; E_B = \frac{E_S k_m \cos \alpha}{1 + b \sin^2 \alpha}. \quad (5.42)$$

Как следует из (5.42), ЭДС  $E_B$ , как и ЭДС  $E_A$ , не является гармонической функцией угла  $\alpha$ . Отклонение от этой функции в обеих обмотках объясняется наличием потока  $\Phi_{Aq}$ .

Из диаграммы (рис.5.34,б) видно, что поперечные потоки  $\Phi_{Aq}$  и  $\Phi_{Bq}$  направлены встречно. Это значит, что при наличии двух обмоток суммарный поперечный поток  $\Phi_q = \Phi_{Aq} + \Phi_{Bq}$ , будет меньше, чем во вращающемся трансформаторе с одной обмоткой. Выполняя определенные условия, ( $\Phi_{Aq} = -\Phi_{Bq}$ ) можно устранить вызванную этими потоками погрешность

*Симметрирование синусно-косинусных вращающихся трансформаторов* – это подбор сопротивления цепей статорных и роторных обмоток, при котором амплитуды ЭДС выходных обмоток изменяются строго по гармоническому закону от угла поворота  $\alpha$ . Цель любого симметрирования – компенсация поперечного потока  $\Phi_q$ , вносящего погрешность в выходную характеристику. Симметрирование синусно-косинусных ВТ осуществляется либо со стороны ротора – вторичное симметрирование, либо со стороны статора – первичное симметрирование.

*Вторичное симметрирование* состоит в подборе цепей роторных обмоток, при которых  $\Phi_q = 0$ . Для этого необходимо, чтобы нулю была равна сумма МДС, создаваемых «поперечными витками обмоток», то есть, чтобы  $\Phi_{Aq} + \Phi_{Bq} = 0$  или  $\Phi_{Aq} = -\Phi_{Bq}$

Согласно рис.5.34 имеем:

$$I_A w_A \cos \alpha = I_B w_B \sin \alpha,$$

или, выражая токи через ЭДС и сопротивления, и при условии  $w_A = w_B$  получим:

$$\begin{aligned} \frac{E_A}{Z_A + Z_{AH}} w_A \cos \alpha &= \frac{E_B}{Z_B + Z_{BH}} w_A \sin \alpha; \\ \frac{E_S k_m \sin \alpha \cos \alpha}{Z_A + Z_{AH}} &= \frac{E_S k_m \sin \alpha \cos \alpha}{Z_B + Z_{BH}}. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Из (5.43) следует, что условием вторичного симметрирования является равенство полных сопротивлений цепей обмоток ротора:

$$Z_A + Z_{AH} = Z_B + Z_{BH}. \quad (5.44)$$

Особенностью вторичного симметрирования является то, что входное сопротивление  $Z_S$  и потребляемый из сети ток  $I_S = U_S / Z_S$  при постоянном напряжении  $U_S$  не зависит от угла поворота и равен соответственно:

$$I_S = \frac{E_S k_m^2}{Z_R + Z_{RH}} \approx \frac{U_S k_m^2}{Z_R + Z_{RH}} = \frac{U_S}{Z_S} = const, \quad (5.45)$$

где  $Z_S = \frac{Z_R + Z_{RH}}{k_m^2}$  – входное сопротивление вращающегося трансформатора;

$$Z_R = Z_A = Z_B; \quad Z_{RH} = Z_{AH} = Z_{BH}.$$

Однако у ВТ с вторичным симметрированием выходное сопротивление зависит от угла поворота, что ограничивает их применение.

Наличие вторичного симметрирования проверяется либо с помощью амперметра, включенного в цепь обмотки  $S$ , либо с помощью вольтметра, включенного на зажимы обмотки  $k$  статора.

Метод амперметра основан на том, что входное сопротивление  $Z_S$  при вторичном не зависит от  $\alpha$ . Это значит, что при повороте ротора ток (в пределах погрешности) не изменяется.

Метод вольтметра основан на том, что при вторичном симметрировании отсутствует поперечный поток, то есть ЭДС квадратурной обмотки, а, следовательно, и показания вольтметра, при этом равны нулю (в пределах погрешности).

*Первичное симметрирование синусно-косинусных вращающихся трансформаторов* сводится к включению в цепь квадратурной обмотки  $k$  определенного сопротивления  $Z_{kH}$ . Условием первичного симметрирования является равенство полных сопротивлений цепей обмоток статора  $S$  и  $k$

$$Z_{uct} + Z_{\text{л}} + Z_S = Z_k + Z_{kH},$$

где  $Z_{uct}$ ,  $Z_{\text{л}}$ ,  $Z_{kH}$  – сопротивления соответственно источника питания, линии передачи, подключаемое к обмотке  $k$ .

Как правило, сопротивление линии весьма мало ( $Z_{\text{л}} = 0$ ), собственные сопротивления обмоток  $S$  и  $k$  равны, поэтому условием первичного симметрирования является равенство  $Z_{uct} = Z_{kH}$ . В этом случае, если вращающийся трансформатор питается от источника большой мощности, сопротивление которого равно  $Z_{uct} = 0$ , то и  $Z_{kH} = 0$ . Таким образом для осуществления первичного симметрирования необходимо замкнуть накоротко квадратурную обмотку.

Вращающиеся трансформаторы, как и любые другие информационные машины, имеют погрешности, которые в зависимости от физической природы делятся на четыре группы:

1. *принципиальные погрешности* – это отклонение выходных характеристик от синусоидальной и косинусоидальной вследствие неточности симметрирования; у линейных – отклонение выходной характеристики от линейной вследствие неточности аппроксимации;
2. *конструктивные погрешности* вызываются в основном несинусоидальностью распределения МДС обмоток вдоль окружности машины, изменение магнитного сопротивления воздушного зазора из-за наличия пазов на поверхности статора и ротора, нелинейностью намагничивания и явлением гистерезиса. Уменьшение этих погрешностей достигается путем применения специальных «синусных» схем обмоток, за счет скоса пазов статора и ротора, выполнения магнитопровода ВТ ненасыщенным из пермаллоя с узкой петель намагничивания;
3. *технологические погрешности* обуславливаются эксцентриситетом расточек статора и ротора, асимметрией магнитопровода, неточностью расположения и скоса пазов, наличием короткозамкнутых витков в обмотке, ошибками при выполнении обмотки. Для уменьшения этих погрешностей устанавливаются жесткие технологические допуски;
4. к *эксплуатационным погрешностям* относятся, например, температурная погрешность, связанная с изменением активных сопротивлений обмоток при изменении температуры. Колебание частоты напряжения питания вызывает изменение индуктивных сопротивлений.

Класс точности вращающихся трансформаторов устанавливается для нормальных условий эксплуатации, для определения которого учитываются следующие показатели:

- *погрешность отображения функциональной зависимости*, определяемая по отношению к наибольшей выходной ЭДС; у синусно-косинусных ВТ различных классов погрешность допускается от 0,005 до 0,2 %, у линейных ВТ – от 0,02 до 0,2 %;
- *асимметрия нулевых положений ротора ВТ*, под которой понимается отклонение действительных нулевых положений ротора от теоретических  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ ; у синусно-косинусных ВТ допускается от  $10''$  до  $40'$ ;
- *ЭДС квадратурной обмотки*, определяемая по отношению к напряжению возбуждения; у синусно-косинусных ВТ различных классов погрешность допускается от 0,04 до 1,2 %;
- *остаточная ЭДС*, определяемая по отношению к наибольшей выходной ЭДС, у синусно-косинусных ВТ различных классов погрешность допускается от 0,03 до 0,1 %, у линейных ВТ – от 0,02 до 0,3 %;

- разность коэффициентов трансформации выходных обмоток, определяемая по отношению к наибольшему из этих коэффициентов; у синусно-косинусных ВТ погрешность допускается от 0,005 до 0,2 %.

Основные технические характеристики вращающегося трансформатора типа 2,5ВТ представлены в табл.5.10.

Табл.5.10 – Технические характеристики вращающегося трансформатора типа 2,5ВТ

Характеристика		Показатель
Тип		2,5ВТ ЛШЗ 010.399
Назначение		синусно-косинусный вращающийся трансформатор
Напряжение, В	Номинальное	27
	Рабочий диапазон	0...27
Номинальная частота напряжения возбуждения, Гц		400
Диапазон рабочих частот напряжения возбуждения, Гц		380...1050
Частота вращения вала, об/мин		5...20

*Потенциометрические датчики* предназначены для преобразования механического перемещения в электрический сигнал. Основной частью датчика является реостат, сопротивление которого изменяется при перемещении движка 1, скользящего по проволоке 2, намотанной на каркас 3 (рис.5.35).

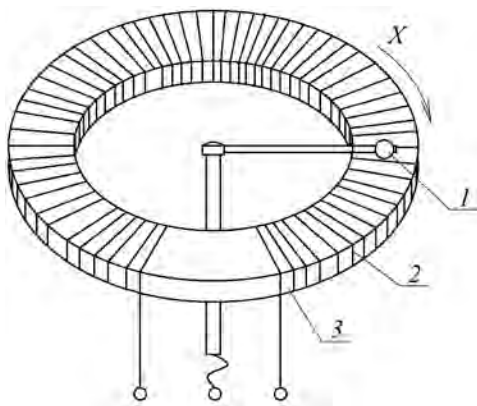


Рис.5.35 Конструктивная схема потенциометрического датчика

Напряжение питания подается на всю обмотку реостата через неподвижные выводы этой обмотки. Выходное напряжение, пропорциональное перемещению  $X$  движка 1, снимается с одного из неподвижных выводов и с подвижного движка 1. Такая схема в электротехнике называется потенциометрической или схемой делителя напряжения (рис.5.36,а).

Если сопротивление всей обмотки датчика обозначить  $R$ , а сопротивление части этой обмотки, с которой снимается выходное напряжение, через  $R_{\text{вых}}$ , то потенциометрическая схема включения датчика может быть представлена как последовательное соединение резисторов с сопротивлением  $R_{\text{вых}}$  и  $R - R_{\text{вых}}$  (рис.5.36,б).

Ток через обмотку датчика  $I = U / R$ , а приложенное напряжение распределяется (делится) между последовательно соединенными резисторами:

$$U = IR_{\text{вых}} + I(R - R_{\text{вых}}). \quad (5.46)$$

Если сопротивление обмотки равномерно распределить по длине  $l$ , а перемещение движка обозначить через  $X$ , то выходное напряжение датчика

$$U_{\text{вых}} = IR_{\text{вых}} = UX / l. \quad (5.47)$$

Таким образом, выходной сигнал датчика пропорционален перемещению движка.

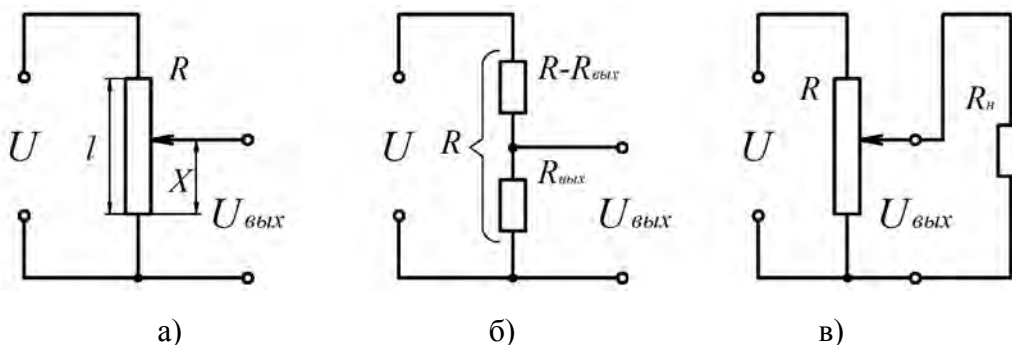


Рис.5.36 Схемы включения потенциметрического датчика

В автоматических системах движок потенциметрического датчика может быть связан с каким-либо устройством, например, клапаном, исполнительным механизмом, режущим инструментом, положение которого необходимо измерить и передать в виде электрического сигнала.

Наличие скользящего контакта снижает надежность потенциметрического датчика и является его основным недостатком. Для питания датчика может быть использовано как напряжение постоянного тока, так и напряжение переменного. В зависимости от закона изменения сопротивления обмотки различают линейные и функциональные потенциметрические датчики.

Основной характеристикой потенциметрического датчика является зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от перемещения  $X$ . При равномерной намотке зависимость  $U_{\text{вых}} = f(X)$  линейная только на холостом ходу, то есть при отсутствии сопротивления нагрузки, подключенной к выходным зажимам датчика. При эксплуатации к зажимам датчика подключаются электрические приборы, входное сопротивление которых является сопротивлением нагрузки  $R_n$  (рис.5.36).

Для анализа влияния сопротивления нагрузки  $R_n$  на основную характеристику датчика, полное сопротивление обмотки которого  $R$ , введем понятие коэффициента нагрузки  $\beta = R_n / R$  и  $\alpha = X / l$ . Выходное напряжение датчика в этом случае равно:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U\alpha}{1 + \alpha(1 - \alpha) / \beta}. \quad (5.48)$$

По уравнению (5.48) построим зависимость  $U_{\text{вых}}/U = f(\alpha)$ , где  $U$  – напряжение питания датчика, для различных значений  $\beta$  (рис.5.37).

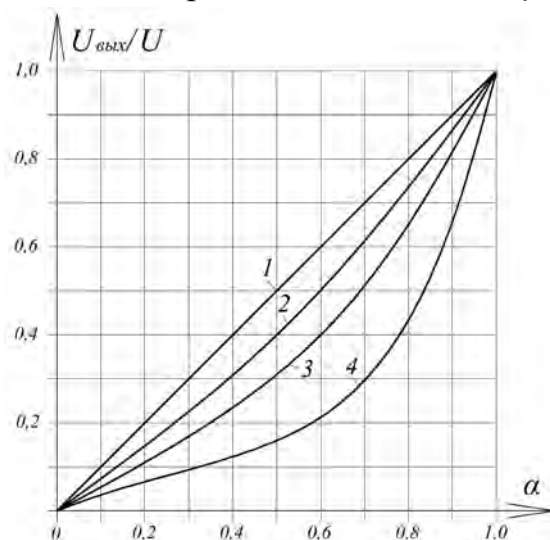


Рис.5.37 Статические характеристики потенциометрических датчиков:

1 –  $\beta=\infty$ ; 2 –  $\beta=1,0$ ; 3 –  $\beta=0,5$ ; 4 –  $\beta=0,1$

С уменьшением сопротивления нагрузки  $R_n$  характеристика датчика становится нелинейной и возрастает ошибка преобразования. Относительная погрешность для нагруженного датчика может быть найдена сопоставлением выражений (5.47) и (5.48):

$$\delta = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вых}}^{\beta=\infty}}{U} = \frac{\alpha^2(1-\alpha)}{\beta + \alpha(1-\alpha)}. \quad (5.49)$$

Отношение перемещения движка  $X$  к длине намотки  $l$  обозначаем через  $\alpha=X/l$ . Если датчик не нагружен, то есть сопротивление нагрузки  $R_n=\infty$  и  $\beta=\infty$ , то выходное напряжение линейно возрастает при изменении  $\alpha$  от 0 до 1;  $U_{\text{вых}}=\alpha U$ . Графически эта зависимости изображается прямой линией. При наличии сопротивления нагрузки  $R_n$ , соизмеримого с сопротивлением обмотки  $R$ , эта зависимость отличается от линейной, поскольку часть тока, проходящего через датчик, протекает в нагрузке. Ток, поступающий от источника питания определяется по выражению:

$$I = U \left[ (R - \alpha R) + \frac{\alpha R R_n}{\alpha R + R_n} \right], \quad (5.50)$$

или, подставляя  $R_n=\beta R$ , получим:

$$I = \frac{U/R}{(\alpha + \beta - \alpha^2)/(\alpha + \beta)}. \quad (5.51)$$

Важной характеристикой качества потенциометрического датчика является плавность изменения выходного напряжения. При перемещении движка по обмотке потенциометра происходит скачкообразное изменение сопротивления,



поскольку движок переходит с одного витка на другой. Это приводит к тому, что зависимость выходного напряжения от перемещения имеет ступенчатый вид.

**Термоэлектрические датчики.** К термоэлектрическим датчикам относят элементы, изменяющие под действием температуры свои электрические свойства (сопротивление, электродвижущую силу и др.) и используемые как измерительные преобразователи (датчики) температуры.

Наибольшее распространение имеют терморезисторы, изменяющие под действием температуры свое сопротивление, и термопары, вырабатывающие э.д.с., зависящую от температуры.

Термопары относят к датчикам генераторного типа, терморезисторы – к датчикам параметрического типа.

Термопары преобразуют температуру измеряемой среды в соответствующую термоэлектродвижущую силу (т.э.д.с.).

Собственно термопара представляет собой два термоэлектрода, сваренных на одном конце. Это – рабочий («горячий») спай. На свободных («холодных») концах термопары возникает т.э.д.с., зависящая от материала термоэлектродов и разности температур горячего и холодного спаев.

Характеристики распространенных термопар приведены в табл.5.11

Табл.5.11 – Характеристики термопар

Обозначение термопары	Градуировка	Материал термоэлектродов	Пределы измерения
ТПП	ПП – 1	Платинородий – платина	253 ... 1573
ТРП	ПР – 30/6	Платинородий (30% родия) Платинородий (6% родия)	573 ... 1873
ТХА	ХА	Хромель-алюмель	223 ... 1273
ТХК	ХК	Хромель-копель	223 ... 873
ТПС	ПС	НК - СА	573 ... 1273

Зависимость т.э.д.с. от температуры (рис.5.38) для каждой из градуировок вполне определена и приводится в справочной литературе. Развиваемые термопарами т.э.д.с. невелики. Так, для температуры 373 °К (100 °С) горячего спаев и 273 °К (0 °С) холодного спаев она составляет для градуировки ХК 6,95 мВ, для градуировки ПП - 1 только 0,64 мВ (0,00064 В).

Коэффициент передачи термопар зависит от температуры. Так, для ХК он составляет при 0 °С – 0,0066, при 100 °С – 0,073 мВ/град.

Относительный коэффициент передачи термопар близок к единице:

$$k = \frac{\Delta \varepsilon / \varepsilon}{\Delta \theta / \theta}, \quad (5.52)$$

где  $\varepsilon$  – э.д.с. термопары при температуре  $\theta$  град;  $\Delta\varepsilon$  – приращение э.д.с. при увеличении температуры на  $\Delta\theta$  град.

В комплекте с термопарами применяют приборы непосредственного измерения – милливольтметры и приборы, работающие по компенсационному принципу – электронные потенциометры. Шкалы приборов градуированы по температуре, на каждом приборе обозначен тип применяемой с ним термопары.

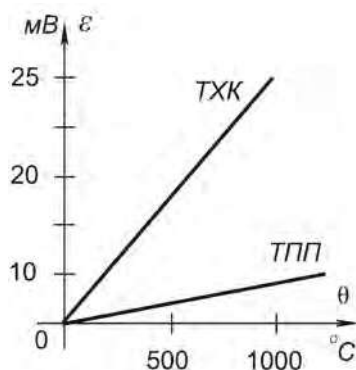


Рис.5.38 Статические характеристики термопар

Для присоединения свободных концов используются компенсационные провода, не образующие т.э.д.с. с электродами термопары. Провода изготавливаются из меди с добавками других металлов. Для каждого электрода применяют предназначенный для него провод. Компенсационные провода как бы удлиняют термоэлектроды, перенося свободные концы к зажимам измерительного прибора. Температура этих зажимов зависит от температуры окружающего воздуха. В измерительных приборах предусмотрена ее автоматическая компенсация.

Принцип действия металлических терморезисторов (термометров сопротивления) основан на зависимости удельного сопротивления металлов от температуры. При этом измерение температуры сводится к измерению сопротивления и может производиться дистанционно.

Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры описывается известным выражением:

$$r = r_0 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0) + \beta \cdot (\theta - \theta_0)^2 + \gamma \cdot (\theta - \theta_0)^3 \right], \quad (5.53)$$

где  $r$ ,  $r_0$  – сопротивление проводника при температуре  $\theta$  и  $\theta_0$  соответственно;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – температурные коэффициенты сопротивления металла, 1/град, 1/град<sup>2</sup>, 1/град<sup>3</sup> соответственно.

Для различных металлов температурные коэффициенты различны, графики статических характеристик приведены на рис.5.39.

Отечественной промышленностью серийно выпускаются термометры сопротивления с чувствительными элементами из медной проволоки (ТСМ), платиновой (ТСП), никелевой (ТС).

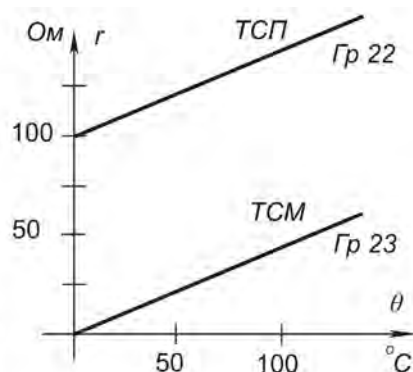


Рис.5.39 Статические характеристики металлических терморезисторов

Характеристики распространенных термометров сопротивления приведены в табл.5.12. Для этих градуировок в справочной литературе приводятся таблицы зависимости сопротивления от температуры, где сопротивления представлены весьма точно (до 4-ой значащей цифры).

Табл.5.12 – Характеристики термометров сопротивления

Обозначение термометра сопротивления	Градуировка	Сопротивление при 273 (0 °C)	Пределы изм-я, К
ТСП	Гр. 21	46,00	23 .. 773
ТСП	Гр. 22	100,00	23... 773
ТСМ	Гр. 23	53,00	223 ... 423
ТСМ	Гр. 24	100,00	223 ... 423

Температурные коэффициенты сопротивления невелики. Так, для меди  $\alpha=0,00428$ , для платины  $\alpha=0,00392$ , для никеля  $\alpha=0,0062$  1/град; коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  на несколько порядков меньше. Относительный коэффициент передачи терморезистора  $k$  определяется по выражению:

$$k = \frac{\Delta r / r_0}{\Delta \theta / \theta_0}, \quad (5.54)$$

где,  $r_0$  – сопротивление терморезистора при температуре  $\theta_0$  град;  $\Delta r$  – приращение сопротивления при увеличении температуры на  $\Delta \theta$ .

Сопротивление датчиков изменяется весьма мало, поэтому их применяют в комплекте с точными измерителями сопротивления – электронными автоматическими мостами и стрелочными приборами – логометрами. Приборы градуируются по температуре, на каждом из них указан тип необходимого термометра сопротивления. В лабораторных условиях применяют измерительные мосты с ручным уравниванием.

В настоящее время применяются полупроводниковые терморезисторы двух типов – термисторы и позисторы.

Принцип действия и тех, и других основан на зависимости электрического сопротивления полупроводникового материала от температуры.

В материале термисторов (ПТР) с увеличением температуры увеличивается число носителей тока и их сопротивление уменьшается.

Уравнение статической характеристики термисторов имеет вид:

$$r = r_0 \cdot e^{\frac{B(\theta - \theta_0)}{\theta \cdot \theta_0}}, \quad (5.55)$$

где,  $r$ ,  $r_0$  – сопротивление ПТР при температурах  $\theta$  и  $\theta_0$  соответственно;  $B$  – постоянный коэффициент, определяемый, в основном материалом ПТР.

Графики статических характеристик полупроводниковых терморезисторов приведены на рис.5.40.

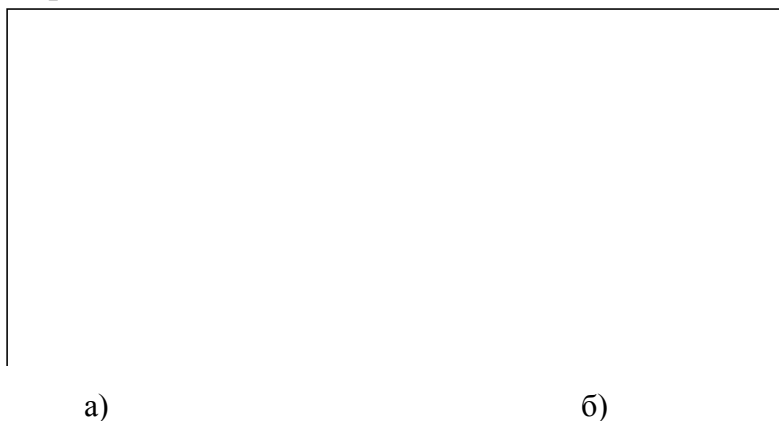


Рис.5.40 Статические характеристики термисторов (а) и позисторов (б)

Отечественной промышленностью выпускаются различные типы ПТР. Наиболее распространенными, используемыми как датчики температуры в установках сельскохозяйственного назначения, являются ММТ – медно-марганцевые и КМТ – кобальто-марганцевые. Они выпускаются с различными номинальными – при 293 К (20 °С) – сопротивлениями.

ПТР одного типа и с одним номинальным сопротивлением имеют значительный разброс параметров: по номинальному сопротивлению до 20%, по значению постоянной  $B$  – до 17%. Замена одного датчика другим с теми же номинальными параметрами требует подстройки измерительной или регулирующей аппаратуры.

Предельные температуры для большинства ПТР не превышают 453 К (180 °С), их параметры во времени стабильны, срок службы составляет десятки тысяч часов.

При работе в электрических схемах ПТР нагреваются протекающим током. Если выделяемая в них мощность невелика, то дополнительный нагрев ПТР незначителен. С увеличением протекающего тока ПТР начинает самонагреваться, его сопротивление уменьшается. Если не принять меры к ограни-

чению тока через ПТР, он может быть поврежден. Допустимая мощность рассеяния для различных типов ПТР составляет от 0,005 до 0,8 Вт.

Явление самонагрева ПТР используется при измерениях скорости потоков жидкостей и газов, влажности и других параметров.

Отечественной промышленностью освоен выпуск позисторов – полупроводниковых элементов, резко увеличивающих свое сопротивление при определенной температуре. Позисторы используются в устройствах для защиты обмоток электродвигателей от недопустимого нагрева. Статические характеристики позисторов приведены на рис.7.40,б. В соответствии с классами нагревостойкости изоляции электродвигателей выпускаются позисторы СТ 14 – 1Б для температуры 95 °С (изоляция класса «А») и СТ 14 – 1А для температуры 120 °С (изоляция класса «В»). Как видно из графиков, чувствительность позисторов очень высока – они изменяют сопротивление примерно в 100 раз при изменении температуры на 5 градусов. Высокая чувствительность существенно упрощает схему работающего с позистором устройства встроенной температурной защиты.

Относительный коэффициент передачи термисторов и позисторов значительно больше единицы. Для термисторов он отрицателен, для позисторов – положителен.

Конструктивно термоэлектрические датчики представляют собой чувствительные элементы (термопары, терморезисторы), заключенные в защитную арматуру.

Термоэлектрические датчики подразделяют:

- по назначению – на погружаемые, поверхностные и для помещений;
- по герметичности со стороны измеряемой среды – на герметичные, рассчитанные на определенное давление и негерметичные;
- по материалу корпуса – из углеродистой или нержавеющей стали, латуни и др.;
- по инерционности – с большой тепловой инерционностью (БИ), со средней (СИ) и малоинерционные (МИ).

К объекту измерения погружаемые термодатчики присоединяются, как правило, через штуцер с накидной гайкой.

Позисторы представляют собой прямоугольные пластинки с размерами в единицы миллиметров. Они встраиваются в обмотку статора (по одному на фазу) и соединяются последовательно. При недопустимом нагреве любого их общее сопротивление резко возрастает.

Термоэлектрические датчики инерционны. При внезапном скачкообразном изменении температуры среды выходное воздействие – т.э.д.с., сопротивление изменяется не мгновенно, а по мере прогрева чувствительного элемента.

Поток теплоты передается через корпус, заполнитель, изоляцию к чувствительному элементу.

Временная характеристика датчика при увеличении измеряемой температуры показана на рис.5.41. На оси абсцисс отложено время процесса. За нуль принят момент, когда увеличилась температура среды. По оси ординат отложены относительные значения выходного воздействия – изменения сопротивления терморезистора или т.э.д.с. термопары. За единицу выходного воздействия принято полное приращение сопротивления  $(\Delta r_{II})$  или т.э.д.с.  $(\Delta \varepsilon_{II})$  под действием скачка температуры.



Рис.5.41 Временная характеристика термоэлектрического датчика

На структурных схемах термоэлектрические датчики представляют апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k}{T_T p + 1}, \quad (5.56)$$

где  $k$  – относительный коэффициент передачи;  $T_T$  – постоянная времени датчика.

Для тепловых элементов постоянная времени равна отношению теплоемкости  $C$  элемента к его теплопередаче  $A$ :

$$T_T = \frac{C}{A}. \quad (5.57)$$

Постоянные времени термометров сопротивления составляют: для БИ – до 4-х минут, для СИ – до 1 мин. 20 с, для МИ – до 9 с.

Для термопар постоянные времени имеют значения: для БИ – до 8 мин., для СИ – до 2,5 мин., для МИ – до 1,5 мин.

Так как объекты регулирования в сельскохозяйственном производстве имеют постоянные времени, измеряемые часами, электротепловые датчики иногда считают безынерционными.

Полупроводниковые терморезисторы имеют нелинейную статическую характеристику, их коэффициент передачи с температурой изменяется, поэтому график временной характеристики для них отличается от экспоненты.

В исследовательской практике применяют миниатюрные терморезисторы с размерами в десятки микрон и термопары из проволоки диаметром в единицы микрон. Такие элементы, используемые без арматуры, могут иметь постоянные времени порядка миллисекунд и применяются для исследований кратковременных тепловых процессов.

**Фотоэлектрические датчики.** Фотоэлементом называется вакуумный, полупроводниковый или какой-либо другой прибор, электрические свойства которого (ток, сопротивление или э.д.с.) изменяются под воздействием падающего на него электромагнитного излучения.

Практически используется зависимость тока, сопротивления или э.д.с. фотоэлемента – его выходных воздействий – от величины светового потока или его спектрального состава – входных воздействий.

Основной статической характеристикой фотоэлемента является световая  $I_\phi = f(\Phi)$  или  $I_\phi = f(E)$  – зависимость тока фотоэлемента  $I_\phi$  от светового потока  $\Phi$  или освещенности  $E$ . Ток фотоэлемента зависит также от приложенного к нему напряжения  $U$ , температуры фотоэлемента  $\theta$ , длины волны  $\lambda$  (цветности) светового потока.

Численно зависимость тока фотоэлемента от светового потока оценивается коэффициентом передачи (чувствительностью). Чувствительность к белому – неразложенному – свету называют интегральной. Различают удельную  $K_v$  и максимальную  $K_M$  чувствительность:

$$K_v = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta \Phi \cdot U}; K_M = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta \Phi} \text{ при } U = U_M, \quad (5.58)$$

где  $\Delta \Phi$  – изменение светового потока, лм;  $\Delta I_\phi$  – изменение тока фотоэлемента, мкА;  $U$  – приложенное напряжение, В;  $U_M$  – максимальное напряжение фотоэлемента, В.

Если входным воздействием служит изменение цветности (длины волны) светового потока, необходимо знать зависимость фототока от изменения монохроматических световых потоков для требуемых длин волн  $I_\phi = f(\Phi_\lambda)$  и соответствующие значения спектральных чувствительностей:

$$K_{Ci} = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta \Phi_{\lambda i}}; K_{Cv} = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta \Phi_{\lambda i} \cdot U}, \quad (5.59)$$

где,  $\Delta \Phi_{\lambda i}$  – приращение светового потока с длиной волны  $\lambda i$ .

В технических данных фотоэлемента приводят или график зависимости его чувствительности от длины – «спектральную характеристику» или длину волны светового потока, при которой чувствительность фотоэлемента наиболее высока – «максимум спектральной чувствительности».

Так как фотоэлементы работают в электрических цепях, важны их вольт-амперные характеристики  $I_\phi = f(U_\phi)$  при  $(\Phi, \theta, \lambda) = const$ .

При выборе электрического режима фотоэлемента нельзя превышать максимально допустимых для него напряжения, тока и мощности рассеяния. Допустимой мощностью рассеяния называют мощность, отдаваемую в виде тепла («рассеиваемую») в окружающую среду при допустимой для элемента температуре нагрева. Необходимо, чтобы электрическая мощность  $P_\phi$ , потребляемая элементом, не превышала допустимой мощности рассеяния:  $P_\phi < P_{доп}$ . Так как  $P_\phi = U_\phi I_\phi$ , а значения тока зависят от светового потока, нужно выбирать напряжение питания так, чтобы при максимально возможном в установке световом потоке мощность рассеяния и ток фотоэлемента были меньше допустимых.

При изменениях светового потока проявляется инерционность фотоэлементов. Если световой поток изменяется скачкообразно, изменение фототока описывается экспоненциальным законом, т.е. фотоэлементы представляются апериодическим звеном первого порядка. Численной характеристикой инерционности фотоэлементов являются постоянные времени, значения которых зависят не только от типа, но и от режима работы фотоэлементов. Так, с изменением светового потока изменяются и постоянные времени.

Ток фотоэлементов зависит от их температуры: с ее повышением ток обычно увеличивается. Относительные изменения тока составляют от долей до единиц процентов на градус. Отметим, что при отсутствии светового потока через фотоэлемент протекает «темновой ток», обусловленный, в основном, влиянием температуры.

По принципу действия различают три группы фотоэлементов: с внешним фотоэффектом, внутренним фотоэффектом и с вентильным фотоэффектом.

К фотоэлементам с внешним фотоэффектом относятся вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, а также фотоумножители.

Широкое распространение в технике получили полупроводниковые фотоэлементы с внутренним фотоэффектом – фоторезисторы. Их действие основано на том, что многие полупроводники (сернистый кадмий, селенистый кадмий и др.) увеличивают число электронов проводимости под действием внешнего излучения. Первичные электроны, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки,



ки, вызывают вторичный поток электронов. В результате сопротивление полупроводника при облучении значительно уменьшается.

Конструктивно фоторезисторы представляют собой нанесенный на керамическую или стеклянную пластину слой полупроводника площадью в единицы – сотни  $\text{мм}^2$  с входящими в него электродами. Полупроводниковый слой защищается от воздействия окружающей среды слоем лака. Пластина с полупроводником размещается в пластмассовом или металлическом герметизированном корпусе. Контактные выводы предназначены для присоединения пайкой или установкой фоторезистора в панель электронной лампы.

Удельная чувствительность фоторезисторов достигает  $10^4$   $\text{мкА/лмВ}$ , и кратность уменьшения сопротивления при освещении может составлять несколько тысяч. Некоторые фоторезисторы имеют значительные мощности рассеяния (например, у ФСК-7  $P_{\text{рас}}=0,7$  Вт), что позволяет иногда обходиться без усилителя.

Световые характеристики фоторезисторов почти линейны и описываются зависимостью:

$$I_{\phi} = S \cdot E^{\alpha} K_v U_{\phi}, \quad (5.60)$$

где  $S$  – площадь светочувствительного слоя,  $\text{м}^2$ ;  $I_{\phi}, U_{\phi}$  – ток и напряжение фоторезистора в  $\text{мкА}$  и В соответственно;  $E$  – освещенность слоя,  $\text{лк}$ ;  $\alpha$  – показатель степени, ( $\alpha = 0,9$ );  $K_v$  – удельная чувствительность фоторезистора.

Фоторезисторы чувствительны к инфракрасным лучам: максимум спектральной чувствительности для разных образцов лежит в пределах  $0,9 \dots 1,2$   $\text{мкм}$ , а длинноволновая граница фотопроводимости достигает  $2,7$   $\text{мкм}$ . Они обладают сравнительно высоким температурным коэффициентом – до нескольких процентов изменения тока на градус, имеют заметный темновой ток.

Большинство фоторезисторов обладают довольно значительной инерционностью. Их постоянные времени составляют от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  с и сильно зависят от условий работы – температуры, освещенности и спектрального состава светового потока. Фоторезисторы имеют значительный разброс параметров среди образцов одной марки.

К фотоэлементам с вентильным фотоэффектом относятся фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры, а также вентильные фотоэлементы. У всех этих приборов области  $p$ - $n$  перехода сделаны доступными для освещения извне. Под действием излучения в объеме полупроводника генерируются электронно-дырочные пары – носители тока. У вентильных фотоэлементов и фотодиодов они разделяются  $p$ - $n$  переходом; на электродах приборов появляется фото-ЭДС, достигающая десятых долей вольта. При замыкании электродов на внешнюю цепь, в ней появляется фототок, величина которого зависит от освещенности

перехода, сопротивления цепи, температуры фотоэлемента и длины волны светового потока. Такой режим работы фотоэлементов называется генераторным («вентильным»). Промышленностью выпускаются вентильные фотоэлементы (селеновые, кремниевые), работающие как источники фототока. Они применяются для целей измерения светового и лучистого потока, при измерении высоких температур, а также для питания электронной аппаратуры. В генераторном режиме могут использоваться и фотодиоды, однако, развиваемая ими э.д.с. невелика.

Большую чувствительность имеют фотодиоды, используемые с посторонним источником напряжения. В этом режиме – фотодиодном – они включаются последовательно с резистором нагрузки к источнику постоянного напряжения в непроводящем направлении. При этом обратный ток и напряжение на фотодиоде зависят от его освещенности (рис.5.42).



Рис.5.42 Световые (а) и вольтамперные (б) характеристики: 1 – фоторезисторов, 2 – фотодиодов в фотодиодном режиме, 3 – фототириستоров.

Фототранзисторы часто используются при отключенной базе в фотодиодном режиме, они имеют большую, чем фотодиоды, чувствительность. Вывод базы может быть использован для установки порога срабатывания, температурной компенсации и т.д.

Фототиристоры отличаются от обычных тиристоров тем, что управляющей величиной у них является световой поток, а не ток управляющего электрода. Они сочетают в себе достоинства тиристора (переключатель с двумя устойчивыми состояниями, высокое быстродействие) и достоинства полупроводникового фотоэлемента.

### 5.3.2. Реле

Реле – коммутационное устройство, предназначенное производить скачкообразные изменения в управляемых цепях при заданном значении воздействующих величин. Такими могут быть как электрические (ток, напряжение, активная или реактивная мощность и др.), так и неэлектрические (температура,

давление, частота вращения). Выходным воздействием реле является электрический ток, коммутируемый либо контактами, либо резким изменением проводимости у бесконтактных электронных, полупроводниковых, магнитных и других реле.

Реле могут выполнять функцию датчиков, задатчиков, органов сравнения, преобразователей. Важным свойством реле является электрическое разделение цепей выхода (контактов) и входа (обмотки).

Ток обмотки создает электромагнитную силу, притягивающую якорь к сердечнику – реле срабатывает. При отключении тока, реле отпускает – якорь и контакты возвращаются в первоначальное состояние. Возврат осуществляется силами противодействующей пружины и пружин контактов.

Электромагнитные реле выпускаются для постоянного и переменного тока обмотки. Магнитопровод реле переменного тока, обычно, выполняют набранным из листов электротехнической стали, хотя имеются реле и со сплошными сердечниками. Часть полюса электромагнита реле переменного тока охватывается экраном – короткозамкнутым витком из меди или алюминия, уменьшающим пульсации силы электромагнита (рис.5.43).

Реле постоянного тока для ослабления остаточного, после отключения обмотки, магнитного потока снабжаются немагнитной прокладкой между якорем и сердечником – штифтом отлипания.

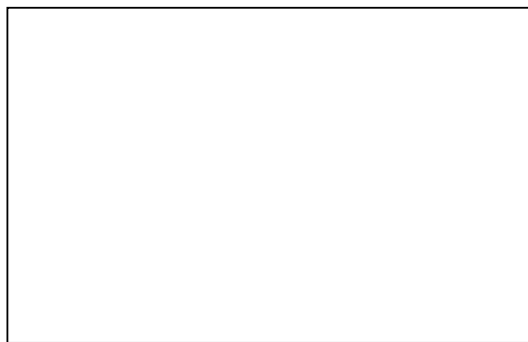


Рис.5.43 Конструкция электромагнитного реле: 1 – сердечник; 2 - обмотка; 3 - якорь; 4 – немагнитная прокладка; 5 - поводок; 6, 7 – замыкающая пара контактов; 8 – противодействующая пружина; 9 – упор неподвижного контакта.

Свойства реле определяются двумя характеристиками: механической – зависимостью противодействующей силы  $F_{\Pi}$  от зазора  $\delta$  между якорем и сердечником  $F_{\Pi} = F(\delta)$ , и тяговой  $F_{\mathcal{J}} = F(\delta)$ , где  $F_{\mathcal{J}}$  – сила электромагнита, движущая якорь (рис.5.44). Эти силы направлены встречно.

В исходном состоянии якорь реле отпущен, зазор между ним и сердечником  $\delta_0$ , максимален. Если перемещать якорь до соприкосновения контак-

тов (зазор  $\delta_c$ ), деформируются пружины только подвижных контактов и противодействующее усилие возрастает от  $F_{пт}$  – трогания до  $F_{пс}$ .



Рис.5.44 Механическая 1 и тяговые 2, 3, 4 и характеристики электромагнитного реле

Если пружины неподвижных контактов были предварительно напряжены с силой  $F_{пд}$ , то совместное движение контактов продолжится только при силе большей  $F_{пд}$ . Теперь изгибаются также пружины неподвижных контактов, общая жесткость пружин увеличится. При зазоре  $\delta_k$  якорь притянут полностью. Сила притяжения якоря обратно пропорциональна квадрату изменения зазора. Тяговые характеристики располагаются тем выше, чем больше ток обмотки.

Тяговая и механическая характеристики реле должны быть согласованы. По графикам рис.5.44 можно установить, что безостановочное движение якоря при срабатывании возможно при токе обмотки  $I_0 \geq I_3$ , а отпускание – при  $I_0 \leq I_1$ . Минимальный ток, обеспечивающий замыкание контактов при безостановочном движении якоря называют током срабатывания  $I_{ср}$ . Максимальное значение тока обмотки, при котором якорь и контакты возвращаются в исходное состояние, называют током отпускания  $I_{от}$ . Отношение тока отпускания к току срабатывания называют коэффициентом возврата  $k_B$ :

$$k_B = \frac{I_{от}}{I_{ср}}. \quad (5.61)$$

Для реле переменного тока он около 0,8, для реле постоянного тока 0,6 ... 0,2, а для некоторых реле не нормируется.

Аналогично (5.61) выражается коэффициент возврата по напряжению:

$$k_{BH} = \frac{U_{от}}{U_{ср}}, \quad (5.62)$$

где  $U_{от}$  – напряжение отпускания,  $U_{ср}$  – напряжение срабатывания.

Для повышения коэффициента возврата по напряжению применяется схема, приведенная на рис.5.45. После срабатывания реле  $KL1$  его размыкающий контакт  $KL1$  вводит в цепь обмотки с сопротивлением  $R_0$  добавочный резистор  $R$ . Ток обмотки уменьшается. Для отпускания реле достаточно небольшого снижения напряжения, приложенного к схеме:

$$k_{BH} = k_B \cdot \frac{R_0 + R}{R_0}. \quad (5.63)$$

Если резистор  $R$  уменьшает ток до тока отпускания, реле переходит в автоколебательный режим. Такие схемы широко применяются в вибрационных регуляторах.

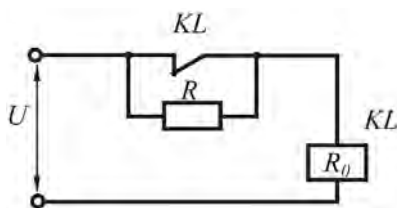


Рис.5.45 Схема включения реле для повышения коэффициента возврата

Для надежного срабатывания на практике обеспечивают ток обмотки больший тока срабатывания. Его называют рабочим или номинальным. По этому току рассчитывается нагрев обмотки реле. Отношение номинального тока к току срабатывания называют коэффициентом надежности (запаса) при срабатывании:

$$k_{H.CP} = \frac{I_H}{I_{CP}} = 1,2 \dots 2,0.$$

Для надежного отпускания реле минимальный ток схемы  $I_{МИН}$  должен быть меньше тока отпускания  $I_{ОТ}$ . Их отношение называют коэффициентом надежности (запаса) при отпускании  $k_{H.ОТ}$ :

$$k_{H.ОТ} = \frac{I_{ОТ}}{I_{МИН}} = 1,5 \dots 3,0.$$

Ответственным элементом конструкции реле являются его контакты. Они должны иметь малое сопротивление в замкнутом состоянии, хорошо противостоять механическому износу, коррозии, электрическому износу, иметь хорошую теплопроводность. Контакты изготавливаются из чистых металлов (серебра, золота, платины), сплавов, а также металлокерамическими, изготавливаемыми методами порошковой металлургии из серебра и окиси кадмия, меди и вольфрама и др.

Конструкция контактов, усилие их сжатия, скорость замыкания и размыкания, а также характеристики коммутируемого тока определяют коммутационную способность контактов – способность выдерживать определенное число

срабатываний. Наиболее тяжелым для контактов является разрыв цепи постоянного тока при индуктивной нагрузке, когда велика опасность возникновения электрической дуги. Ограничивается также и ток замыкания: при срабатывании наблюдается «дребезг» контактов, приводящий к их подгоранию.

Работа описанных реле не зависит от направления тока в обмотке. Такие реле называют нейтральными.

У поляризованных реле направление замыкания переключающего контакта зависит от направления (полярности) тока в обмотке. Конструкция такого реле показана на рис.5.46. На якорь 1, который может поворачиваться вокруг своей оси 2, действуют электромагнитные силы, создаваемые магнитными потоками  $\Phi_y$  и  $\Phi_{\Pi}$ . Поток  $\Phi_{\Pi}$  (поляризующий) создан постоянным магнитом 3. Две части этого потока от северного С полюса магнита через магнитопроводящие болты 4, полюсные наконечники и воздушные зазоры входят в якорь, и через лепесток 5 якоря и зазор под ним входят в южный полюс Ю. Управляющий поток  $\Phi_y$  создается током в обмотке, его направление определяется полярностью тока. На рис.5.46 потоки  $\Phi_y$  и  $\Phi_{\Pi}$  суммируются в правом зазоре, в левом – вычитаются. Якорь замыкает контакт «Я» с «Л». При смене полярности «Я» замкнется с «П».

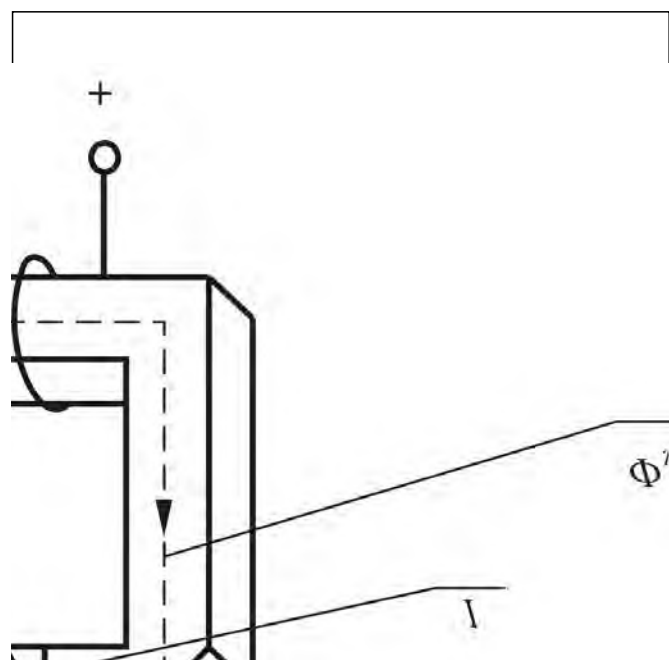


Рис.5.46 Конструкция поляризованного реле

На принципиальных схемах точкой отмечается тот неподвижный контакт, с которым замкнется подвижный, если плюс источника тока будет присоединен к выводу обмотки, также отмеченному точкой.

Возможны три регулировки реле (рис.5.47):

- двухпозиционная двустабильная. Якорь при соответствующей полярности тока обмотки перебрасывается от одного контакта к другому и при отключении тока остается там;
- двухпозиционная с преобладанием, одностабильная. Срабатывание происходит только при определенной полярности тока в обмотке. При отключении тока якорь возвращает подвижный контакт к неподвижному контакту покоя;
- Трехпозиционная. При отсутствии тока в обмотке якорь занимает среднее положение. При токе одной полярности переходит в одно, при токе другой полярности – в другое положение.

Как видно из рис.5.47 статические характеристики реле существенно нелинейны.

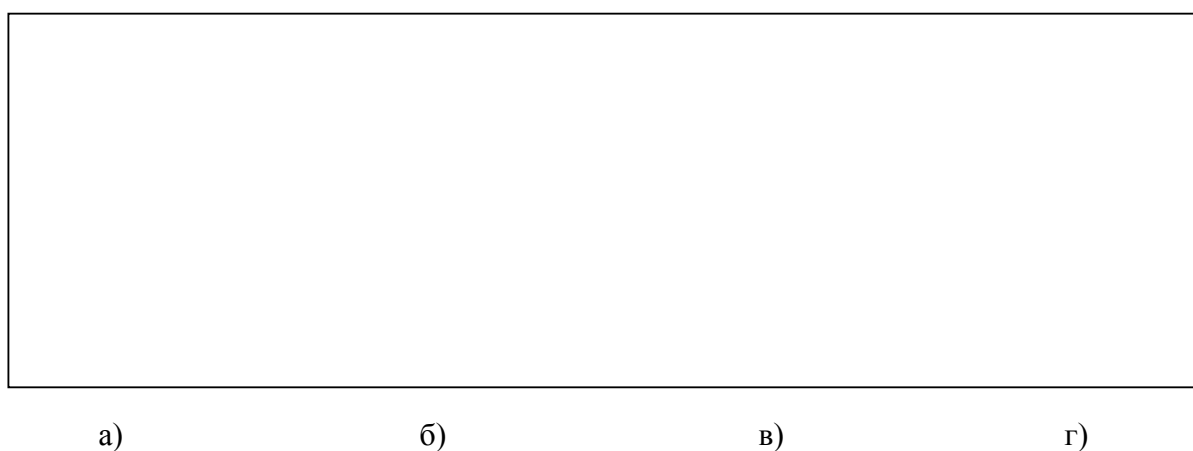


Рис.5.47 Статические характеристики реле (а ... в – поляризованных, г – нейтрального) и изображение их контактов;  $I_0$  – ток обмотки реле,  $I_k$  – ток его контактов

Дистанционные переключатели представляют собой двустабильное реле, имеющее несколько переключающих контактов. Они выполняются как поляризованные со статической характеристикой (рис. 5.47,а), или имеют отдельные обмотки для переключения в разные положения.

Промышленностью выпускается широкий ассортимент реле, отличающихся родом тока обмотки, номинальными напряжениями и токами, числом и исполнением контактов, их коммутационной способностью, степенью защиты от действия окружающей среды и категорией размещения.

При заказе реле необходимо указывать его тип и номер паспорта, под которым оно значится в каталогах изготовителя.

Важным показателем реле является время срабатывания – это промежуток времени между включением напряжения на обмотку и замыканием контактов. Задержка при срабатывании объясняется влиянием индуктивности на скорость нарастания тока в ней и инерцией подвижных частей. Сокращение времени срабатывания достигают уменьшением электромагнитной постоянной

времени обмотки и снижением массы подвижных частей реле. Таким путем удалось получить время срабатывания реле максимального тока РТ40 около 0,03 с. Заметим, что современные реле с магнитоуправляемыми контактами (герконами) имеют еще меньшее время срабатывания. Для реле РЭС 43 время срабатывания 0,001 с, время отпускания 0,0003 с (0,3 мс).

Часто требуется увеличить время срабатывания или отпускания. Небольшие задержки – до единиц секунд – получают размещением на сердечнике массивного короткозамкнутого витка, задерживающего нарастание тока при включении и поддерживающего магнитный поток при отключении тока обмоток. Этот способ применим только для реле постоянного тока. Для таких же реле применяют схемные решения (рис.5.48).

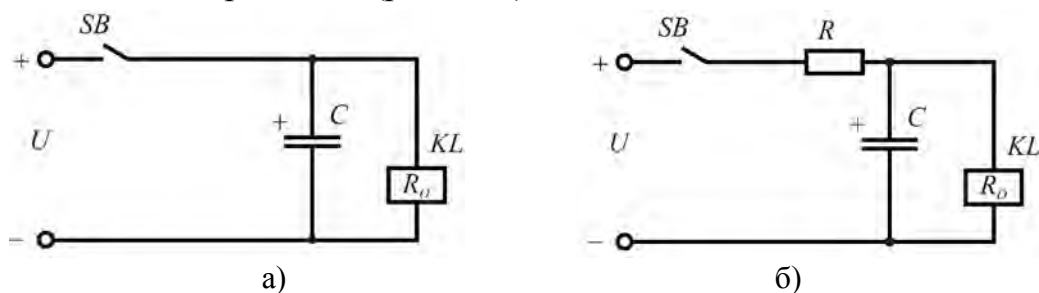


Рис.5.48 Схемы включения реле постоянного тока: а – для увеличения времени отпускания; б – для увеличения времени срабатывания и отпускания

В схеме (рис.5.48,а) при замыкании ключа  $SB$  срабатывает реле  $KL$  и заряжается конденсатор  $C$ . При размыкании ключа реле отпустит свой контакт с задержкой после разряда конденсатора на обмотку. В схеме (рис.5.48,б) при замыкании ключа конденсатор заряжается через резистор  $R$  и реле сработает с задержкой после увеличения тока в обмотке до тока срабатывания. При размыкании ключа обмотка подпитывается током от заряженного конденсатора, пока ток в обмотке не снизится до тока отпускания. Естественно, что сопротивление дополнительного резистора  $R$  должно ограничивать ток обмотки до  $I_0 \leq I_{CP}$ .

В первом приближении (без учета индуктивности обмотки) время срабатывания реле в схеме (рис.5.48,б) составляет:

$$t_{CP} = T_l \cdot \ln \frac{U}{U - U_{CP}}, \quad (5.64)$$

где  $T_l = C \frac{R \cdot R_0}{R + R_0}$  – постоянная времени цепи срабатывания реле.

Аналогично этому время отпускания реле в обеих схемах:

$$t_{OT} = T \cdot \ln \frac{U_{OT} \cdot (R + R_0)}{U \cdot R_0}, \quad (5.65)$$

где  $T = C \cdot R_0$  – постоянная времени цепи тока при отпуске реле.

Наряду с электромагнитными широкое распространение получили по-



лупроводниковые твердотельные реле (ПТР). Элементная структура (рис.5.49) ПТР различных производителей относительно неизменна.

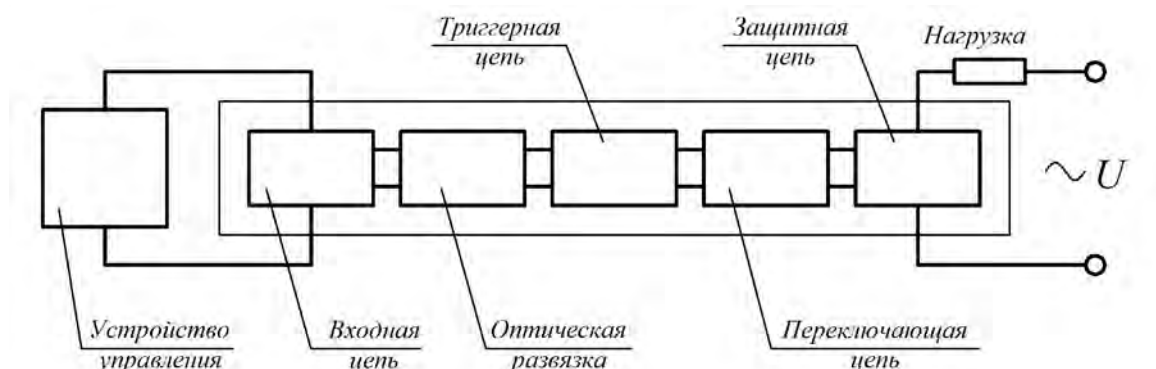


Рис.5.49 Структурная схема твердотельного реле

Основными элементами твердотельных реле являются:

- *входная (первичная) цепь*. Входная цепь твердотельного реле может состоять из обычного резистора, включенного последовательно с оптическим изолятором, или быть более сложной схемой с регулятором тока, с защитой от обратной полярности и т.д., которая предназначена для приема сигнала управления и передачи команды на коммутацию нагрузки;
- *оптическая развязка* в твердотельном реле обеспечивает изоляцию между входной, промежуточной и выходной цепями. Тип оптической развязки, используемой в реле, определяет принцип работы реле;
- *триггерная цепь* обрабатывает входной сигнал и переключает выход твердотельного реле;
- *переключающая цепь* – часть ПТР, обеспечивающая подачу напряжения на нагрузку, основным элементом которой является транзистор или симистор;
- *защитная цепь* предназначена для надежной работы ПТР и его защиты от ошибок, связанных с неправильной эксплуатацией или подключением.

### 5.3.3. Исполнительные механизмы

Исполнительный механизм – устройство, предназначенное для перемещения регулирующего органа в системах автоматического регулирования и дистанционного управления.

По роду энергии исполнительные механизмы (ИМ) разделяют на электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные (электрогидравлические, электропневматические и др.).

Электрические ИМ разделяют на электромагнитные и электродвигательные. К первым относят электромагнитные приводы регулирующих и запорных золотников, клапанов, заслонок; сюда же относят электромагнитные муфты. Ко

вторым относят исполнительные механизмы, имеющие электродвигатель постоянного или переменного тока.

Электродвигательные ИМ классифицируют по следующим признакам:

- по виду движения выходного элемента – с вращательным (одно – и много-обратные) и с поступательным;
- по характеру действия – позиционного, обеспечивающие два положения регулирующего органа «открыто» и «закрыто» и пропорционального действия;
- по скорости перемещения выходного элемента – с постоянной скоростью и с переменной скоростью;
- по системе управления электродвигателем – с контактным или с бесконтактным управлением;
- по степени защиты от попадания внутрь корпуса посторонних тел и воды, а также защите персонала от соприкосновения с вращающимися и токоведущими частями внутри корпуса (защищенные, закрытые и др.);
- по категории мест размещения при эксплуатации (на открытом воздухе, в помещениях) и климатическим зонам (для умеренного, тропического, холодного климата).

Конструкцию электродвигательных исполнительных механизмов рассмотрим на примере МЭО 25/100 (механизм электрический однооборотный с номинальным моментом выходного вала 25 кГс·м и временем полного оборота 100 с). Выпускаются различные типоразмеры механизмов МЭО – от МЭО – 1,6/40 до МЭО – 1000/630 (рис.5.50). Для механизмов последних лет выпуска значения момента приводятся в ньютонах.

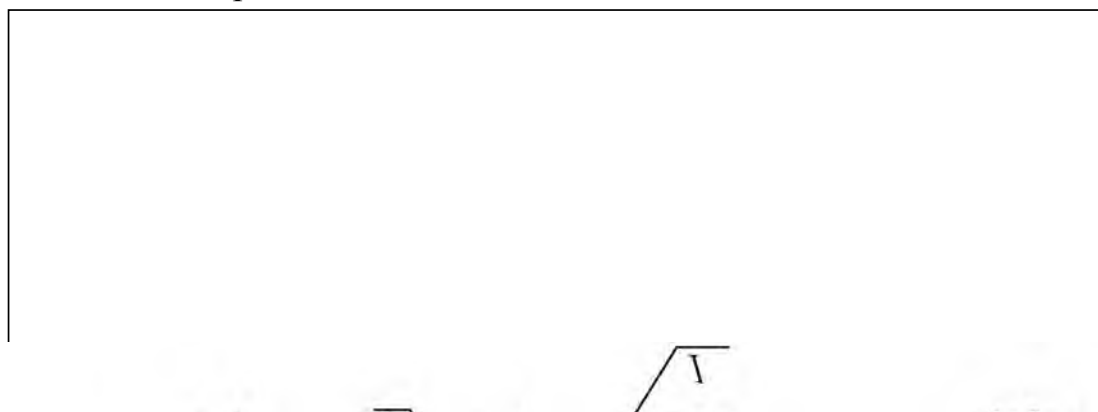


Рис.5.50 Конструкция исполнительного механизма МЭО-25/100. 1 – корпус с редуктором; 2 – электродвигатель; 3 – ручной привод; 4 – тормоз с кнопкой включения; 5 – рычаг выходного вала; 6 – узел упоров; 7 – клемная коробка; 8 – блок датчиков положения

В механизмах МЭО применяются исполнительные двухфазные асинхронные электродвигатели. Для снижения инерционности они имеют либо полый ротор в виде тонкостенного алюминиевого стакана, либо обычный короткозамкнутый ротор, но уменьшенного диаметра. Двигатели имеют обмотки управления (ОУ) и возбуждения (ОВ). Последняя включается через фазосдвигающий кон-

денсатор. Реверсирование двигателя производится переключением выводов одной из обмоток, регулирование частоты вращения – изменением напряжения питания. Двухфазные исполнительные двигатели выполняются с большим запасом по нагреву и допускают длительное пребывание в стопорном режиме. Ротор двигателя связан с выходным валом через редуктор.

Для ручного управления ИМ служит маховичок 3. При необходимости его следует подать в сторону корпуса, нажать кнопку отключения тормоза, и, удерживая маховичок во вдвинутом положении, вращать его. Тормоз выполнен колодочным, его колодка отводится от шкива электродвигателя либо в ручную – кнопкой, либо электромагнитом, включаемым в сеть одновременно с двигателем. Тормоз нужен для ограничения выбега вала после отключения электродвигателя.

Все исполнительные механизмы имеют элементы обратной связи с регулятором. Механизмы МЭО выпускаются с индуктивными датчиками (блок БДИ) и с потенциометрическими (блок БДР). В блоке БДИ два индуктивных датчика. Их ферромагнитные сердечники перемещаются кулачком от выходного вала. Перераспределение напряжения на обмотках служит сигналом обратной связи. В блок БДР входят два проволочных потенциометра. Их движки перемещаются от выходного вала ИМ. Напряжение, снимаемое с движков, пропорционально углу поворота, оно служит сигналом обратной связи. Исполнительные механизмы с такими датчиками могут работать в системах пропорционального регулирования.

В блок обратной связи всех ИМ входят конечные выключатели, отключающие двигатель ИМ в предельных положениях регулирующего органа. Каждый из конечных выключателей имеет переключающий контакт, размыкающая часть которого отключает двигатель, а замыкающая включает сигнал – сигнальную лампу (рис.5.51).

На корпусе ИМ устанавливается узел упоров, предохраняющих приводимый регулирующий орган от поломок при отказе конечных выключателей.

В конструкцию ИМ, имеющих трехфазные электродвигатели, часто вводят предохранительную муфту предельного момента. Когда регулирующий орган доходит до упора, выходной вал ИМ останавливается, а вал двигателя еще вращается благодаря проворачиванию элементов муфты. При этом срабатывает конечный выключатель муфты, отключающий двигатель. ИМ выпускаются с муфтами одностороннего (на закрытие) и двухстороннего действия.

В некоторых установках отключение двигателя производится от реле максимального тока при переходе двигателя в стопорный режим. Отключение должно выполняться с выдержкой времени несколько большей, чем время про-

текания пускового тока при нормальном пуске двигателя. Таким путем получают плотное закрытие регулирующего органа.

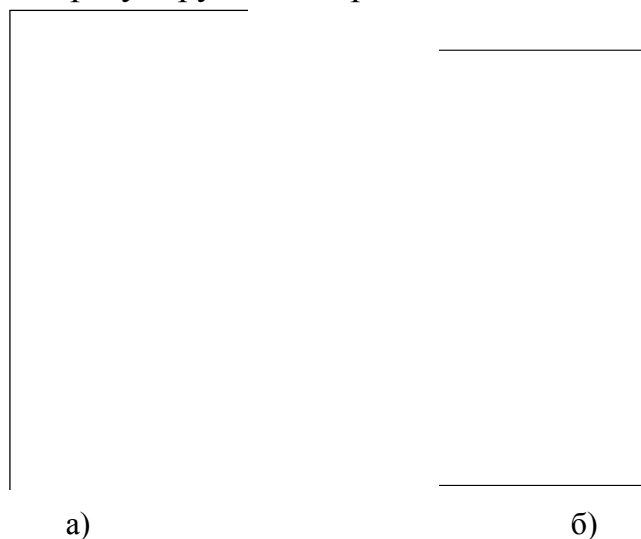


Рис.5.51 Принципиальные электрические схемы исполнительных механизмов ИМ-2/120 (а), МЭО-25/100 (б). МАМ – двигатель исполнительного механизма, YA – электромагнит тормоза, SQ – конечные выключатели, RP – потенциометр обратной связи, L1, L2 – обмотки индуктивного датчика

Переходные режимы ИМ обусловлены, в основном, изменением напряжения, подаваемого на двигатель от регулятора. Это напряжение ( $U$ ) является входным воздействием для исполнительного механизма. Выходным воздействием ИМ обычно является угол поворота выходного вала ( $\varphi$ ). Он зависит от угловой скорости ротора, передаточного отношения редуктора и времени. Угловая скорость ротора определяется приложенным к двигателю напряжением.

Отношение выходного воздействия к входному, взятых в операторной форме записи относительных безразмерных отклонений, является передаточной функцией исполнительного механизма  $W(p)$ :

$$W(p) = \frac{\varphi(p)}{U(p)} = \frac{1}{T_{II}p(T_{ЭМ}p + 1)}, \quad (5.66)$$

где  $T_{ЭМ}$  – электромеханическая постоянная времени ИМ, определяемая электромеханической постоянной времени электродвигателя с учетом приведенного момента инерции элементов редуктора и регулирующего органа;  $T_{II}$  – постоянная времени интегрирования ИМ.

Из (5.66) следует, что на структурных схемах ИМ представляют последовательным соединением интегрирующего и апериодического звена первого порядка (реальным интегрирующим звеном).

Электромеханическая постоянная времени ИМ мало отличается от электромеханической постоянной времени его электродвигателя из-за наличия понижающего редуктора с большим передаточным отношением.

Постоянная времени интегрирования  $T_{II}$  – время, за которое выходное воздействие изменяется от нуля до единицы при неизменном входном, также равном единице. Так, для МЭО – 25/100 время полного (на  $360^\circ$ ) оборота 100 с. Если допустимый угол для регулирующего органа  $90^\circ$ , то время его отработки составит 25 с. т.е. постоянная времени интегрирования  $T_{II} = 25$  с.

В целом электромеханическая постоянная времени ИМ много меньше – на два – три порядка – постоянной времени интегрирования, так что без большой ошибки исполнительный механизм на структурной схеме можно представить интегрирующим звеном с передаточной функцией:

$$W_{IM} = \frac{1}{T_{II} p}. \quad (5.67)$$

#### **5.4. Автоматизация технологических процессов в животноводстве**

При производстве животноводческой продукции можно выделить ряд типичных технологических процессов, характеризующихся достаточно высоким уровнем механизации: доение коров, подача воды, раздача кормов, уборка навоза. Поэтому именно эти процессы в первую очередь подлежат автоматизации.

Основанием для интеграции автоматических систем служат зоотехнические нормы и требования, характеристики помещения и работающего в нем технологического оборудования [2; 5; 22].

##### **5.4.1. Автоматизация первичной обработки молока**

Процесс первичной обработки молока включает в себя операции его очистки, пастеризации и охлаждения. При этом цель пастеризации состоит в уничтожении содержащихся в молоке микроорганизмов. Последующее за пастеризацией охлаждение позволяет увеличить срок хранения продукта. Охлаждение применяют и как самостоятельную операцию при хранении молока на молочных фермах и комплексах.

Пастеризатор молока представляет собой многосекционный пластинчатый теплообменник, подогреваемый горячей водой. На практике используют разные режимы пастеризации: мгновенный (при  $t=85\dots90^\circ\text{C}$ ), кратковременный ( $T=20$  с, при  $t=72\dots76^\circ\text{C}$ ) и длительный ( $T=300$  с, при  $t=90^\circ\text{C}$ ) [17].

Установка для охлаждения молока (рис.5.52) работает по замкнутому циклу. Пары хладагента поступают в компрессор 3, сжимаются и попадают в конденсатор 10, где превращаются в жидкость, стекающую в ресивер 11. Из ресивера жидкий хладагент поступает в испаритель 7, проходя последовательно через теплообменник 4, фильтр-осушитель 5 и терморегулирующий вентиль 6. В терморегулирующем вентиле давление хладагента падает, он оказывается перегретым относи-

тельно нового давления и потому вскипает, отбирая теплоту у воды, орошающей поверхность испарителя. Эта вода насосом 8 перекачивается в охладитель молока 1, после которого возвращается в испаритель.

Для охлаждения воды, омывающей трубки конденсатора, применяется малогабаритная градирня 2 с вентилятором 12.

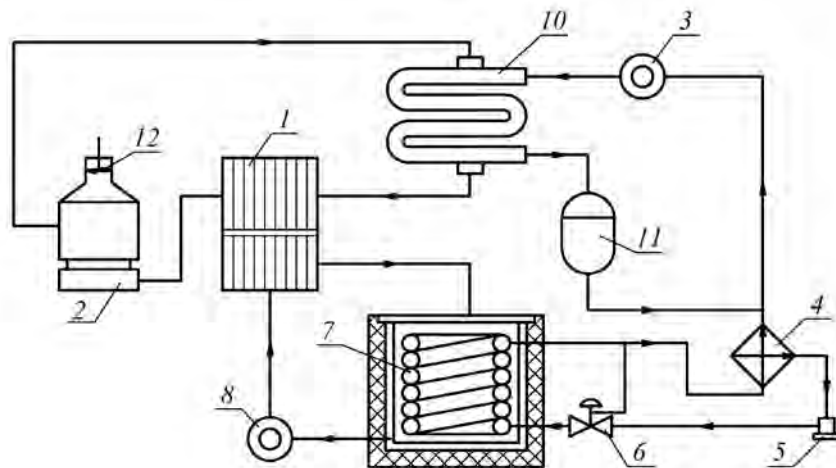


Рис.5.52 Функциональная схема водоохладительной установки

В настоящее время для управления клапанами и задвижками с электроприводом по температуре теплоносителя в водоохладительных и пастеризационных установках получили широкое распространение ПИД-регуляторы, в частности, «ОВЕН ТРМ-212» с интерфейсом RS-485, функциональная схема которого представлена на рис.5.53.

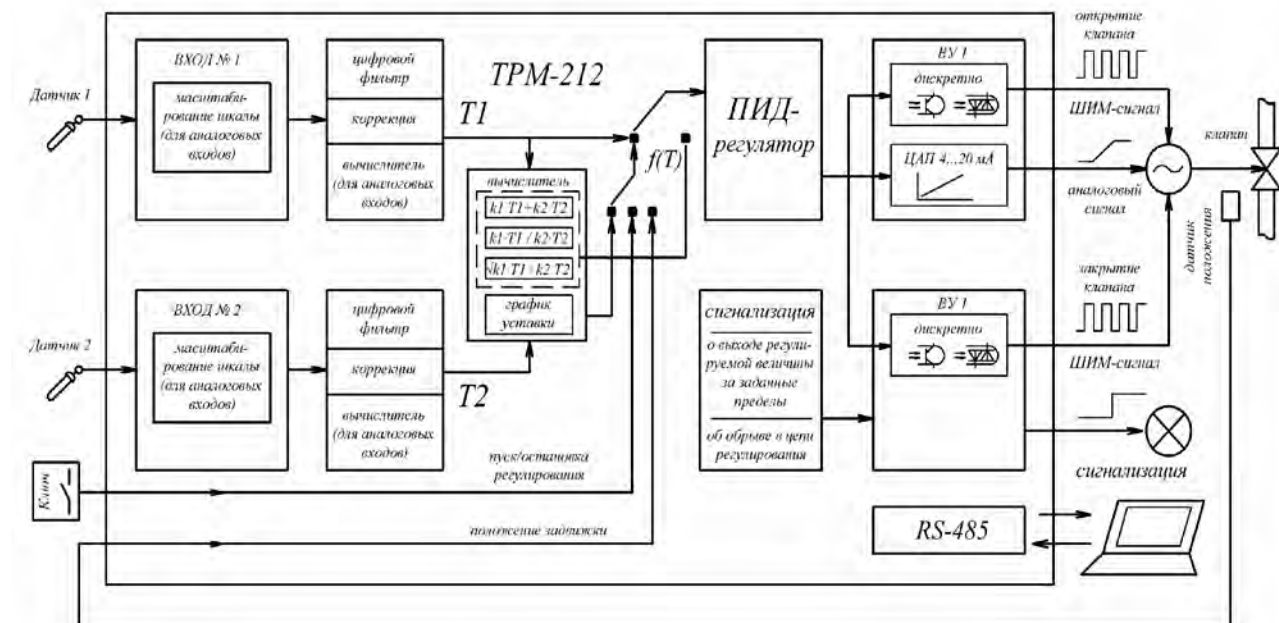


Рис.5.53 САУ трехходовым клапаном с ПИД-регулятором типа ОВЕН ТРМ-212

Применение данного регулятора позволяет управлять клапанами как в функции температуры, так и в функции давления, расхода, уровня, при поступлении сигнала датчика на универсальные входы. На соответствующих выходах

ВУ1 и ВУ2 формируется аналоговый или ШИМ-сигнал открывающий (закрывающий) клапан или задвижку. При этом происходит постоянный контроль положения рабочего органа с помощью датчика положения.

При возникновении аварийных режимов, например, обрыв в цепи регулирования или выход регулируемой величины за заданные пределы, подается соответствующий звуковой или световой сигнал.

#### **5.4.2. Автоматическое управление системами обеспечения микроклимата**

В число параметров микроклимата помещений, определяющих эффективность животноводства, входят температура воздуха, относительная влажность, содержание в воздухе вредных для животных компонентов, скорость движения воздуха и др.

Нормы технологического проектирования определяют температуру в коровнике на уровне 10 °С, отклонение которой от указанного значения приводит к снижению продуктивности. При этом влияние повышенных и пониженных температур особенно заметно в условиях значительной влажности воздуха.

Системы вентиляции выполняют с естественным и искусственным побуждением воздуха. Автоматизация систем с искусственным побуждением определяется, в том числе, конструкцией вентиляционной системы, которая может быть приточной, вытяжной и сбалансированной, когда производительность приточной и вытяжной систем одинакова. По способу раздачи воздуха в вентилируемом помещении различают равномерную, сосредоточенную и децентрализованную (с помощью нескольких отопительно-вентиляционных агрегатов) [5; 10; 11;15].

Для регулирования температуры в системах отопления с приточной вентиляцией в животноводческих помещениях в настоящее время разработано большое количество устройств. В частности, применение контроллера типа «ОВЕН ТРМ-33-Щ4» на фермах КРС позволяет повысить точность поддержания требуемой температуры воздуха в системах приточной вентиляции с водяным или паровым калорифером на заданном уровне и снизить эксплуатационные затраты. САР, функциональная схема которой представлена на рис.5.54, обеспечивает поддержание заданной температуры приточного воздуха по ПИД-закону путем управления приводами вентилятора, жалюзи и запорно-регулирующего клапана.

К входам 1...3 подключаются температурные датчики, например, терморезисторы типа ТСМ 50М или ТСП 50П, для контроля температуры наружного воздуха  $T_n$ , приточного воздуха  $T_{прит}$ , обратной воды в контуре теплоносителя  $T_{обр}$ .

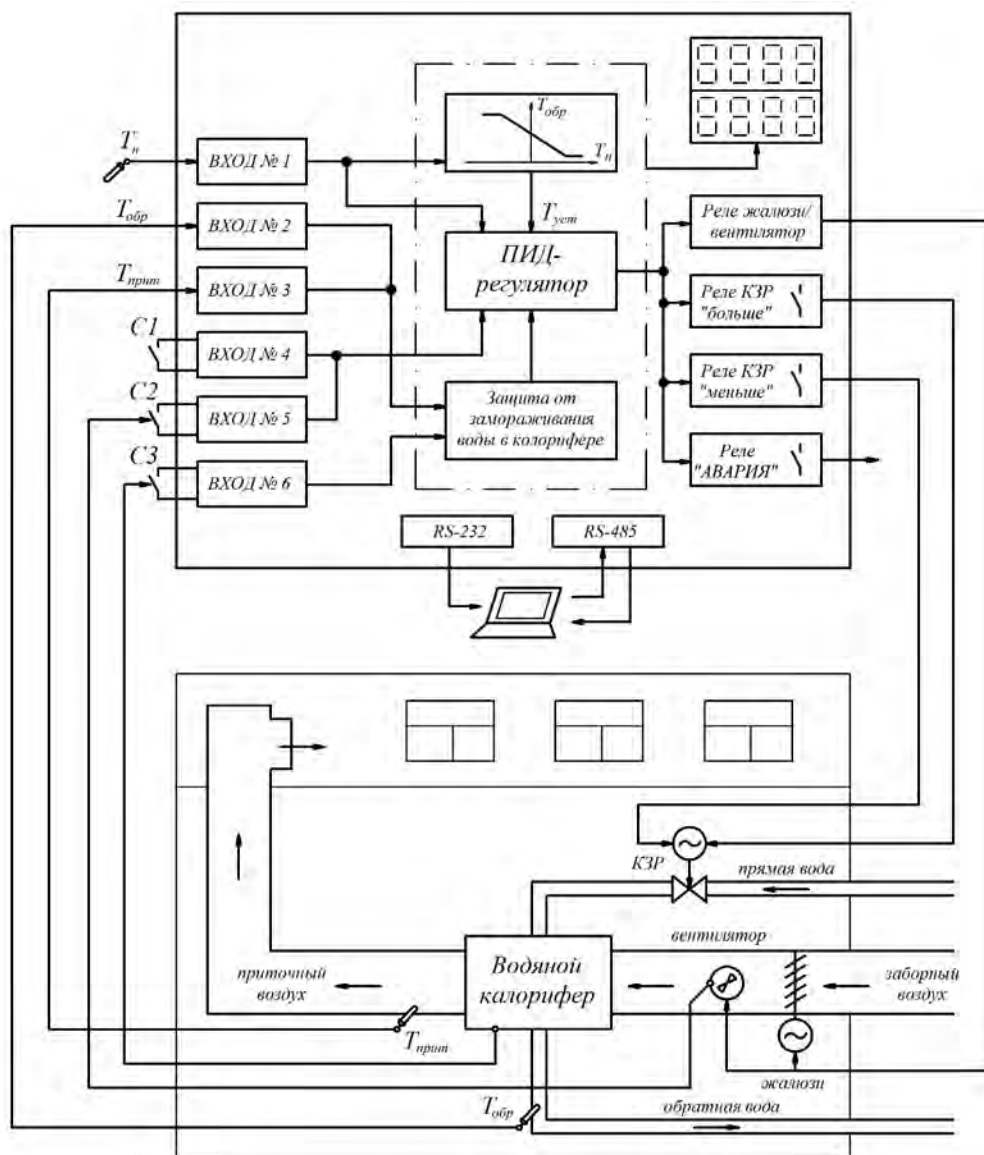


Рис.5.54 Функциональная схема САР температуры воздуха в коровнике

К входам 4...6 подключаются датчики для диагностики работоспособности системы:  $C1$  – коммутирующее устройство, например, таймер, тумблер и др., для дистанционного перевода системы в дежурный режим работы;  $C2$  – датчик контроля работы вентилятора для автоматического перевода системы в дежурный режим при неисправности вентилятора;  $C3$  – датчик контроля протока воды через калорифер для автоматического перевода системы в режим защиты от замораживания при прекращении протока.

Температуру приточного воздуха в системе  $T_{уст.прит}$ , нагрев которого осуществляется теплоносителем, проходящим через калорифер, задается оператором при программировании контроллера. Регулятор по температуре установки  $T_{уст.прит}$  и по результатам измерений и опроса входных датчиков  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  с помощью выходных реле управляет работой вентилятора и жалюзи, а также положением запорно-регулирующего клапана для поддержания заданной температуры в системе отопления. Управление клапаном осуществляется кратко-



временными импульсами (ШИМ-сигналами) по ПИД-закону регулирования, что позволяет поддерживать заданную температуру с необходимой точностью.

Перед началом работы контроллер осуществляет прогрев калорифера, время которого устанавливается оператором при наладке исходя из эксплуатационных параметров системы. При этом для более быстрого разогрева регулятор формирует команду задержки включения вентилятора и открытия жалюзи при полном открытии клапана.

Контроллер осуществляет также защиту системы от превышения температуры обратной воды, возвращаемой в теплоцентраль и защиту калорифера от замораживания в нем воды.

Управление температурой обратной воды осуществляется в зависимости от температуры наружного воздуха в соответствии с диаграммой  $T_{обр} = f(T_n)$  (рис.5.55), формируемой прибором автоматически по заданным оператором программирования координатам точек  $A$ ,  $B$  и  $C$ . При превышения заданного значения температуры обратной воды  $T_{обр.i} > T_{обр.max.i}$  регулятор прерывает управление запорно-регулирующим клапаном по  $T_{прит}$  и переходит на управление по сигналу рассогласования  $E_i = T_{обр.i} - T_{обр.max.i}$ . После возврата  $T_{обр.i}$  в допустимые пределы регулирование продолжается по  $T_{прит}$ .

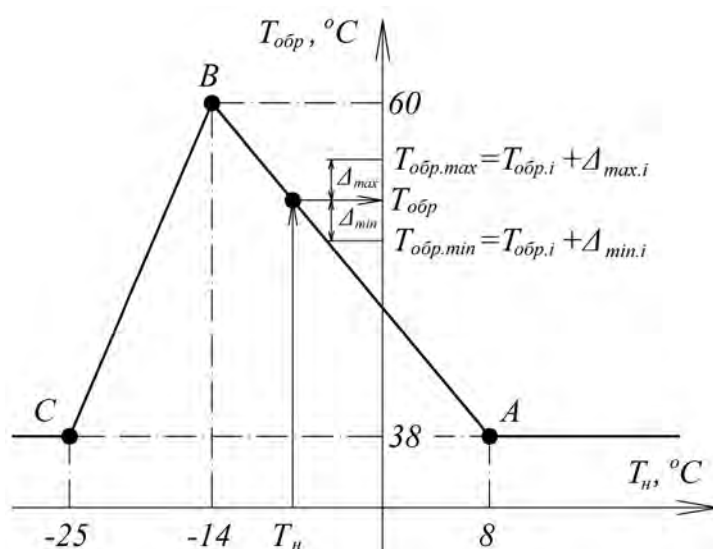


Рис.5.55 График температуры обратной воды

При уменьшении температуры приточного воздуха или температуры обратной воды ниже заданной критической температуры, либо возникновении неисправностей датчиков, например, обрыв или короткое замыкание, система переходит в режим защиты от замораживания воды в калорифере. При этом для максимально быстрого повышения температуры регулятор формирует команду на полное открытие клапана, выключение вентилятора и закрытие жалюзи.

При превышении температурой наружного воздуха значения  $T_{летн}$ , задан-

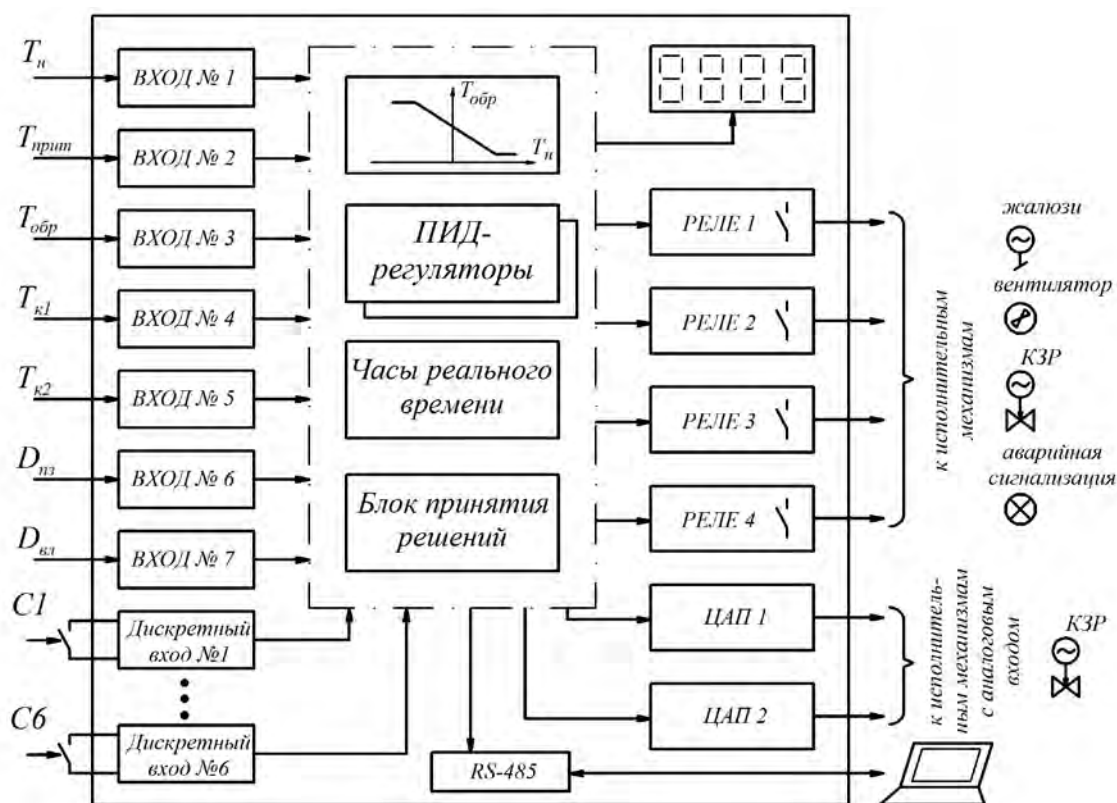
ного при программировании контроллера, система автоматически переходит на летний режим, отключение которого происходит при достижении  $T_n$  значения в точке  $A$  (рис.5.55).

## 5.5. Автоматизация технологических процессов при хранении и переработке сельскохозяйственной продукции

### 5.5.1 Автоматизация процессов хранения сельскохозяйственной продукции

Технология хранения сельскохозяйственной продукции включает в себя процессы подогрева, охлаждения и увлажнения для предохранения продукции от переохлаждения, самосогревания и обезвоживания. Нарушения в технологии хранения оборачиваются большими потерями продукции.

Сохранность продукта зависит главным образом от температурного режима в хранилище. Применение контроллера приточной вентиляции типа «ОВЕН ТРМ-133» (рис.5.56) позволяет поддерживать требуемую температуру в помещении для хранения продукции с заданной степенью точности [7; 10-12].



а)

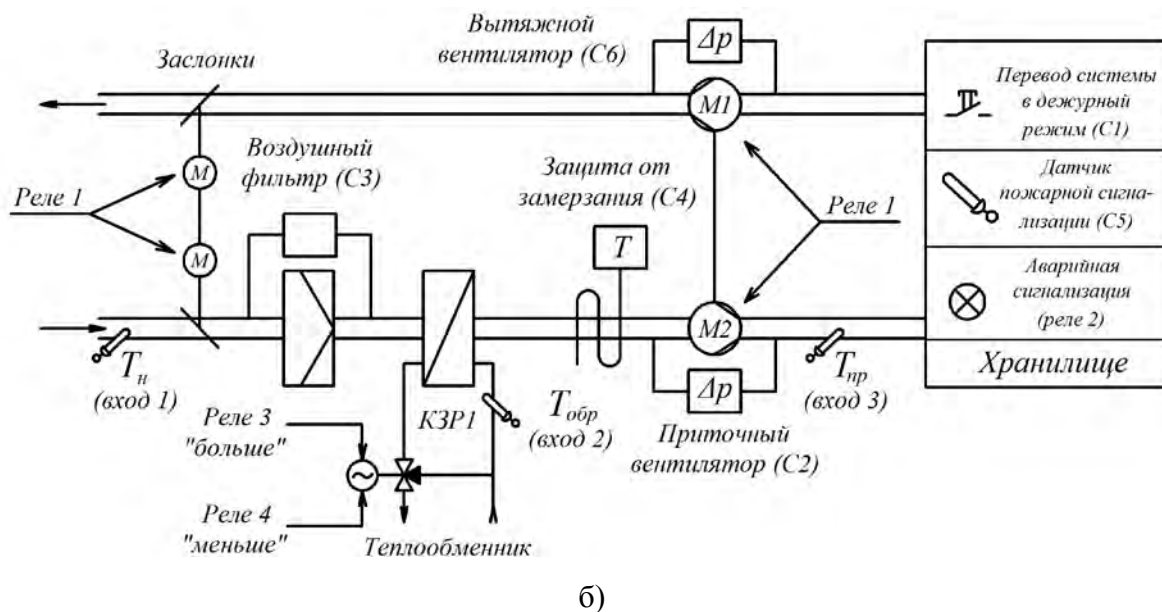


Рис.5.56 Функциональные схемы контроллера приточной вентиляции (а) и САР температуры в помещении для хранения сельскохозяйственной продукции (б)

Микропроцессорное устройство имеет 7 универсальных входов, к которым можно подключать датчики различных типов, например, термосопротивления ТСП 50П, ТСМ 60М; термопары ТХК (L), ТХА (K); датчики с унифицированным выходным сигналом тока 0...5 мА или напряжения 0...1 В; датчики положения задвижки – резистивные или токовые (рис.5.57).

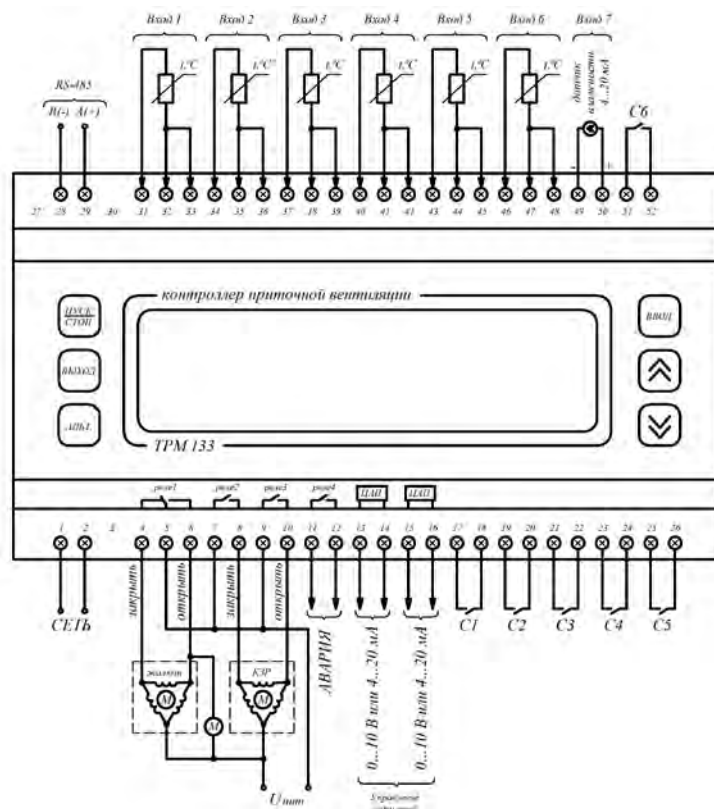


Рис.5.57 Схема подключения контроллера приточной вентиляции

Дискретные входы C1...C6 диагностируют исправность системы венти-

ляции и переключают режимы, и предназначены для подключения датчиков:  $C1$  – коммутирующее устройство для дистанционного перевода системы в дежурный режим;  $C2$  – датчик контроля исправности приточного вентилятора по потоку воздуха;  $C3$  – датчик контроля засорения фильтра приточного (вытяжного) вентилятора;  $C4$  – датчик перевода системы в режим защиты калорифера от замерзания;  $C5$  – датчик пожарной сигнализации;  $C6$  – датчик контроля исправности вытяжного вентилятора.

Для управления вентилятором, жалюзи, калорифером и аварийной сигнализацией контроллер оснащен встроенными выходными элементами: электромагнитными реле и цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП) для управления исполнительным механизмом с аналоговым управлением. При этом регулятор может управлять задвижками как с датчиком положения, так и без него по математической модели, заложенной программой.

Благодаря использованию в контроллере ПИД-закона регулирования и современному алгоритму автонастройки достигается высокая точность поддержания температуры приточного воздуха и обратной воды. Кроме того, используются несколько контуров ПИД-регулирования, что позволяет гибко настраивать прибор для работы в разных режимах.

При организации хранения картофеля и овощей температура в помещении не должна превышать  $2...5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этом случае для обеспечения заданного значения параметра в осенне-зимний период, применяют регулятор скорости вращения вентилятора в зависимости от температуры в помещении (рис.5.58).

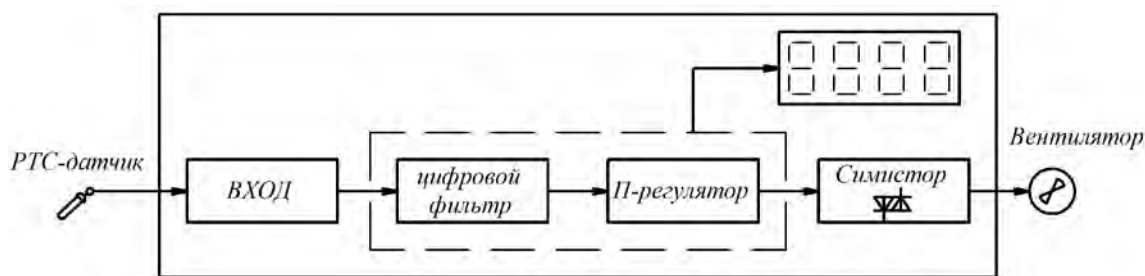


Рис.5.58 Функциональная схема регулятора скорости вращения вентилятора в зависимости от температуры

Температура в хранилище  $T$  измеряется с помощью датчика температуры (РТС-датчик), например, полупроводникового термистора, и подается на П-регулятор, который, в свою очередь, поддерживает заданное значение параметра  $T_{зад}$  путем изменения скорости вращения  $\omega_e$  вентилятора. При этом, чем выше температура в хранилище, тем быстрее вращается вентилятор (рис.5.59). Крутизна характеристики определяется полосой пропорциональности  $\Delta$  регулятора (дифференциалом) и задается оператором при программировании. Таким образом, температура воздуха в помещении поддерживается автоматически за счет

изменения количества теплого внутреннего воздуха, подмешиваемого к холодному наружному.

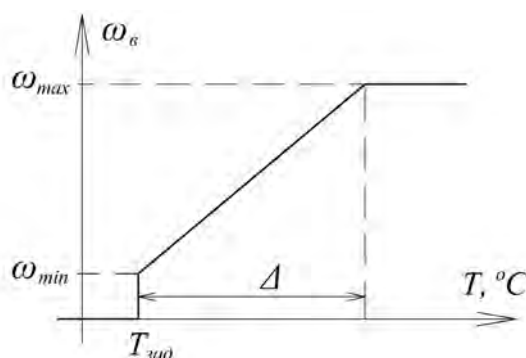


Рис.5.59 График зависимости скорости вращения вентилятора от температуры

Снижение температуры до значения, определяемого уставкой и дифференциалом, приводит к остановке вентилятора. В случае дальнейшего уменьшения контролируемого параметра автоматически включаются рециркуляционно-отопительные агрегаты.

При хранении мясной и молочной продукции важное значение имеет контроль температуры в холодильных и морозильных агрегатах. В настоящее время на перерабатывающих предприятиях применяют блок управления средне- и низкотемпературными машинами с автоматическим размораживанием типа «ОВЕН ТРМ-974». Функциональная схема САУ температуры в холодильном агрегате представлена на рис.5.60.

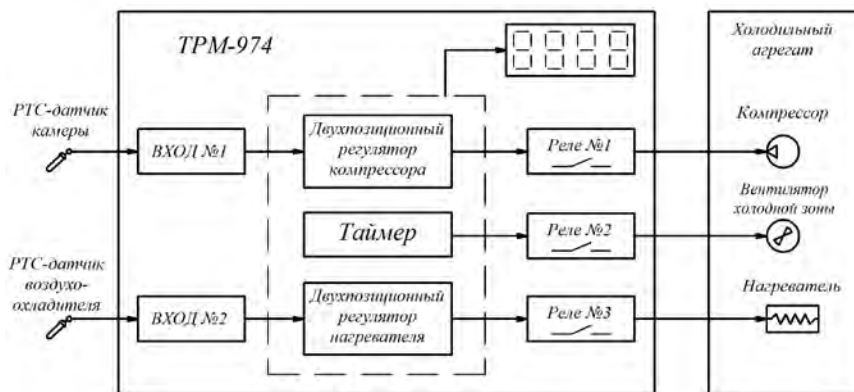


Рис.5.60 Функциональная схема САУ температуры в холодильном агрегате

Контроллер ТРМ-974 имеет два входа для подключения термодатчиков с положительным коэффициентом передачи для измерения температур в холодильной камере и воздухоохладителя. Выходные реле управляют процессами в холодильной камере: реле 1 – компрессором, реле 2 – вентилятором, реле 3 – нагревателем. Регулирование температуры в холодильных машинах может производиться в двух режимах: режим «термостат» и режим «набор холода». Температуру в камере в режиме «термостат» (рис.5.61) определяют параметры

$T_{зад}$  – контрольная точка и  $T_{диф}$  – дифференциал. Для поддержания температуры в холодильной установке контроллер управляет работой компрессора и вентилятора.

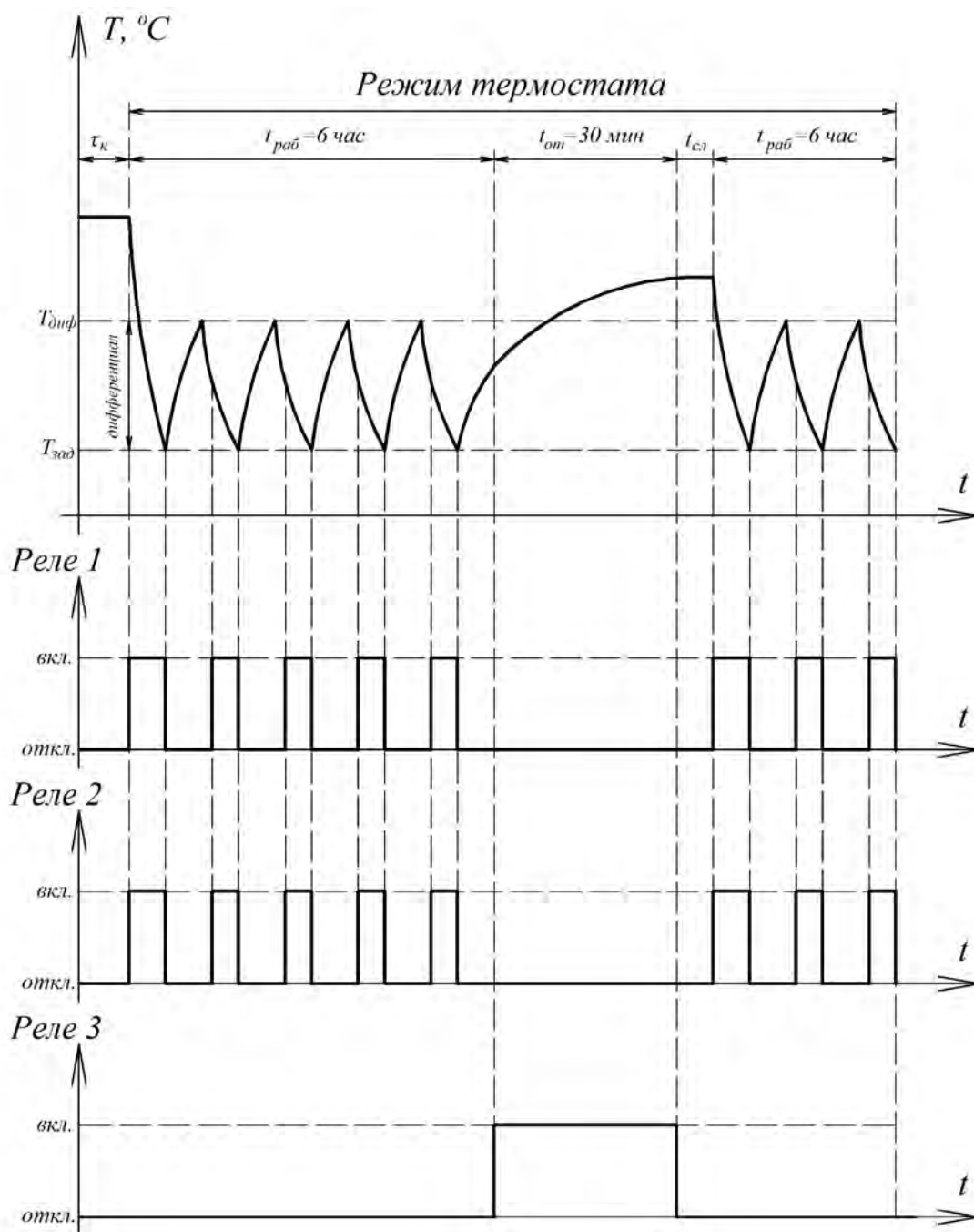


Рис.5.61 Регулирование температуры в холодильной камере в режиме «термостат»

При достижении температуры в холодильной камере значения  $T_{зад} + T_{диф}$  включается компрессор (реле 1) и работает до тех пор, пока температура снизится до значения  $T_{зад}$ . При этом вентилятор (реле 2) по выбору оператора может работать как непрерывно, так и периодически вместе с компрессором.

Для автоматического управления процессом оттайки холодильной камеры контроллер программируют либо по времени (1...99 ч.), либо по времени

наработки компрессора. При этом оттайку можно производить специальным нагревателем (реле 3) при выключенном компрессоре. В ТРМ-974 также предусмотрена возможность управления сливом конденсата и установка времени задержки включения вентилятора по окончании процесса оттайки. Режим «набора холода» (рис.5.62) предназначен для быстрого охлаждения холодильной камеры, заполненной новым (теплым) продуктом.

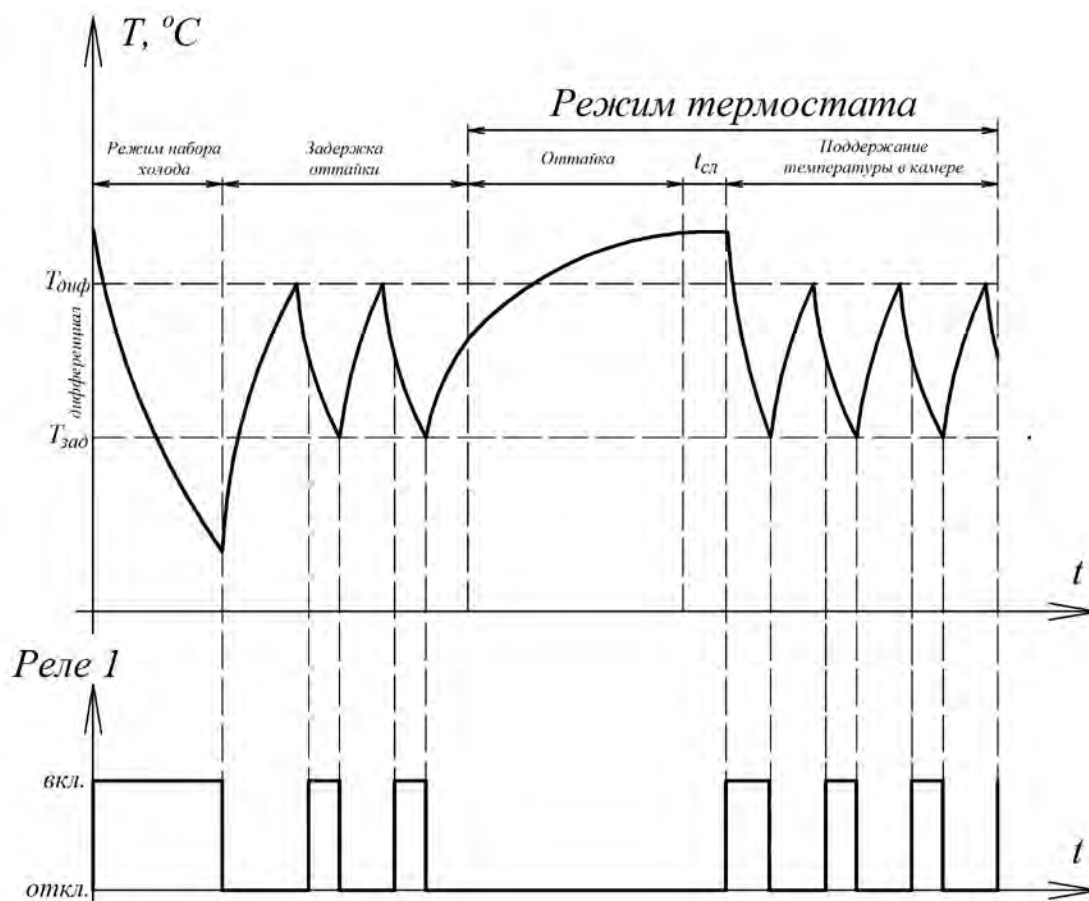


Рис.5.62 Регулирование температуры в холодильной камере в режиме «набора холода»

Продолжительность набора холода задается в диапазоне от 1 до 24 часов, когда компрессор принудительно включен (реле 1). При этом обеспечивается задержка оттайки после набора холода, по окончании которой прибор автоматически переводится в режим «термостат».

### 5.5.2 Автоматизация технологических процессов переработки сельскохозяйственной продукции

Подъем и устойчивое развитие отрасли переработки и хранения продукции растениеводства неразрывно связаны с поиском и внедрением новых технологий и технических средств, которые позволят более эффективно использовать энергию и ресурсы. Характерной и энергоемкой технологической операцией отрасли является сушка растительного сырья – овощей, фруктов, грибов, лекарственных трав и др.

Применяемые в настоящее время для этой цели технология и оборудование в небольших фермерских хозяйствах основаны на конвективной сушке, т.е. циркуляции подогретого воздуха через сушимый материал. Однако несовпадение температурного градиента с градиентом влагонапора из продукта препятствуют быстрому удалению влаги из сушеного материала, что снижает эффективность такого способа сушки.

Другим распространенным способом сушки является нагрев продуктов растительного происхождения от специального источника инфракрасных (ИК) лучей с последующим охлаждением материала потоком воздуха, например от вентилятора. Для такой технологии характерно отсутствие предварительного выбора длины волны излучения ИК-нагревателя в соответствии со спектральной чувствительностью сушеного продукта и принудительного удаления влаги за пределы сушильного шкафа, что снижает эффективность такого способа сушки при влажности обдувающего воздуха более 65 %.

В [10; 15] рассмотрен способ сушки продуктов растительного происхождения, основанный на сочетании радиационного и конвективного подвода теплоты к сушеному материалу и выборе длины волны ИК-излучателя в соответствии с наибольшей поглощательной способностью продукта. Технология [10] предполагает обязательное выполнение последовательных операций для достижения высоких удельных выходных показателей процесса

Толщина слоя продукта 13 на сетчатых поддонах 3 выбрана с учетом наибольшего проникновения лучистого потока в сушимый материал (рис. 5.63). Экспериментально установлено, что при этом обеспечивается такая спектральная чувствительность продукта, при которой создаваемое нагревателем ИК-излучение интенсивно поглощается продуктом и вызывает наибольший его нагрев. Например, для большинства корнеплодов – морковь, свёкла, корень валерианы и др. – длина волны, соответствующая наибольшей поглощательной способности, лежит в пределах  $\lambda=3,7\ldots4,5$  мкм, что соответствует средневолновому диапазону ИК-излучения.

Под этот диапазон волн, соответствующий наибольшей поглощательной способности продукта, настраивается ИК-излучатель 5. Эту операцию можно выполнить путем установления необходимой температуры ИК-нагревателей, используя критериальное уравнение смещения В.Вина  $\lambda_{max}=2896/T$ , где  $\lambda_{max}$  – длина волны ИК-лучистого потока, на которую приходится максимум излучения; 2896 – постоянная Вина;  $T$  – абсолютная температура излучателя.

Таким образом, для получения длины волны  $\lambda_{max}$ , на которую приходится максимум ИК-излучения и обеспечивается наибольшая поглощательная способность объекта сушки, необходимо изменять абсолютную температуру  $T$



нагревателя, например, путем изменения питающего напряжения  $U$  в заданных пределах  $\Delta U$ .

Включение ИК-источников 5 с плотностью теплового потока  $Q=4,5\ldots 8,5$  кВт/м<sup>2</sup> обеспечивает прогрев сушеного материала до температуры продукта  $t_{\text{нагр}}=0,8\ldots 0,9t_{\text{пр}}$ , где  $t_{\text{пр}}$  – предельно допустимая температура сушки для данного материала при длительности воздействия  $T_{\text{нагр}}$ , не превышающей  $T_{\text{нагр}}=0,55\ldots 0,65T_{\text{ц}}$ , где  $T_{\text{ц}}$  – продолжительность цикла сушки растительного сырья;  $T_{\text{ц}}=20$  мин [10; 15].

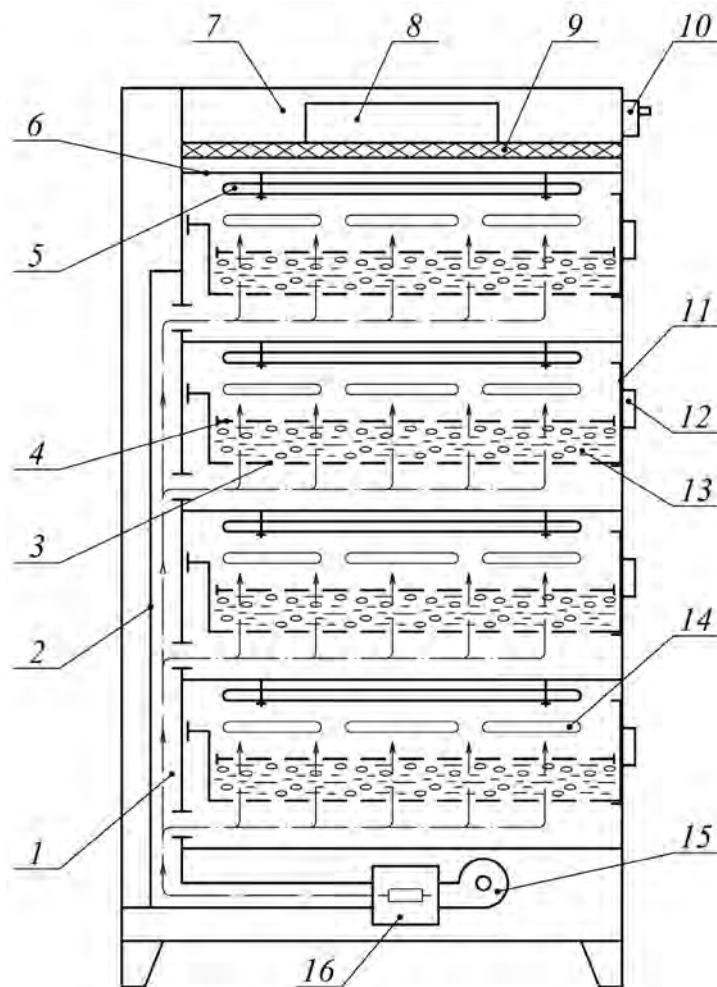


Рис 5.63 Сушильный шкаф: 1 – воздуховод; 2 – стойка; 3 – решетчатое дно контейнера; 4 – решетчатая прижимная панель; 5 – ИК-нагреватели; 6 – алюминиевый экран; 7 – корпус шкафа; 8 – блок автоматического управления; 9 – теплоизоляция; 10 – органы управления; 11 – выдвижной ящик – контейнер; 12 – ручка контейнера; 13 – сушимый материал; 14 – боковые жалюзи; 15 – центробежный вентилятор; 16 – электрокалорифер

Вслед за нагревом производят охлаждение продукта путем продува через него нагнетаемого вентилятором 15 воздуха при выключенных нагревателях 5. При этом температура поверхностного слоя сушеного материала понижается до  $t_{\text{охл}}=0,4\ldots 0,6t_{\text{пр}}$ . Длительность интервала охлаждения  $T_{\text{охл}}$  выбирается в диапазоне  $T_{\text{охл}}=0,05\ldots 0,15T_{\text{ц}}$ .

В результате обдува возникает перепад температур между внутренними и поверхностными слоями продукта, в результате чего образуется температурный напор, направленный из глубины слоев сушимого материала к его поверхностным слоям. Это совпадает с направлением выхода свободной влаги из продукта на его поверхность. Таким образом, чем больше разность температур между наружными и внутренними слоями, тем сильнее напор свободной влаги из глубины продукта на его поверхность. Этим достигается необходимое условие интенсификации процесса удаления свободной влаги из продукта.

Заключительным этапом процесса сушки является удаление выступившей на поверхность продукта влаги за пределы сушильной камеры 7 через боковые жалюзи 14. Операция реализуется продувкой через сушимый материал, подогретого с помощью калорифера 16 до  $45...55\text{ }^{\circ}\text{C}$  и нагнетаемого в сушильную камеру через воздуховод 1 вентилятором 15 воздуха, имеющего относительно низкое влагосодержание. При этом обеспечивается интенсификация всего процесса сушки продуктов растительного происхождения и повышается качество сушеного материала. Для автоматического контроля времени процесса и температуры растительного сырья на каждом этапе сушки представляется эффективным применение специальных контроллеров (рис. 5.64).

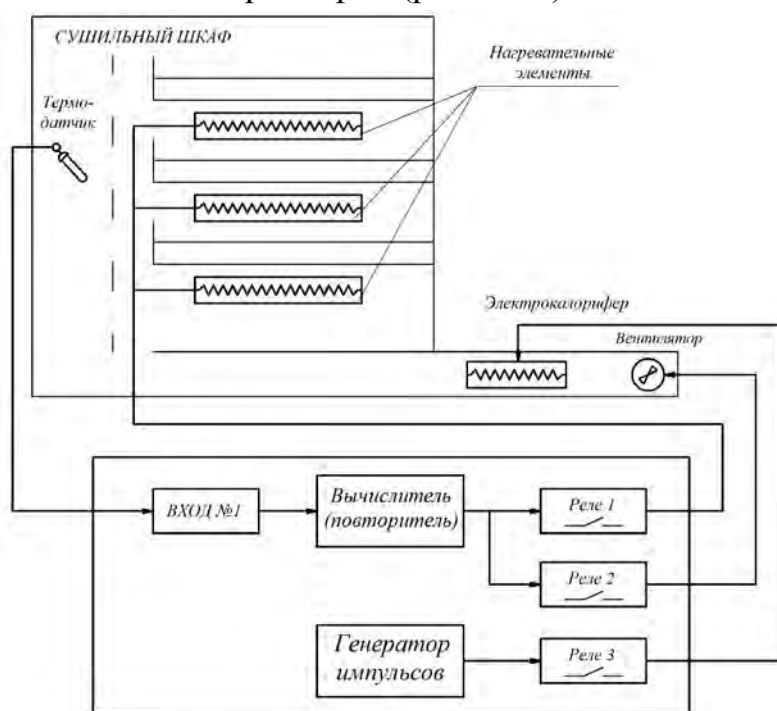


Рис.5.64 Функциональная схема системы для сушки продуктов растительного происхождения

Регулятор работает в режиме двухпозиционного регулирования, однако при необходимости можно применить другие законы регулирования, что позволяет гибко управлять сложным технологическим процессом. Температурный

режим в сушильном шкафу поддерживается в соответствии с графиком (рис.5.65).

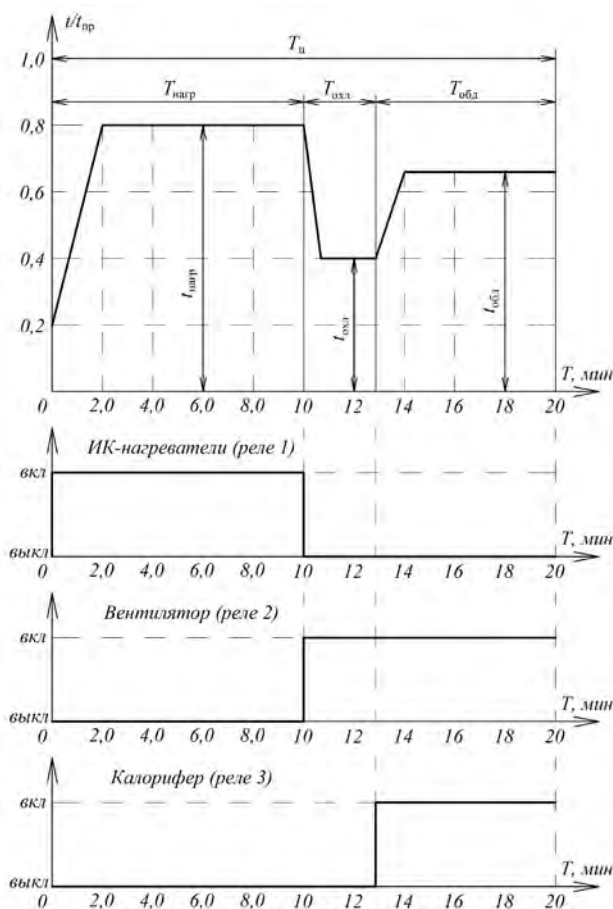


Рис.5.65 Циклограммы для настройки регулятора

Двадцатиминутные циклы сушки повторяются до тех пор, пока продукт не достигнет кондиционной влажности 12...15 %.

Временные интервалы операций – ИК-нагрева  $T_{\text{нагр}}$ , конвективного охлаждения  $T_{\text{охл}}$ , обдува подогретым воздухом  $T_{\text{обд}}$  – задаются индивидуально для выбранного продукта.

Предложенный способ сушки продуктов растительного происхождения способствует повышению качества высушенного материала и уменьшению энергозатрат.

## 5.6. Пример разработки и исследования автоматических систем

Кратко прокомментируем и проиллюстрируем примером особенности основных этапов разработки и исследования автоматических систем.

Рассмотрим систему автоматического регулирования подогрева воздуха свиарника, используемую в переходный период времени года.

Для нагревания теплоносителя – воздуха – применена электрокалориферная установка СФОА; используются две ступени нагревательных элементов –  $P_n=45$  кВт и  $P_o=30$  кВт. Заданные значения температуры: внутри помещения

$\theta_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (пределы  $18\ldots 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), снаружи –  $\theta_{нар}=0\ldots 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В установившемся состоянии (при отсутствии возмущений) поддержание расчетной температуры  $\theta_0$  в объекте обеспечивается нагревателями  $P_o=30\text{ кВт}$ .

### 5.6.1 Анализ объекта и выбор принципа регулирования

Проектирование автоматических систем начинают с выбора управляемых, регулируемых и контролируемых величин. В рассматриваемом примере регулируемая величина – температура воздуха  $\theta_0$  в помещении. Автоматизация технологического процесса состоит в автоматической стабилизации значения  $\theta_0$  в управляемом объекте – животноводческом помещении, являющемся статическим объектом с самовыравниванием.

В качестве регулирующего органа, осуществляющего управляющие воздействия на объект, используется электрокалориферная установка. Возмущающее воздействие на объект управления оказывает отток теплоты  $\theta_n$  из помещения через вытяжную вентиляцию, ворота, строительные конструкции и др. Точность поддержания регулируемой величины сравнительно низкая  $\pm 10\%$ .

При выборе рационального принципа регулирования и структурной схемы необходимо учесть режим САР (статический или динамический), зависящий от соотношения интервалов времени  $\tau_e$  между двумя последовательными возмущениями и времени переходного процесса  $T$  в объекте [22]. При  $\tau_e \geq T$  имеет место статический режим работы системы; если  $\tau_e$  и  $T$  соизмеримы, устанавливается динамический режим; при очень интенсивных возмущениях и  $\tau_e < T$  объект становится неуправляемым по выбранному входу.

Так как резкие перепады внешних температур для переходного периода года не характерны, будем считать возмущающие воздействия на рассматриваемый объект неинтенсивными и, положив  $\tau_e$  и  $T$  соизмеримыми, примем режим действия проектируемой САР динамическим. Поскольку особой точности стабилизации температуры не требуется, целесообразно применить позиционную систему автоматического управления по отклонению.

Основными элементами структурной схемы САР, представленной на рис.6.1,а, являются объект управления ОУ; регулирующий орган РО; двухпозиционный регулятор температуры ДР, вырабатывающий сигнал управления РО; элемент сравнения С, формирующий сигнал рассогласования  $\Delta U$  в соответствии с заданным  $\theta_0$  и действительными значениями температуры в объекте (конструктивно объединен с ДР); чувствительный элемент – датчик Д, контролирующий температуру воздуха в средней зоне объекта ОУ.

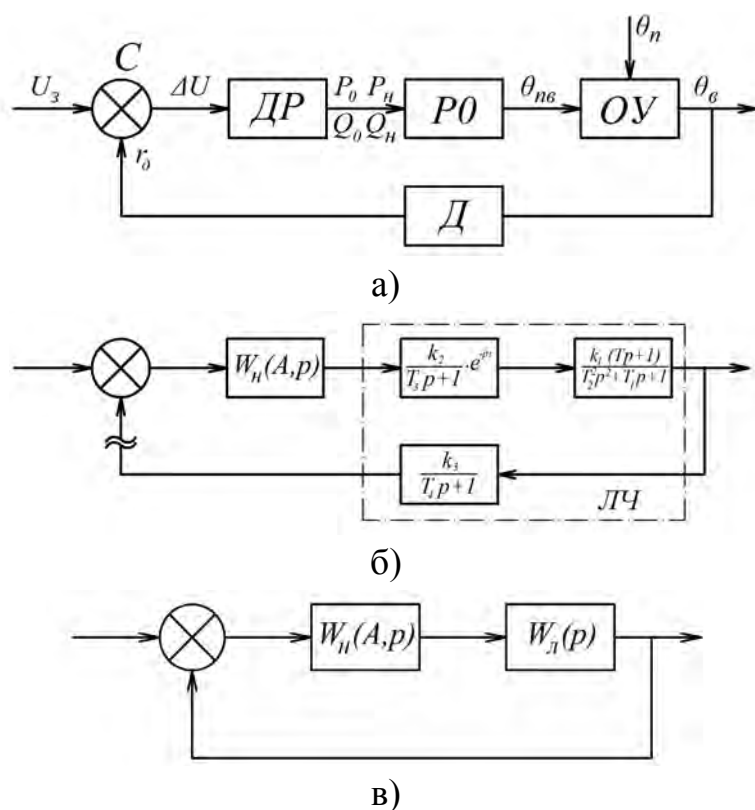


Рис.5.66 Структурные схемы системы автоматического регулирования

Так как системы автоматизации технологических процессов и объектов в сельском хозяйстве рекомендуется выполнять с использованием серийно выпускаемых приборов, наметим предварительно к применению в проектируемой САР следующие технические средства:

- двухпозиционный регулятор ДР – регулятор температуры, в качестве выходного элемента которого используется, например, электромагнитное реле. Статическая характеристика такого регулятора представлена на рис.6.2:
- чувствительный элемент Д – малоинерционный металлический терморезистор ТСМ;
- регулируемый орган – электрокалориферная установка СФОА.

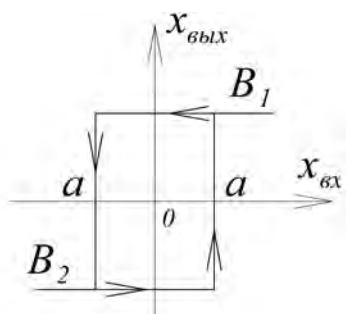


Рис.5.67 Статическая характеристика позиционного регулятора

Оценить правильность предварительного выбора принципа регулирования и основных элементов САР можно лишь после изучения свойств и характеристик отдельных элементов и системы в целом.

### 5.6.2. Определение математических моделей элементов САР

В инженерной практике для оценки статических и динамических свойств элементов и систем широко используют математические модели, устанавливающие взаимосвязь входных и выходных величин в установившихся и переходных режимах и получаемые аналитически или экспериментально.

Достоинство аналитического метода – возможность получения характеристик на стадии проектирования. Однако при аналитическом исследовании невозможно учесть многообразие и взаимовлияние особенностей технологических объектов и процессов и получить значения коэффициентов уравнений их динамики. Этот метод является приближенным и используется, преимущественно, для получения характеристик наиболее простых объектов.

Достоинство экспериментальных моделей состоит в том, что они требуют минимальных сведений о протекающих в объекте процессах, обеспечивая, при этом, приемлемую для инженерных расчетов точность. Рекомендации и особенности планирования и проведения экспериментов по определению характеристик объектов и процессов рассмотрены в [22]. Сущность аналитического и экспериментального методов получения аппроксимирующих моделей проиллюстрируем на примере объекта управления (свинарника), регулирующего органа и датчика соответственно.

Примем для свинарника упрощающие допущения: помещение рассматривается как линейный одномерный объект с сосредоточенными параметрами; время перемещения воздуха внутри помещения не учитываем; тепловыделение животных постоянно.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\sum Q = Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4 = 0, \quad (5.68)$$

где  $Q_1$  – тепловой поток, поступающий в помещение с подогретым воздухом;  $Q_2$  – тепловой поток, уходящий с воздухом через вентиляцию;  $Q_3$  – тепловой поток, выделяемый животными;  $Q_4$  – потери теплоты через ограждения.

В уравнении (5.68) потоки  $Q_1$  и  $Q_2$  – управляющие, а потоки  $Q_3$  и  $Q_4$  – возмущающие воздействия. Учитывая, что регулируемой величиной является температура воздуха  $\theta$ , а связь регулируемой величины, управляющих и возмущающих воздействий определяется законом сохранения энергии, имеем:

$$cm \frac{d\theta}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (5.69)$$

где  $m$  – масса вещества в объеме, кг;  $c$  – теплоемкость вещества, кДж/(кг·°С);  $\theta$  – температура вещества, °С;  $Q_i$  – тепловые потоки, действующие на вещество, кДж/час.

С учетом (5.69) представим теплообмен между воздухом внутри помеще-

ния и наружным системой уравнений в отклонениях:

$$\left. \begin{aligned} c_{\theta} m_{\theta} \frac{d\Delta\theta_{\theta}}{dt} &= \Delta Q_1 - \Delta Q_2 - \Delta Q_3 \\ c_{\theta_2} m_{\theta_2} \frac{d\Delta\theta_{\theta_2}}{dt} &= \Delta Q_3 - \Delta Q_4 \end{aligned} \right\}, \quad (5.70)$$

где  $c_{\theta}$ ,  $c_{\theta_2}$  – удельные теплоемкости воздуха и ограждения, кДж/(кг·°C);  $m_{\theta}$ ,  $m_{\theta_2}$  – массы воздуха и ограждения, кг;  $\Delta\theta_{\theta}$ ,  $\Delta\theta_{\theta_2}$  – отклонения температур воздуха и ограждения от расчетных в установившихся режимах, °C;  $\Delta Q_1 \dots \Delta Q_4$  – отклонения от расчетных значений тепловых потоков соответственно с поступающим в помещение свинарника воздухом, уходящим через вентиляцию, от воздуха внутри помещения к ограждениям и от ограждений к наружному воздуху, кДж/час.

Выразив в (5.70) тепловые потоки через удельные теплоемкости, массы, перепады температур, площади поверхностей теплопередачи и коэффициенты теплообмена, после преобразований, получим уравнение динамики объекта в канонической форме:

$$T_2^2 \frac{d^2 \Delta\theta_{\theta}}{dt^2} + T_1 \frac{d\Delta\theta_{\theta}}{dt} + \Delta\theta_{\theta} = k \left( T \frac{d\Delta m_{\theta}}{dt} + \Delta m_{\theta} \right) + \Delta\theta_{нар}, \quad (5.71)$$

где

$$T_2^2 = \frac{c_{\theta_2} c_{\theta} m_{\theta_2} m_{\theta}}{F_{\theta_2}^2 d_{вн} d_{нар}}; \quad T_1 = \frac{c_{\theta_2} m_{\theta_2} d_{вн} + c_{\theta} m_{\theta} d_{вн} + c_{\theta} m_{\theta} d_{нар}}{F_{\theta_2} d_{вн} d_{нар}};$$

$$T = \frac{c_{\theta_2} m_{\theta_2}}{F_{\theta_2}^2 (d_{вн} + d_{нар})}; \quad k_1 = \frac{c_{\theta} (d_{вн} + d_{нар}) (\theta_{нв} - 2\theta_{\theta} + \theta_{нар})}{F_{\theta_2} d_{вн} d_{нар}},$$

$\Delta m_{\theta}$  – приращение массы внутреннего воздуха, кг/с;  $F_{\theta_2}$  – площадь ограждений, м<sup>2</sup>;  $d_{вн}$ ,  $d_{нар}$  – коэффициенты теплообмена на внутренних и наружных поверхностях ограждений, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\theta_{\theta}$ ,  $\theta_{нв}$ ,  $\theta_{нар}$  – температура, соответственно, внутреннего, подаваемого наружного воздуха, °C;  $\Delta\theta_{нар}$  – приращение температуры наружного воздуха, °C.

Соотношение (5.71) позволяет оценить динамические и статические свойства объекта регулирования, если положить переходный процесс закончившимся и приравнять в (5.71) производные всех порядков нулю. Применив преобразование Лапласа, запишем передаточную функцию объекта регулирования по управляющему воздействию:

$$W_1(p) = \frac{\Delta\theta_{\theta}(p)}{\Delta m_{\theta}(p)} = \frac{k_1 (Tp + 1)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}. \quad (5.72)$$

Численное значение передаточной функции получим, принимая геометрию строительных ограждений и теплотехнические характеристики среды и

объекта: объем помещения  $V_6=9000 \text{ м}^3$ ,  $\rho_6=1,205 \text{ кг/м}^3$ , объем стен, перегородок и др.  $V_{oz}=500 \text{ м}^3$ ,  $c_6=1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ,  $\rho_{oz}=1700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\theta_6=20 \text{ °C}$ ,  $\theta_{н6}=60 \text{ °C}$ ,  $\theta_{нар}=10 \text{ °C}$ ,  $d_{6н}=d_{нар}=2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ ,  $c_{oz}=0,88 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ,  $F_{озп}=1000 \text{ м}^2$ .

После подстановки значений в (5.71), получаем  $T_2^2=224 \text{ с}^2$ ;  $T_I=401 \text{ с}$ ;  $T=196 \text{ с}$ ,  $k_I=0,03 \text{ °C} \cdot \text{с/кг}$ .

Численное значение передаточной функции

$$W_1(p) = \frac{0,03(196p + 1)}{224p^2 + 401p + 1}. \quad (5.73)$$

Вид и параметры аппроксимирующих динамических моделей электрокалорифера и чувствительного элемента проектируемой САР определим, воспользовавшись, например, разгонными характеристиками, которые считаем заданными в примере. Вид характеристик показан на рис.5.68.

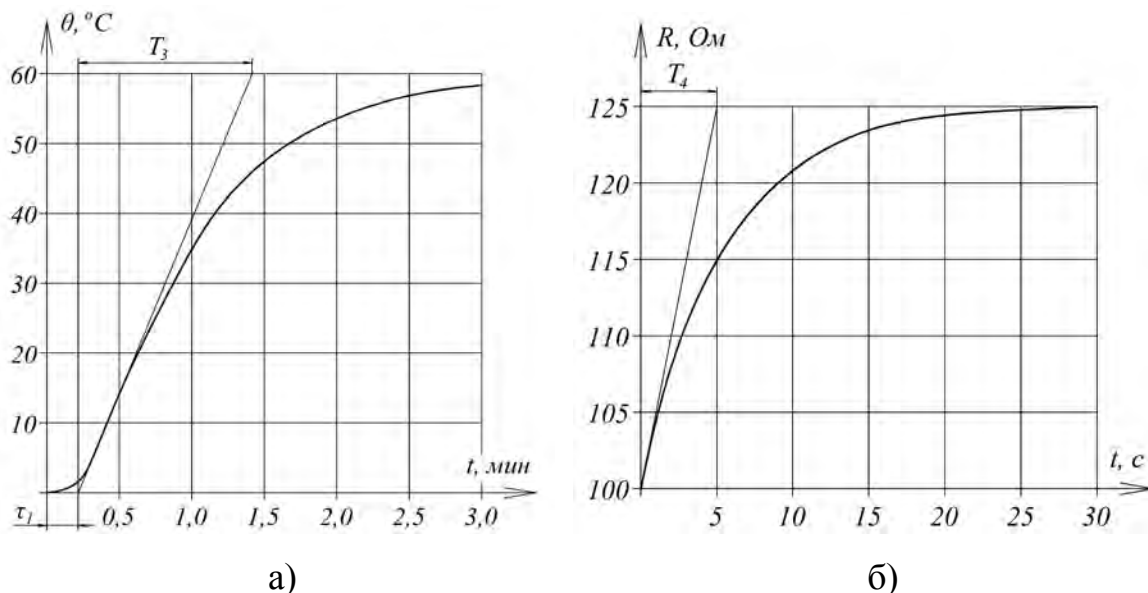


Рис.5.68 Разгонные характеристики электрокалориферной установки (а) и датчика температуры (б)

Устройство с характеристикой рис.5.68 удобно представить двумя последовательно соединенными звеньями: инерционным и запаздывающим. Тогда передаточная функция калорифера по каналу «мощность нагревателя – температура теплоносителя» будет иметь вид:

$$W_2(p) = \frac{\Delta \theta_{н6}(p)}{\Delta P(p)} = \frac{k_2 \cdot e^{-p\tau_1}}{T_3 p + 1}. \quad (5.74)$$

Из графических построений имеем  $\tau_I=12 \text{ с}$ ,  $T_3=70 \text{ с}$ . За время переходного процесса температура воздуха возрастает на  $\Delta \theta_{н6}=60 \text{ °C}$  (рис.5.68,а). Принимая мощность нагревателей калорифера при включении регулятора  $P_n=45 \text{ кВт}$ , находим передаточный коэффициент калорифера



$$k_2 = \frac{\Delta \theta_{нб}}{\Delta P} = \frac{60}{45} = 1,33 \text{ } ^\circ\text{C/кВт}. \quad (5.75)$$

Представим (6.6) в виде

$$W_2(p) = \frac{1,33}{70p + 1} \cdot e^{-12p}. \quad (5.76)$$

Элемент с характеристикой на рис.5.68,б аппроксимируется апериодическим звеном первого порядка. Инерционность терморезистора в сравнении с инерционностью объекта регулирования и калорифера мала, запаздыванием датчика  $\tau_2$  также можно пренебречь. Из графических построений имеем  $T_4=5$  с. Изменение сопротивления датчика за время переходного процесса  $\Delta R=125-100=25$  Ом, передаточный коэффициент датчика

$$k_3 = \frac{\Delta R}{\Delta \theta} = \frac{25}{60} = 0,42 \text{ Ом/}^\circ\text{C}.$$

Передаточная функция датчика по каналу «температура среды – сопротивление»

$$W_3(p) = \frac{\Delta R(p)}{\Delta \theta(p)} = \frac{k_3}{T_4 p + 1} = \frac{0,42}{5p + 1}. \quad (5.77)$$

С учетом (5.72), (5.74), (5.77) регулятор проектируемой системы без существенной потери точности может быть аппроксимирован безынерционным звеном.

Применение в проектируемой САР двухпозиционного регулятора с существенно нелинейной статической характеристикой выходного элемента (рис.5.67) делает всю систему нелинейной. Поэтому последующий анализ работы нелинейной САР в разомкнутом и замкнутом состояниях следует проводить, выделив линейную (ЛЧ) и нелинейную (НЧ) части и представив динамические структурные схемы САР, как показано на рис.5.66,б,в.

На рис.5.66,в передаточная функция  $W_n(p)$  определяется произведением передаточных функций отдельных звеньев  $W_1(p) \dots W_3(p)$ , соединенных последовательно

$$W_n(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \quad (5.78)$$

Передаточная функция  $W_n(A, p)$  нелинейного элемента (НЭ) – регулятора – определяется по методу гармонической линеаризации [14; 22] и имеет вид:

$$W_n(A, p) = b(A) + \frac{P}{\omega} c(A), \quad (5.79)$$

где  $b(A) = \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}$ ;  $c(A) = -\frac{4ab}{\pi A}$  – коэффициенты гармонической линеаризации;  $a, b$  – параметры статической характеристики реле регулятора;  $A$  – амплитуда входного сигнала.

С учетом (5.78) и (5.79) передаточная функция нелинейной линеаризованной системы в разомкнутом и замкнутом состояниях соответственно

$$W(p) = W_n(A, p) \cdot W_l(p), \quad (5.80)$$

$$W^*(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)}. \quad (5.81)$$

Выражения (5.72) – (5.81) позволяют оценить главный показатель работоспособности каждого элемента и всей системы – динамическую устойчивость. Определим устойчивость линейных элементов и линейной части САР. Из (5.72), (5.74) и (5.77) следует, что нули передаточных функций объекта, регулирующего органа, чувствительного элемента, определяемые соотношениями:

$$p_{1,2} = \frac{-T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2T_2^2}; \quad p_1 = -1,79, \quad p_2 = -4,5 \cdot 10^{-3};$$

$$70p + 1 = 0, \quad p_1 = -\frac{1}{70} \approx -0,014;$$

$$5p + 1 = 0, \quad p_1 = -\frac{1}{5} = -0,2,$$

– вещественные отрицательные числа, расположенные в левой комплексной полуплоскости корней, и каждый из перечисленных элементов в отдельности устойчив.

Чтобы избежать громоздких преобразований пренебрежем, с некоторой потерей точности, запаздыванием  $\tau_1$  в калорифере, так как  $\tau_1 = 12$  с «  $T_3 = 70$  с. Тогда численное значение передаточной функции  $W_l(p)$  линейной части системы определится

$$\begin{aligned} W_l(p) &= \frac{0,03(196p + 1)}{224p^2 + 401p + 1} \cdot \frac{0,42}{5p + 1} \cdot \frac{1,33}{70p + 1} = \\ &= \frac{0,017(196p + 1)}{78400p^4 + 157150p^3 + 30649p^2 + 476p + 1}, \end{aligned} \quad (5.82)$$

а характеристический полином:

$$78400p^4 + 157150p^3 + 30649p^2 + 476p + 1 = 0. \quad (5.83)$$

Воспользуемся критерием Рауса, согласно которому для устойчивой системы с характеристическим уравнением четвертого порядка вида

$$a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 = 0,$$

где  $a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$  – постоянные коэффициенты, должны выполняться неравенства:

$$a_4 > 0; a_3 > 0; a_2 > 0; a_1 > 0; a_0 > 0; a_1a_2a_3 - a_1^2a_4 - a_0a_3^2 > 0.$$

Тогда для (5.83) имеем:

$$78400 > 0; 157150 > 0; 30649 > 0; 476 > 0; 1 > 0;$$

$$476 \cdot 30649 \cdot 157150 - 476^2 \cdot 78400 - 1 \cdot 157150^2 > 0,$$

то есть комбинация линейных элементов проектируемой САР устойчива.

Наглядное представление об устойчивости объекта или системы дает амплитудно-фазовая характеристика (АФХ), которую легко получить из выражения передаточной функции заменой комплексной переменной  $p$  мнимой  $j\omega$ . Частотную передаточную функцию объекта

$$W(j\omega) = \frac{0,03(196j\omega + 1)}{-224\omega^2 + 401j\omega + 1}, \quad (5.84)$$

приведем к виду  $W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega)$ , где  $R(\omega)$ ,  $jI(\omega)$  – соответственно вещественная и мнимая составляющие частотной передаточной функции. Выполним для (5.84) преобразования, получаем:

$$R(\omega) = \frac{0,03(1 + 78372\omega^2)}{1 + 160353\omega^2 + 50176\omega^4}, \quad (5.85)$$

$$jI(\omega) = j \frac{-0,03(205\omega + 43904\omega^3)}{1 + 160353\omega^2 + 50176\omega^4}. \quad (5.86)$$

Задавая значения  $\omega$  в диапазоне  $0 \dots \infty$  заполним табл. 5.13 для построения АФХ объекта (рис.5.69).

Табл.5.13 – Расчетные данные для построения АФХ свиарника

$\omega$	0	0,1	0,6	1,0	2,0	4,0	8,0	10	$\infty$
$R(\omega) \times 10^{-3}$	30	14,6	13,2	11,2	6,5	2,4	0,69	0,45	0
$jI(\omega) \times 10^{-3}$	0	-0,41	-4,5	-6,3	-7,3	-5,5	-3,1	-2,5	0

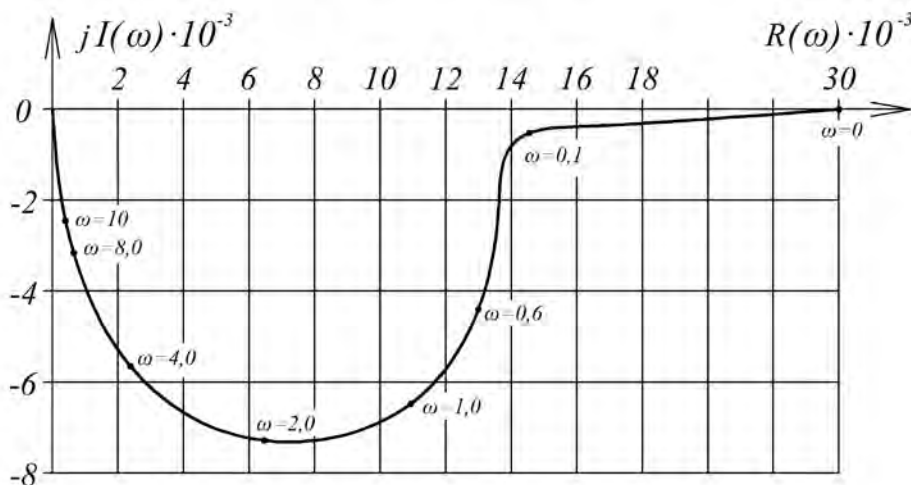


Рис.5.69 Амплитудно-фазовая частотная характеристика свиарника

Подобными рассуждениями получают АФХ каждого элемента и всей системы автоматического регулирования.

Устойчивость линейной системы по ее АФХ удобно оценивать с помощью критерия Найквиста [14]. При этом, если годограф АЧХ устойчивой разо-

мкнутой САР не «закручивается» вокруг начала координат  $(0; j0)$  и не охватывает точку комплексной плоскости с координатами  $(-1; j0)$ , то замкнутая САР устойчива. Удобным при оценке устойчивости системы являются также асимптотические логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ), методика получения которых подробно рассмотрена в [22].

### 5.6.3. Определение параметров настройки регулятора и оценка качества регулирования

Структурная схема замкнутой САР с двухпозиционным регулятором с петлевой статической характеристикой (рис.6.2) представлена на рис.6.1,в. Для удобства дальнейших рассуждений примем, что обобщенным объектом регулирования в этой схеме является совокупность всех линейных звеньев с передаточной функцией  $W_n(p)$ .

Свободное движение линейной части проектируемой САР, определяемое характеристическим уравнением четвертого порядка (6.13) с вещественными отрицательными корнями, представляется совокупностью четырех экспоненциальных составляющих, стремящихся с течением времени к некоторым установившимся значениям. Полагая результирующее изменение выходной величины в системе между смежными переключениями релейного элемента экспоненциальным, представим упрощенную динамику процесса регулирования, как показано на рис.6.5. Из диаграммы следует, что в замкнутой САР при релейной статической характеристике регулятора с зоной неоднозначности  $2a$  в установившемся режиме возникают автоколебания [14].

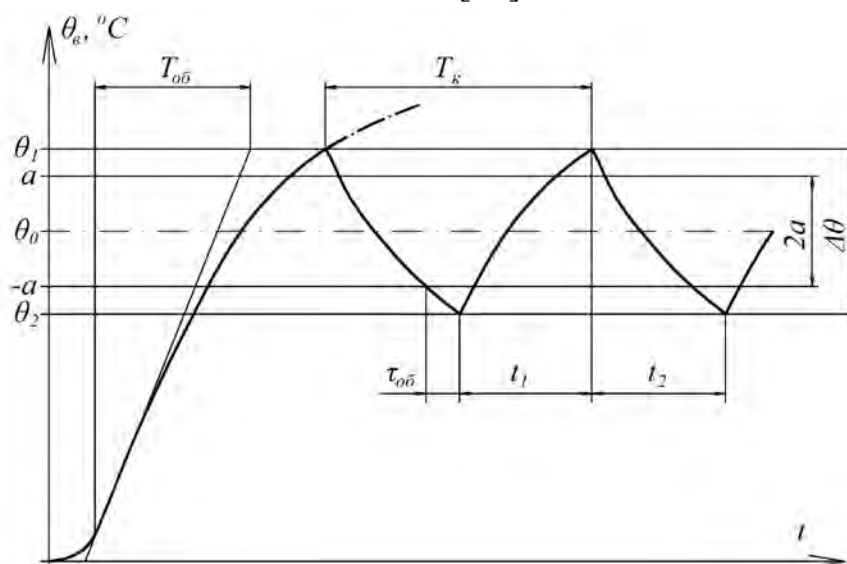


Рис. 5.70 Автоколебания в нелинейной САР с позиционным регулятором

Исследование автоколебаний и определение параметров предельных циклов осуществимо, например, с помощью частотных критериев устойчивости, однако при высоком порядке характеристического полинома системы этот под-

ход требует значительных вычислений и не всегда удобен.

Расчет упростится, если учесть, что статические объекты с самовыравниванием с характеристическим уравнением вида (5.83) могут быть представлены апериодическим звеном с запаздыванием [14]. Тогда, полагая передаточную функцию объекта в виде

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{k_{\text{об}} \cdot e^{-p\tau_{\text{об}}}}{T_{\text{об}}p + 1}, \quad (5.87)$$

где  $k_{\text{об}}$ ,  $\tau_{\text{об}}$ ,  $T_{\text{об}}$  – соответственно передаточный коэффициент, запаздывание и постоянная времени обобщенного объекта, легко рассчитать процесс двухпозиционного регулирования, воспользовавшись рекомендациями [22]. Формулы для расчета длительности положительной  $t_1$  и отрицательной  $t_2$  амплитуд автоколебаний, их периода  $T_{\kappa}$ , частоты переключений  $n$  регулятора, положительной  $\theta_1$  и отрицательной  $\theta_2$  амплитуд отклонения регулируемой величины от заданного значения и диапазона  $\Delta\theta$  колебаний регулируемой величины имеют вид:

$$t_1 = \tau_{\text{об}} + T_{\text{об}} \ln \frac{k_{\text{об}}^* (B_1 + B_2) - (k_{\text{об}}^* B_2 - a) \cdot e^{-\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}}{k_{\text{об}}^* B_1 - a}; \quad (5.88)$$

$$t_2 = \tau_{\text{об}} + T_{\text{об}} \ln \frac{k_{\text{об}}^* (B_1 + B_2) - (k_{\text{об}}^* B_1 - a) \cdot e^{-\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}}{k_{\text{об}}^* B_2 - a}; \quad (5.89)$$

$$T_{\kappa} = t_1 + t_2; \quad n = 2/T_{\kappa}; \quad (5.90)$$

$$\theta_1 = k_{\text{об}}^* B_1 (1 - e^{-\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}) + a \cdot e^{-\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}; \quad (5.91)$$

$$\theta_2 = k_{\text{об}}^* B_2 (1 - e^{-\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}) + a \cdot e^{-\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}; \quad (5.92)$$

$$\Delta\theta = k_{\text{об}}^* (B_1 + B_2) (1 - e^{-\tau/T}) + 2a \cdot e^{-\tau/T}, \quad (5.93)$$

где  $k_{\text{об}}^*$  – коэффициент передачи объекта по управляющему воздействию, о.е.;  $B_1$ ,  $B_2$  – управляющие воздействия на объект соответственно при включенном и отключенном регуляторе, о.е.;  $2a$  – зона неоднозначности (дифференциал) регулятора о.е.

Для принятой динамической модели объекта (5.87) удобно в качестве входного регулирующего воздействия принять энергию  $Q$ , подаваемую в объект в единицу времени для поддержания требуемого значения температуры  $\theta_0$ . Так как в установившемся режиме (при отключенном регуляторе)  $\theta_0 = k_{\text{об}} Q_0$ , то коэффициент передачи

$$k_{\text{об}} = \frac{\theta_0}{Q_0} = \frac{20}{30} = 0,67 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с/кДж},$$

а его относительное значение

$$k_{об}^* = \frac{\theta_0 / \theta_{\delta}}{Q_0 / Q_{\delta}} = 1,0,$$

где  $\theta_{\delta}$ ,  $Q_{\delta}$  – базисные значения величин.

Изменение регулирующего воздействия в относительных единицах при включении регулятора

$$B_1 = \frac{Q_n - Q_0}{Q_0} = \frac{45 - 30}{30} = 0,5,$$

при отключении

$$B_2 = \frac{Q_0}{Q_0} = 1,0.$$

Принимая зону неоднозначности регулятора в именованных единицах равной  $1^{\circ}\text{C}$  в относительных единицах, получим

$$2a = \frac{1}{20} = 0,05; a = 0,025.$$

Полагая постоянную времени и запаздывание обобщенного объекта заданными, соответственно  $T_{об} = 401$  с,  $\tau_{об} = 0,15 T_{об} = 60$  с, определяем длительность включения регулятора

$$t_1 = 60 + 401 \cdot \ln \frac{1(0,5 + 1) - (1 \cdot 1 - 0,025) \cdot e^{-60/401}}{1 \cdot 0,5 - 0,025} = 192 \text{ с};$$

длительность паузы:

$$t_2 = 60 + 401 \cdot \ln \frac{1(0,5 + 1) - (1 \cdot 0,5 - 0,025) \cdot e^{-60/401}}{1 \cdot 1 - 0,025} = 105 \text{ с};$$

период колебаний:

$$T_{\kappa} = t_1 + t_2 = 192 + 105 = 279 \text{ с};$$

диапазон колебаний регулируемой величины:

$$\Delta \theta = 1(0,5 + 1)(1 - e^{-60/401}) + 2 \cdot e^{-60/401} = 0,25 \text{ о.е.};$$

в абсолютных единицах:

$$\Delta \theta = 0,25 \cdot 20 = 5^{\circ}\text{C};$$

положительная и отрицательная амплитуды колебаний регулируемой величины

$$\theta_1 = 1 \cdot 0,5(1 - e^{-60/401}) + 0,025 \cdot e^{-60/401} = 0,09 \text{ о.е.};$$

$$\theta_2 = 1 \cdot 1(1 - e^{-60/401}) + 0,025 \cdot e^{-60/401} = 0,16 \text{ о.е.};$$

или

$$\theta_1 = 0,09 \cdot 20 = 1,8^{\circ}\text{C}; \theta_2 = 0,16 \cdot 20 = 3,2^{\circ}\text{C}.$$

Так как значения  $\theta_1$  и  $\theta_2$  не равны, то для обеспечения равенства амплитуд колебаний относительно принятого значения температуры задание регулятору при его настройке следует скорректировать на величину [22]:

$$\varepsilon_0 = k_{об}^* (B_1 - B_2)(1 - e^{-\tau_{об}/T_{об}}) = 1(0,5 - 1)(1 - e^{-60/401}) = -0,07 \text{ о.е.},$$

или

$$\varepsilon_0 = -0,07 \cdot 20 = -1,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, диапазон колебаний регулируемой величины  $\Delta\theta = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$  в проектируемой САР получился больше требуемого  $\Delta\theta = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , однако это превышение весьма мало и составляет 5 %, что вполне допустимо для практики. При необходимости, точность стабилизации САР с релейным регулятором можно повысить. Методы улучшения качества двухпозиционного регулирования рассмотрены в [22].

По результатам исследования свойств проектируемой системы составляют функциональную схему автоматизации (ФСА) – основной техникой документ, определяющий структуру и характер системы автоматизации объекта, оснащение его приборами и средствами автоматизации.

ФСА представляет собой совмещенную схему технологического процесса с упрощенным изображением автоматизированных агрегатов и функциональных элементов автоматики, показанных условными обозначениями и линиями связи между ними. Конфигурация технологического оборудования на ФСА соответствует, как правило, действительной, но изображается без соблюдения масштаба, второстепенных элементов и других подробностей. Технические средства автоматизации (первичные преобразователи, датчики, регуляторы и др.) показывают условными обозначениями.

Система условных обозначений строится по функциональным признакам, выполняемым приборами или средствами автоматизации.

Применяют основные три группы графических обозначений:

- окружность – первичные измерительные преобразователи и приборы, в том числе, регулирующие, контролирующие, сигнализирующие;
- квадрат – исполнительные механизмы;
- два треугольника, сложенные вершинами – регулирующие органы.

Вид измеряемой величины и функциональное назначение прибора показывают при помощи буквенных обозначений, вписанных внутри условного изображения прибора. Основные обозначения приведены в табл.5.14 и 5.15.

Буквенное обозначение прибора записывают внутри символа в следующем порядке: 1 – измеряемая величина; 2 – уточнение измеряемой величины; 3 – функции, выполняемые прибором; 4 – дополнительные значения функций (при необходимости). Функциональные признаки, если их несколько в приборе, располагают в последовательности *IRCSA* (показание – регистрация – регулирование – включение – отключение – сигнализация).

Табл.5.14 - Основные буквенные условные обозначения

Измеряемая величина	Обозначение	Уточнение
Разность, перепад	–	D
Любая электрическая величина	E	–
Расход	F	–
Соотношение, доля	–	F
Размер, положение, перемещение	G	–
Ручное воздействие	H	–
Автоматическое переключение	–	J
Время, временная программа	K	–
Уровень	L	–
Влажность	M	–
Давление	P	–
Интегрирование	–	Q
Скорость, частота	S	–
Температура	T	–
Масса	W	–

Табл.5.15 – Буквенные условные обозначения функций, выполняемых прибором

Функции	Обозначение	Уточнение
Сигнализация	A	–
Регулирование, управление	C	–
Чувствительный элемент	E	–
Верхний предел измеряемой величины	–	H
Показание, измерение	I	–
Станция управления	K	–
Нижний предел измеряемой величины	–	L
Регистрация	R	–
Включение, переключение, отключение сигнализации	S	–
Дистанционная передача, промежуточное преобразование	T	–
Преобразование, вычисление функции	Y	–

Допускается указывать функциональные признаки, используемые лишь в данной схеме автоматики. Пример построения условного обозначения прибора для измерения, регистрации и автоматического регулирования температуры показан на рис.5.71.

Всем приборам и средствам автоматизации присваивают позиционные обозначения, сохраняемые на всех последующих схемах (принципиальных, соединения), в тексте, заказных спецификациях и др.

Пример функциональной схемы автоматизации проектируемой САР температуры свиарника представлен на рис.5.72.

Функциональная схема дает представление об общем алгоритме функционирования создаваемой системы автоматизации и позволяет разработать принципиальную схему САР. Принципиальная схема (ПС) определяет полный состав элементов системы и дает детальное представление о принципе ее рабо-



ты. ПС служит основой для разработки других конструкторских документов: монтажных схем щитов, пультов, схем соединений, схем подключений и др.

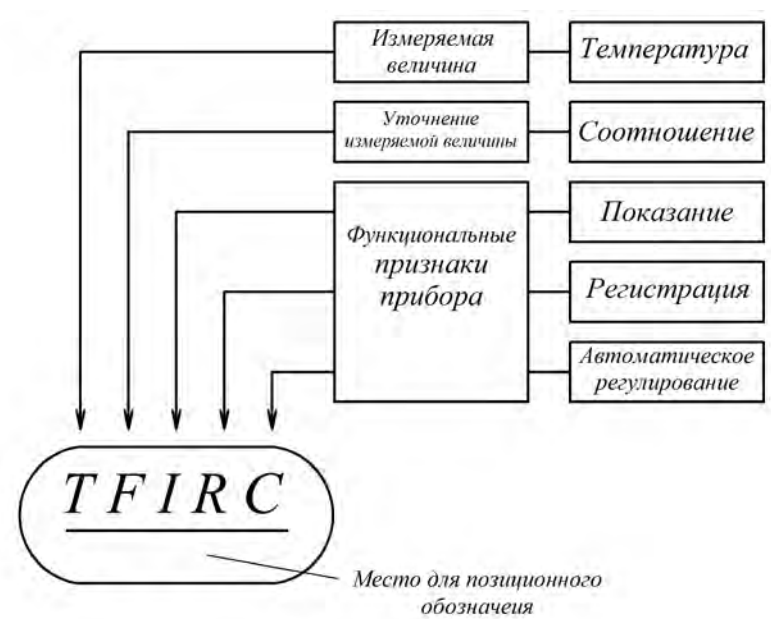


Рис.5.71 Структура прибора для измерения, регистрации и регулирования температуры

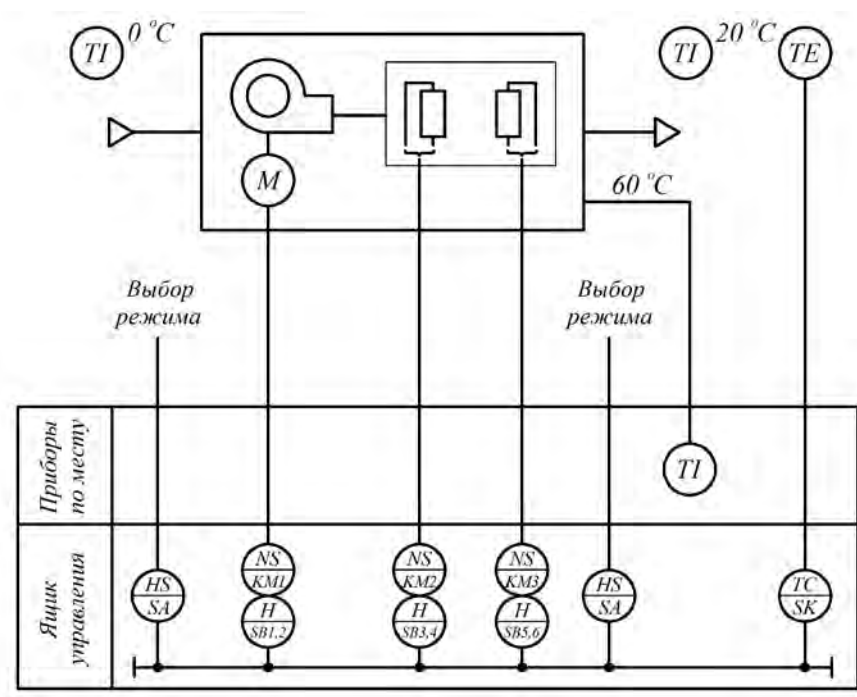


Рис.5.72 Функциональная схема САР температуры свиарника

Принципиальную электрическую схему составляют на основании схемы автоматизации, учитывая заданный алгоритм функционирования элементов контроля, автоматического управления, регулирования, сигнализации и общие технические требования к автоматизируемому объекту.

На ПС в условном виде изображают приборы, аппараты, линии связи между отдельными элементами, блоками, модулями устройств. В общем случае ПС содержит:

- условные изображения принципа действия функциональных узлов схемы автоматизации;
- поясняющие записки;
- части элементов данной схемы, используемые в других схемах;
- диаграммы переключений контактов многопозиционных устройств;
- перечень используемых приборов, средств автоматизации, аппаратуры и др.;
- перечень чертежей, общие пояснения и примечания.

При составлении и вычерчивании ПС используют совмещенный или разнесенный способы изображения элементов. При этом разнесенный способ является более наглядным и получил на практике большее распространение.

Рекомендации по составлению принципиальных электрических схем, схем соединений подробно рассмотрены в [7].

## 6. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

### 6.1. Определение расчетной нагрузки на примере ремонтно-механического цеха

При выборе электрооборудования необходимо знать расчетную нагрузку цеха и всего предприятия в целом [3-5].

Исходными данными для расчета по цеху является перечень размещенного в нем электрооборудования с указанными значениями установленной мощности  $P_{уст}$  и количества  $n$  (табл. 6.1).

Табл. 6.1 – Перечень электрооборудования цеха

№ ЭП	Наименование участка цеха и электроприемников	Руст. ЭП, кВт	n, шт	№ ЭП	Наименование участка цеха и электроприемников	Руст. ЭП, кВт	n, шт
1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Штамповочно-заготовительное отделение</b>				<b>Сварочное отделение</b>			
1	Пресс – ножницы	3,3	1	1	Сварочный трансформатор	25 кВт·А	2
2	Отрезной станок	12,9	1	2	Машина электросвар. шовная	75 кВт·А	1
3	Пресс эксцентриковый	7,0	1	3	Машина электросвар. стыковая	25 кВт·А	1
4	Пресс листогибочный	15,7	1	4	Машина электросвар. точечная	50 кВт·А	1
5	Ножницы листовые	7,0	1	5	Отрезной станок	12,5	1
6	Машина вальцовочная	2,5	1	6	Кран-балка	5,3	1
7	Токарно-револьверный станок	5,6	1	7	Преобразователь сварочный	14,0	1
8	Обдирочно-точильный станок	1,7	2	8	Сварочный полуавтомат	17,0	1
9	Кран-балка электрическая	2,8	1	9	Сушильный шкаф	7,0	1
10	Вентилятор	7,0	1	10	Вентилятор	7,0	2
<b>Механическое отделение</b>				<b>Термическое отделение</b>			
1	Токарный станок	7,0	1	1	Высокочастотная установка	50 кВт·А	1
2	Токарно-винторезный станок	4,5	1	2	Электропечь сопрот-я шахтная	35,0	2
3	Вертикально-сверлильный станок	4,5	1	3	Электропечь сопрот-я камерная	12,0	1
4	Резьбонарезный станок	7,0	1	4	Электропечь трубчатая	3,5	1
5	Вертикально-фрезерный станок	10,0	1	5	Электропечь муфельная	1,6	1
6	Строгальный станок	7,0	1	6	Электропечь-ванна	10,0	1
7	Координатно-расточный станок	6,5	1	7	Печь нагреватель. камерная	12,0	1
8	Радиально-сверлильный станок	1,7	2	8	Таль электрическая	2,8	2
9	Кран-балка электрическая	4,8	1	9	Шкаф сушильный	1,7	1
10	Вентилятор	1,7	2	10	Вентилятор	7,0	1

Для вычисления расчетной нагрузки по методу упорядоченных диаграмм необходимо знать режим работы электроприемников (коэффициент использования), а для определения расчетной *реактивной и полной* мощностей применяется коэффициент мощности  $\cos\phi$ . Коэффициенты использования и мощности на практике определяются экспериментально или могут быть взяты из литературы [3-5].

В рассматриваемом случае все электрооборудование сформировано по технологическим отделениям в однородные группы, однако, формировать группы можно также по близким значениям коэффициента использования (по

близкому режиму работы – длительному/ кратковременному), или близким значениям коэффициента мощности.

Выпишем коэффициенты использования и мощности для электрооборудования [3-5], указанного в табл. 6.2.

Табл.6.2 – Коэффициенты использования и мощности для размещенного в ремонтно-механическом цехе электрооборудования

№ ЭП	Наименование участка цеха и электроприемников	cos φ	Ки	№ ЭП	Наименование участка цеха и электроприемников	cos φ	Ки
1	2	3	4	1	2	3	4
<b>1. Штамповочно-заготовительное отделение</b>				<b>3. Сварочное отделение</b>			
1	Пресс – ножницы	0,80	0,65	1	Сварочный трансформатор	0,30	0,2
2	Отрезной станок	0,40	0,12	2	Машина электросвар. шовная	0,70	0,35
3	Пресс эксцентриковый	0,80	0,65	3	Машина электросвар. стыковая	0,60	0,35
4	Пресс листогибочный	0,80	0,65	4	Машина электросвар. точечная	0,50	0,35
5	Ножницы листовые	0,65	0,45	5	Отрезной станок	0,40	0,12
6	Машина вальцовочная	0,40	0,12	6	Кран-балка	0,50	0,15
7	Токарно-револьверный станок	0,50	0,14	7	Преобразователь сварочный	0,30	0,20
8	Обдирочно-точильный станок	0,40	0,12	8	Сварочный полуавтомат	0,50	0,40
9	Кран-балка электрическая	0,50	0,25	9	Сушильный шкаф	1,00	0,80
10	Вентилятор	0,80	0,8	10	Вентилятор	0,80	0,80
<b>2. Механическое отделение</b>				<b>4. Термическое отделение</b>			
1	Токарный станок	0,50	0,14	1	Высокочастотная установка	0,80	0,70
2	Токарно-винторезный станок	0,50	0,14	2	Электропечь сопот-я шахтная	0,95	0,80
3	Вертикально-сверлильный станок	0,40	0,12	3	Электропечь сопот-я камерная	0,95	0,80
4	Резьбонарезный станок	0,50	0,14	4	Электропечь трубчатая	0,95	0,80
5	Вертикально-фрезерный станок	0,50	0,14	5	Электропечь муфельная	0,95	0,80
6	Строгальный станок	0,50	0,14	6	Электропечь-ванна	0,90	0,75
7	Координатно-расточный станок	0,65	0,17	7	Печь нагреватель. камерная	0,95	0,80
8	Радиально-сверлильный станок	0,40	0,12	8	Таль электрическая	0,80	0,80
9	Кран-балка электрическая	0,50	0,25	9	Шкаф сушильный	1,00	0,80
10	Вентилятор	0,80	0,80	10	Вентилятор	0,80	0,80

Расчетная нагрузка потребителя (цеха) определяется известным образом:

- 1) формируется перечень электрооборудования с указанием номинальной или установленной мощности;
- 2) определяется смена с наибольшим потреблением электроэнергии;
- 3) описываются особенности технологического процесса, влияющие на электропотребление, выделяются электроприемники с высокой неравномерностью нагрузки;
- 4) исключаются из расчета электроприемники малой мощности, резервные нагрузки, а также эпизодически включаемая нагрузка;
- 5) определяются группы электроприемников, имеющих одинаковый тип работы и выделяются из них подгруппы, имеющие одинаковые величины индивидуальных коэффициентов использования;
- 6) выделяются электроприемники одинакового режима работы и определяется их средняя мощность активная и реактивная мощности

$$P_{cp} = \sum_{i=1}^m (K_{иi} P_{номi}), \quad (6.1)$$

$$Q_{cp} = \sum_{i=1}^m (K_{иi} P_{номi} \operatorname{tg} \varphi) \quad (6.2)$$

где  $m$  – количество групп электроприемников,  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности, соответствующий средневзвешенному коэффициенту мощности  $\cos \varphi$ , характерному для  $i$ -го электроприемника;

7) производится расчет группового коэффициента использования  $K_{и}$  активной мощности

$$K_{и\text{ групп.}} = \frac{\sum_{i=1}^m (K_{иi} P_{номi})}{\sum_{i=1}^m P_{номi}}; \quad (6.3)$$

8) определяется эффективное число электроприемников в группе из  $n \leq 30$  электроприемников

$$n_{э} = \frac{\left( \sum_{i=1}^n P_{номi} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_{номi})^2}, \quad (6.4)$$

при  $n > 30$  целесообразно пользоваться упрощенной формулой

$$n_{э} = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_{номi}}{P_{ном(max)}}, \quad (6.5)$$

где  $n_{э}$  – число однородных по режиму работы электроприемников одинаковой мощности, которое дает то же значение расчетного максимума  $P_{max}$ , что и группа электроприемников, различных по мощности и режиму работы. При числе электроприемников в группе четыре и более допускается принимать  $n_{э}$  равным  $n$  (действительному числу электроприемников) при условии, что отношение номинальной мощности наибольшего электроприемника  $P_{ном(max)}$  к номинальной мощности меньшего  $P_{ном(min)}$  меньше трех. В данном случае при определении значения  $n$  допускается исключать мелкие электроприемники, суммарная мощность которых не превышает 5% номинальной мощности всей группы.

9) в зависимости от вычисленных значений группового коэффициента использования  $K_{\text{игр.}}$  и эффективного числа электроприемников  $n_{\text{э}}$  по данным табл. 6.3 и из рис. 6.1 выбирается расчетный коэффициент  $K_p$ ;

10) определяется расчетный максимум активной и реактивной нагрузок:

$$P_p = P_{\text{max}} = K_p \sum_{i=1}^m (K_{\text{ии}} P_{\text{ном}i}); \quad (6.6)$$

$$Q_p = K_p \sum_{i=1}^m (K_{\text{ии}} P_{\text{ном}i} \text{tg}\varphi) \quad (\text{при } n < 10); \quad (6.7)$$

$$Q_p = 1,1 \cdot K_p \sum_{i=1}^m (K_{\text{ии}} P_{\text{ном}i} \text{tg}\varphi) \quad (\text{при } n \geq 10). \quad (6.8)$$

Определение расчетной нагрузки для рассматриваемого в задаче ремонтно-механического цеха будем производить следующим образом: сначала находятся расчетные максимумы отделений цеха (штамповочно-заготовительного, механического, сварочного и термического), а затем расчетный максимум в целом по цеху.

Определим расчетную нагрузку, например, штамповочно-заготовительного цеха (табл. 6.3).

Табл. 6.3 – Ведомость электрооборудования установленного в штамповочно-заготовительном отделении ремонтно-механического цеха

№ п/п	Наименование участка цеха и электроприемников	Руст. ЭП, кВт	n, шт	n · P <sub>уст</sub> кВт	K <sub>и</sub>	cos φ	tg φ
1	<b>Пресс – ножницы</b>	3,3	1	3,3	0,65	0,80	0,75
2	<b>Отрезной станок</b>	12,9	1	12,9	0,12	0,40	2,29
3		7,0	1	7,0	0,65	0,80	0,75
4	<b>Пресс эксцентриковый</b>	15,7	1	15,7	0,65	0,80	0,75
5		7,0	1	7,0	0,45	0,65	1,17
6	Пресс листогибочный	2,5	1	2,5	0,12	0,40	2,29
7	Ножницы листовые	5,6	1	5,6	0,14	0,50	1,73
8	Машина вальцовочная	1,7	2	3,4	0,12	0,40	2,29
9	Токарно-револьверный станок	2,8	1	2,8	0,25	0,50	1,73
10	Обдирочно-точильный станок	7,0	1	7,0	0,8	0,80	0,75
	Кран-балка электрическая						
	Вентилятор						

Выполним расчет группового коэффициента использования  $K_{\text{игр.}}$ :

$$\sum_{i=1}^m (K_{\text{ии}} P_{\text{ном}i}) = 0,65 \cdot 3,3 + 0,12 \cdot 12,9 + 0,65 \cdot 7,0 + 0,65 \cdot 15,7 + 0,45 \cdot 7,0 + 0,12 \cdot 2,5 + 0,14 \cdot 5,6 + 0,12 \cdot 3,4 + 0,25 \cdot 2,8 + 0,8 \cdot 7,0 = 29,39 \text{ кВт};$$

$$\sum_{i=1}^m P_{\text{ном}i} = 3,3 + 12,9 + 7,0 + 15,7 + 7,0 + 2,5 + 5,6 + 3,4 + 2,8 + 7,0 = 67,2 \text{ кВт}.$$

$$K_{и\text{ групп.}} = \frac{\sum_{i=1}^m (K_{иi} P_{ном i})}{\sum_{i=1}^m P_{ном i}} = \frac{29,39}{67,2} = 0,44.$$

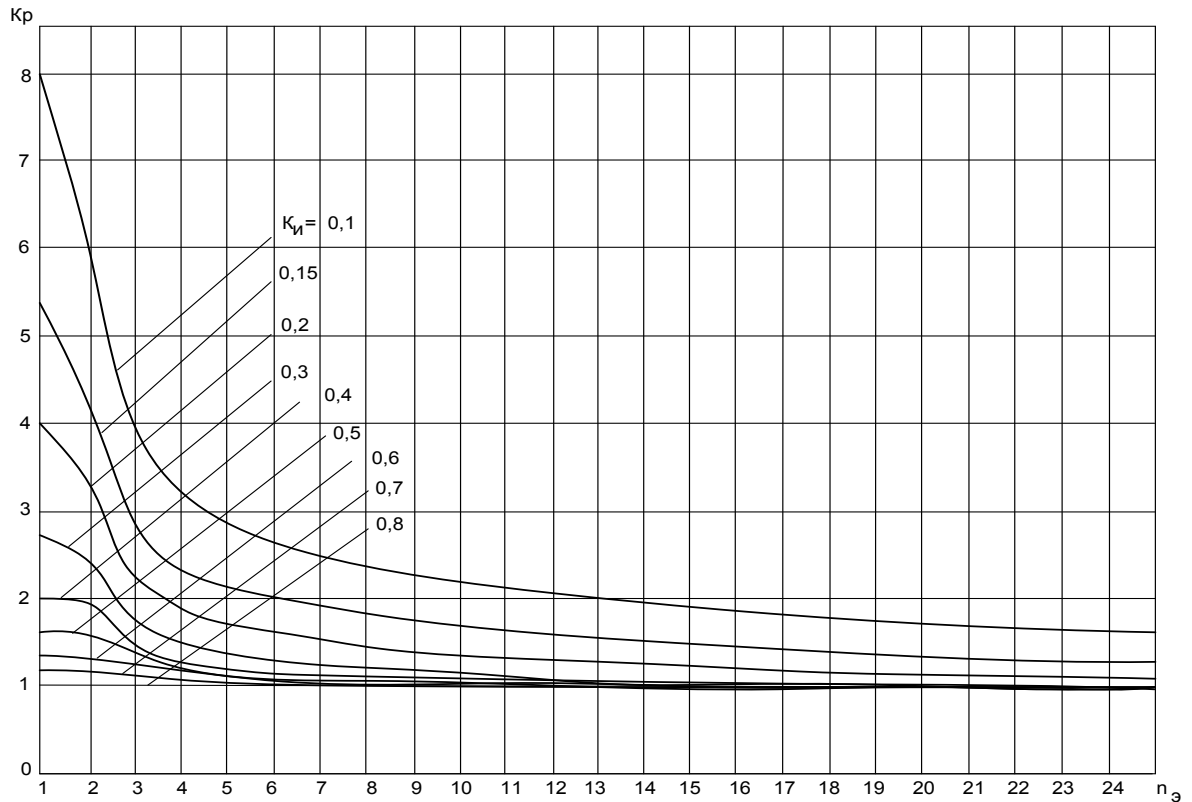


Рис. 6.1 Зависимость расчетного коэффициента от параметров группы электроприемников

В отличие от индивидуального коэффициента использования, принадлежащего каждому электроприемнику, групповой коэффициент использования один и принадлежит всей группе.

На следующем этапе определяется эффективное число группы электроприемников  $n_9$ , т.к. для рассматриваемого случая  $\sum n = 11$  (табл. 3), поэтому расчет  $n_9$  выполняется по формуле (6.4):

$$\left( \sum_{i=1}^n P_{ном i} \right)^2 = (3,3 + 12,9 + 7,0 + 15,7 + 7,0 + 2,5 + 5,6 + 3,4 + 2,8 + 7,0)^2 = 4515,8 \text{ кВт.}$$

$$\sum_{i=1}^n (P_{ном i})^2 = (3,3^2 + 12,9^2 + 7,0^2 + 15,7^2 + 7,0^2 + 2,5^2 + 5,6^2 + 3,4^2 + 2,8^2 + 7,0^2) = 627,8 \text{ кВт.}$$

Тогда

$$n_{\text{э}} = \frac{\left( \sum_{i=1}^n P_{\text{ном}i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_{\text{ном}i})^2} = \frac{4515,84}{627,8} = 7,2.$$

По рис. 6.1 и по известным значениям  $K_{\text{игр.}} = 0,44$  и  $n_{\text{э}} = 7,2$  определим расчетный коэффициент  $k_p = 1,1$ .

По формуле (6.6) найдем:

$$\sum_{i=1}^m (K_{ui} P_{\text{ном}i}) = 0,65 \cdot 3,3 + 0,12 \cdot 12,9 + 0,65 \cdot 7,0 + 0,65 \cdot 15,7 + 0,45 \cdot 7,0 + 0,12 \cdot 2,5 + \\ + 0,14 \cdot 5,6 + 0,12 \cdot 3,4 + 0,25 \cdot 2,8 + 0,8 \cdot 7,0 = 29,39 \text{ кВт}.$$

Активную и реактивную расчетные нагрузки штамповочно-заготовительного отделения определим по выражениям (6.6)-(6.8):

$$P_p = P_{\text{max}} = K_p \sum_{i=1}^n (K_{ui} P_{\text{ном}i}) = 1,1 \cdot 29,39 = 32,33 \text{ кВт}.$$

Так как  $\sum n = 11$ , то

$$\sum_{i=1}^n (K_{ui} P_{\text{ном}i} \cdot \text{tg}\varphi) = 0,65 \cdot 3,3 \cdot 0,75 + 0,12 \cdot 12,9 \cdot 2,29 + 0,65 \cdot 7,0 \cdot 0,75 + 0,65 \cdot 15,7 \cdot 0,75 + \\ + 0,45 \cdot 7,0 \cdot 1,17 + 0,12 \cdot 2,5 \cdot 2,29 + 0,14 \cdot 5,6 \cdot 1,73 + 0,12 \cdot 3,4 \cdot 2,29 + 0,25 \cdot 2,8 \cdot 1,73 + \\ + 0,8 \cdot 7,0 \cdot 0,75 = 28,3 \text{ квар};$$

$$Q_p = 1,1 \cdot K_p \sum_{i=1}^m (K_{ui} P_{\text{ном}i} \cdot \text{tg}\varphi) = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 28,3 = 34,23 \text{ квар}.$$

По этой методике определим расчетные мощности остальных отделений. Результаты расчета представлены в табл. 6.4.

По расчетным значениям  $k_{\text{игр}}$  и  $n_{\text{э}}$  определим расчетный коэффициент группы  $k_p$  (рис. 1), а также расчетные значения активной и реактивной мощности (6.6)-(6.8). Результаты расчетов представлены в табл. 6.5.

После определения расчетных значений мощности отделений ремонтно-механического цеха необходимо выполнить расчет мощности в целом по цеху. Для этого необходимо воспользоваться методом упорядоченных диаграмм применительно к полученным значениям мощности различных отделений.



Табл. 6.4 – Результаты расчета по отделениям  
Механическое отделение

№	Оборудование	$\cos \varphi$	$\kappa_{и}$	$P_{ном}$	$n$	$n \cdot P_{ном}$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\kappa_{и} \cdot n \cdot P_{ном}$	$\kappa_{и.гр}$	$n_9$
1	Токарный станок	0,5	0,14	7	1	7	1,73	0,98	0,18	7,2
2	Токарно-винторезный станок	0,5	0,14	4,5	1	4,5	1,73	0,63		
3	Вертикально-сверлильный станок	0,4	0,12	4,5	1	4,5	2,29	0,54		
4	Резьбонарезный стан,	0,5	0,14	7	1	7	1,73	0,98		
5	Вертикально-фрезерный станок	0,5	0,14	10	1	10	1,73	1,4		
6	Строгальный станок	0,5	0,14	7	1	7	1,73	0,98		
7	Координатно-расточный станок	0,65	0,17	6,5	1	6,5	1,16	1,11		
8	Радиально-сверлильный станок	0,4	0,12	1,7	2	3,4	2,29	0,41		
9	Кран-балка электрическая	0,5	0,25	4,8	1	4,8	1,73	1,2		
10	Вентилятор	0,8	0,8	1,7	2	3,4	0,75	2,72		

Сварочное отделение

1	Сварочный трансформатор	0,3	0,2	7,5	2	15	3,17	3	0,36	6,62
2	Машина электросвар, шовная	0,7	0,35	52,5	1	52,5	1,02	18,375		
3	Машина электросвар, стыковая	0,6	0,35	15	1	15	1,33	5,25		
4	Машина электросвар, точечная	0,5	0,35	25	1	25	1,73	8,75		
5	Отрезной станок	0,4	0,12	12,5	1	12,5	2,22	1,5		
6	Кран-балка	0,5	0,15	5,3	1	5,3	1,73	0,795		
7	Преобразователь сварочный	0,3	0,2	14	1	14	3,17	2,8		
8	Сварочный полуавтомат	0,5	0,4	17	1	17	1,73	6,8		
9	Сушильный шкаф	1	0,8	7	1	7	0	5,6		
10	Вентилятор	0,8	0,8	7	2	14	0,75	11,2		

Термическое отделение

1	Высокочастотная уст,	0,8	0,7	40	1	40	0,75	28	0,77	3,82
2	Электродпечь сопр, Шахтная	0,95	0,8	35	2	70	0,32	56		
3	Электродпечь сопр, камерная	0,95	0,8	12	1	12	0,32	9,6		
4	Электродпечь труб,	0,95	0,8	3,5	1	3,5	0,32	2,8		
5	Электродпечь муф,	0,95	0,8	1,6	1	1,6	0,32	1,28		
6	Электродпечь-ванна	0,9	0,75	10	1	10	0,48	7,5		
7	Печь нагрев, - кам,	0,95	0,8	12	1	12	0,32	9,6		
8	Таль электрическая	0,8	0,8	2,8	2	5,6	0,75	4,48		
9	Шкаф сушильный	1	0,8	1,7	1	1,7	0	1,36		
10	Вентилятор	0,8	0,8	7	1	7	0,75	5,6		

Табл. 6.5 – Результаты расчета по цеху

Отделение	$\kappa_p$	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВ·А
Штамповочно-заготовит. отделение	1,10	32,33	34,24	47,09
Механическое отделение	1,45	15,87	25,82	30,31
Сварочное отделение	1,14	73,04	105,76	128,52
Термическое отделение	1,00	126,22	64,07	141,55

Коэффициент использования группы по (3) будет:

$$K_{\text{и групп}} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{\text{и}i} P_{\text{ном}i})}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ном}i}} = \frac{(0,44 \cdot 32,33 + 0,18 \cdot 15,87 + 0,36 \cdot 73,04 + 0,77 \cdot 126,22)}{32,33 + 15,87 + 73,04 + 126,22} = 0,57.$$

Так как общее количество электроприемников больше 30 ( $\sum n = 47$  - в целом по цеху), то определить эффективное число электроприемников можно по выражению (5):

$$n_9 = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_{\text{ном}i}}{P_{\text{ном}}(\text{max})} = \frac{2(32,33 + 15,87 + 73,04 + 126,22)}{126,22} = 3,92.$$

По рис. 6.1 найдем расчетный коэффициент в целом по цеху  $\kappa_p = 1,12$ .

Потребляемая электрооборудованием цеха активная и реактивная мощности будут:

$$P_p = K_p \sum_{i=1}^m (K_{\text{и}i} P_{\text{ном}i}) = 1,12(0,44 \cdot 32,33 + 0,18 \cdot 15,87 + 0,36 \cdot 73,04 + 0,77 \cdot 126,22) = 157,94 \text{ кВт}.$$

$$Q_p = 1,1 K_p \sum_{i=1}^m (K_{\text{и}i} Q_{\text{ном}i}) = 1,1 \cdot 1,12 \cdot (0,44 \cdot 34,24 + 0,18 \cdot 25,82 + 0,36 \cdot 105,76 + 0,77 \cdot 64,07) = 132,50 \text{ квар}.$$

Расчетное значение полной мощности и тока:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{157,94^2 + 132,50^2} = 206,16 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} = \frac{206,16}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 297,92 \text{ А}.$$

## 6.2. Коэффициент мощности и способы его повышения

Работа асинхронных электродвигателей, трансформаторов, дросселей насыщения и других электромагнитных аппаратов и устройств переменного тока сопровождается процессом непрерывного изменения возникающего в них маг-

нитного потока под действием протекающего по цепи переменного тока. При изменении магнитного потока возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует изменению переменного тока, что приводит к его отставанию по фазе от напряжения сети (рис.6.2). Следовательно, самоиндукция является причиной сдвига фаз между током и напряжением, который оценивается коэффициентом мощности или  $\cos\varphi$ .

Мгновенное значение мощности генератора всегда содержит составляющую, которая обусловлена инерцией магнитного потока, то есть противодействием ЭДС самоиндукции, которая называется реактивной мощностью. Реактивная мощность изменяется в течение полупериода переменного тока.

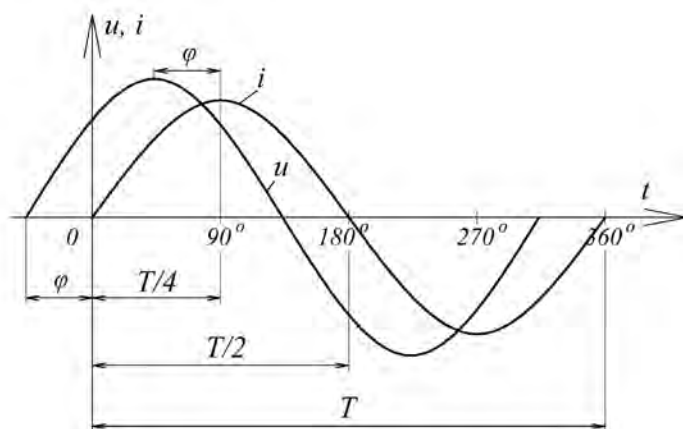


Рис.6.2 Диаграмма сдвига фаз между напряжением и током

В течение первой четверти каждого периода (рис. 6.3), когда ток увеличивается от нуля до наибольшего значения, соответственно растет и магнитный поток. При этом в магнитном поле идет накопление энергии за счет реактивной мощности, поступающей из генератора в цепь потребителя.

В течение второй четверти каждого периода, когда ток и магнитный поток уменьшаются, энергия магнитного поля также уменьшается до нуля, что сопровождается возвращением реактивной мощности из цепи потребителя в генератор под действием встречно направленной ЭДС самоиндукции.

Реактивная мощность, идущая на создание магнитного потока в асинхронных двигателях, трансформаторах и других индукционных аппаратах и электрических устройствах, четыре раза в течение периода меняет свое направление, при этом среднее значение этой мощности за каждый полупериод равно нулю. Характер обмена реактивной мощностью между генератором и цепью потребителя происходит в форме колебательного процесса.

Таким образом, на создание реактивной мощности не требуется расхода активной мощности в первичном двигателе, который покрывает лишь потери активной мощности в цепи между генератором и потребителем.

Выражение для активной мощности  $P$  можно представить в виде следующего соотношения  $P = S \cdot \cos \varphi$ , откуда величина  $\cos \varphi$  определяется:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (6.9)$$

где  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  – полная мощность, кВА;  $Q$  – реактивная мощность, квар.

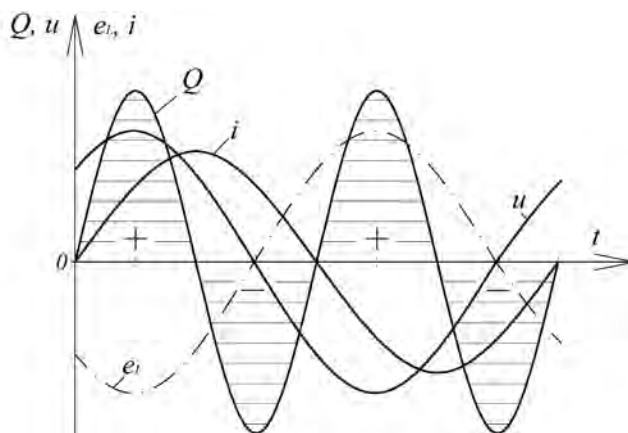


Рис.6.3 Изменение реактивной мощности в цепи с индуктивной нагрузкой

Величина  $\cos \varphi$  показывает, какую часть от полной мощности, вырабатываемой генератором, составляет активная мощность  $P$ . Чем меньше  $\cos \varphi$ , тем меньше активная мощность  $P$  при одной и той же полной мощности  $S$ . Следовательно, по величине  $\cos \varphi$  можно судить о том, какая часть полной мощности  $S$  используется для полезной, например, механической работы.

Как показано в [5], при заданной частоте переменного тока  $f$  потребляемая реактивная мощность  $Q$  увеличивается с ростом магнитного потока и сопротивления пути магнитного потока и уменьшается, если магнитная проницаемость применяемого материала высока. С целью уменьшения сопротивления пути магнитному потоку асинхронные электродвигатели проектируются, по возможности, с минимальным воздушным зазором.

Увеличение объема воздушных зазоров магнитопровода приводит к росту реактивной мощности. Поэтому асинхронные электродвигатели закрытого исполнения и тихоходные, по сравнению с ЭД открытого исполнения и быстроходными одинаковой мощности, потребляют из сети повышенную реактивную мощность  $Q$ .

Основными потребителями реактивной мощности  $Q$  являются асинхронные электродвигатели (до 60 %), трансформаторы (до 20 %), другие индукционные аппараты и воздушные линии (до 20 %).

Асинхронные электродвигатели. Важными энергетическими показателями работы АД являются: коэффициент мощности и потребление реактивной энергии за определенный промежуток времени.

Сдвиг фаз тока и напряжения в цепи асинхронной машины обуславливается наличием в ней реактивной мощности  $Q$ , расходуемой на питание электромагнитных полей двигателя – главного поля, за счет которого происходит передача энергии от статора к ротору, и полей рассеяния обмоток статора и ротора.

Значение  $Q$  определяется изменением запаса электромагнитной энергии, заключенной в этих полях, обусловленных изменением создающего их переменного тока. По реактивной мощности  $Q$ , потребляемой электродвигателем из сети, и его активной мощности  $P$  определяется коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (6.10)$$

При номинальной нагрузке коэффициент мощности имеет номинальное значение

$$\cos \varphi_n = \frac{P_n}{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}. \quad (6.11)$$

Величина номинального коэффициента мощности асинхронных двигателей определяется конструктивными параметрами машины и зависит от номинальной мощности, конструкции ротора, вида применяемого материала, скорости вращения и т.д. С увеличением номинальной мощности электродвигателя активные материалы машины используются лучше, поэтому их объем, приходящийся на 1 кВт, уменьшается. В связи с этим количество энергии, заключенной в электромагнитных полях, и пропорциональная ему реактивная мощность, приходящаяся на 1 кВт, уменьшаются. В результате  $\cos \varphi$  с увеличением мощности электродвигателя растет.

На рис. 6.4 представлены зависимости  $\cos \varphi$  от  $P_n$  для различной частоты вращения  $n$ . Так возрастание  $\cos \varphi$ , заметное при малых номинальных мощностях, по мере роста мощности становится менее интенсивным, а при больших мощностях практически прекращается. Увеличение синхронной скорости двигателей, приводящее к лучшему использованию материалов, а значит к уменьшению реактивной мощности  $Q$ , так же связано с увеличением номинального коэффициента мощности. Разница в значениях  $\cos \varphi_n$  при различных синхронных скоростях тем заметнее, чем меньше номинальная мощность  $P_n$ .

Асинхронные электродвигатели с коротко замкнутым ротором с меньшей величиной приведенного междужелезного пространства и меньшей длиной лобовых соединений на роторе, чем двигатели с фазным ротором, имеют по сравнению с последними больший  $\cos \varphi_n$ . Двигатели с глубокими пазами, имеющие несколько большее рассеяние, обладают меньшим значением коэффициента мощности, чем двигатели с круглыми пазами.

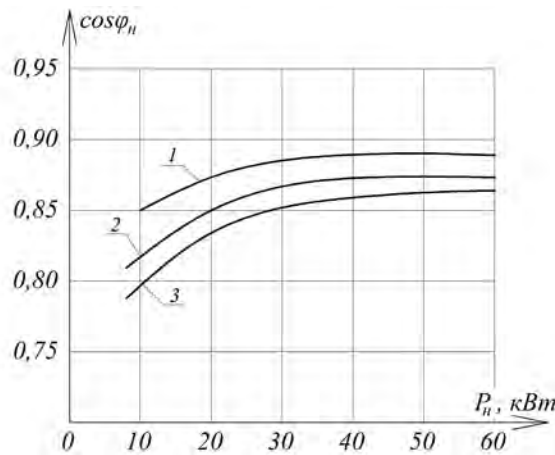


Рис. 6.4 Зависимость  $\cos \varphi_n$  от номинальной мощности и синхронной скорости асинхронного электродвигателя: 1 –  $n=1500$ ; 2 –  $n=1000$ ; 3 –  $n=740$  об/мин

Низковольтные двигатели по причине большей компактности статорной обмотки имеют лучший  $\cos \varphi_n$ , чем высоковольтные.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя в сильной степени зависит от его нагрузки. Для оценки влияния нагрузки, а так же напряжения на зажимах двигателя на величину  $\cos \varphi_n$  можно представить полную реактивную мощность, потребляемую двигателем, состоящую из двух слагаемых:

- реактивная мощность, связанная с главным полем;
- реактивная мощность, связанная с полями рассеяния.

Реактивная мощность  $Q_\mu$ , обусловленная главным полем:

$$Q_\mu = 3I_\mu^2 x_\mu \text{ или } Q_\mu = 3 \frac{E_1^2}{x_\mu}, \quad (6.12)$$

а реактивная мощность, обусловленная полями рассеяния,

$$Q_p = 3(I_1^2 x_1 + I_2'^2 x_2'), \quad (6.13)$$

где  $I_\mu$  и  $x_\mu$  – ток и реактивное сопротивление намагничивания.

Так как в пределах значения нагрузок от холостого хода и до номинальной  $E_1 \approx U$ , то

$$Q_\mu \approx 3 \frac{U^2}{x_\mu}. \quad (6.14)$$

Полная реактивная мощность, потребляемая двигателем

$$Q = 3 \left( \frac{U^2}{x_\mu} + I_1^2 x_1 + I_2'^2 x_2' \right), \quad (6.15)$$

где  $3I_1^2 x_1$  и  $3I_2'^2 x_2'$  – реактивная мощность полей рассеяния статора и ротора.

Реактивная мощность главного поля имеет наибольшее значение при холостом ходе, когда  $E_1$  достигает значения  $U$ . По мере увеличения нагрузки за счет

потери напряжения в обмотке статора  $E_1$  уменьшается; одновременно увеличивается  $x_\mu$  вследствие имеющего место при этом уменьшении насыщения, связанного с уменьшением магнитного потока. Однако изменения  $E_1$  и  $x_\mu$  в пределах значения нагрузок от холостого хода до величины, несколько превосходящей номинальную, не велики, и поэтому реактивная мощность главного поля в этих пределах изменения нагрузки меняется незначительно.

Коэффициент мощности, при холостом ходе вследствие значительной величины реактивной мощности  $Q_\mu$  и незначительной активной мощности, обусловленной лишь постоянными потерями, мал. Далее по мере роста нагрузки до некоторого ее значения активная мощность растет быстрее реактивной и  $\cos\varphi$  повышается. При дальнейшем увеличении нагрузки активная мощность растет медленнее реактивной, вследствие чего  $\cos\varphi$  падает. На рис. 6.5 приведены зависимости  $\cos\varphi$  от относительной нагрузки для различных номинальных значений  $\cos\varphi_n$ . На всех кривых виден максимум  $\cos\varphi_n$ , и чем больше он по величине, тем при меньшей нагрузке он имеет место.

При одном и том же моменте нагрузки на валу реактивная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, меняется с изменением напряжения. При уменьшении напряжения в случае малых нагрузок полная реактивная мощность падает, а  $\cos\varphi$  растет. При увеличении напряжения реактивная мощность растет. Так как при снижении напряжения и связанном с ним уменьшением магнитного потока при неизменном моменте нагрузки растет вторичный ток, то одновременно с убыванием реактивной мощности  $Q_\mu$  главного поля растет реактивная мощность полей рассеяния  $Q_p$ .

На уменьшении подводимого напряжения основан известный метод повышения  $\cos\varphi$  малозагруженных двигателей путем переключения обмоток статора с «треугольника» на «звезду», в результате чего фазовое напряжение снижается в  $\sqrt{3}$  раз.

При малых нагрузках, когда рабочий ток, а вместе с тем мощности полей рассеяния не велики, преобладающее значение в выражении для полной реактивной мощности имеет реактивная мощность главного поля (6.14). В случае значительных нагрузочных моментов превалирующее значение имеет для реактивной мощности полей рассеяния  $Q_p$  (6.13).

В силу влияния насыщения, которое может быть при значительном повышении напряжения, приведенное положение является справедливым лишь для относительно небольших изменений напряжения.

За время разбега расход реактивной энергии больше, чем при номинальной нагрузке в течение того же времени. Это обусловлено тем, что обычно разбег

происходит при повышенной величине тока по сравнению с номинальным значением.

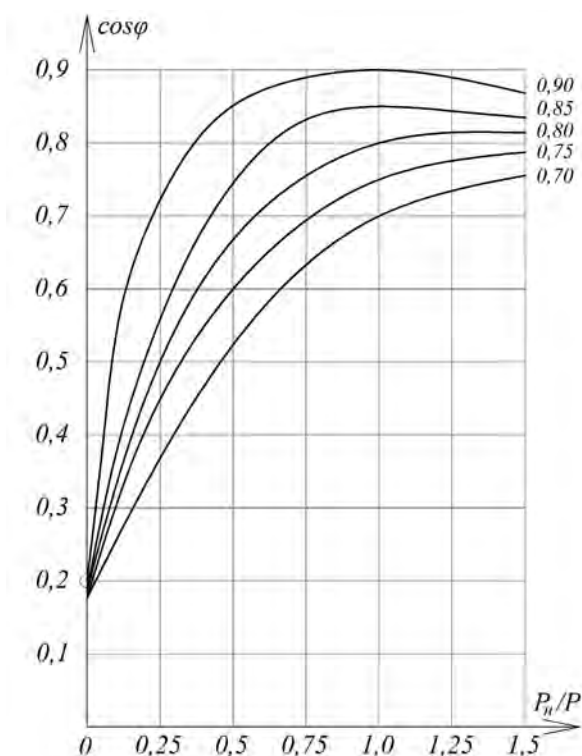


Рис.6.5 Изменение  $\cos \varphi$  асинхронных двигателей в зависимости от нагрузки

Расход реактивной энергии при разбеге может быть определен по выражению:

$$A = \int_0^{t_p} Q dt, \quad (6.16)$$

или

$$A = \int_0^{t_p} Q_\mu dt + \int_0^{t_p} Q_p dt. \quad (6.17)$$

В случае двигателя с фазным ротором, пускаемого с помощью реостата, можно получить, что в течение всего времени разбега

$$Q_\mu = P_0 \sin \varphi_0 = \text{const}. \quad (6.18)$$

Если принять допущения, что

$$I_1 + I_2' = \text{const} \text{ и } x_1 + x_2' = \text{const}, \quad (6.19)$$

то расход реактивной энергии за время разбега:

$$Q = P_0 \sin \varphi_0 t_p + A_{\kappa.o} \frac{x_1 + x_2'}{r_2^1} \cdot \frac{2\mu_n \cdot S_n}{1 + \mu_n \cdot S_n}, \quad (6.20)$$

где  $\mu_n$  — кратность пускового момента;  $P_0$  и  $\sin \varphi_0$  — мощность и синус угла сдвига фаз при холостом ходе.



Расход реактивной энергии за время торможения может быть определен из приближенного выражения:

$$A_{p.m} = m_m t_m P_0 \sin \varphi_0 + 3 A_{к.о} \frac{x_1 + x_2'}{r_2^1}, \quad (6.21)$$

где  $t_m$  – время торможения;  $m_m = 0,25 \dots 0,35$ .

Трансформаторы. Потребляемая трансформаторами реактивная мощность имеет две составляющие: холостого хода или намагничивающую мощность  $Q_\mu$  и реактивную мощность рассеяния  $Q_p$ .

Первая составляющая пропорциональна квадрату напряжения:

$$Q_\mu \equiv B_m^2 \equiv U^2. \quad (6.22)$$

Вторая составляющая может быть представлена следующим соотношением:

$$Q_p = 3 I_2^2 z_k, \quad (6.23)$$

где  $I_2$  – вторичный ток трансформатора, А;  $z_k$  – сопротивление короткого замыкания, Ом.

Следовательно, потребляемая трансформатором реактивная мощность равна

$$Q = Q_\mu + Q_p = Q_\mu + k_z^2 Q_{pn}, \text{ квар}, \quad (6.24)$$

где  $Q_\mu = \frac{i_0 S_n}{100}$  – реактивная мощность холостого хода трансформатора, квар;  $Q_p$  – прирост реактивной мощности трансформатора при данной нагрузке, квар;

$Q_{pn} = \frac{u_k S_n}{100}$  – прирост реактивной мощности трансформатора при номинальной нагрузке, квар;  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;  $i_0$  – величина

тока холостого хода, %;  $u_k$  – величина напряжения короткого замыкания, %;

$k_z = \frac{I}{I_n} = \frac{S}{S_n}$  – коэффициент загрузки трансформатора;  $I$  и  $I_n$  – соответственно нагрузочный и номинальный токи трансформатора;  $S$  – мощность трансформатора при данной нагрузке, кВ·А.

Составляющая реактивной мощности холостого хода трансформатора принимается постоянной, не зависящей от его нагрузки.

Потребляемая трансформатором реактивная мощность зависит от коэффициента нагрузки трансформатора. Поэтому целесообразно определить коэффициент нагрузки трансформатора, который определяется исходя из минимума приведенных активных потерь:

$$k_n = \sqrt{\frac{\Delta P_0 + k_\varphi Q_\mu}{P_{н.нз} + k_\varphi Q_{рн}}}, \quad (6.25)$$

где  $\Delta P_0$  – потери холостого хода в трансформаторе, кВт;  $P_{н.нз}$  – нагрузочные номинальные потери в обмотках трансформатора (потери короткого замыкания), кВт;  $k_\varphi$  – экономический эквивалент, кВт/квар.

Мгновенное значение коэффициента мощности  $\cos \varphi_m$  обычно определяется фазометром.

При отсутствии фазометра для оценки  $\cos \varphi_m$  можно воспользоваться по следующими способами:

а) двумя трехфазными ваттметрами или при наличии одного ваттметра с переключателем измеряются  $P$  и  $Q$  и определяется  $\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{Q}{P}$ , затем по  $\operatorname{tg} \varphi_m$  находится соответствующий ему  $\cos \varphi_m$ ;

б) двумя однофазными ваттметрами измеряется активная мощность и определяется

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{\sqrt{3}(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1}, \quad (6.26)$$

где  $P_1$  – показание ваттметра фазы А;  $P_2$  – показание ваттметра фазы С;

в) с помощью амперметра, вольтметра и трехфазного ваттметра измеряют соответственно ток, напряжение и активную мощность. По формуле находят

$$\cos \varphi_m = \frac{P}{\sqrt{3}UI}, \quad (6.27)$$

где  $I$ ,  $U$ ,  $P$  – действующие значения, тока, напряжения, мощности.

На практике часто пользуются величиной средневзвешенного коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ср.взв}$  электроустановки за сутки, неделю, месяц, квартал или год, которая определяется по показателям счетчиков активной и реактивной энергии за соответствующий промежуток времени из соотношений

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_p}{W_a}, \quad (6.28)$$

где  $W_p$ ,  $W_a$  – расход реактивной и активной энергии в течение выбранного времени.

Тогда величина средневзвешенного коэффициента мощности может быть определена, исходя из следующего соотношения:

$$\cos \varphi_{ср.взв} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{ср.взв}}}. \quad (6.29)$$

Низкий  $\cos \varphi$  потребителя влияет на ток генератора, трансформатора и линейной электропередачи

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}, \text{ А.} \quad (6.30)$$

Из выражения (6.30) следует, что при передаче одной и той же активной мощности, но при различных значениях  $\cos \varphi$  будут иметь место различные значения тока, причем чем меньше  $\cos \varphi$ , тем больше будет величина тока. Большой ток при передаче одной и той же активной мощности вызывает большую перегрузку трансформатора и линии электропередачи.

Неполная загрузка электродвигателя приводит к низкому  $\cos \varphi$ , то есть уменьшению доли использования активного тока и активной мощности и увеличению общего тока (рис. 6.6):

$$\dot{I} = \dot{I}_\mu + \dot{I}_a, \quad (6.31)$$

где  $\dot{I}_\mu$  и  $\dot{I}_a$  – соответственно реактивная и активная составляющие тока.

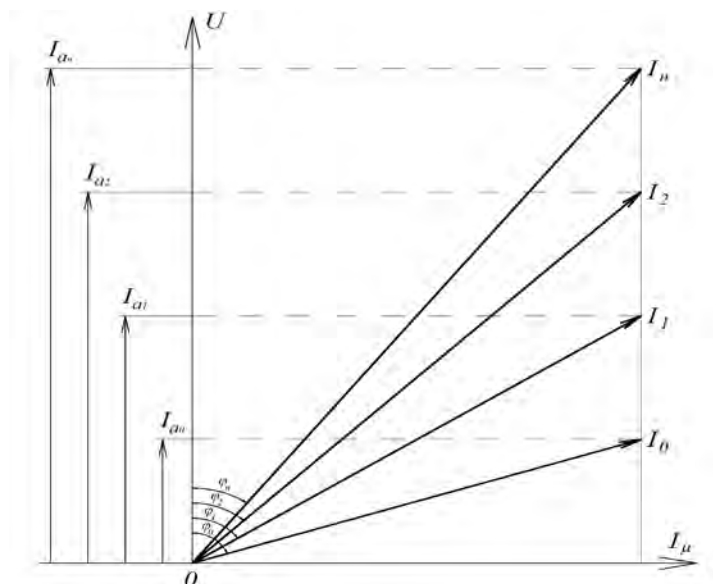


Рис.6.6 Величина активного тока электродвигателя в зависимости от  $\cos \varphi$

Понижение коэффициента мощности косвенно оказывает влияние на КПД первичных двигателей – гидротурбин, дизелей, приводящих в движение генератор.

Мощность приводного двигателя определяется активной составляющей мощности генератора. При номинальных значениях тока, напряжения и коэффициента мощности, мощность генератора будет равна:

$$P = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi_n \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (6.32)$$

Снижение коэффициента мощности, по сравнению его с номинальным значением, приводит к снижению активной мощности генератора, а следова-

тельно, и к недоиспользованию мощности первичного двигателя. Недогрузка приводного двигателя вызывает его работу с низким КПД.

Например, если генератор мощностью 100 кВ·А работает с  $\cos \varphi_n = 0,8$ , то активная составляющая мощности будет равна:

$$P_n = S \cos \varphi_n = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ кВт.}$$

Если этот же генератор работает при  $\cos \varphi = 0,6$ , то активная составляющая мощности составит:

$$P = S \cos \varphi = 100 \cdot 0,6 = 60 \text{ кВт.}$$

Отсюда следует, что с изменением коэффициента мощности первичный двигатель загружается не одинаково, поэтому изменяется его КПД.

Электрические машины и аппараты конструктивно рассчитываются для работы при определенных значениях напряжения и тока. Поэтому их характеризуют не активной мощностью, зависящей от сдвига фаз между напряжением и током, а полной мощностью, представляющей собой произведение действующих значений напряжения и тока, то есть  $S = UI$ .

Низкий  $\cos \varphi$  при передаче одной и той же активной мощности приводит к увеличению полной мощности и удорожанию силовой установки. Например, при активной нагрузке, равной  $P = 100$  кВт и  $\cos \varphi_n = 0,8$ , полная мощность составит:

$$S_n = \frac{P}{\cos \varphi_n} = \frac{100}{0,8} = 125 \text{ кВ·А.}$$

При  $\cos \varphi = 0,4$  и передаче той же активной мощности 100 кВт полная мощность будет равна:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{100}{0,4} = 250 \text{ кВ·А.}$$

Это означает, что при активной мощности 100 кВт и  $\cos \varphi = 0,8$  достаточно установить один трансформатор мощностью 125 кВ·А, в то время как для такой же мощности при  $\cos \varphi = 0,4$  потребуется установка двух трансформаторов мощностью по 125 кВ·А каждый или одного трансформатора мощностью 250 кВ·А.

Большая полная мощность вызывает необходимость увеличения размеров пусковой аппаратуры, предохранителей, измерительных приборов, счетчиков, защитных устройств, что также значительно усложняет и удорожает установку в целом.

Низкий  $\cos \varphi$  вызывает увеличение потерь энергии в проводах, поэтому высокое значение коэффициента мощности весьма желательно с целью уменьшения потерь при передаче энергии по линиям электропередач.

Мощность потерь в сопротивлении проводов приближенно равна:

$$\Delta P = R_{\text{л}} I^2 = \frac{P^2 \cdot R_{\text{л}}}{U^2 \cos^2 \varphi} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (6.33)$$

где  $P$  – передаваемая мощность, кВт;  $R_{\text{л}}$  – сопротивление линии, Ом.

Из (6.33) следует, что потери мощности обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности приемника энергии.

При данной активной мощности приемника ток в линии тем больше, чем меньше значение  $\cos \varphi$ :

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (6.34)$$

Увеличение тока при низком коэффициенте мощности установки связано с необходимостью увеличения сечения проводов и кабелей, что в свою очередь приводит к удорожанию стоимости установки:

$$q = \frac{\rho l \cdot P^2}{\Delta P U^2 \cos^2 \varphi}. \quad (6.35)$$

где  $q$  – сечение проводов, мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина линии, м;  $\rho$  – удельное сопротивление проводов, Ом·мм<sup>2</sup>/м.

При передаче одной и той же активной мощности и при сохранении потерь неизменными сечение изменяется обратно пропорционально квадрату коэффициента мощности. Следовательно, для лучшего использования электрооборудования желательно иметь более высокий коэффициент мощности или меньший сдвиг по фазе тока относительно напряжения. Наилучшее использование оборудования достигается, когда  $\cos \varphi$  близок к единице.

### **Средства компенсации реактивной мощности.**

Для искусственной компенсации реактивной мощности применяются специальные компенсирующие устройства, являющиеся источниками реактивной энергии емкостного характера.

Сущность компенсации реактивной мощности наглядно представлена на рис. 6.7. Рассмотрим схему электрической цепи (рис. 6.7,а). Пусть до компенсации потребитель имел активную мощность  $P$  с током  $I_a$  (отрезок  $OB$ , рис. 6.7,б) и реактивную мощность от индуктивной нагрузки  $Q_l$  с соответствующим током  $I_L$  (отрезок  $BA$ ). Полной мощности  $S_l$  соответствует вектор  $I_n$  (отрезок  $OA$ ). Коэффициент мощности до компенсации  $\cos \varphi_1$ . Векторная диаграмма компенсации представлена на рис. 6.7,в.

После компенсации, то есть после подключения параллельно нагрузке конденсатора  $C$  мощностью  $Q_k$  (ток  $I_C$ ), суммарная реактивная мощность потребителя будет уже  $Q_l - Q_k$  (ток  $I_L - I_C$ ) и соответственно уменьшится угол сдвига

фаз с  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$  и повысится коэффициент мощности с  $\cos \varphi_1$  до  $\cos \varphi_2$ . Полная потребляемая мощность при той же потребляемой активной мощности  $P$  (ток  $I_a$ ) снизится с  $S_1$  (ток  $I_H$ ) до  $S_2$  (ток  $I_2$ ) (отрезок  $OA'$ ). Следовательно, в результате компенсации можно при том же сечении проводов повысить пропускную способность сети при активной мощности.

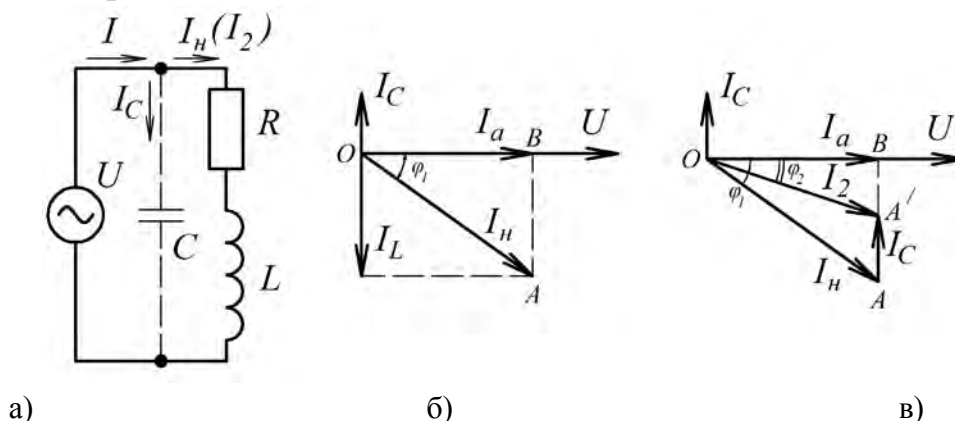


Рис. 6.7 Векторные диаграммы компенсации реактивной мощности

К техническим средствам компенсации реактивной мощности относятся следующие виды компенсирующих устройств: конденсаторные батареи (КБ), синхронные двигатели, вентильные статические источники реактивной мощности (ИРМ).

Среди технических средств компенсации реактивной мощности наибольшее распространение получили конденсаторные батареи – специальные устройства, предназначенные для получения реактивно емкостной мощности. Конденсаторы изготавливают на напряжение 220, 380, 660, 6300 и 10500 В однофазного и трехфазного исполнения для наружной и внутренней установки. КБ разделяют на масляные и совтоловые. При этом, диэлектрическая проницаемость совтола примерно вдвое больше, чем масла. Однако отрицательная допустимая температура составляет  $-10^\circ\text{C}$  для совтоловых конденсаторов, в то время как масляные могут работать при температуре  $-40^\circ\text{C}$ .

Широкое применение конденсаторов для компенсации реактивной мощности объясняется их значительными преимуществами по сравнению с другими компенсационными устройствами (КУ): незначительные удельные потери активной мощности до 0,005 кВт/квар, отсутствие вращающихся частей, простота монтажа и эксплуатации, относительная невысокая стоимость, малая масса, отсутствие шума во время работы, возможность установки около отдельных групп электроприводов и др.

В зависимости от подключения конденсаторной установки возможны следующие виды компенсации:

- индивидуальная или постоянная компенсация, при которой индуктивная реактивная мощность компенсируется непосредственно в месте ее потребления,

что ведет к разгрузке подводящих проводов (рис. 6.8,а). Применяется для отдельных, работающих в продолжительном режиме, потребителей с постоянной или относительно большой мощностью (двигатели, трансформаторы, сварочные аппараты и др.);

- групповая компенсация, в которой аналогично индивидуальной компенсации для нескольких одновременно работающих индуктивных потребителей подключается общий постоянный конденсатор (рис. 6.8,б). Применяется для находящихся вблизи друг от друга электродвигателей;
- централизованная компенсация, при которой определенное число конденсаторов подключается к главному или групповому распределительному шкафу (рис. 6.8,в). Такую компенсацию применяют, обычно, в больших электрических системах с переменной нагрузкой. Управление такой конденсаторной установкой выполняет регулятор-контроллер, который постоянно анализирует потребление реактивной мощности из сети. Такие регуляторы включают и отключают конденсаторы, с помощью которых компенсируется мгновенная реактивная мощность общей нагрузки и, таким образом, уменьшается суммарная мощность, потребляемая от сети.

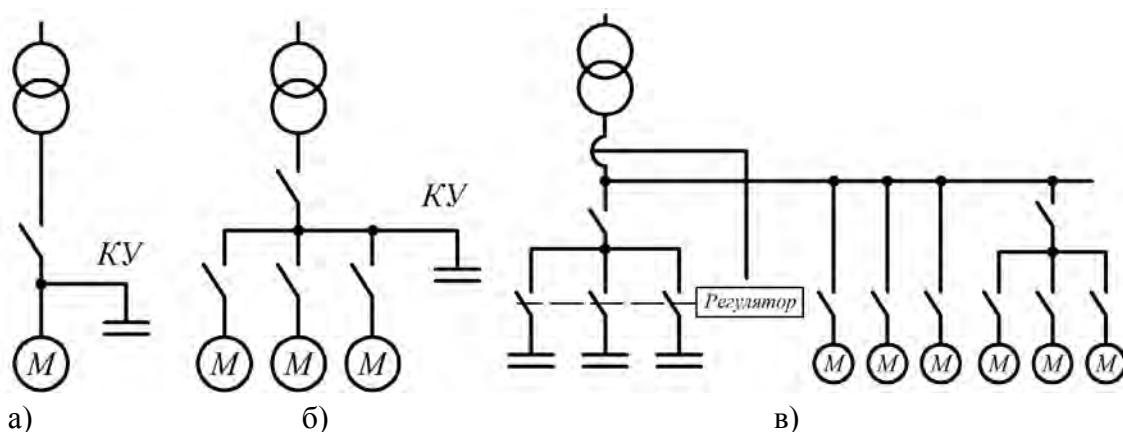


Рис. 6.8 Виды компенсации реактивной мощности: индивидуальная (а), групповая (б) и централизованная (в) компенсации

Установка компенсации реактивной мощности состоит из определенного числа конденсаторных ветвей, которые в своем построении и ступенях подбираются исходя из особенностей каждой конкретной электросети и ее потребителей реактивной мощности.

Применение автоматических установок компенсации реактивной мощности позволяет решить ряд проблем:

- снизить загрузку силовых трансформаторов;
- обеспечить питание потребителя электроэнергии по кабелю с меньшим сечением, не допуская перегрева изоляции;

- за счет частичной токовой разгрузки силовых трансформаторов и питающих кабелей подключить дополнительную нагрузку;
- избежать глубокой «просадки» напряжения на линиях электроснабжения удаленных потребителей (водозаборные скважины, стройплощадки, летние дойки и др.);
- максимально использовать мощность автономных дизель-генераторов;
- облегчить пуск и работу электродвигателей;
- исключается генерация реактивной мощности в сеть;
- исключается появление в сети перенапряжения и др.

Установки компенсации изготавливаются из отдельных, расположенных в металлических шкафах, силовых компенсационных модулей, конструкция которых обеспечивает взаимозаменяемость идентичных элементов установки. Сборка и комплектация установок компенсации реактивной мощности производится на предприятии-изготовителе, а на месте их размещения – только монтаж и подключение к потребителю.

Другой вид компенсирующих устройств – синхронные двигатели. Из [5] известно, что при увеличении тока возбуждения выше номинального значения синхронные двигатели (СД) могут вырабатывать реактивную мощность, которую можно использовать для компенсации. Главным отличием СД от асинхронного двигателя является то, что магнитное поле, необходимое для вращения синхронного двигателя, создается, в основном, от отдельного источника постоянного тока – возбuditеля. Вследствие этого СД в нормальном режиме ( $\cos\varphi=1$ ) почти не потребляет из сети реактивную мощность, необходимую для создания главного магнитного потока, а в режиме перевозбуждения, то есть при работе с опережающим коэффициентом мощности, может генерировать емкостную мощность в сеть.

Разновидностью СД являются синхронные компенсаторы СК, которые представляют собой синхронный двигатель облегченной конструкции без нагрузки на валу.

В связи с этим компенсаторы, как и служащие для этих же целей батареи конденсаторов, устанавливаемые на потребительских подстанциях, называют также генераторами реактивной мощности. Однако в период спада потребительских нагрузок (например, ночью) нередко возникает необходимость работы синхронных компенсаторов в недовозбужденном режиме, когда они потребляют из сети индуктивный ток и реактивную мощность, так как в этих случаях напряжение сети стремится возрасти и для поддержания его на нормальном уровне необходимо загрузить сеть индуктивными токами, вызывающими в ней дополнительные падения напряжения. Для этого каждый синхронный компенсатор снабжается автоматическим регулятором возбуждения или напряжения,



который регулирует величину его тока возбуждения так, что напряжение на зажимах компенсатора остается постоянным.

Для эффективного использования компенсирующих установок в условиях эксплуатации их оборудуют устройствами автоматического или ручного управления, позволяющими полностью или частично регулировать мощность при наименьших и наибольших нагрузок в энергосистеме. Таким способом улучшается режим работы системы электроснабжения, исключается перекомпенсация, которая может вызвать повышение напряжения в сети и увеличить потери электроэнергии.

Целесообразно использовать возможности автоматического регулирования возбуждения имеющихся на предприятии синхронных двигателей. Устройство автоматического регулирования возбуждения входит в конструкцию СД и позволяет двигателю работать как с перевозбуждением, генерируя реактивную мощность в сеть в часы максимума нагрузок, так и с недовозбуждением, в период которого СД потребляет из сети реактивную мощность.

Конденсаторные батареи (КБ) мощностью более 150 квар должны быть снабжены регуляторами реактивной мощности. Для этой цели КБ секционируется, обеспечивая ступенчатое регулирование.

Одноступенчатое регулирование мощности КБ, при котором вся мощность конденсаторной батареи включается и отключается в определенное время суток в соответствии с графиком нагрузок или при определенном уровне напряжения в сети, выполняется проще и используется при равномерном графике потребления реактивной мощности.

На предприятиях, имеющих неравномерные графики потребления реактивной мощности, применяется многоступенчатое регулирование, при котором становится возможным включение и отключение различного числа секций КБ.

Выбор того или иного способа автоматического регулирования реактивной мощности, параметра и схемы регулирования определяется характером технологического процесса и изменением реактивных нагрузок и др. Регулирование может быть по времени суток, уровню напряжения сети, реактивным токам в сети и т.д.

На промышленных и сельскохозяйственных предприятиях чаще применяется автоматическое регулирование по времени суток и уровню напряжения. При регулировании мощности КБ используются регуляторы (контроллеры) компенсации реактивной мощности, например, серии *LSB*, *LSA*, *BSA* и др. [22].

Регулирование мощности КБ по напряжению применяется в тех случаях, когда требуется одновременное регулирование реактивной мощности и напряжения, например, при питании электропривода от нерегулируемого трансфор-

матора. В этом случае с увеличением реактивной мощности снижается напряжение и наоборот.

Широкое распространение получило комбинированное регулирование – по времени суток с коррекцией по напряжению. Такие схемы регулирования могут быть применены для одно- и многоступенчатого регулирования. При этом для исключения повторного включения КБ в заряженном состоянии используется задержка по времени, необходимое для полной разрядки конденсаторов.

Для обеспечения безопасности обслуживания отключенных конденсаторов, а так же во избежание включения заряженных КБ требуется применение специальных разрядных резисторов (РС), присоединенных параллельно конденсаторам. При этом включение РС должно производиться без промежуточных разъединителей, рубильников или предохранителей.

Величина РС определяется по формуле:

$$R_{раз} = k_p \frac{U_{\phi}^2}{Q_{КБ}} \cdot 10^6, \text{ Ом}, \quad (6.36)$$

где  $R_{раз}$  – величина сопротивления разрядного резистора;  $k_p$  – поправочный коэффициент,  $k_p = 1,5 \dots 2,5$ ;  $Q_{КБ}$  – реактивная мощность конденсаторной батареи.

Разрядные резисторы должны удовлетворять следующим требованиям:

- быстро, порядка одной минуты, автоматически снижать напряжение на зажимах заряженного конденсатора;
- иметь незначительные потери активной мощности (1 Вт на 1 квар) во время нормальной работы конденсаторов.

### **6.3. Проверка электрической сети 0,38 кВ на возможность запуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором**

Возможность запуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от сети 0,38 кВ проверяют по неравенству:

$$M_n \geq \eta_{зан} \frac{M_{с.мех}}{m'_n}, \quad (6.37)$$

где  $M_n$  – номинальный момент электродвигателя, Н·м;  $\eta_{зан}$  – коэффициент запаса, учитывающий несовпадение действительных характеристик двигателя с каталожными данными и погрешности расчета ( $\eta_{зан} = 1,2 \dots 1,3$ );  $M_{с.мех}$  – момент сопротивления механизма;  $m'_n$  – кратность пускового момента двигателя с учетом снижения напряжения при пуске ( $m'_n = U_n^* \cdot m_n$ );  $m_n$  – кратность пускового момента двигателя при номинальном напряжении;  $U_n^* = U_n / U_n$  – напряжение на зажимах дви-

гателя при пуске в относительных единицах;  $U_n$  – напряжение на зажимах двигателя при пуске, В;  $U_n$  – номинальное напряжение сети, В.

Напряжение на зажимах электродвигателя при пуске в относительных единицах

$$U_n^* = \frac{U_m^*}{1 + \Delta U_n^*}, \quad (6.38)$$

где  $U_m^* = U_m / U_n$  – напряжение в точке присоединения электродвигателя до его пуска в относительных единицах;  $\Delta U_n^*$  – потери напряжения в электрической сети при пуске электродвигателя в относительных единицах:

$$\Delta U_n^* = \frac{\sqrt{3 \cdot I_n (R_{\text{вн}} \cdot \cos \varphi_n + X_{\text{вн}} \cdot \sin \varphi_n)}}{U_n}, \quad (6.39)$$

где  $R_{\text{вн}} = R_l + R_T$  – суммарное активное сопротивление линии и трансформатора, Ом;  $X_{\text{вн}} = X_l + X_T$  – суммарное индуктивное сопротивление линии и трансформатора, Ом;  $\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности двигателя при пуске;  $I_n$  – пусковой ток электродвигателя, А.

Коэффициент мощности двигателя при пуске определяется по формуле:

$$\cos \varphi_n = \frac{2 \cos \varphi_n \cdot m_n}{k_i}, \quad (6.40)$$

где  $\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности электродвигателя;  $k_i$  – Кратность пускового тока электродвигателя.

Активное и индуктивное сопротивления трансформатора определяют по выражениям:

$$R_T = \frac{\Delta P_{\text{мн}} U_n^2}{S_{\text{нт}}^2}, \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (6.41)$$

где  $\Delta P_{\text{мн}}$  – потери мощности в меди трансформатора [2-5];  $S_{\text{нт}}$  – номинальная мощность трансформатора;  $Z_T$  – полное сопротивление трансформатора.

Устойчивость работы асинхронного электродвигателя при пуске соседнего двигателя проверяют по (6.37) или в относительных единицах

$$1 \geq \eta_{\text{зан}} \frac{M_{\text{с.мех}}^*}{m'_{\text{max}}}, \quad (6.42)$$

где  $m'_{\text{max}}$  – кратность критического максимального момента двигателя с учетом снижения напряжения при пуске соседнего двигателя ( $m'_{\text{max}} = U^2 \cdot m_{\text{max}}$ );  $m_{\text{max}}$  – кратность критического момента двигателя при номинальном напряжении.

#### 6.4. Определение допустимых сопротивлений заземляющих устройств

В соответствии с [24; 25] для безопасной работы должны быть рассчитаны заземляющие устройства ТП, выбраны повторное заземление на отходящих линиях и зануление электроустановок, а также проверено защитное отключение при повреждении электроустановок.

Согласно [24] сопротивление заземляющего устройства определяется следующими условиями.

Для электроустановок напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью

$$\gamma_z = \frac{250}{I_z}, \quad (6.43)$$

где  $I_z$  – расчетный ток замыкания на землю, который можно приближенно определить по формуле

$$\gamma_z = \frac{U(l_g + 0,35l_k)}{350}, \quad (6.44)$$

где  $U_n$  – линейное номинальное напряжение, кВ;  $l_g$  и  $l_k$  – соответственно протяженность электрически связанных воздушных и кабельных линий, км.

В качестве расчетного тока замыкания на землю в установках с изолированной нейтралью можно принимать ток срабатывания релейной защиты  $I_{сз}$  при многофазных коротких замыканиях или ток плавкой вставки  $I_g$  предохранителя при условии, что обеспечивается отключение замыкания на землю.

Для электроустановок напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью с учетом естественных заземлений сопротивление  $\gamma_z$  должно быть не более 0,5 Ом.

Для электроустановок напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью  $\gamma_z$  должно быть не более 4 Ом при суммарной мощности генераторов или трансформаторов более 100 кВ·А и не более 10 Ом при суммарной мощности 100 кВ·А и менее.

Для электроустановок с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединяют нейтраль генераторов и трансформаторов, должно быть не более: при напряжении 660/380 В – 2 Ом, при напряжении 380/220 В – 4 Ом, при напряжении 220/127 В – 8 Ом.

Эти сопротивления должны быть обеспечены с учетом использования естественных заземлений, а также повторных заземлений нулевого провода воздушных линий напряжением до 1000 В при числе отходящих линий не менее двух. При этом сопротивление искусственного заземления, к которому присоединяются нейтраль генераторов, не должно быть более 15 Ом при на-

пряжении 660/380 В, 30 Ом при напряжении 380/220 В и 60 Ом при 220/127 В, если меньшее сопротивление не требуется по условиям грозозащиты или к этому заземлению не присоединяется электрооборудование напряжением выше 1000 В.

### 6.5 Расчет заземляющих устройств

В установках до 1000 В допустимое значение сопротивления заземляющего контура [24].

$$R_{з\partial} = \frac{125}{I_3}, \quad (6.45)$$

где  $R_{з\partial}$  – допустимое сопротивление заземлителя, Ом;  $I_3$  – ток замыкания на землю, А.

Необходимое количество электродов, вертикально забиваемых в землю, определяют по выражению

$$n_э = \frac{R_{cm}}{R_{з\partial}} \quad (6.46)$$

где  $n_э$  – число вертикальных электродов с учетом коэффициента экранирования;  $R_{cm}$  – сопротивление одного электрода с учетом коэффициента экранирования.

Сопротивление  $R_{cm}$  определяют по формуле

$$R_{cm} = \frac{\rho}{\eta_3 \cdot l \cdot 2\pi} \ln \frac{4l}{d}, \quad (6.47)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м;  $\eta_3$  – коэффициент использования заземлителей;  $l$  и  $d$  – длина и диаметр стержня, м.

Если в качестве электродов применяется угловая сталь, то в этом случае принимают  $d = 0,95 b$  ( $b$  – ширина полки уголка).

Сопротивление соединительной полосы

$$R_{cn} = \frac{\rho}{\eta \cdot l \cdot 2\pi} \ln \frac{4l^2}{b \cdot h}, \quad (6.48)$$

где  $\eta$  – коэффициент взаимозэкранирования полосы;  $l$  – длина всей полосы, м;  $b$  – ширина полосы, м;  $h$  – глубина заделки полосы, м.

В зависимости от почвенно-климатических условий удельное сопротивление грунта выбирают из табл. 6.6.

Расчетное сопротивление контура

$$R_k = \frac{\frac{1}{n_э} R_{cm} R_n}{\frac{1}{n} R_{cm} + R_n} \leq P_{з\partial} \quad (6.49)$$

Табл. 6.6 – Удельное сопротивление различных грунтов

Наименование грунта	Удельное сопротивление грунта $\rho$ , Ом·м	Наименование Грунта или среды	Удельное сопротивление грунта $\rho$ , Ом·м
Каменистая почва	4000	Глина	40
Песок	700	Торф	20
Супесь	300	Вода равнинной реки	50
Суглинок и смесь глины с гравием	100	Морская вода	1

При  $R_K \leq 4$  Ом значение повторного заземления  $R_{нов}$  не должно превышать 10 Ом; при  $R_K \leq 10$  Ом  $R_{нов} \leq 30$  Ом при числе повторных заземлений не менее 3 на данной линии [24].

При выполнении зануления в целях надежного срабатывания защитной аппаратуры необходимо соблюдать следующие условия:

$I^{(I)} \leq 3I_{нр}$  – при использовании автоматов с тепловыми расцепителями.

$I^{(I)} \leq (1,25 \dots 1,4)I_{нв}$  – при использовании автоматов без тепловых расцепителей в сочетании с предохранителями;

$I^{(I)}$  – однофазный ток металлического короткого замыкания в конце линии;

$I_{нр}$ ;  $I_{нв}$  – номинальный ток теплового расцепителя или плавкой вставки предохранителя.

Во взрывоопасных помещениях необходимо соблюдать следующие условия:

$I^{(I)} \leq 4I_{нв}$  – при использовании предохранителей;

$I^{(I)} \leq 6I_{нв}$  – при использовании автоматов с тепловыми разделителями.

Значение  $I^{(I)}$  может быть оценено по приближенной формуле:

$$I^{(I)} = \frac{U_\phi}{Z_n + Z_m / 3}, \quad (6.50)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение, В;  $Z_n$  – полное сопротивление петли из фазного и нулевого проводов, Ом,

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}, \quad R_n = l \cdot r_0; \quad X_n = l \cdot X_o, \quad (6.51)$$

$l$  – длина провода, км;  $r_0$  и  $X_o$  – активное и внешнее индуктивное удельное сопротивление провода, Ом/км;  $Z_m$  – сопротивление трансформатора подстанции, Ом, [5; 7]. Если перечисленные условия не соблюдаются, то необходимо применять защитные отключающие устройства (ЗОУ) в сочетании с автоматами, оборудованными нулевыми или независимыми расцепителями.

## 6.6 Защита от прямых ударов молнии

Для защиты от прямых ударов молнии служат стержневые и тросовые молниеотводы [24; 25]. Стержневые молниеотводы обычно применяют для защиты сосредоточенных объектов (открытые распределительного устройства станций и подстанций, отдельные сооружения, производственные и животноводческие помещения и т.д.).

Защитные свойства стержневого молниеотвода (рис. 6.9) характеризуются зоной защиты, под которой понимают пространство вокруг молниеотвода, где поражение защищаемого объекта атмосферным разрядом маловероятно. Радиус защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой до 30 м определяют по формуле

$$r_x = 1,6h \frac{h - h_x}{h + h_x}, \quad (6.52)$$

где  $h$  – полная высота молниеотвода;  $h_x$  – высота защищаемого объекта.

Защитное действие одиночного молниеотвода характеризуется коэффициентом защиты  $k_x$ :

$$k_x = \lg \alpha = \frac{r_x}{h_a} \quad (6.53)$$

где  $h_a$  – активная высота молниеотвода,  $h_a = h - h_x$ , отсюда

$$k_x = \frac{1,6}{1 + h_x / h}, \quad (6.54)$$

Предельное значение  $k_x = 1,6$  – при высоте молниеотвода меньше 30 м, а наибольший радиус защиты  $r_x = 1,6h_a$ .

Если высота стержневого молниеотвода более 30 м, то

$$\tau_x = \frac{8,8\sqrt{h(h - h_x)}}{h + h_x}, \quad (6.55)$$

$$\tau_x = \frac{8,8}{(1 + h_x / h)\sqrt{h}}, \quad (6.56)$$

Для двойного стержневого молниеотвода (рис. 6.10.) значения  $r_x$  и  $k_x$  во внешних областях зон защиты определяют так же, как и для одиночного молниеотвода.

Расчетную ширину внутренней зоны защиты  $2b_x$  на высоте  $h_x$  находят по формуле

$$2b_x = \frac{7h_a - a}{14h_a - a}, \quad (6.57)$$

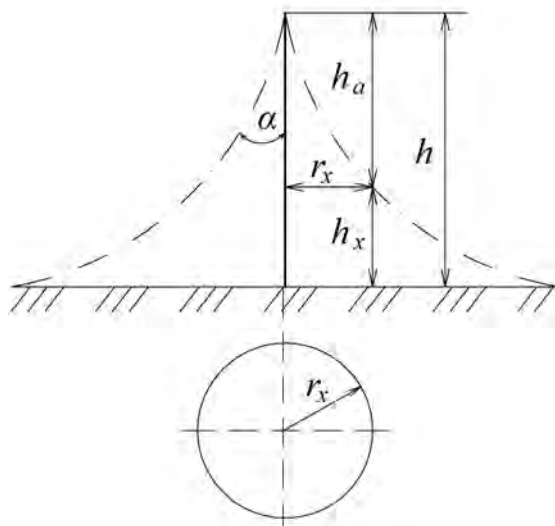


Рис.6.9 Защитная зона одиночного стержневого молниеотвода

Зону защиты для группы, состоящей из трех или четырех молниеотводов, определяют следующим образом:

а) при  $h \leq 30$  м  $D \leq 8 h_a$ ;      б) при  $h \geq 30$  м  $D \leq \frac{5,5}{\sqrt{h}} h_a - 8$ ,

где  $D$  – диаметр окружности, проходящей через вершины треугольника, образованного тремя молниеотводами, или диагональ четырехугольника образованного четырьмя молниеотводами.

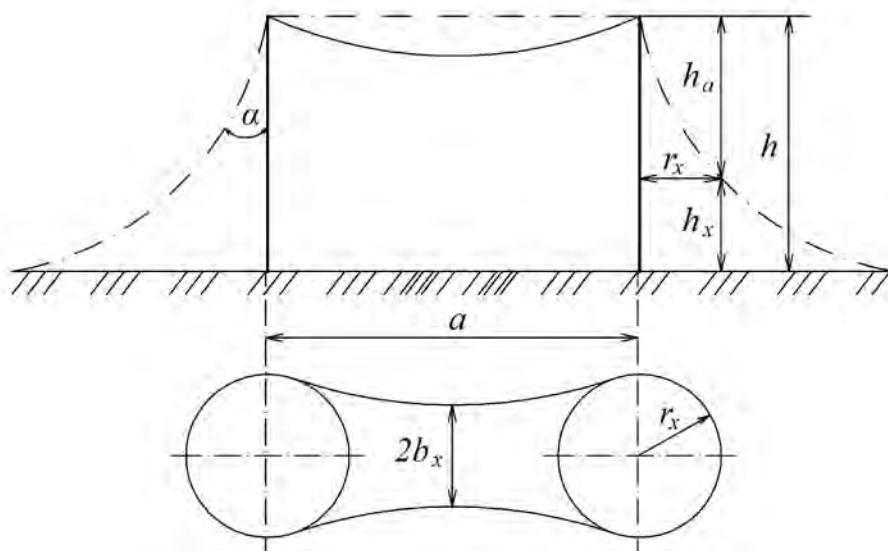


Рис.6.10 Защитная зона двойного стержневого молниеотвода

Внешний радиус защиты  $r_x$  в этом случае определяют так же, как и для одиночного молниеотвода, а расчетную ширину внутренней зоны защиты – по формуле (6.57) или по специальным кривым.



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В учебном пособии авторами сделана попытка обобщить излагаемый в ряде общепрофессиональных и специальных учебных дисциплин (Автоматика, Автоматизированный электропривод, Светотехника и электротехнологии, Проектирование систем электрификации и др.) материал, который необходим студентам электротехнических специальностей или направлений подготовки для проведения самостоятельной работы, в частности, при выполнении курсовых работ, проектов, выпускных квалификационных работ (ВКР).

Следует отметить, что в образовательных учреждениях различной ведомственной принадлежности учебные планы подготовки и рабочие программы схожих по названию и содержанию учебных дисциплин, как правило, существенно отличаются объемом учебных часов лекционных, практических, лабораторных занятий, наличием-отсутствием курсовых работ или проектов в разделе самостоятельной работы и др. Возможно, это вызовет некоторые затруднения у обучаемых и потребует внимательного и творческого подхода к освоению представленного материала.

Авторы полагают, что предлагаемые методики и примеры окажут пользу студентам при выполнении всех видов самостоятельной работы и намерены продолжить работу по совершенствованию пособия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфенбейль С.П. Термины и определения в агроинженерии. – М.: Колос, 2008. – 350 с.
2. Рекус Г.Г. Электрооборудование производств: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2005. – 709 с.
3. Коломиец А.П., Кондратьева Н.П. Электропривод и электрооборудование. – М.: Колос, 2006. – 328 с.
4. Шичков Л.П. Электрический привод. – М.: Колос, 2006. – 179 с.
5. Епифанов А.П. Электропривод в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 2009. – 320 с.
6. Баранов Л.А., Захаров В.А. Светотехника и электротехнология. – М.: Колос, 2006. – 344 с.
7. Змеев А.Я. Проектирование систем электрификации. – Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2009. – 148 с.
8. Баев В.И. практикум по электрическому освещению и облучению. – М.: Колос, 2008. – 360 с.
9. Любайкин С.Н., Львицын А.В. Электрическое освещение и облучение в сельскохозяйственном производстве. – Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2009. – 128 с.
10. Любайкин С.Н., Львицын А.В. Электротехнологические установки в сельском хозяйстве. – Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2005. – 148 с.
11. Бородин И.Ф., Судник Ю.А. Автоматизация технологических процессов. – М.: Колос, 2005. – 344 с.
12. Усанов К.М., Змеев А.Я., Каргин В.А., Волгин А.В. Автоматика. – Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2008. – 136 с.
13. Практикум по автоматике. Математическое моделирование систем автоматического регулирования / под ред. Карташова Б.А. – М.: Колос, 2009. – 326 с.
14. Филимонова Т.А., Змеев А.В. Электропривод. – Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2008. – 152 с.
15. Яковлев Б.Б. Теория автоматического управления: Учебник, 2-е изд-е. – М.: Агропромиздат, 2007. – 567 с.
16. Любайкин С.Н., Змеев А.Я. Практикум по электроприводу и электрооборудованию. – Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2009. – 146 с.
17. Усанов К.М., Мошкин В.И., Каргин В.А., Волгин А.В. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: Монография. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 202 с.
18. Усанов К.М., Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: Монография. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – 284 с.

19. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы.– Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
20. Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Вдовина О.В. Взаимные соотношения в мощных импульсных электромагнитных машинах / Вестник Саратовского государственного технического университета, №3(47), вып.2.– Саратов, 2010. – С.65-71.
21. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 6.0. ООО «Тор» г. Санкт-Петербург. (<http://elcut.ru>).
22. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004. – 911 с.
23. Производство светодиодных светильников [Текст] : каталог / Уральский завод электротехнологий. – Екатеринбург: Уральское книжное изд-во, 2012. – 52 с.
24. Правила устройства электроустановок [Текст]. – 6-е и 7-е изд. – Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2007. – 853 с
25. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок [Текст]. – Новосибирск: Изд-во «Норматика», 2014. – 96 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение П1

#### Светильники для ламп с цоколем E27 для общественных зданий

Тип	Число ламп	Мощность ламп, Вт	Степень защиты	Светотехнические характеристики					Способ установки
				Класс светораспреде- ления*	Обозначение КСС*	КПД, %			
						общий	в верхней полусфере	в нижней полусфере	
ПЛК	1	150	IP20	П	Г-1	60	-	-	П
ПП07	1	100	2'0	Н	Д-1	76	26	50	П
НПО01	2	60	2'0	Н	Д-2	64	10	54	П
НПО16	1	60	IP53	Р	Д-1	65	30	35	П
НПО18	2	40	2'0	Н	Д-1	65	15	50	П
НПО18	2	60	IP20	Н	Г-1	65	15	50	П
НПО18	1	60	2'0	Н	Д-1	65	15	50	П
НПО18	1	100	2'0	Н	Д-1	65	15	50	П
НПО18	1	150	2'0	Н	Л	70	15	55	П
НПО20	1	100	2'0	Р	М	70	30	40	П
НБО06	1	100	2'0	Р	М	70	30	40	Б
НПО30	1	60; 100	2'0	Н	Д-1	64	10	54	П
ПРК300	1	300	IP20	О	Д-1	78	48	30	С
СК300	1	300	IP20	О	Д-1	80	56	24	С
НСО02	1	150; 100	IP20	Н	Д-2	75	20	55	С
НСО02	1	150	2'0	Р	М	67	32	35	С
СВП	1	200; 500	IP20	П	Г-3	75	-	-	В
НВО04	1	200; 300	IP20	П	Г-3	55	-	-	В
НВО07	1	200; 300	2'0	П	Г-1	40	-	-	В
НВО07	1	300	IP20	П	Г-1	45	-	-	В
НВО07	1	60	2'0	Р	М	70	30	40	Б

\* - при использовании с лампой накаливания

## Светильники для ламп с цоколем E27, E40 для производственных помещений

Тип	Мощность ламп, Вт	Степень защиты	Светотехнические характеристики				Способ установки
			Класс светорас- пределения	Обозначение КСС	КПД, %		
					общий	в нижней полусфере	
С, НСП17	200; 500	IP20	П	-	80	80	С
ГС, НСП17	500; 1000	IP20	П	Г-4	80	80	С
ГК, НСП17	1000	IP20	П	К-1	80	80	С
ГСУ, НСП17	500; 1000	5'3	П	Г-4	80	80	С
ГКУ, НСП17	1000	5'3	П	К-1	80	80	С
УПМ15, НСП22	500	5'3	П	Д-2	75	75	С
УП24, НСП22	500	IP63	П	Г-1	67	67	С
УПД, НСП20	500; 1000	5'0	П	Г-1	75	75	С
УПС, НСП19	500; 1000	5'0	-	-	75	75	С
ППД, НСП11	100; 200	IP63	П	Д-2	67	67	С
ППД	500	IP60	Н	Д-1	68	60	С
ППР, НСП11	100; 200	IP60	Р	М	77	47	С
ППД-2	500	IP63	П	Г-2	67	67	С
НСР01	100; 200	IP53	Р	М	75	45	С
НСР09	100; 200	IP50	Р	М	75	45	С
НСР01 «Астра», НСР21 «Бирюза»	100; 200	5'3	П	Д-2	71	71	С
НСР01 «Астра», НСР21	100; 200	5'3	Ко- сосвет	-	71	71	С
НСР01 «Астра»	200	IP53	П	Г-2	60	60	С
НСР01, НСП02	100	IP54	Р	М	70	42	С
НСР03	60	IP54	Р	М	75	45	С
НСР04	200	IP22	Р	М	75	45	С
НСР11	500	IP60	Н	Д-1	67	53	С
НСР11	500	IP60	Р	М	77	47	С
ПСХ	60	IP54	Н	Д-1	65	50	П, Б
НПЛ03	100	IP54	П	Д-1	50	50	П, Б
Н4БИ150	150	Повы- шенной надежно- сти про- тив взры- ва	П	Г-1	55	55	С
Н4Би150	150		Р	М	70	40	С
Н4БН300М	300		П	Г-2	50	50	С
Н4БН300М	300		Р	М	80	45	С
В4А60	60	Взрыво- безопас- ный	П	Д-1	50	50	П
В3Г100А	100		П	Д-1	45	45	П
В3Г200АМ	200		П	Д-2	60	60	С
В3Г200АМ	200		Н	Д-1	75	55	С
В3Г/В4А-200АМ	200		П	Д-2	55	55	С
В3Г/В4А-200АМ	200		Н	Д-1	75	55	С

\* - при использовании с лампой накаливания

## Светильники с люминесцентными лампами для общественных зданий

Тип	Число ламп	Мощность ламп, Вт	Степень защиты	Светотехнические характеристики				Способ установки
				Класс светорас- пределения	Обозначе- ние КСС	КПД, %		
						общий	в нижней полу- сфере	
ЛПО30	1	20; 40; 65	IP20	Р	Д-1	80	60	П, Б
ЛПО30	1	20; 40; 65	2'0	Н	Д-1	65	48	П, Б
ЛПО30	1	20; 40; 65	IP20	П	-	70	70	П
ЛПО30	2	20; 40; 65	2'0	Н	Д-2	65	48	П
ЛПО30	2	20; 40; 65	IP20	П	Г-1	60	60	П
ЛСО02	2	40	IP20	Р	Г-2	70	30	С
ЛСО02	4	40	IP20	Р	Г-2	70	30	С
ШОД	2	40; 80	IP20	Р	Г-1	85	42	С
ЛВО01	2	20; 40; 65	2'0	П	Д-2	55	55	В
ЛВО01	4	20; 40; 65	2'0	П	Г-1	50	50	В
ЛВО01	2; 4	40	2'0	Н	Д-1	65	52	П
ЛВО03	1	20; 40	IP20	П	Г-1	65	65	П, Б
ЛВО03	1	20; 40	2'0	Н	Д-1	65	48	П,Б
ЛВО03	1	20; 40	IP20	Р	Д-1	80	60	П, Б
ЛВО02	2	20; 40; 65	2'0	П	Г-1	52	52	П
ЛВО02	4	20; 40; 65	2'0	П	Г-2	50	50	П
ЛВО02	1	20; 40	2'0	Н	Д-1	57	48	П
ЛВО09	1	40	IP20	Р	Д-1	80	80	П
ЛПО12	1	20; 40	IP20	П	-	70	70	Б, П

Приложение П4

Светильники с люминисцентными лампами для производственных помещений

Тип прожектора	Тип лампы	Максимальная сила света, ккд	КПД, %	Угол рассеяния, град		Наименьшая высота установки, м
				в горизонтальной плоскости	в вертикальной плоскости	
ПСМ-30-1	Г220-200	33	33	16	16	10
ПСМ-40-1	Г220-500	70	35	19	19	15
ПСМ-40-2	ПЖ-220-500	280	35	9	9	30
ПСМ-50-1	Г220-1000	120	35	21	21	20
	ДРЛ-400	19,5	-	74	74	8
	ДРЛ-700	52	-	74	74	13
ПЗР-250	ДРЛ-250	11	-	60	60	6
ПЗР-400	ДРЛ-400	19	-	60	60	8
ПЗР-25	Г220-200	16	27	16	12	7
ПЗР-35	Г220-500	50	27	21	19	13
ПЗР-45	ДРЛ-400	14	-	84	90	7
	ДРЛ-700	30	-	100	100	10
	Г220-1000	130	27	26	24	21
	Г220-1500	225	27	25	26	27
ПКН-1000-1	КГ220-1000-5	52	60	92	18	13
ПКН-1000-2	КГ220-1000-5	30,6	60	90	40	10
ПКН-1500-1	Г220-1500	90	60	92	20	17
ПКН-1500-2	Г220-1500	45	60	106	54	12
ПКН-2000-1	КГ220-2000-4	125	60	104	16	20
ПКН-2000-2	КГ220-2000-4	67,5	60	116	44	15

## Технические характеристики прожекторов

Тип	Число ламп	Мощность ламп, Вт	Степень защиты	Светотехнические характеристики			Способ установки
				Класс светораспре- деления	Обозначение кривой силы света	КПД, %	
ОДР	2	40	IP20	П	Г-1	70	С
ЛДОР	2	40; 80	IP20	Н	Д-2	75	С
ЛСП02	2	40; 65; 80	IP20	П	Д-2	70	С
ЛСП02	2	40; 65; 80	IP20	П	Г-1	60	С
ЛСП13	2	40; 65	IP20	П	Л	75	С
ЛСП13	2	40; 65	IP20	П	Г-2	75	С
ПВЛМ	2	40; 80	5'0	Н	Д-2	75	С, П
ПВЛМ	2	40; 80	5'0	П	Г-1	65	С, П
ПВЛМ	2	40; 80	5'0	Н	Д-2	70	С, П
ПВЛМ	2	40; 80	5'0	Н	Д-1	85	С, П
ПВЛМ	2	40	Для сельскохозяйственных помещений				
ПВЛМ	1	40					
ПВЛМ-Р	2	40					
ПВЛМ	1	80	5'0	Н	Д-1	85	С, П
ПВЛМ	2	40; 80	5'0	Н	-	65	С, П
ЛСП18	1	40	5'0	Н	Д-1	65	С, П
ПВЛ1, ЛСП16	2	40	IP54	Н	Д-1	60	С
ПВЛП	2	40	IP54	Н	Д-1	65	С
ЛСП14	2	40	IP54	Н	Д-1	65	С



Значения удельной мощности общего равномерного освещения светильниками с люминесцентными лампами ( $\rho_{\text{п}}=50\%$ ,  $\rho_{\text{с}}=30\%$ ,  $\rho_{\text{р.п.}}=10\%$ ,  $\kappa_3=1,3$ ,  $z=1,1$ ,  $E=100$  лк)

$H_p$	Площадь помещения, м <sup>2</sup>	Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup> , для групп светильников и типов ламп							
		ЛБ-40, 65	ЛХБ-40, 65; ЛБ-80; ЛД-40; ЛТБ-40, 65	ЛХБ-80; ЛДЦ-40; ЛД- 65; ЛТБ-80;	ЛД-80; ЛДЦ- 65; 80	ЛБ-40, 65	ЛХБ-40, 65; ЛБ-80; ЛД-40; ЛТБ-40, 65	ЛХБ-80; ЛДЦ-40; ЛД- 65; ЛТБ-80;	ЛД-80; ЛДЦ- 65; 80
		ЛСП02, ЛСП06, ПВЛМ с характеристикой светораспределения П, Д-2				ЛСП03, Н4Т5Л, ПВЛМ с характеристикой светораспределения П, Д-2			
2...3	10...15	9,8	11	12,4	14,9	8,7	9,9	11,6	13,4
	15...25	7,8	8,7	9,7	11,2	7	8,1	9,2	10,7
	25...50	5,8	6,8	7,5	8,6	5,7	6,6	7,4	8,6
	50...150	4,4	5,4	6	6,9	4,5	5,3	6	6,9
	150...300	4	4,7	5,2	6,1	4	4,7	5,3	6,1
	>300	3,6	4,1	4,7	5,4	3,4	4	4,5	5,2
3...4	10...15	13	15,2	17,6	20	14,8	15,2	16,2	18,4
	15...20	11,6	13,6	15,5	18	11,3	12,5	14,2	15,9
	20...30	9,9	11,2	13	15,6	8,4	9,7	11,3	13,3
	30...50	7,7	8,6	10	12,1	6,8	7,9	9	10,3
	50...120	5,5	6,4	7,4	8,4	5,5	6,4	7,3	8,4
	120...300	4,4	5,2	5,9	6,7	4,5	5,2	5,9	6,8
	>300	3,6	4,1	4,7	5,4	3,4	4	4,5	5,2
4...6	10...17	15	17,3	20,1	22	18	18,6	19,7	22
	17...25	13,6	15,8	18,2	20	15,5	16,4	17,2	19,6
	25...35	12,4	14,4	16,5	18,5	12,7	13,7	15	16,8
	35...50	10,8	12,1	14,2	15,8	9,2	10,5	12,4	14,1
	50...80	8,5	9,5	10,5	11,8	7,4	8,6	9,8	11,2
	80...150	6	7	7,9	9,2	6,1	7,1	8,3	9,4
	150...400	4,6	5,4	6,2	7	4,8	5,6	6,4	7,4
	>400	3,5	4,1	4,7	5,4	3,4	4	4,5	5,2
$H_p$	Площадь помещения, м <sup>2</sup>	ЛСП02 с характеристикой светораспределения Н, Д-2				ПВЛ1, ПВЛП, ЛСП14, ЛСП16, ЛСП18, ЛПО03, ЛПО16, ЛПО30 с характеристикой светораспределения Н, Д-1			
		ЛБ-40, 65	ЛХБ-40, 65; ЛБ-80; ЛД-40; ЛТБ-40, 65	ЛХБ-80; ЛДЦ-40; ЛД- 65; ЛТБ-80;	ЛД-80; ЛДЦ- 65; 80	ЛБ-40	ЛХБ-40; ЛД-40; ЛТБ-40	ЛДЦ-40	
2...3	10...15	9,6	10,9	12,5	14,6	12,4	14,5	17,4	
	15...25	7,6	9	10	11,6	9,4	11	13,4	
	25...50	6,1	7,2	8,1	9,4	7,4	8,9	10,7	
	50...150	4,9	5,8	6,6	7,6	5,9	7	8,4	
	150...300	4,4	5	5,7	6,6	5,2	6,1	7,4	

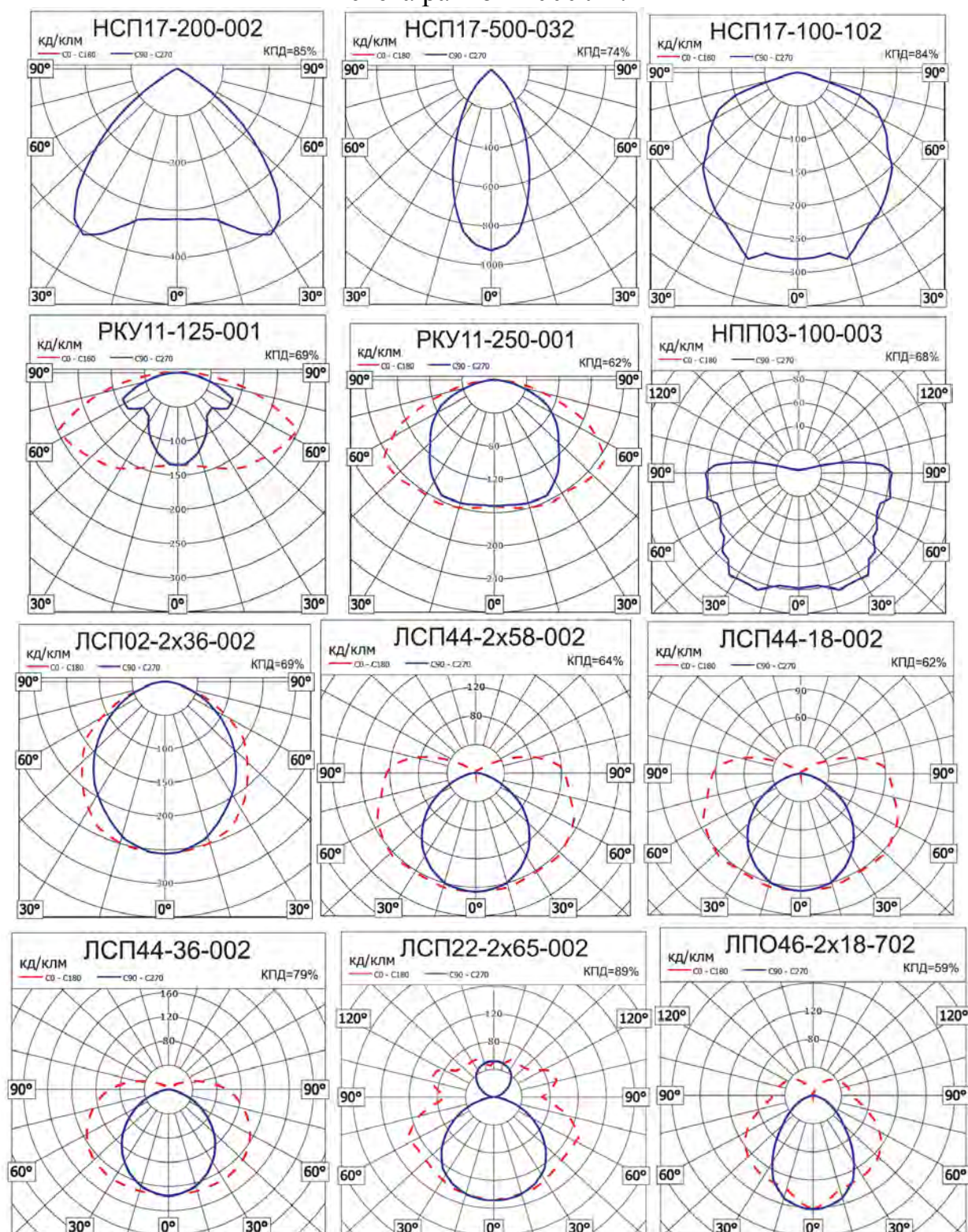
	>300	3,9	4,5	5	5,9	4,5	5,3	6,4
3...4	10...15	14,2	18,4	21	24	17,7	19,8	23
	15...20	11,2	14,5	16	18,6	15,1	17,5	20
	20...30	9,5	10,8	12,5	14,5	11,9	14,2	17
	30...50	7,6	8,9	10	11,4	9,3	10,9	17,2
	50...120	5,9	7	7,8	9,1	7,1	8,6	10,3
	120...300	4,8	5,7	6,5	7,5	5,8	7	8,3
	>300	3,9	4,5	5	5,9	4,5	5,3	6,4
4...6	10...17	21	26	28	30	21	23	25
	17...25	15,6	20	23	27	18,5	21	24
	25...35	12	16,1	17,2	20	16	18	21
	35...50	10,3	11,7	13,8	16	13,3	15,4	18,1
	50...80	8,1	9,5	10,7	12,3	10,2	12	14,4
	80...150	6,6	7,8	8,8	10,2	8,2	9,8	11,7
	150...400	5,3	6,2	7	8,1	6,2	7,4	8,9
	>400	3,9	4,5	5	5,9	4,5	5,3	6,4

**Коэффициенты использования светового потока светильников с люминесцентными лампами и лампами накаливания**

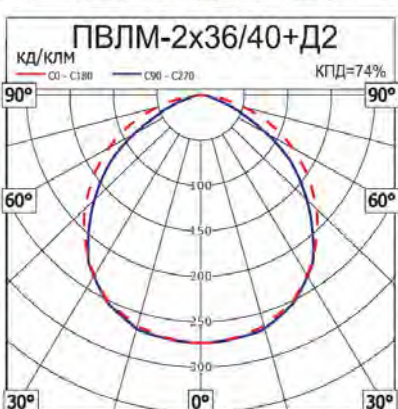
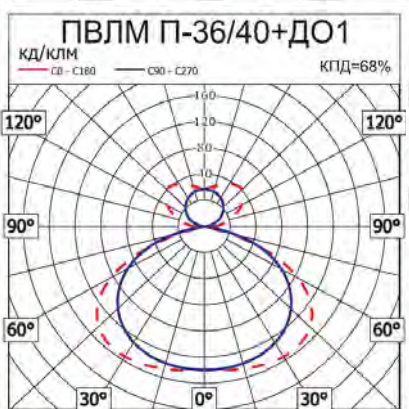
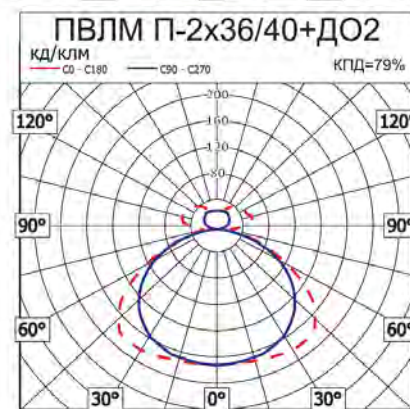
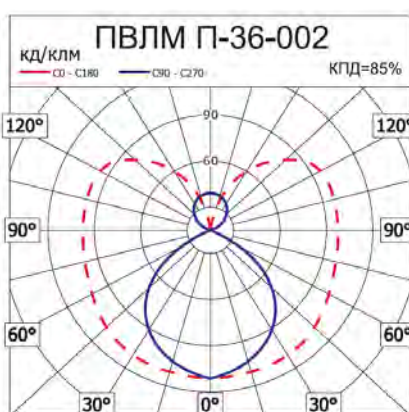
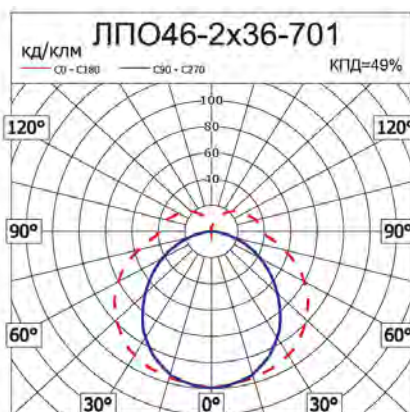
Характеристика светораспределения светильников	П, Д-2					Р, М					Р, М				
Тип светильника	НСП21, НСП22, УПМ15					НСП02, НСП03, НБО07, НПО20, НБО16					НСП04, НСП09, НСП11, ППР				
$\rho_{п, \%}$	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0
$\rho_{с, \%}$	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0
$\rho_{р.п, \%}$	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0
Индекс помещения $i$	Коэффициенты использования, %														
0,5	24	22	20	17	16	12	10	7	5	3	19	18	12	9	6
0,6	34	32	26	23	21	16	15	10	7	6	24	23	15	11	8
0,7	42	39	34	30	29	20	19	14	10	9	29	27	19	15	12
0,8	46	44	38	34	33	23	21	16	12	11	33	31	23	18	14
0,9	49	47	41	37	36	26	24	18	15	13	35	33	25	19	15
1	51	49	43	39	37	28	26	20	17	15	37	35	26	20	16
1,1	53	50	45	41	39	29	27	21	18	16	40	37	28	22	18
1,25	56	52	47	43	41	31	28	23	19	17	43	40	30	24	19
1,5	60	55	50	46	44	35	31	25	21	19	46	42	32	25	20
1,75	63	58	53	48	46	37	33	27	22	20	49	45	35	27	22
2	66	60	55	51	49	39	35	29	23	20	52	47	37	29	23
2,25	68	62	57	53	51	42	37	30	25	21	54	49	39	31	24
2,5	70	64	59	55	53	44	39	32	27	22	56	51	40	32	25
3	73	66	62	58	56	48	43	35	29	24	60	53	43	35	27
3,5	76	68	64	61	59	51	45	37	31	25	62	55	45	36	28
4	78	70	66	62	60	53	47	39	32	26	64	57	47	38	30
5	81	73	69	64	62	57	50	42	35	29	67	59	49	40	32
Характеристика светораспределения светильников	П, Д-2					Н, Д-1					П, Л				
Тип светильника	НСП11, ППД					НСП11, ПСХ, НПО18					НСП17, С, СУ				
$\rho_{п, \%}$	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0
$\rho_{с, \%}$	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0
$\rho_{р.п, \%}$	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0
Индекс помещения $i$	Коэффициенты использования, %														
0,5	25	24	20	17	16	19	18	13	9	7	27	23	17	12	11
0,6	31	30	24	20	19	24	23	16	12	10	36	35	27	23	21
0,7	39	36	3	26	25	28	27	19	14	12	44	40	34	29	27
0,8	43	41	36	32	31	30	29	21	16	13	49	45	38	33	32
0,9	45	43	38	34	33	33	31	23	18	15	53	50	44	39	37
1	47	44	39	36	34	35	33	25	20	16	58	54	48	44	42
1,1	49	45	41	38	36	37	35	26	21	17	60	56	50	46	44
1,25	51	47	42	39	37	40	37	28	23	19	63	59	53	49	47
1,5	55	51	45	42	40	43	40	31	25	21	68	62	57	53	52
1,75	58	53	49	45	43	46	42	34	28	23	72	65	60	57	55
2	61	55	51	47	45	49	44	36	30	25	77	68	64	60	58

2,25	63	57	53	49	47	51	46	38	32	26	78	70	66	63	60
2,5	65	58	54	51	49	53	47	39	33	28	80	72	68	65	62
3	68	61	56	54	52	56	50	42	35	30	84	75	71	68	65
3,5	70	63	58	56	54	59	52	44	38	32	87	77	74	70	68
4	72	64	60	57	56	61	53	46	40	34	90	79	75	72	70
5	74	65	62	58	57	63	55	48	42	36	91	80	76	73	71
Характеристика светораспределения светильников	П, Г-1					П, Д-2					Н, Д-1				
Тип светильника	НСП22, УП-24					ЛСП02, ЛСП06, ПВЛМ					ПВЛ1, ПВЛП, ЛСП14, ЛСП16, ЛСП18, ЛПО03, ЛПО16, ЛПО30				
$\rho_{п, \%}$	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0
$\rho_{с, \%}$	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0
$\rho_{р.п, \%}$	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0
Индекс помещения $i$	Коэффициенты использования, %														
0,5	30	28	25	21	18	28	27	21	18	16	22	18	13	11	9
0,6	33	31	26	23	22	33	32	25	22	20	25	23	17	14	12
0,7	38	36	31	28	25	38	36	30	26	24	28	27	20	16	15
0,8	41	39	34	30	29	42	39	33	29	28	31	29	23	19	17
0,9	46	42	37	33	32	46	42	37	32	31	34	32	26	21	19
1	48	45	40	37	36	49	45	40	35	34	37	34	28	23	21
1,1	49	46	41	38	38	52	46	42	38	36	39	36	30	25	23
1,25	52	47	43	40	40	55	50	45	40	39	42	38	32	27	25
1,5	55	50	46	43	43	60	54	49	45	44	46	42	36	30	28
1,75	58	52	49	46	45	63	57	52	48	47	49	44	38	33	30
2	61	55	51	48	47	65	59	55	52	49	51	46	40	35	32
2,25	63	56	52	49	49	68	62	57	53	52	53	48	42	37	34
2,5	64	57	53	50	50	70	63	58	55	54	55	50	43	39	35
3	67	59	56	53	52	73	65	61	58	56	58	52	45	41	37
3,5	69	61	57	55	54	75	67	62	60	58	60	53	47	43	39
4	71	63	59	57	55	77	68	64	61	59	61	54	48	44	40
5	73	64	61	59	57	80	70	67	65	62	65	57	51	48	43

Кривые силы света в абсолютных единицах при световом потоке источника света равном 1000 лм.







## Параметры люминесцентных ламп низкого давления

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение на лампе, В	Ток лампы, А	Номинальный световой поток, лм	Срок службы, ч	Габаритные размеры, мм	
						Длина	Наружный диаметр
ЛЦД20	20	57	0,37	820	12000	604	40
ЛЕЦ20		88	0,23	865			
ЛД20		57	0,37	920			
ЛХБ20		57	0,37	950			
ЛТБ20		57	0,37	975			
ЛБ20		57	0,37	1180			
ЛН30	30	104	0,36	1350	12000	909	27
ЛДЦ30				1450			
ЛД30				1640			
ЛХБ30				1940			
ЛТБ30				1880			
ЛБ30				2100			
ЛБА30				2040			
ЛДЦ40	40	103	0,43	2100	12000	1214	40
ЛЕЦ40				2190			
ЛД40				2340			
ЛХБЦ40				2450			
ЛХБ40				2780			
ЛТБ40				2780			
ЛБ40				3000			
ЛБА40				3040			
ЛДЦ65				3050			
ЛНЦ65	65	110	0,67	3450	12000	1514	40
ЛД65				3570			
ЛХБ65				4100			
ЛТБ65				4200			
ЛБ65				4550			
ЛДЦ80	80	102	0,865	3740	12000	1514	40
ЛД80				4070			
ЛХБ80				4600			
ЛТБ80				4720			
ЛБ80				5220			
ЛТБЦ40	40	50	0,88	1750	6000	1214	38
ЛХБР40	40	103	0,43	2080	10000	1214	40
ЛБР40	40	103	0,43	2250	10000	1214	40
ЛБР65	65	102	0,7	4200	10000	1514	40
ЛХБР80	80	102	0,865	3460	10000	1514	40
ЛБР80	80	102	0,865	4100	10000	1514	40

## Приложение П10

### Провода и кабели для сельскохозяйственных осветительных проводок

Вид проводки	Марка провода, кабеля	Способ прокладки	Характеристика помещения
Открытая в негорючих конструкциях	АПВ, АПРВ	На роликах	Нормальная среда
	АПВ, АПРВ	На изоляторах	Влажное, сырое, жаркое
	АВВГ, АПВГ, АНРГ, АВРГ, АСРГ	На скобах	На всех, кроме взрывоопасных «В»
	АПП, АПВ, АПРТО	В трубах	Во всех
Тросовая	АВТС-1, АВТС-2	С несущим стальным тросом	В животноводческих
Скрытая и открытая	АПРТО, АПВ	В стальных трубах	В пожароопасных «П» и др.
Скрытая в негорючих конструкциях	АППВ, АПВ, АПРВ, АПН	В трубах под штукатуркой	Во всех, кроме «П» и «В»
Вне помещения	АВВ, ААБ, АСБАВВ, ААБ, АСБ	По стенам в траншеях, трубах	-

## Приложение П11

### Длительный допустимый ток ( $I_0$ ) для проводов с алюминиевой / (медной) жилой

Площадь сечения провода, мм <sup>2</sup>	Способ прокладки проводов			
	открытый	Открытый в трубах при числе жил		
		2	3	4
1,5	– / (23)	– / (19)	– / (17)	– / (16)
2,5	24 / (30)	20 / (27)	19 / (25)	19 / (25)
4,0	32 / (41)	28 / (38)	28 / (35)	23 / (30)
6,0	39 / (50)	36 / (46)	32 / (42)	30 / (40)
10,0	60 / (80)	50 / (70)	47 / (60)	39 / (50)

Примечание: в скобках даны значения тока для медной жилы

## Приложение П12

### Допустимая площадь сечения проводов

Тип проводки	Площадь сечения провода, мм <sup>2</sup>	
	медного	алюминиевого
Ввод в производственные помещения	4,0	10,0
Ввод в жилые помещения	4,0	6,0
Внутренняя проводка:		
скрытая, на скобах, тросовая	1,5	2,5
на изоляторах с пролетом не менее двух метров	2,5	4,0
Наружная проводка по конструкциям	2,5	4,0
Зарядка светильников	0,5	-
Голые провода:		
в зданиях	2,5	4,0
воздушных линий	6,0	16,0



# Приложение П13

Значения коэффициентов С, входящих в формулу для расчета сетей по  
потере напряжения

Номинальное напряжение сети, В	Система сети и род тока	Выражение коэф. С	Значение коэффициента С для проводников	
			медных	алюминиевых
380/220	Трехфазная с нулем	$\gamma U_{\text{л}}^2/10^5$	72	44
380	Трехфазная без нуля		72	44
220/127	Трехфазная с нулем		24	14,7
220	Трехфазная без нуля	$\gamma U_{\text{л}}^2/10^5$	24	14,7
36			0,648	0,396
24			0,288	0,176
12			0,072	0,044
380/220	Двухфазная с нулем	$\gamma U_{\text{л}}^2/(2,25 \cdot 10^5)$	32	19,5
220/127			10,7	6,5
220	Двухпроводная пере- менного или постоян- ного тока	$\gamma U^2/2 \cdot 10^5$	12	7,4
127			4	2,46
36			0,324	0,198
24			0,144	0,088
12			0,036	0,022

# Приложение П14

## Автоматические выключатели

Тип выключа- теля	Номиналь- ный ток, А	Число по- люсов	Тип распределителя	Номинальный ток рас- пределителя, А
ВА14-26-14	32	1	Тепловой, электро- магнитный	6;8;10;16;20;25;32
ВА14-26-34	32	3	То же	6;8;10;16;20;25;32
ВА16-25-14	25	1		6,3;10;16;20;25
ВА51-31-1	31...100	1		6,3;8;10;12,5;16;20;
ВА51-31-3	31...100	3		25;31,5;40;50;63;80;100
АЕ1000	63	1	Комбинированный	16;25
А3715	63	2	Тепловой, электро- магнитный	16;20;25;32;40;50; 63;80;100;125;160
А3716	63	3		
А63	63	1	Комбинированный, электромагнитный	0,6;1;1,25;1,6;2;2,5;3,2; 4;5;6;8;10;12,5;16;20;25 ;32;40;50;63
А63	63	2		
А63	63	3		
АЕ2034	25	1	Тепловой	0,6;0,8;1;1,25;1,6;2;2,5; 3;15;4;5;6,3;8;10;12,5; 16;20;25
АЕ2036	25	3		
АЕ2044	63	1	Электромагнитный	0,6;0,8;1;1,25;1,6;2;2,5; 3,15;4;5;6,3;8;10;12,5;1 6;20;25;31,5;40;50;63
АЕ2046	63	3		

## Осветительные групповые щиты

Тип защиты	Аппаратура управления и защиты				
	На вводе	На группах			
		Число групп	Тип аппарата	Число полюсов аппарата	Номинальный ток расцепителя, А
ОП-3	-	3	АЕ1000	1	16;20;25
ОП-6	-	6	АЕ1000	1	
ОП-9	-	9	АЕ1000	1	
ОП-12	-	12	АЕ1000	1	
ЯОУ-8501	ПВ3-60	6	АЕ1031	1	2.5;3.15;4;5;6.3; 8;10;12.5;16;20;25
ЯОУ-8502	ПВ3-100	12	АЕ1031	1	
ЯОУ-8503	ПВ3-100	6	АЕ2044	1	4;5;6.3;8;10;12.5;16; 20;25;31.5;40;50;63
ЯОУ-8504	ПВ3-100	2	АЕ2046	3	
ЩКИ-8501	-	3	АЕ1000; ВА14; ВА16	1	16;25
ЩКИ-8503	-	3		1	
ЩКИ-8505	-	3		1	
ЩКИ-8507	-	3		1	
ОЩ-6	-	6	А63	1	15;20;25;30;40;50
ОЩ-12	-	12	А63	1	
ОЩВ-6	АЕ2046	6	А3161	1	
ОЩВ-12	АЕ2056	12	А3161	1	
УОЩВ-6	АЕ2046	6	А3161	1	
УОЩВ-12	АЕ2056	12	А3161	1	

Тип вводного щита	№ группы	Аппаратура защиты			Групповая линия			Электроприемники			Фаза	Вид освещения
		Тип	Ном. ток $I_n$ , А	ВТХ (числовые значения характеристик)	Марка, сечение кабеля	Способ прокладки	Установленная мощность $P_u$ , кВт	Расчетный ток $I_p$ , А	Полная нагрузка $\Delta U$ , %			
ОПМ-3 $P_u = 5,6$ кВт $P_p = 4,48$ кВт $I_p = 6,9$ А $\Delta U = 0,3$ %	1	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	T	2,25	10,2	2	A	Рабочее	
	2	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	T	2,25	10,2	2	B	Рабочее	
	3	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	CK	0,32	1,45	0,6	C		
	1'	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	T, CK	1,16	5,27	1	A	Рабочее	
	2'	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	CK	1,2	5,45	0,6	B	Рабочее	
	3'	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	CK	0,96	4,4	0,7	C	Рабочее	
ОШВ-6 $P_u = 4,0$ кВт $P_p = 3,2$ кВт $I_p = 4,86$ А $\Delta U = 0,3$ %	4'	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	CK	1,0	4,45	0,9	A	Рабочее	
	5'	ВА14-26	32	B	ВВГ 3x2,5	CK	0,75	3,4	1,1	B	Дежурное	
	6'	ВА14-26								C	Резерв	
		УЗО 01-4P-40-100			ВВГ 5x6		9,6	11,9	0,5			

Пример однолинейной электрической схемы осветительной сети



Учебное издание

Змеев Анатолий Яковлевич  
Усанов Константин Михайлович  
Мошкин Владимир Иванович  
Каргин Виталий Александрович

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

Учебное пособие

В авторской редакции

---

Подписано к печати 19.12.16	Формат 60х84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ.л. 18,25	Уч. изд.л. 18,25
Заказ 187	Тираж 300	

БИЦ Курганского государственного университета.  
640020, г. Курган, ул Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.