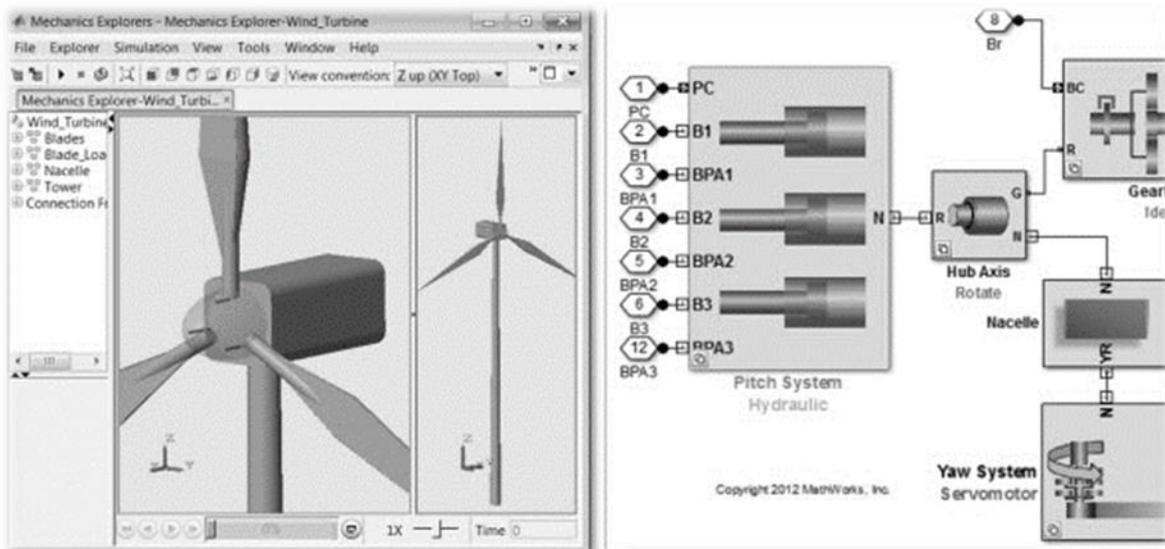


Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев

# ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Санкт-Петербург  
2016

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев**

**ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**Учебное пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2016**

Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Введение в специальность Электроэнергетика и электротехника – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 108 с.

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения по направлению 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника. Рассматриваются характеристики электроэнергетических систем; приводится описание основных технических средств передачи, преобразования и потребления электроэнергии; разбираются устройства, основанные на применении возобновляемых источников энергии; описывается назначение, функции и состав автоматизированного электропривода, его роль в современных машинных технологиях.

Рекомендовано к печати Ученым советом Мегафакультета Компьютерных Технологий и Управления 13.09.2016 протокол №7



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

© Демидова Г.Л., Лукичев Д.В., 2016

## Оглавление

Список сокращений.....	4
Введение.....	6
1. Характеристика специальности.....	7
2. Краткая история электроэнергетики. Энергетическая система.....	9
2.1. История развития электроэнергетики.....	9
2.2. Энергетическая и электроэнергетическая системы.....	10
3. Режимы работы электроэнергетических систем и средства управления ими.....	15
3.1. Классификация режимов электроэнергетической системы.....	15
3.2. Нормативные показатели устойчивости электроэнергетической системы.....	17
3.3. Средства управления режимами электроэнергетической системы...	18
4. Технические средства передачи электроэнергии. Сверхпроводимость. ....	22
4.1. Классификация линий электропередачи.....	23
4.2. Общая характеристика воздушной линии и условий ее работы.....	24
4.3. Общая характеристика кабельных линий.....	28
4.4. Сверхпроводимость.....	32
5. Качество электроэнергии.....	37
5.1. Показатели качества электроэнергии.....	38
6. Трансформаторное оборудование.....	44
6.1. Трансформаторы напряжения. Конструкция и принцип действия...	44
6.2. Автотрансформаторы.....	46
6.3. Трансформаторы специального назначения.....	46
7. Электрические машины электростанций.....	49
7.1. Классификация электрических машин.....	49
7.2. Асинхронные машины.....	51
7.3. Синхронные машины.....	52
7.4. Двигатели постоянного тока.....	54
7.5. Вопросы вибрации и выбора электрических машин.....	55
8. Устройства, основанные на применении возобновляемых источниках энергии.....	56
8.1. Состояние возобновляемых источников энергии в мире.....	56
8.2. Возобновляемые источники энергии в России.....	59
8.3. Ветроэнергетические установки.....	64
8.4. Солнечные электростанции.....	75
9. Автоматизированный электропривод.....	86
Заключение.....	104
Литература.....	105

## Список сокращений

АРВ	-	автоматический регулятор возбуждения
АВР	-	автоматическое включение резерва
АД	-	асинхронный двигатель
АКБ	-	аккумуляторная батарея
АПВ	-	автоматическое повторное включение
АРЧВ	-	автоматический регулятор частоты вращения
АРЧМ	-	автоматическое регулирование частоты и активной мощности
АЧП	-	автоматический частотный пуск
АЧР	-	автоматическая частотная разгрузка
АЭС	-	атомная электростанция
БДПТ	-	бесконтактный двигатель постоянного тока
ВАХ	-	вольтамперная характеристика
ВД	-	вентильный двигатель
ВИЭ	-	возобновляемый источник энергии
ВЛ	-	воздушная линия
ВН	-	высокое напряжение
ВП	-	ветряной поток
ВЭУ	-	ветроэнергетическая установка
ВЭУВО	-	ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения
ВЭУГО	-	ветроэнергетическая установка с горизонтальной осью вращения
ГВ	-	горячая вода
ГеоТЭС	-	геотермальная теплоэлектростанция
ГЭС	-	гидроэлектростанция
ДПР	-	датчик положения ротора
ДПТ	-	двигатель постоянного тока
ИМ	-	исполнительный механизм
ИРМ	-	источник реактивной мощности
ИСУ	-	информационная часть системы управления
КИЭВ	-	коэффициент использования энергии ветра
КЛ	-	кабельная линия
КПД	-	коэффициент полезного действия
КРМ	-	компенсация реактивной мощности
КЭ	-	качество электрической энергии
ЛЭП	-	линия электропередачи
МГЭС	-	малая гидроэлектростанция
НН	-	низкое напряжение
ОПУ	-	опорно-поворотное устройство
ПА	-	противоаварийная автоматика
ПКЭ	-	показатели качества электрической энергии

ПМ	-	передаточный механизм
РД	-	ротор двигателя
РЗ	-	релейная защита
СВН	-	сверхвысокое напряжение
СД	-	синхронный двигатель
СК	-	синхронный компенсатор
СН	-	среднее напряжение
СП	-	сверхпроводимость
СТК	-	силовые тиристорные компенсаторы
СФЭС	-	солнечная фотоэлектрическая станция
СФЭУ	-	солнечная фотоэлектрическая установка
СЭП	-	следящий электропривод
СЭС	-	солнечная электростанция
СЭУ	-	солнечная энергетическая установка
ТТ	-	трансформатор тока
ТБО	-	твердые бытовые отходы
ТН	-	трансформатор напряжения
ТЭС	-	тепловая электростанция
УВН	-	ультравысокое напряжение
ФЭП	-	фотоэлектрическая панель
ХВ	-	холодная вода
ШИП	-	широтно-импульсный преобразователь
ЭИМ	-	электроизоляционный материал
ЭМ	-	электромобиль
ЭМП	-	электромагнитная помеха
ЭМП	-	электромеханический преобразователь
ЭМС	-	электромагнитная совместимость
ЭП	-	электроприемник
ЭСУ	-	энергетическая часть системы управления
ЭЭС	-	электроэнергетическая система

## **Введение**

Учебная дисциплина «Введение в специальность: Электроэнергетика и электротехника» имеет цель ознакомить студентов младших курсов с содержанием выбранной ими специальности и ее местом среди инженерных специальностей.

В учебном пособии по данной дисциплине рассматриваются следующие вопросы:

- характеристика специальности;
- электроэнергетические системы – характеристики и состав;
- технические средства передачи, преобразования и потребления электроэнергии;
- устройства, основанные на применении возобновляемых источников энергии;
- автоматизированный электропривод: назначение, состав и примеры его использования в современных машинных технологиях.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной формы обучения.

## 1. Характеристика специальности

Энергетика, как сфера деятельности человеческого общества является глобальной системой, включающей как подсистему окружающей среды, так и различные отрасли народного хозяйства. Созданные человеком энергетические установки, имеющие огромные суммарные мощности, оказывают заметное влияние на естественные процессы, происходящие в биосфере.

Электротехника в свою очередь является наукой об использовании электричества и магнетизма в человеческой деятельности. В настоящее время все бытовые приборы работают на электроэнергии, поэтому электротехника является одним из самых важных компонентов в жизни каждого человека. Центральным объектом внимания электротехники является ток и его характеристики. Помимо него электротехника рассматривает электромагнитные поля, их свойства и практическое применение в электромеханических системах и в энергетических устройствах.

Подготовка бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» ориентирована на создание и применение аппаратных и программных средств управления процессами преобразования энергии и точным движением в различных электротехнических и электромеханических системах и комплексах. Знания полученного материала позволяет будущим специалистам – инженерам и руководителям современного высокоразвитого производства не только свободно разбираться в устройстве и принципе действия разнообразной электротехнической аппаратуры, но и грамотно использовать их на практике.

В процессе обучения студентам читается целый ряд дисциплин, входящих в образовательную программу. Среди них можно выделить следующие специализированные дисциплины:

- Электротехника и электроника
- Общая энергетика
- Метрология
- Электрические машины
- Электрические и электронные аппараты
- Элементы систем автоматики
- Теория автоматического управления
- Цифровая и микропроцессорная техника
- Основы управления электромеханическими системами
- Проектирование электротехнических устройств
- Теория автоматизированного электропривода
- Электропривод в современных технологиях

На старших курсах бакалавриата, а также в магистратуре большое внимание уделяется электроприводу – управляемой электромеханической системе, сочетающей в себе микропроцессорную систему управления,

двигатель, силовой полупроводниковый преобразователь, а также различные типы датчиков и вспомогательных устройств. В современных экономических условиях роль и значение автоматизированного электропривода как энергетической и интеллектуальной основы современного машинного производства постоянно возрастает, так как создание большинства новых высоких технологий невозможно без использования высокоточных электроприводов и системам автоматизации. Например, повышение энергоэффективности и энергосбережение во всех отраслях хозяйства в значительной степени базируется на использовании регулируемого автоматизированного электропривода. Все более расширяется использование электропривода на транспорте, в медицине и других сферах жизнедеятельности человека.

Создание современных электромеханических систем невозможно без знания силовой электроники, механики, автоматики, микроэлектроники и компьютерной техники. На это ориентированы дисциплины, входящие в программу обучения магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и представленные в виде блок-схемы на рис. 1.

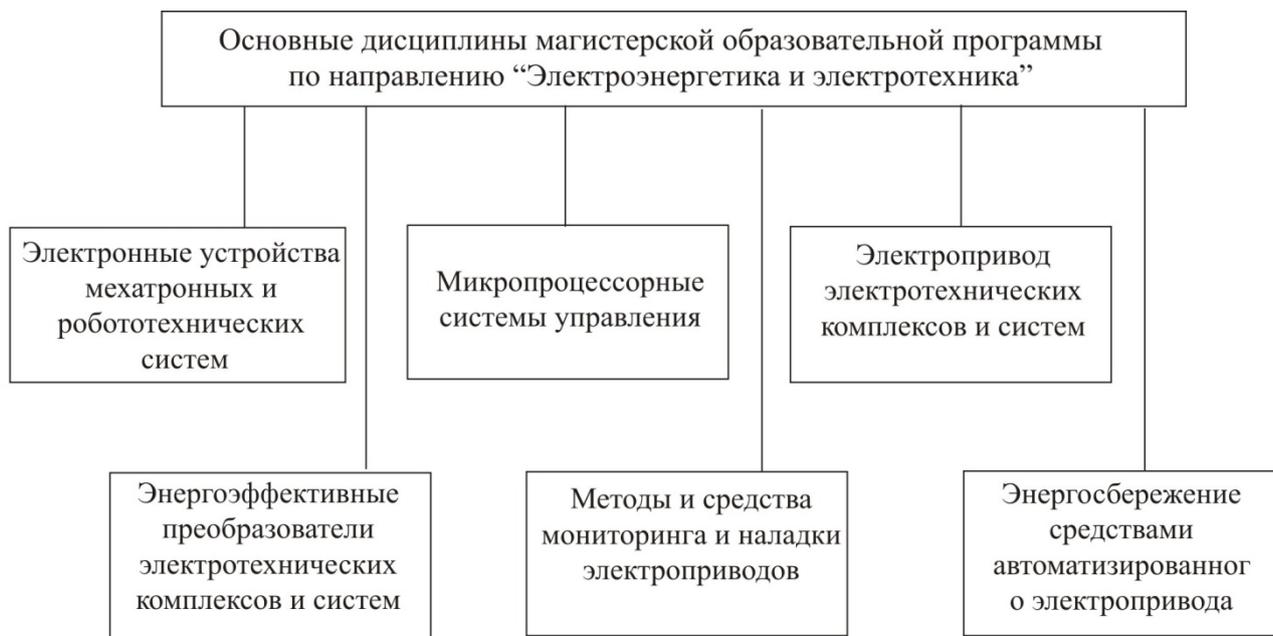


Рисунок 1 – Основные специальные дисциплины направления 13.04.02

После окончания обучения выпускники направления «Электроэнергетика и электротехника» являются специалистами в области проектирования, изготовления и эксплуатации современных электрических комплексов и систем с компьютерным управлением, включая как энергетические, так и информационные устройства.

## 2. Краткая история электроэнергетики. Энергетическая система

### 2.1. История развития электроэнергетики

К 90-м гг. XIX в. когда уже весьма глубоко была разработана теория электротехники, электрические установки работали преимущественно на постоянном токе и применялись в телеграфии, освещении, гальванотехнике и минном деле. Они использовали электрохимические источники (например, медно-цинковые батареи) и имели значительные ограничения по мощности. Но главным существенным недостатком постоянного тока явилось то, что он не поддается трансформации, то есть изменению напряжения. Многим ученым и изобретателям стало очевидным, что без переменного тока электротехника в дальнейшем развиваться не сможет. Одним из аргументов противников переменного тока было – отсутствие для него приемлемых электродвигателей. В конце 80-х гг. XIX в. одними из первых разработкой двигателей переменного тока начали заниматься итальянский физик Г. Феррарис и американский изобретатель сербского происхождения Н. Тесла. Однако созданные ими двухфазные двигатели не смогли найти эффективного практического применения из-за конструктивных недоработок, связанных с теоретическими просчетами.

Блестяще решил вопрос в пользу переменного тока наш соотечественник Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862 – 1919) – изобретатель трехфазного асинхронного электродвигателя и разработчик основных элементов трехфазной системы переменного тока. Большую часть жизни ученый прожил вдали от Родины - в Германии. Многие годы он проработал на фирме AEG (Allgemeine Electricität Gesellschaft – «Всеобщая компания электричества»), начав свою инженерную деятельность в должности шеф-электрика (главного электрика). Основанная в 1881 г. как одно из отделений предприятий американского предпринимателя и изобретателя Томаса Эдисона, к 90-х гг. XIX в. фирма стала самостоятельной, а впоследствии - одним из крупнейших электротехнических предприятий Европы. Доливо-Добровольский установил, что для создания вращающегося магнитного поля - основы работы асинхронного двигателя - технически и экономически целесообразно применение симметричной трехфазной магнитной системы, со сдвигом фаз на  $120^\circ$ .

Трехфазный асинхронный электродвигатель, изготовленный Доливо-Добровольским в 1889 г., продемонстрировал высокую эффективность и неоспоримые преимущества перед двухфазными двигателями Феррариса и Тесла. По словам изобретателя: «уже при первом включении выявилось ошеломляющее для представлений того времени действие... попытка остановить его торможением за конец вала от руки блестяще провалилась, и только при особой ловкости было возможно воспрепятствовать таким способом его запуску при включении. Если принять во внимание малые размеры моторчика, это представлялось чудом для всех приглашенных свидетелей».

Несмотря на это отношение к переменному току у многих оставалось сдержанным. Корифеем электротехники Т. Эдисон отказался даже осмотреть новое изобретение, заявив: «Нет, нет, переменный ток - это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем». Вскоре Доливо-Добровольскому удалось решить все основные проблемы, связанные с конструкцией двигателя, устройство которого до настоящего времени принципиально не менялось. Вслед за этим с окончательной разработкой трехфазного синхронного генератора и трансформаторов начался повсеместный переход на трехфазный переменный ток.

В настоящее время практически повсеместно используются трехфазные системы переменного тока частотой 50 и 60 Гц.

## 2.2. Энергетическая и электроэнергетическая системы

### Энергетическая система

Электрическая энергия является один из самых важных видов энергии. Преимуществами электроэнергии являются:

*производство* (в основном, преобразование механической энергии в электрическую) – разнообразие используемых ресурсов [гидроэлектростанций (ГЭС), тепловых электростанций (ТЭС), атомных электростанций (АЭС)], возможности концентрации мощностей и управления их размещением;

*передача* – возможность надежной и экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния;

*распределение* – простота канализации электроэнергии потребителям независимо от их мощности;

*потребление* – простота и экономичность преобразования электроэнергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую), а также существование ряда высокоэффективных электротехнических технологий – электролиз, гальванотехника.

Передача электроэнергии от электростанции к потребителю осуществляется по электрическим линиям. Однако, когда потребители удалены от электростанции, передачу электроэнергии приходится осуществлять на повышенном напряжении. Тогда между электростанцией и потребителями необходимо сооружать повышающие и понижающие подстанции. Электростанции при помощи электрических линий (через подстанции) связывают друг с другом для параллельной работы на общую нагрузку. Такая совокупность электростанций, подстанций и приемников электроэнергии, связанных между собой линиями электропередачи, называется *энергетической системой* или *энергосистемой* (см. рис.2).

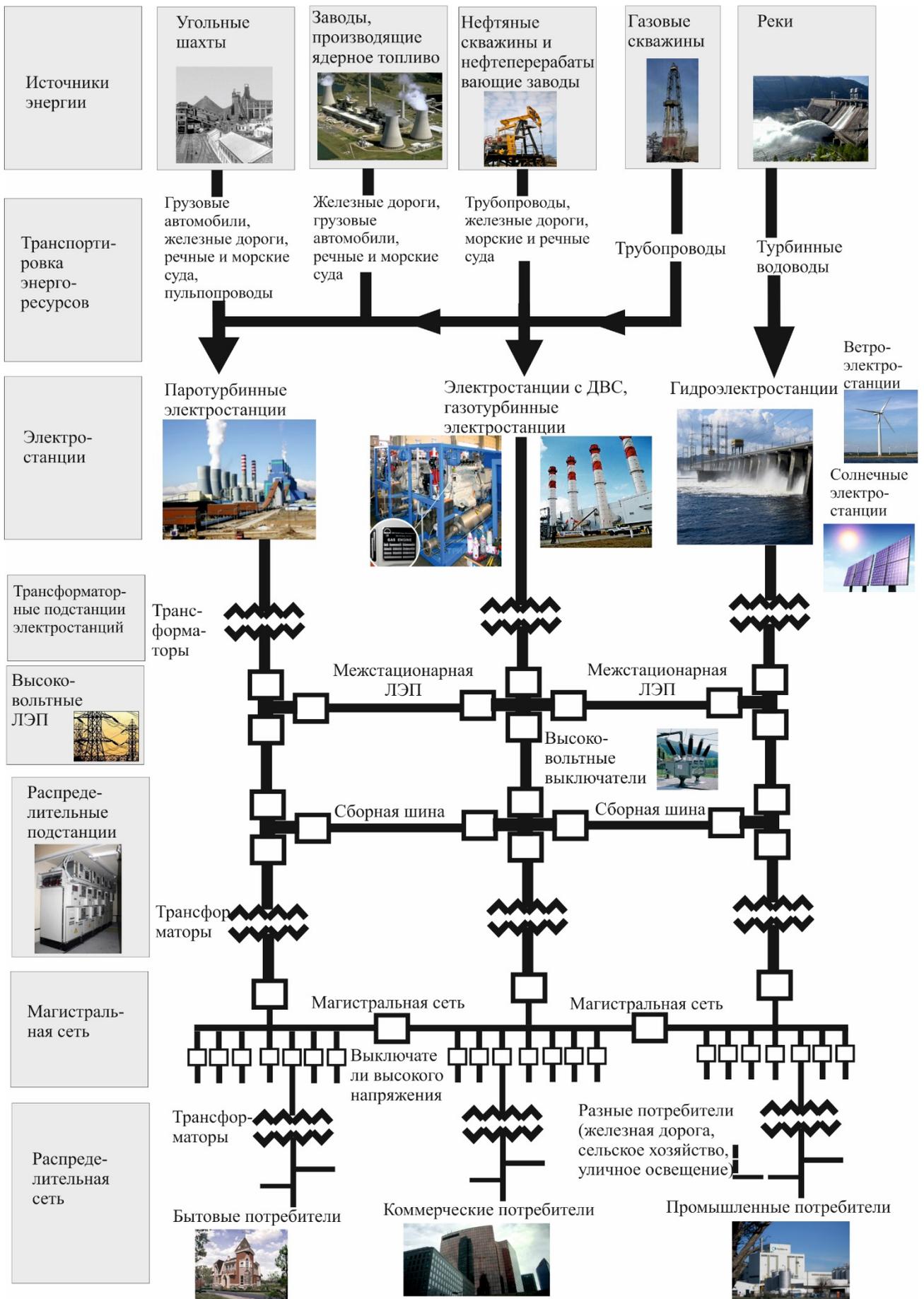


Рисунок 2 – Схема преобразования энергии

В такой системе получают существенные технико-экономические, преимущества:

1) возможность увеличения единичной мощности генераторов и электростанции. Это снижает стоимость 1 кВт установленной мощности, позволяет резко повысить производительность электромашиностроительных заводов при тех же производственных площадях и трудозатратах,

2) значительное повышение надежности электроснабжения потребителей,

3) повышение экономичности работы различных типов электростанций, при этом обеспечиваются наиболее эффективное использование мощности ГЭС и более экономичные режимы работы ТЭС,

4) снижение необходимой резервной мощности на электростанциях.

### **Электроэнергетическая система**

Энергосистемы общего пользования производят электроэнергию, потребляя энергоресурсы, источники которых представлены в верхней части рисунка 2. Электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электроэнергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии называется *электроэнергетической системой (ЭЭС)*.

Энергетическое производство, и в особенности производство электроэнергии, обладает рядом особенностей, резко отличающих его от других отраслей промышленности.

*Первая и важнейшая особенность* электроэнергетической системы заключается в том, что производство электроэнергии, ее распределение и преобразование в другие виды энергии осуществляются практически в один и тот же момент времени. Другими словами, электроэнергия нигде не аккумулируется. Энергия, произведенная в системе, равна энергии, потребленной в ней, и жестко ею определяется. Это равенство справедливо для любого короткого промежутка времени, т.е. между мощностями энергосистемы имеется точный баланс. Заметим, что преобразование и передача энергии происходят во всех элементах системы с потерями энергии и, следовательно, потребление энергии должно учитывать не только полезное потребление, но и потери энергии в элементах преобразования и передачи. Отсюда вытекает следующее:

а) снижение выработки энергии на электростанциях против требуемого уровня из-за ремонтов оборудования, аварий и других причин при отсутствии резерва в системе требует снижения количества энергии, отпускаемой потребителю;

б) временное снижение потребления энергии из-за ремонта оборудования, аварий и других причин при отсутствии в системе так называемых потребителей-регуляторов не дает возможности полностью использовать оборудование электростанции в этот период;

в) небаланс между мощностью электростанций и мощностью, потребляемой в системе, не может существовать. При снижении мощности электростанций одновременно автоматически снижается потребляемая мощность, и наоборот.

*Вторая особенность* электроэнергетической системы – это относительная быстрота протекания в ней переходных процессов. Волновые процессы совершаются в тысячные или даже миллионные доли секунды; процессы, связанные с короткими замыканиями, включениями и отключениями, качаниями, нарушениями устойчивости, совершаются в течение долей секунды или нескольких секунд.

Быстрота протекания переходных процессов в электрической системе требует обязательного применения специальных автоматических устройств. Эти устройства, часто весьма быстродействующие, должны обеспечить надлежащую корректировку переходных процессов в системе. Правильный выбор и настройка всех этих автоматических устройств, к которым относятся аппараты защиты от перенапряжений, установки релейной защиты, автоматические регуляторы, автоматические выключатели и т.п., немыслимы без учета работы всей системы как единого целого. Все это способствует широчайшему внедрению автоматики в энергетических системах и полной автоматизации отдельных электростанций, подстанций и т.п.

*Третья особенность* электроэнергетической системы заключается в том, что она тесно связана со всеми отраслями промышленности: связью, транспортом и т.п., что предопределяет необходимость своевременного их развития. Рост энергетических систем должен обязательно опережать рост потребления энергии, иначе создание резервов в энергосистемах невозможно. С другой стороны, рост энергетических систем должен быть гармоничным: все элементы системы должны развиваться без каких-либо диспропорций в развитии отдельных элементов.

### *Электрическая сеть*

Соединение энергосистем между собой осуществляется с помощью межсистемных электрических связей, состоящих из одной или нескольких линий электропередачи (ЛЭП).

Основные доводы в пользу объединения энергосистем таковы:

- а) уменьшение суммарного резерва мощности;
- б) улучшение использования мощности и энергии гидроэлектростанций одной или обеих систем;
- в) уменьшение суммарного максимума нагрузки объединяемых энергосистем;
- г) взаимопомощь систем в случае неодинаковых сезонных изменений мощности электростанций и, в частности, гидроэлектростанций;
- д) взаимопомощь систем в случае неодинаковых сезонных изменений нагрузки;
- е) взаимопомощь систем в проведении ремонтов.

*Электрическая сеть* как часть электроэнергетической системы обеспечивает возможность выдачи мощности электростанций, ее передачу на расстояние, преобразование параметров электроэнергии (напряжения, тока) на подстанциях и ее распределение по некоторой территории вплоть до непосредственных электроприемников.

Электрические сети современных энергосистем характеризуются *многоступенчатостью*, т.е. большим числом трансформаций на пути от источников электроэнергии к ее потребителям.

Классификация электрических сетей по признакам, связанным с номинальным напряжением, сведена в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Классификация электрических сетей по признакам, связанным с номинальным напряжением

Признак	Номинальные напряжения, кВ				
	< 1	3–35	110–220	330–750	1150
Номинальное напряжение	НН	СН	ВН	СВН	УВН
Охват территории	Местные		Районные	Региональные	
Назначение	Распределительные			Системообразующие	
Характер потребителей	Городские, промышленные, сельскохозяйственные				

Примечание. Сети напряжением до 1 кВ называются сетями низкого напряжения (НН). Сети напряжением выше 1 кВ, в свою очередь, делятся на сети среднего (СН), высокого (ВН), сверхвысокого (СВН) и ультравысокого (УВН) напряжения.

### *Элементы электроэнергетической системы*

Энергетическая система (ЭЭС) состоит из элементов, которые можно разделить на три группы:

1. *основные (силовые)* элементы – генерирующие агрегаты электростанций, преобразующие энергию воды или пара в электроэнергию; трансформаторы, автотрансформаторы, выпрямительные установки, преобразующие значения и вид тока и напряжения; линии электропередачи (ЛЭП), передающие электроэнергию на расстояние; коммутационная аппаратура (выключатели, разъединители), предназначенные для изменения схемы ЭЭС и отключения поврежденных элементов;

2. *измерительные элементы* – трансформаторы тока и напряжения, предназначенные для подключения измерительных приборов, средств управления и регулирования;

3. *средства управления* – релейная защита, регуляторы, автоматика, телемеханика, связь, обеспечивающие оперативное и автоматическое управление схемой и работой ЭЭС [2].

### 3. Режимы работы электроэнергетических систем и средства управление ими

#### 3.1. Классификация режимов электроэнергетической системы

Состояние ЭЭС на заданный момент или отрезок времени называется *режимом*. Режим определяется составом включенных основных элементов ЭЭС и их загрузкой. Значения напряжений, мощностей и токов элементов, а также частоты, определяющие процесс производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, называются *параметрами режима*.

Если параметры режима неизменны во времени, то режим ЭЭС называется *установившимся*, если изменяются – то *переходным*. Строго говоря, понятие установившегося режима в ЭЭС условное, так как в ней всегда существует переходный режим, вызванный малыми колебаниями нагрузки. Установившийся режим понимается в том смысле, что параметры режима генераторов электростанций и крупных подстанций практически постоянны во времени.

Основная задача ЭЭС – экономичное и надежное электроснабжение потребителей без перегрузок основных элементов ЭЭС и при обеспечении заданного качества электроэнергии. В этом смысле основной режим ЭЭС – *нормальный установившийся*. В таких режимах ЭЭС работает большую часть времени.

По тем или иным причинам допускается работа ЭЭС в *утяжеленных установившихся (вынужденных)* режимах, которые характеризуются меньшей надежностью, некоторой перегрузкой отдельных элементов и, возможно, ухудшением качества электроэнергии. Длительное существование утяжеленного режима нежелательно, так как при этом существует повышенная опасность возникновения аварийной ситуации.

Наиболее опасными для ЭЭС являются *аварийные* режимы, вызванные короткими замыканиями и разрывами цепи передачи электроэнергии, в частности, вследствие ложных срабатываний защит и автоматики, а также ошибок эксплуатационного персонала. Длительное существование аварийного режима недопустимо, так как при этом не обеспечивается нормальное электроснабжение потребителей и существует опасность дальнейшего развития аварии и распространения ее на соседние районы. Для предотвращения возникновения аварии и прекращения ее развития применяются средства автоматического и оперативного управления, которыми оснащаются диспетчерские центры, электростанции и подстанции.

После ликвидации аварии ЭЭС переходит в *послеаварийный установившийся режим*, который не удовлетворяет требованиям экономичности и не полностью соответствует требованиям надежности и качества электроснабжения. Он допускается только как *кратковременный* для последующего перехода к нормальному режиму.

Для завершения классификации режимов ЭЭС отметим еще *нормальные переходные режимы*, вызванные значительными изменениями нагрузки и выводом оборудования в ремонт [2]. Переходный режим ЭЭС представляет собой целую гамму переходных процессов, различающихся скоростью протекания:

- волновые переходные процессы (1–100 мкс);
- электромагнитные переходные процессы (10–500 мс);
- электромеханические переходные процессы (0,1–10 с);
- длительные электромеханические переходные процессы, возникающие, например, при каскадном развитии аварий (от нескольких минут до десятков минут).

Переходные режимы делятся на две большие группы по величине возмущающих воздействий или возмущений:

1. Переходные режимы при малых возмущениях, т.е. установившиеся режимы. ЭЭС должна работать устойчиво при малых возмущениях, иначе говоря, она должна обладать статической устойчивостью. *Статическая устойчивость* – это способность ЭЭС восстанавливать исходный режим после малого его возмущения.

2. Переходные режимы при больших возмущениях, возникающих как в нормальных, так и в аварийных условиях работы ЭЭС. По отношению к большим возмущениям вводится понятие динамической устойчивости ЭЭС. *Динамическая устойчивость* – это способность ЭЭС восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или состояние, практически близкое к исходному и допустимое по условиям эксплуатации ЭЭС. Если после большого возмущения синхронная работа ЭЭС сначала нарушается, а затем после некоторого, допустимого по условиям эксплуатации, асинхронного хода восстанавливается, то считается, что система обладает *результатирующей устойчивостью*.

Уже из перечисления возможных режимов ЭЭС следует, что этими режимами необходимо управлять, причем для разных режимов задачи управления различаются:

а) для нормальных режимов – это обеспечение экономичного и надежного электроснабжения;

б) для утяжеленных режимов – это обеспечение надежного электроснабжения при длительно допустимых перегрузках основных элементов ЭЭС;

в) для аварийных режимов – это максимальная локализация аварии и быстрая ликвидация ее последствий;

г) для послеаварийных режимов – быстрый и надежный переход к нормальному установившемуся режиму;

д) для нормальных переходных режимов – быстрое затухание колебаний.

### 3.2. Нормативные показатели устойчивости электроэнергетической системы

Электрoэнергетическая система должна работать так, чтобы некоторые изменения (ухудшения) режима не приводили к нарушению устойчивости ее работы. Простейшая оценка ее запаса устойчивости основывается на сопоставлении показателей проверяемого (исходного) режима и показателей, характеризующих режим, предельный по устойчивости.

*Статическая устойчивость.* Запас статической устойчивости ЭЭС по мощности определяется по формуле, %:

$$k_p = \frac{P_{\text{пр}} - P}{P_{\text{пр}}} \cdot 100,$$

где  $P$  – передаваемая мощность;  $P_{\text{пр}}$  – предельная передаваемая мощность, определенная из условий устойчивости режима с учетом действия автоматических устройств.

Значение  $k_p$  должно быть не менее 20 % в нормальном режиме и 8 % в кратковременном послеаварийном режиме (до вмешательства персонала в регулирование режима).

Запас статической устойчивости по напряжению ЭЭС в целом в нормальном режиме должен быть не менее 10%. Запас по напряжению определяется для каждой из основных узловых точек ЭЭС по формуле, %:

$$k_U = \frac{U_{\text{н}} - U_{\text{кр}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100,$$

где  $U_{\text{н}}$  – длительно поддерживаемое напряжение в рассматриваемой узловой точке ЭЭС;  $U_{\text{кр}}$  – критическое напряжение в этой же точке, при котором нарушается статическая устойчивость работы ЭЭС.

Запас статической устойчивости ЭЭС в целом оценивается по наименьшему запасу, полученному для основных узловых точек (т.е. по наихудшей точке). Если наихудшая точка известна заранее, то достаточно рассчитать запас для этой точки.

Статическая устойчивость работы ЭЭС в послеаварийных режимах обеспечивается, как правило, за счет мероприятий, не требующих дополнительных капитальных вложений:

- кратковременного повышения напряжения на зажимах генераторов;
- быстрого снижения нагрузки электропередачи путем отключения части генераторов на электростанциях и т.п.

Кроме того, существуют мероприятия, улучшающие статическую устойчивость, но требующие дополнительных капитальных вложений:

- 1) применение быстродействующей системы возбуждения генераторов;
- 2) использование синхронных компенсаторов на промежуточных подстанциях;
- 3) использование статических тиристорных компенсаторов;

4) продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления электропередачи с помощью статических конденсаторов и т.п.

Практически все эти мероприятия позволяют улучшить и динамическую устойчивость.

*Динамическая устойчивость.* Расчеты динамической устойчивости имеют своей целью выявление характера динамического перехода от одного режима ЭЭС к другому. Если при этом переходе ни одна мощная электростанция не выпадает из синхронной работы, то переход считается благополучным. Обычно проверка устойчивости ЭЭС производится при коротких замыканиях, происходящих в наиболее опасных (в смысле возможного нарушения устойчивости) точках при наибольшей возможной нагрузке электропередачи. Динамическая устойчивость должна обеспечиваться при наиболее характерных для данного элемента ЭЭС возмущениях и режимах, принятых за расчетные.

Согласно действующим нормативам по расчетам динамической устойчивости, она должна обеспечиваться в наиболее тяжелых точках энергосистемы при следующих видах коротких замыканий:

- для сетей 35 кВ – при трехфазном коротком замыкании;
- для сетей 110–1150 кВ – при двухфазном коротком замыкании на землю.

### **3.3. Средства управления режимами электроэнергетической системы**

#### **Автоматические устройства электроэнергетической системы**

Управление режимами ЭЭС осуществляется оперативным персоналом, а также автоматическими регуляторами и устройствами противоаварийной автоматики (ПА). Практически вся автоматика в настоящее время построена на основе микропроцессорных систем. Настройка автоматических систем управления производится в соответствии с заранее выбранными характеристиками так, чтобы обеспечить экономичность работы ЭЭС и соответствие требованиям качества отпускаемой потребителям электроэнергии.

Выбор видов используемых автоматических устройств, оценка их эффективности и влияния на надежность работы ЭЭС производятся на основе специальных оптимизационных расчетов. Управление режимами ЭЭС должно быть оптимальным, т.е. дающим наилучший технико-экономический эффект в условиях действия противоположных факторов. Например, желая увеличить передаваемую по ЛЭП мощность, можно вызвать аварийное отключение этой линии из-за нарушения устойчивости ее работы.

Рассмотрим наиболее важные автоматические устройства ЭЭС и их назначение.

*Автоматические регуляторы возбуждения (АРВ)* синхронных машин поддерживают напряжение на их шинах на требуемом уровне и, в случае необходимости, форсируют возбуждение, улучшая тем самым устойчивость работы ЭЭС.

*Автоматические регуляторы частоты вращения (АРЧВ)* турбин генераторов поддерживают требуемую частоту вращения роторов генераторов и тем самым частоту в ЭЭС.

*Автоматическое регулирование частоты и активной мощности (АРЧМ)* поддерживает неизменными баланс активной мощности и частоту с учетом возможностей межсистемных электропередач по пропускной способности, т.е. ограничений по передаваемой активной мощности.

*Релейная защита (РЗ)* элементов ЭЭС действует на сигнал или на отключение элементов энергосистемы в случае их повреждения или ненормальной работы. Информация о состоянии защищаемого объекта непрерывно поступает в защитное устройство, которое обрабатывает ее и в случае нарушения нормального режима работы устанавливает место и вид повреждения.

*Автоматическое включение резерва (АВР)* осуществляет ввод резервного оборудования при аварийном отключении основного.

*Автоматическое повторное включение (АПВ)* повышает надежность электроснабжения потребителей за счет повторного включения ЛЭП после ее автоматического отключения посредством релейной защиты.

*Автоматическая частотная разгрузка (АЧР)* ЭЭС обеспечивает сохранение баланса мощности при тяжелой аварии, если она сопровождается значительным понижением частоты в энергосистеме (ниже допустимого уровня). В этом случае АЧР отключает ряд наименее ответственных, заранее выбранных потребителей, чтобы предотвратить значительное снижение частоты и напряжения в ЭЭС, следовательно, сохраняет устойчивость работы ЭЭС.

*Автоматический частотный пуск (АЧП)* агрегатов ГЭС осуществляется при снижении частоты в ЭЭС ниже допустимого уровня с учетом эго, что время набора мощности агрегатами ГЭС составляет около 1 мин.

## **Регулирование напряжения в электрических сетях**

Как уже отмечалось, основными элементами электрических цепей являются источники электромагнитной энергии, элементы передачи (линии электропередачи, линии связи) и преобразования энергии (трансформаторы, выпрямители, инверторы и др.), а также приемники энергии, в которых электромагнитная энергия преобразуется в энергию других видов (механическую, химическую, тепловую и т.п.).

Протекание тока по элементам электрической сети сопровождается потерями напряжения. В результате по мере удаления от источника питания напряжение уменьшается. В то же время для нормальной работы электроприемников подводимое к ним напряжение может только незначительно отличаться от номинального напряжения и должно находиться в допустимых пределах.

Согласно ГОСТ 13109–97 на качество электроэнергии для большинства электроприемников отклонение напряжения от номинального значения не должно превышать 5 %, В послеаварийных режимах работы допустимое отклонение напряжения увеличивается еще на 5 %. В питающих сетях нижние допустимые отклонения напряжений достигают 10–15 %. Обеспечить выполнение требований к отклонениям напряжений в современных ЭЭС без применения специальных мер и устройств невозможно. Если принять, что на пути от генераторов электростанций до приемников электрическая энергия претерпевает четыре трансформации, при каждой трансформации потери напряжения составляют 5 %, а в каждой из сетей – 10 %, то суммарные потери напряжения могут составить 60%.

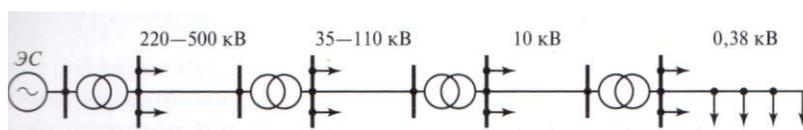


Рисунок 3 – Схема передачи электроэнергии в сети

Для обеспечения допустимых уровней напряжения в ЭЭС используются специальные технические средства – регулирующие устройства. Их назначение – уменьшение или компенсация потерь напряжения в сетях.

Для анализа возможностей уменьшения потерь напряжения в элементах ЭЭС (линиях, трансформаторах) воспользуемся выражением для их определения:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U},$$

где  $P, Q$  – активная и реактивная мощности в элементе сети;  $R, X$  – активное и реактивное сопротивления элемента;  $U$  – напряжение на том конце элемента, где заданы мощности.

Из этого выражения следует, что потери напряжения уменьшаются при увеличении напряжения сети, а также, что с ростом передаваемой мощности увеличивается напряжение электропередачи. Увеличение номинального напряжения позволяет уменьшить потери напряжения, но его нельзя рассматривать как средство регулирования напряжения. Решение об уровне номинального напряжения принимается на основании данных о передаваемой мощности и расстоянии, на которое передается эта мощность.

Другая возможность – изменение мощности. Уменьшение активной мощности связано с ее недоотпуском потребителям и поэтому не может быть использовано. Уменьшить потоки реактивной мощности можно с помощью установки у потребителей источников реактивной мощности (ИРМ). При полной компенсации можно достичь нулевого потока реактивной мощности по элементу сети, хотя экономически это делать нецелесообразно.

Еще одна возможность влияния на потери напряжения связана с изменением сопротивления линии. Уменьшение активного сопротивления связано с увеличением сечения проводов воздушной линии ЛЭП или с включением

параллельно работающих элементов, что делать экономически нецелесообразно.

Наиболее эффективным и используемым средством уменьшения потерь напряжения является компенсация реактивной мощности (КРМ), однако при этом следует отметить, что основным ее назначением остается все-таки снижение потерь активной мощности и электроэнергии в сети. Основным же средством регулирования напряжения является использование специальных технических средств, которые рассматриваются ниже.

*Синхронные генераторы.* Будучи основным источником реактивной мощности в ЭЭС, генераторы электростанций одновременно являются важнейшим из средств регулирования напряжения. У большинства генераторов напряжение на его зажимах  $U_{\Gamma}$  может изменяться в пределах

$$0,95U_{\text{ном}} \leq U_{\Gamma} \leq 1,05U_{\text{ном}}.$$

Заданное значение напряжения может поддерживаться автоматическим регулятором возбуждения (АРВ). Напряжение на шинах генератора удается поддерживать на заданном уровне только в том случае, если генерируемая им реактивная мощность  $Q_{\Gamma}$  находится в допустимых пределах

$$Q_{\text{min}} \leq Q_{\Gamma} \leq Q_{\text{max}}.$$

При достижении реактивной мощностью предельного значения она фиксируется на этом значении и напряжение генератора уже будет изменяться следующим образом: при достижении нижнего предела изменения мощности – повышаться, при достижении верхнего предела – понижаться. Номинальная реактивная мощность генератора определяется номинальным коэффициентом мощности  $\cos \varphi_{\Gamma}$ .

*Синхронные компенсаторы (СК)* позволяют поддерживать и регулировать напряжение в пределах  $\pm 5\%$  в точке подключения за счет изменения тока возбуждения. Как и у генераторов, регулирование напряжения возможно при изменении реактивной мощности СК в допустимых пределах.

Ту же задачу решают статические тиристорные компенсаторы (СТК) с тем отличием от СК, что благодаря тиристорной системе управления регулирование осуществляется практически мгновенно. Это особенно важно для стабилизации переходных процессов в ЭЭС.

*Трансформаторы, автотрансформаторы.* К устройствам, позволяющим регулировать напряжение в сети относятся также *двухобмоточные трансформаторы* понижающих подстанций, *автотрансформаторы* и *трехобмоточные трансформаторы* для связи сетей различного номинального напряжения, *линейные регуляторы*, работающие в блоке с автотрансформаторами. В этих устройствах одна из обмоток имеет несколько регулировочных ответвлений, с помощью которых можно изменять количество рабочих витков обмотки и тем самым изменять коэффициент трансформации, что приводит к изменению напряжения на шинах нагрузки при одном и том же подведенном к трансформатору напряжении.

## 4. Технические средства передачи электроэнергии. Сверхпроводимость

### 4.1. Классификация линий электропередачи

Линия электропередачи (ЛЭП) – это электрическая линия, выходящая за пределы электростанции или подстанции и предназначенная для передачи электрической энергии на расстояние [10].

Существует 2 типа передачи больших количеств электроэнергии на расстояние:

- линии открытого типа (воздушные);
- линии закрытого типа (кабельные).

Современная классификация ЛЭП базируется на ряде признаков и приведена в табл.4.1

Таблица 4.1.  
Классификация линий электропередачи

Признак	Тип линии	Разновидности
Род тока	Постоянного тока	–
	Трёхфазного переменного тока	–
	Многофазного переменного тока	Шестифазная Двенадцатифазная
Номинальное напряжение	До 1 кВ	НН (до 1 кВ)
	Свыше 1 кВ	СН (3 – 35кВ)
		ВН (110 – 220 кВ)
		СВН (330 – 750 кВ) УВН (свыше 1000 кВ)
Конструктивное выполнение	Воздушная	–
	Кабельная	–
Число цепей	Одноцепная	–
	Двухцепная	–
	Многоцепная	–
Топологические характеристики	Радиальная	–
	Магистральная	–
	Ответвление	–
Функциональное назначение	Распределительная	–
	Питающая	–
	Межсистемная связь	–

На первом месте в классификации стоит род тока. В соответствии с этим признаком различаются линии постоянного и переменного тока. Линии постоянного тока конкурируют с остальными лишь при достаточно большой

протяженности и передаваемой мощности. Наиболее распространены в мире линии трехфазного переменного тока, причем по протяженности среди них лидируют именно воздушные линии (ВЛ).

Наиболее важным признаком, определяющим различие конструктивных и электрических характеристик ЛЭП, является номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ . Выделяют ЛЭП низкого (НН), среднего (СН), высокого (ВН), сверхвысокого (СВН) и ультравысокого (УВН) напряжения (см.табл.2.1).

Процесс электрификации, создания и объединения энергосистем в Единую энергосистему сопровождался постепенным увеличением номинального напряжения ЛЭП с целью повышения их пропускной способности. Исторически сложились две системы номинальных напряжений. Первая, наиболее распространенная, включает в себя следующий ряд значений  $U_{\text{ном}}$ : 35–110–220–500–1150 кВ, а вторая: 35–150–330–750 кВ. К 2000 г. на территории России находилось в эксплуатации около 680 тыс. км ВЛ 35–1150 кВ.

По конструктивному исполнению различают воздушные и кабельные линии (КЛ). *Кабельная линия* – линия электропередачи, выполненная одним или несколькими кабелями, уложенными непосредственно в землю или проложенными в кабельных сооружениях (коллекторах, туннелях, каналах, блоках и т.п.). *Воздушная линия* – это «линия электропередачи, провода которой поддерживаются над землей с помощью опор, изоляторов и арматуры» [10]. Наряду с типовыми конструктивными решениями, современная техника передачи электроэнергии по линиям открытого типа располагает и рядом нетрадиционных оригинальных предложений, направленных на увеличение пропускной способности и уменьшение полосы отчуждения под трассу линии, на более полное удовлетворение требованиям технической эстетики и снижение отрицательного воздействия электромагнитных полей ВЛ СВН и особенно УВН на окружающую среду, а также на повышение экономичности процесса передачи электроэнергии.

По количеству параллельных цепей ( $n_{\text{ц}}$ ), прокладываемых по общей трассе, различают одноцепные ( $n_{\text{ц}} = 1$ ), двухцепные ( $n_{\text{ц}} = 2$ ) и многоцепные ( $n_{\text{ц}} > 2$ ) линии. По ГОСТ 24291–90 одноцепная воздушная линия переменного тока определяется как линия, имеющая один комплект фазных проводов, а двухцепная ВЛ – два комплекта. Соответственно, многоцепной ВЛ называется линия, имеющая более двух комплектов фазных проводов. Эти комплекты могут иметь одинаковые или различные номинальные напряжения. В последнем случае линия называется комбинированной.

Одноцепные воздушные линии сооружаются на одноцепных опорах, тогда как двухцепные могут сооружаться либо с подвеской каждой цепи на отдельных опорах, либо с их подвеской на общей (двухцепной) опоре. В последнем случае, очевидно, сокращается полоса отчуждения территории под трассу линии, но возрастают вертикальные габариты и масса опоры. Первое

обстоятельство, как правило, является решающим, если линия проходит в густонаселенных районах, где обычно стоимость земли достаточно высока. По этой же причине в ряде стран мира используются и многоцепные опоры с подвеской цепей одного номинального напряжения (обычно с  $n_{\text{Ц}} = 4$ ) либо разных напряжений (с  $n_{\text{Ц}} < 6$ ).

По топологическим (схемным) характеристикам различают радиальные и магистральные линии. Радиальной считается линия, в которую мощность как линия, от которой отходит несколько ответвлений. Под ответвлением понимается линия, присоединенная одним концом к другой ЛЭП в ее промежуточной точке.

Последний признак классификации – функциональное назначение. Здесь выделяются распределительные и питающие линии, а также линии межсистемной связи. Деление линий на распределительные и питающие достаточно условно, ибо и те, и другие служат для обеспечения электрической энергией пунктов потребления. Обычно к распределительным относят линии местных электрических сетей, а к питающим – линии сетей районного значения, которые осуществляют электроснабжение центров питания распределительных сетей. Линии межсистемной связи непосредственно соединяют разные энергосистемы и предназначены для взаимного обмена мощностью как в нормальных режимах, так и при авариях.

#### **4.2. Общая характеристика воздушной линии и условий ее работы**

Воздушная линия – это устройство для передачи электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным при помощи изоляторов и арматуры к опорам или кронштейнам инженерных сооружений. В этом определении перечислены почти все основные элементы ВЛ (опоры, провода, изоляторы, арматура), за исключением грозозащитных тросов и фундаментов [3]. Наглядное представление о составе конструктивных элементов дает рис. 4

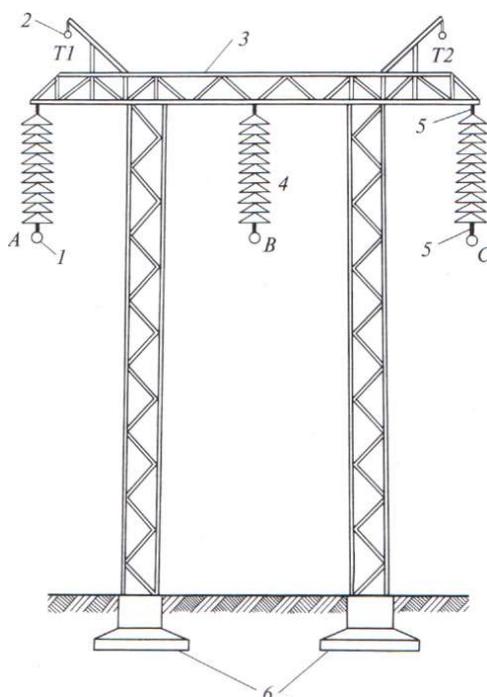


Рисунок 4 – Конструктивные элементы ВЛ:

1 – провода фаз линии (А, В, С); 2 – защитные тросы (Т1, Т2); 3 – опоры; 4 – гирлянда изоляторов; 5 – элементы арматуры; 6 – фундаменты

Естественно, главными элементами являются провода фаз линии А, В, С, непосредственно осуществляющие передачу электроэнергии. Для защиты проводов от прямых ударов молнии служат тросы, монтируемые в верхней части опор на тросостойках. Опоры предназначены для надежного поддержания проводов и тросов на определенной высоте над поверхностью земли как при нормальной эксплуатации линии, так и в различных аварийных ситуациях. Спектр конструкций опор из различных материалов достаточно разнообразен. Изоляторы должны обеспечить необходимый промежуток между находящимся под напряжением проводом и заземленным телом опоры. Линейная арматура – это комплекс устройств, с помощью которых провода соединяются, закрепляются на изоляторах, а изоляторы – на опорах. Наконец, фундаменты служат для обеспечения устойчивого положения опор в пространстве.

На рис. 5 показан участок одноцепной воздушной линии между опорами, которые по виду отличаются от показанной на рис. 4. Эти опоры называются анкерными, а расстояние  $L_a$  между ними по трассе – анкерным пролетом. Такие опоры, в отличие от расположенных между ними промежуточных опор, рассчитаны на противодействие значительным силам одностороннего тяжения по проводам, возникающим при их обрыве в примыкающем к анкерной опоре промежуточном пролете длиной  $L$ , а также при монтаже проводов и тросов. Провода на анкерных опорах жестко закрепляются на натяжных гирляндах изоляторов, а на промежуточных опорах – на поддерживающих гирляндах, имеющих длину  $\lambda_r$ . Длина гирлянды тем больше, чем выше номинальное напряжение линии.

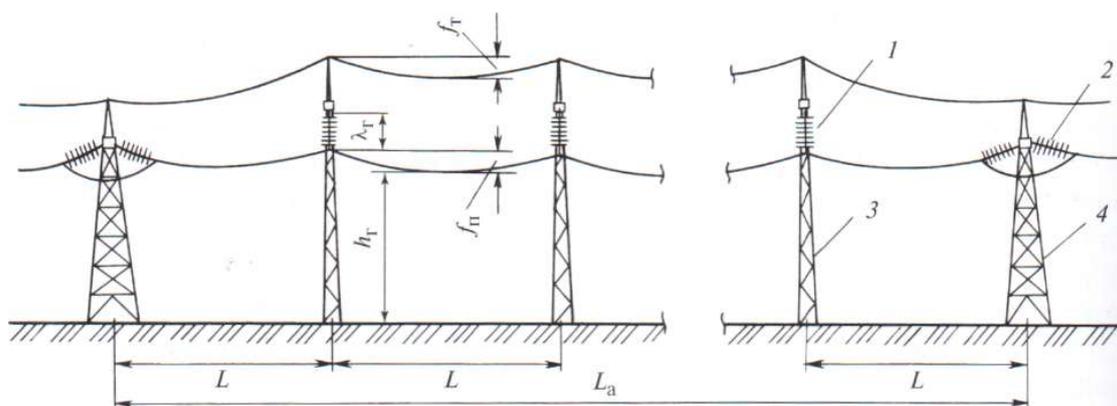


Рисунок 5 – Эскиз анкерного пролета ВЛ:

1 – поддерживающая гирлянда; 2 – натяжная гирлянда; 3 – промежуточная опора; 4 – анкерная опора

В промежуточном пролете провода и тросы провисают. Расстояние по вертикали между точкой подвеса на опоре и низшей точкой в пролете называется стрелой провеса. На рис. 5 стрела провеса провода обозначена  $f_n$ , а троса –  $f_T$ . Расстояние от низшей точки провода до земли, воды или пересекаемых объектов  $h_T$  называется габаритом линии. Оно определяется в ПУЭ в зависимости от  $U_{ном}$ , характера местности и типа пересекаемого линией сооружения и для ВЛ с  $U_{ном} < 500$  кВ, сооружаемых в ненаселенной местности, составляет 6–8 м.

Элементы ВЛ работают в сложных и разнообразных географических и климатических условиях, различающихся сезонными изменениями температуры и влажности воздуха, наличием в нем природных и промышленных загрязнений. Кроме того, они должны противостоять воздействию сил, основными из которых являются: вес всех элементов линии; вес гололедоизморозевых отложений на проводах, тросах и опорах; давление ветра на провода, тросы и опоры; тяжения по проводам и тросам [2]. Обусловленные массой конструктивных элементов линии силы, действующие на одну опору, могут достигать сотен тысяч ньютонов ( $1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}$ ), и провода, тросы и опоры должны быть рассчитаны на такие нагрузки.

При определенных погодных условиях (обычно при температуре воздуха от  $-3$  до  $-5$  °С и скорости ветра до 10 м/с) происходит образование ледяного покрова на проводах, тросах и опорах ВЛ с массой  $900 \text{ кг/м}^3$ . Вес такого покрова, приходящийся на одну опору, может достигать тысяч ньютонов. Интенсивность гололедообразования неодинакова в различных регионах страны. Вся территория России делится на восемь районов, различающихся возможной максимальной толщиной стенки гололеда. Карты районирования страны по гололедным условиям приводятся в ПУЭ.

Аналогичным образом территория России делится на восемь районов с различной максимальной скоростью ветра. Ветровые нагрузки (скоростной напор ветра) также должны восприниматься всеми конструктивными элементами ВЛ. Обычно считается, что давление ветра направлено параллельно

поверхности земли и перпендикулярно продольной оси линии. Силы, обусловленные действием ветра, в расчете на одну опору могут достигать сотен тысяч ньютонов и обязательно учитываются при проектировании механической части ВЛ.

Действие ветра обуславливает и два нежелательных явления, отрицательно влияющих на конструктивную часть ВЛ.

Во-первых, это вибрация проводов и тросов, возникающая при равномерном движении воздуха со скоростью 4–8 м/с. Она характеризуется частотой колебаний в десятки герц и амплитудами до десятков миллиметров. Вибрация вызывает многократные перегибы проволок проводов и тросов, что в конечном счете приводит к их излому, ослаблению прочности провода или троса и к возможности их обрыва, т.е. к аварийной ситуации.

Во-вторых, при скоростях ветра 15–30 м/с может возникать так называемая пляска проводов и тросов. Обычно это явление наблюдается в период, когда провода и тросы покрыты гололедом. Эти колебания характеризуются частотой в единицы герц, однако их амплитуда может достигать величины, равной стреле провеса провода или троса. Возникающие при этом динамические воздействия на узлы крепления проводов к гирляндам изоляторов и последних к опорам настолько значительны, что могут приводить к поломкам арматуры и деталей опор. Кроме того, при пляске возможны касания и схлестывания проводов между собой и с тросами, что вызывает короткие замыкания и аварийное отключение линии.

Для борьбы с вибрацией воздушные линии оснащаются виброгасителями. Единственным средством демпфирования колебаний при пляске является плавка гололеда, осуществляемая с помощью специального оборудования, обеспечивающего прохождение по линии больших токов и такой нагрев проводов, при котором происходят таяние и сброс ледяной корки.

Проводниковые материалы, из которых изготавливаются провода воздушных линий электропередачи, т.е. их главные элементы, должны удовлетворять ряду технических и экономических требований. Прежде всего они должны обладать невысоким удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ , чтобы потери активной мощности на нагрев проводов и потери напряжения в линии при прочих равных условиях были по возможности минимальны.

Плотность этих материалов  $\gamma$  также не должна быть высокой, поскольку при заданном поперечном сечении проводника  $F$  она определяет удельную нагрузку от собственного веса провода. Еще одним требованием является высокая механическая прочность, оцениваемая по пределу прочности на разрыв  $\sigma_{\text{разр}}$ . Одновременно проводниковый материал должен обладать стойкостью к атмосферным воздействиям и химическим реагентам, находящимся в воздухе. Наконец, этот материал не должен быть дефицитным и дорогим, чтобы стоимость воздушных линий была бы приемлемой при их массовом строительстве.

### 4.3. Общая характеристика кабельных линий

В настоящее время силовые кабельные линии сооружаются в тех случаях, когда строительство воздушных линий нецелесообразно по причинам экономического, архитектурно-планировочного или экологического характера.

Совокупность этих причин в наибольшей степени проявляется при решении вопросов электроснабжения крупных городов и промышленных зон, где в большинстве случаев приходится считаться с необходимостью отчуждения достаточно больших территорий под трассы воздушных линий, а также с экологическими и эстетическими недостатками их сооружения в густонаселенных районах. Поэтому в последние десятилетия для электроснабжения таких районов все шире используются кабельные линии, а в крупнейших городах с целью высвобождения территории для жилищного строительства все чаще ранее сооруженные воздушные линии заменяются кабельными. Кроме того, кабельные линии в ряде случаев являются единственным средством передачи электроэнергии через большие водные пространства, на подходах к аэропортам, а также для обеспечения выдачи мощности гидроэлектростанций, если отсутствует возможность связи трансформаторов и распределительного устройства высшего напряжения по воздушным линиям [3].

Кабельные линии, прокладываемые по городским или промышленным территориям, в большинстве случаев являются закрытыми сооружениями, причем чаще всего подземными. Вследствие этого они защищены от воздействия ветра и гололедных нагрузок, однако подвержены другим отрицательным внешним воздействиям. При прокладке кабелей в грунте ими являются наличие влаги, химическая агрессивность почвы, наличие блуждающих токов, возможность механических повреждений механизмами при проведении земляных работ, дополнительный нагрев от проложенных вблизи теплотрасс или других источников теплоты и т.п. В связи с этим конструкции как собственно кабеля, так и кабельной линии в целом должны предусматривать защиту от указанных воздействий. Поэтому поверх электрической изоляции кабеля накладывается металлическая оболочка, которая, в свою очередь, имеет те или иные защитные покровы, в том числе в ряде случаев и металлическую броню для защиты от механических повреждений.

Кабельная линия как электроустановка состоит из следующих элементов: собственно силового кабеля (или кабелей), оборудования для соединения и секционирования участков кабеля и присоединения концов кабеля к аппаратуре и к шинам распределительных устройств (кабельная арматура), а также аппаратуры подпитки маслом или газом (для масло- и газонаполненных кабелей). Кабели могут прокладываться не только в земляных траншеях, но и в различных кабельных сооружениях – в коллекторах, туннелях, каналах, блоках, шахтах, в кабельных этажах и двойных полах, по эстакадам и в галереях. Кабельная арматура иногда вместе с аппаратурой подпитки может

размещаться в кабельных колодцах или камерах. В специальных зданиях располагаются автоматические подпитывающие установки маслonaполненных кабельных линий высокого давления. Таким образом, кабельная линия, в особенности при номинальных напряжениях 110 кВ и более, представляет собой достаточно сложное техническое сооружение.

Классификация кабельных линий в основном соответствует классификации ее главных элементов, т.е. кабелей. Основными признаками этой классификации являются [1-3]:

- род тока;
- значение номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$ ;
- число токоведущих элементов;
- материал токоведущих элементов;
- электроизоляционный материал (ЭИМ);
- характер пропитки и способ увеличения электрической прочности бумажной изоляции;
- материал оболочек.

Данные признаки относятся лишь к кабелям, работающим в условиях естественного охлаждения.

Рассмотрение кабельных линий с форсированным охлаждением водой или маслом, а также криогенных кабелей является предметом специального курса, поэтому здесь эти нетрадиционные типы кабельных линий не рассматриваются, равно как и кабельные линии, использующие в качестве основной изоляции сжатый газ [3].

По роду тока различаются силовые кабели переменного и постоянного тока.

Кабели переменного тока по величине  $U_{\text{ном}}$  делятся на кабели низкого (до 1 кВ), среднего (1–35 кВ) и высокого напряжения (110 кВ и выше).

По числу токоведущих элементов различают кабели одно-, двух-, трех- и четырехжильные. Двух- и четырехжильные кабели используются в сетях с номинальным напряжением до 1 кВ. Последние применяются в четырехпроводных сетях переменного тока, поэтому четвертая жила выполняет функцию нулевого провода и ее сечение обычно меньше сечения фазных жил. Одножильные и преимущественно трех- жильные кабели используются в сетях с  $U_{\text{ном}} = 3–35$  кВ. Кабели более высоких напряжений, как правило, одножильные.

По материалу токоведущих элементов различают кабели с медными, алюминиевыми и натриевыми жилами. В последнее время в связи с дефицитностью и высокой стоимостью меди при  $U_{\text{ном}} < 35$  кВ преимущественно изготавливаются кабели с алюминиевыми жилами. Кабели с натриевыми жилами на сегодня еще не получили широкого распространения, и их ограниченное количество находится в стадии экспериментальных исследований и опытной эксплуатации.

Электрическая изоляция токопроводящих жил (ТПЖ) рассматриваемых традиционных конструкций кабелей может быть реализована с использованием различных электроизоляционных материалов (ЭИМ). В настоящее время промышленность выпускает кабели с бумажной пропитанной, пластмассовой и резиновой изоляцией. Последние изготавливаются в ограниченном количестве на напряжения до 1 кВ. Производство кабелей с пластмассовой изоляцией в настоящее время расширяется, поскольку они имеют ряд преимуществ по сравнению с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией, основными из которых являются простота изготовления, большее удобство монтажа и эксплуатации, а также большие допустимые температуры нагрева в стационарных режимах, при перегрузках и коротких замыканиях.

Бумажная электрическая изоляция кабелей с номинальным напряжением до 35 кВ для увеличения электрической прочности пропитывается составами различной вязкости. При этом различают кабели, пропитанные нормально, обедненно и нестекающим составом. При  $U_{ном} > 110$  кВ вязкая пропитка не обеспечивает требуемой электрической прочности изоляции при экономически приемлемых габаритах кабеля. Поэтому для таких кабелей увеличение электрической прочности достигается заполнением бумажной изоляции маслом или газом под давлением. В первом случае кабели получили название маслонаполненных, во втором – газонаполненных.

Защита бумажной электрической изоляции кабелей от увлажнения при хранении и в процессе монтажа и дальнейшей эксплуатации линии обеспечивается наложением металлических оболочек. Кабели с такой изоляцией в нашей стране изготавливают в свинцовых и алюминиевых оболочках. В последнем случае оболочка может выполняться гладкой или гофрированной (для обеспечения требуемой гибкости). Неметаллические оболочки (из пластмассы или резины) применяются для кабелей с синтетической или резиновой изоляцией.

Силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 6 и 10 кВ изготавливаются трехжильными. В качестве фазной и поясной изоляции применяется бумага, пропитанная маслоканифольным составом. Такие кабели выпускаются с медными и алюминиевыми жилами секторной формы. Для защиты гигроскопичной изоляции в конструкции кабеля предусмотрена металлическая оболочка из свинца или алюминия. Поверх металлических оболочек накладываются защитные покровы для механической и коррозионной защиты. Конструкция трехжильного кабеля с поясной изоляцией показана на рис. 6.

Из перечисленных выше разновидностей кабелей широкое применение при построении систем электроснабжения нашли кабели переменного тока среднего и высокого напряжений с бумажно-масляной изоляцией.

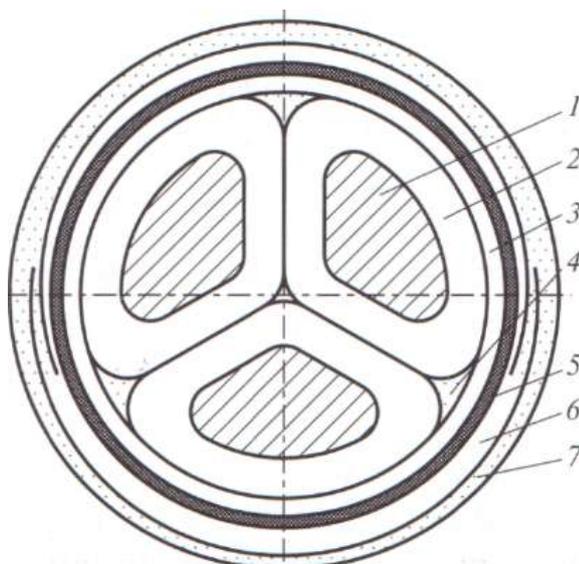


Рисунок 6 – Трехжильный кабель с поясной изоляцией и секторными уплотненными жилами:

1 – токопроводящая жила; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – заполнение; 5 – свинцовая оболочка; 6 – подушка под броней; 7 – броня из двух стальных лент

Надежность работы всей кабельной линии во многом определяется надежностью ее арматуры, т.е. муфт различного типа и назначения. Кабельные муфты высокого напряжения можно классифицировать по трем основным признакам [1–3].

По назначению муфты делятся на три основные группы – концевые, соединительные и стопорные, причем среди концевых выделяют открытые муфты и кабельные вводы в трансформаторы и аппараты высокого напряжения, а среди соединительных – собственно соединительные, ответвительные и соединительно-разветвительные муфты.

1. По виду электрической изоляции муфты в свою очередь делятся на две группы: со слоистой и с монолитной изоляцией. Слоистая изоляция выполняется путем намотки лент из кабельной бумаги, синтетической пленки или их композиции и заполняется той или иной изолирующей средой (маслом, газом) под избыточным давлением или без него. Монолитная изоляция образуется методом экструзии или спеканием ЭИМ в подогреваемых пресс-формах.

2. По роду тока различают муфты для кабелей переменного, постоянного и импульсного тока. Муфты кабелей переменного тока могут выполняться однофазными и трехфазными.

3. Конструкция муфт силовых кабелей высокого напряжения в первую очередь определяется типом кабеля, для которого они предназначены.

#### 4.4. Сверхпроводимость

Сверхпроводимость (СП) – явление, заключающееся в том, что у определенных химических элементов, соединений, сплавов при их охлаждении ниже определенной температуры наблюдается переход из нормального в так называемое сверхпроводящее состояние, в котором их электрическое сопротивление постоянному току полностью отсутствует. При этом переходе структурные свойства этих сверхпроводников остаются практически неизменными. Электрические и магнитные свойства в сверхпроводящем состоянии резко отличаются от этих свойств в нормальном режиме [2].

Сверхпроводимость была обнаружена во многих металлах и сплавах и в некоторых полупроводниковых и керамических материалах, число которых все возрастает. Два наиболее интересных явления, которые наблюдаются в сверхпроводящем состоянии вещества – исчезновение электрического сопротивления в сверхпроводнике и выталкивание магнитного потока из его объема. Первый эффект интерпретировался ранними исследователями как свидетельство бесконечно большой электрической проводимости, откуда и произошло название сверхпроводимость.

Исчезновение электрического сопротивления может быть продемонстрировано возбуждением электрического тока в кольце из сверхпроводящего материала. Если кольцо охладить до нужной температуры, то ток в кольце будет существовать неограниченно долго даже после удаления вызвавшего его источника тока. Магнитный поток – это совокупность магнитных силовых линий, образующих магнитное поле. Пока напряженность поля ниже некоторого критического значения, поток выталкивается из сверхпроводника, что схематически показано на рис. 7.

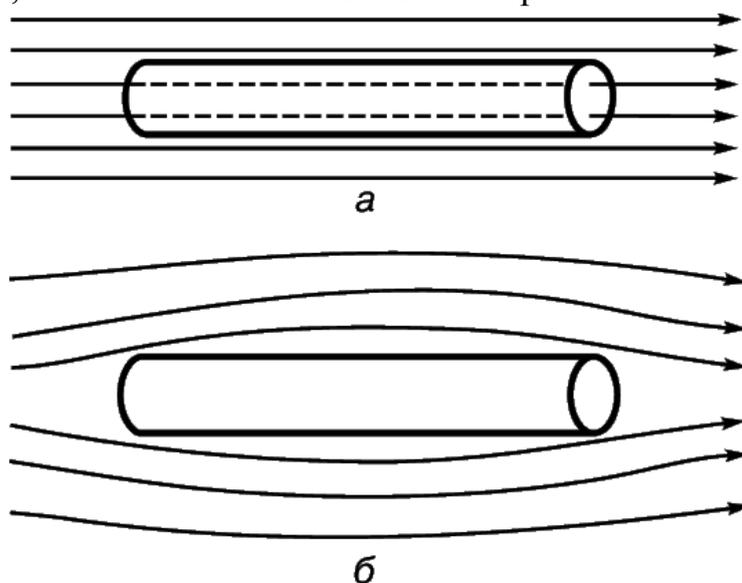


Рисунок 7 – Магнитный поток проникает в стержень, находящийся в нормальном состоянии (а), но выталкивается из стержня, охлажденного до сверхпроводящего состояния (б)

Твердое тело, проводящее электрический ток, представляет собой кристаллическую решетку, в которой могут двигаться электроны. Решетку образуют атомы, расположенные в геометрически правильном порядке, а движущиеся электроны – это электроны с внешних оболочек атомов. Поскольку поток электронов и есть электрический ток, эти электроны называются электронами проводимости. Если проводник находится в нормальном (несверхпроводящем) состоянии, то каждый электрон движется независимо от других. Способность любого электрона перемещаться и, следовательно, поддерживать электрический ток ограничивается его столкновениями с решеткой, а также с атомами примесей в твердом теле. Чтобы в проводнике существовал ток электронов, к нему должно быть приложено напряжение; это значит, что проводник имеет электрическое сопротивление. Если же проводник находится в сверхпроводящем состоянии, то электроны проводимости объединяются в единое макроскопически упорядоченное состояние, в котором они ведут себя уже как «коллектив»; на внешнее воздействие реагирует также весь «коллектив». Столкновения между электронами и решеткой становятся невозможными, и ток, однажды возникнув, будет существовать и в отсутствие внешнего источника тока (напряжения). Сверхпроводящее состояние возникает скачкообразно при температуре, которая называется температурой перехода. Выше этой температуры металл или полупроводник находится в нормальном состоянии, а ниже ее – в сверхпроводящем. Температура перехода данного вещества определяется соотношением двух «противоположных сил»: одна стремится упорядочить электроны, а другая – разрушить этот порядок. Например, тенденция к упорядочиванию в таких металлах, как медь, золото и серебро, столь мала, что эти элементы не становятся сверхпроводниками даже при температуре, лежащей лишь на несколько миллионных кельвина выше абсолютного нуля. Абсолютный нуль (0 К,  $-273,16^{\circ}$  С) – это нижняя граница температуры, при которой вещество теряет все свое тепло. Другие металлы и сплавы имеют температуры перехода в диапазоне от 0,000325 до 23,2 К. В 1986 были созданы сверхпроводники из керамических материалов с необычайно высокой температурой перехода. Так, для образцов керамики  $YBa_2Cu_3O_7$  температура перехода превышает 90 К.

Различают низкотемпературную и высокотемпературную сверхпроводимости. Низкотемпературная сверхпроводимость достигается при охлаждении определенных материалов жидким гелием при уровне температур 4 К (точнее 4,2 по Кельвину, эта температура кипения жидкого гелия при нормальном давлении). Высокотемпературная сверхпроводимость достигается при охлаждении определенных материалов жидким азотом при температуре 77 К (точнее 77,3 по Кельвину или  $-195,7^{\circ}$  С).

Перечислим основные определения, характеризующие свойства сверхпроводников.

1) Критическое магнитное поле – значение поля, выше которого сверхпроводник находится в нормальном состоянии. Критические поля обычно лежат в интервале от нескольких десятков гаусс до нескольких сотен тысяч гаусс в зависимости от сверхпроводника и его металлофизического состояния. Критическое поле данного сверхпроводника меняется с температурой, уменьшаясь при ее повышении. При температуре перехода критическое поле равно нулю, а при абсолютном нуле оно максимально.

2) Критический ток – максимальный постоянный ток, который может выдерживать сверхпроводник без потери сверхпроводящего состояния. Как и критическое магнитное поле, критический ток сильно зависит от температуры, уменьшаясь при ее увеличении.

3) Глубина проникновения – расстояние, на которое магнитный поток проникает в сверхпроводник. Глубина проникновения оказывается функцией температуры и различна в разных материалах. Магнитный поток выталкивается из сверхпроводника токами, циркулирующими в поверхностном слое, толщина которого приблизительно равна глубине проникновения.

Чтобы понять, почему выталкивается магнитный поток, т.е. чем обусловлен эффект Мейсснера, нужно вспомнить, что все физические системы стремятся к состоянию с минимальной энергией. Магнитное поле обладает некоторой энергией. У сверхпроводника в магнитном поле энергия увеличивается. Но она снова понижается благодаря тому, что в поверхностном слое сверхпроводника возникают токи. Эти токи создают магнитное поле, которым компенсируется поле, приложенное извне. Энергия сверхпроводника выше, чем в отсутствие внешнего магнитного поля, но ниже, чем в том случае, когда поле проникает внутрь его.

Полное выталкивание магнитного потока энергетически выгодно не для всех сверхпроводников. В некоторых материалах состояние с минимальной энергией в магнитном поле достигается, если некоторые из линий магнитного потока частично проникают в вещество, образуя мозаику из сверхпроводящих областей, где магнитное поле отсутствует, и нормальных, где оно есть.

4) Длина когерентности – расстояние, на котором электроны взаимодействуют друг с другом, создавая сверхпроводящее состояние. Электроны в пределах длины когерентности движутся согласованно – когерентно (как бы «в ногу»). С существованием больших длин когерентности (намного превышающих атомные размеры порядка  $10^{-8}$  см) связаны необычные свойства сверхпроводников.

5) Удельная теплоемкость – количество теплоты, необходимое для того, чтобы повысить температуру 1 г вещества на 1 К. Удельная теплоемкость сверхпроводника резко возрастает вблизи температуры перехода в сверхпроводящее состояние, и довольно быстро уменьшается с понижением температуры. Таким образом, в области перехода для повышения температуры вещества в сверхпроводящем состоянии требуется больше теплоты, чем в нормальном состоянии, а при очень низких температурах – наоборот. Так как

удельная теплоемкость определяется в основном электронами проводимости, это явление указывает на то, что состояние электронов изменяется.

### Сверхпроводящие кабельные линии электропередачи

Основными ожидаемыми преимуществами СП-кабельных линий электропередачи являются:

- возможность передачи электроэнергии практически без потерь; малые габариты, малая отчуждаемая территория, необходимая для укладки этих линий;
- возможность передачи электроэнергии на сравнительно низком напряжении вследствие практического отсутствия потерь.

При освоении промышленного производства СП-кабельных линий они могут найти следующее применение:

- передача электроэнергии на определенные расстояния;
- глубокие вводы в города, мегаполисы
- кабельные линии при переходе через водные преграды и др.;
- схемы выдачи мощности от ГЭС, ТЭС, АЭС и др.

Конструкция однофазного СП-кабеля показана на рисунке 8.



Рисунок 8 – Конструкция сверхпроводящего кабеля

Существует особенность сверхпроводящего кабеля. Потери в кабеле постоянного тока практически равны нулю, при протекании переменного тока существуют небольшие потери.

## *Применение сверхпроводников*

Керамические сверхпроводники весьма перспективны в плане крупномасштабных применений, главным образом по той причине, что их можно изучать и использовать при охлаждении сравнительно недорогим жидким азотом.

Сверхпроводимость будет широко использоваться в компьютерных технологиях. Здесь сверхпроводящие элементы могут обеспечивать очень малые времена переключения, ничтожные потери мощности при использовании тонкопленочных элементов и большие объемные плотности монтажа схем. Разрабатываются опытные образцы тонкопленочных джозефсоновских контактов в схемах, содержащих сотни логических элементов и элементов памяти.

Наиболее интересные возможные промышленные применения сверхпроводимости связаны с генерированием, передачей и использованием электроэнергии. Например, по сверхпроводящему кабелю диаметром несколько дюймов можно передавать столько же электроэнергии, как и по огромной сети ЛЭП, причем с очень малыми потерями или вообще без них. Стоимость изготовления изоляции и охлаждения сверхпроводников должна компенсироваться эффективностью передачи энергии. С появлением керамических сверхпроводников, охлаждаемых жидким азотом, передача электроэнергии с применением сверхпроводников становится экономически очень привлекательной.

Еще одно возможное применение сверхпроводников – в мощных генераторах тока и электродвигателях малых размеров. Обмотки из сверхпроводящих материалов могли бы создавать огромные магнитные поля в генераторах и электродвигателях, благодаря чему они были бы значительно более мощными, чем обычные машины. Опытные образцы давно уже созданы, а керамические сверхпроводники могли бы сделать такие машины достаточно экономичными. Рассматриваются также возможности применения сверхпроводящих магнитов для аккумулялирования электроэнергии, в магнитной гидродинамике и для производства термоядерной энергии.

Инженеры давно уже задумывались о том, как можно было бы использовать огромные магнитные поля, создаваемые с помощью сверхпроводников, для магнитной подвески поезда (магнитной левитации). За счет сил взаимного отталкивания между движущимся магнитом и током, индуцируемым в направляющем проводнике, поезд двигался бы плавно, без шума и трения и был бы способен развивать очень большие скорости. Экспериментальные поезда на магнитной подвеске в Японии и Германии достигли скоростей, близких к 300 км/ч.

## 5. Качество электроэнергии

Электрическая энергия непосредственно используется при создании других видов продукции и оказывает существенное влияние на экономические жители производства и качество выпускаемых изделий. Понятие качества электрической энергии (КЭ) проявляется через качество работы электроприемников (ЭП). Поэтому если ЭП работают неудовлетворительно, и в каждом конкретном случае качество электроэнергии соответствует установленным требованиям, то причину следует искать в качестве изготовления. Если параметры КЭ не соответствуют требованиям, то претензии предъявляются поставщику – электроснабжающей организации. Качество электроэнергии на месте производства не гарантирует ее качества в точке присоединения потребителя. Качество электроэнергии является составляющей электромагнитной совместимости, характеризующей электромагнитную среду. Электроприемники и аппараты, присоединенные к электрическим сетям, предназначены для работы при определенных номинальных параметрах: номинальной частоте, номинальном напряжении, номинальном токе, изменяющемся по синусоидальному закону. В системе электроснабжения всегда возможно отклонение от этих требований, определяемых показателями электрической энергии (ПКЭ).

*Качество электрической энергии* – это совокупность ее характеристик по частоте и напряжению, называемых показателями качества электроэнергии, определяющих воздействие электроэнергии на электрооборудование, электрические аппараты и приборы, подключенные к электрической сети, оцениваемое по соответствию этих ПКЭ установленным требованиям.

*Электромагнитная совместимость (ЭМС)* характеризует не только взаимодействие между электрическими приборами, аппаратами, электрооборудованием и электромагнитной средой, но и взаимодействие этих технических средств между собой. Под ЭМС понимают способность электротехнических средств или их элементов нормально функционировать в данной электромагнитной среде (обстановке), не внося недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) в эту среду и не испытывая таковых с ее стороны.

*Электромагнитная помеха* – это случайное электромагнитное воздействие, способное вызывать в электротехническом устройстве нарушение функционирования, отказ, разрушение. Помеха может проявляться как ток, напряжение, электромагнитное поле. В практике различают *кондуктивные* и *полевые* ЭМП. К кондуктивным относятся помехи, распространяющиеся по проводам, в частности по электрической сети. Полевые помехи распространяются через окружающее пространство. Помехи создаются источниками помех, которыми могут быть как электротехнические средства, так и электротехнологические процессы.

## 5.1. Показатели качества электроэнергии

Качество электроэнергии учитывает все аспекты ЭМС, но характеризует только электрическую сеть. Установленные для нее уровни ЭМС называют показателями качества электроэнергии.

Фактические значения ПКЭ должны контролироваться с помощью специализированных средств измерения в условиях эксплуатации, а уровни помехоустойчивости и уровни вносимых ЭП помех – путем необходимых испытаний при их разработке и производстве.

Все одиннадцать ПКЭ, которые установлены ГОСТ 13109-97, могут быть условно разделены на три группы. К первой группе можно отнести отклонения частоты и отклонения напряжения, которые связаны с особенностями технологического процесса производства и передачи электроэнергии. Ко второй группе можно отнести ПКЭ, характеризующие несинусоидальность формы кривой напряжения, несимметрию и колебания напряжения. Источниками этих искажений (эмитентами) являются, главным образом, электроприемники. К третьей группе можно: отнести ПКЭ, характеризующие случайные электромагнитные явления и электротехнические процессы, несвязанные с технологическим процессом производства, передачи и потребления электроэнергии. К ним относятся провалы напряжения, перенапряжения и импульсы напряжения, которые возникают в системе электроснабжения в большинстве случаев в результате коммутаций электрооборудования или разрядов молнии на линию электропередачи. Рассмотрим эти показатели более подробно.

*Отклонение частоты.* Частота  $f$  является общесистемным параметром режима ЭЭС и определяется балансом активной мощности. При возникновении дефицита генерируемой мощности в системе происходит снижение частоты до такого значения, при котором устанавливается новый баланс генерируемой и потребляемой мощности. При избытке генерируемой мощности, наоборот, частота повышается.

Качество электроэнергии по частоте характеризуется отклонением частоты  $\Delta f$  :

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном}},$$

где  $f_{\text{ном}}$  - номинальное значение частоты, Гц;  $f_y$  - фактическое установившееся (измеренное) значение частоты, Гц.

ГОСТ 13109-97 устанавливает следующие нормы по отклонению частоты:  $\Delta f_{\text{норм}} = \pm 0,2$  Гц и  $\Delta f_{\text{пред}} = \pm 0,4$  Гц соответственно для нормально и предельно допустимых значений.

*Отклонение напряжения.* Напряжение в узлах электроэнергетической системы может быть различным и определяется балансом реактивной мощности в этих узлах. Отличие фактического установившегося напряжения

$U_y$  в заданной точке сети от его номинального значения  $U_{\text{ном}}$  характеризуется отклонением напряжения  $\delta U_y$ . Отклонения напряжения, определяемые в процентах от номинального значения, устанавливаются в том или ином узле ЭЭС в зависимости от параметров сети и нагрузки узла:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100,$$

ГОСТ 13109–97 устанавливает нормы по отклонениям напряжения на выводах электроприемников как  $\delta U_{\text{норм}} = \pm 5\%$  и  $\delta U_{\text{пред}} = \pm 10\%$  соответственно для нормальных и предельно допустимых значений.

*Колебания напряжения.* Если отклонения напряжения создаются под воздействием относительно медленных изменений нагрузки, определяемых ее графиком, то быстрые изменения нагрузки создают колебания напряжения. Колебания напряжения определяются по огибающей действующих или амплитудных значений напряжения и характеризуются размахом  $\delta U_t$  и частотой повторения изменений напряжения  $F_{\delta U_t}$  или интервалами между изменениями напряжения. Пример огибающей амплитудных значений напряжения, измеренных дискретно на каждом полупериоде, приведен на рис. 9. Размах изменения напряжения оценивается в процентах на каждом полупериоде основной частоты по формуле

$$\delta U_t = \frac{U_{i2} - U_{i1}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100,$$

где  $U_{i2}$  и  $U_{i1}$  – значения следующих один за другим экстремумов или экстремума и горизонтального участка.

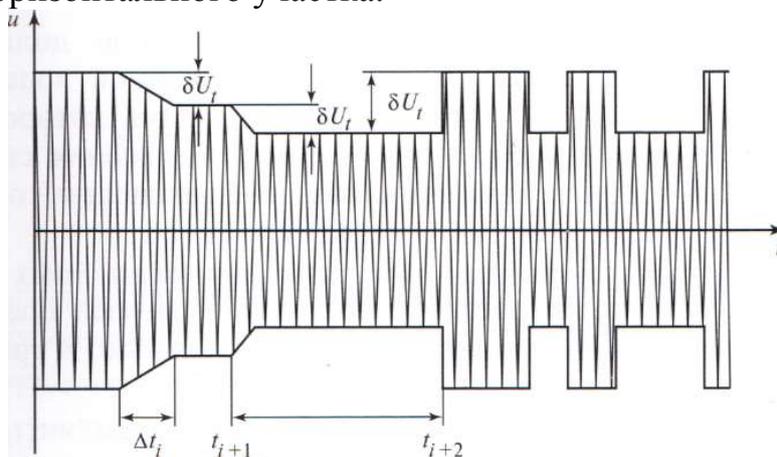


Рисунок 9 – Колебания напряжения размахом  $\delta U_t$ , длительностью  $\Delta t_i$  и интервалом между изменениями  $t_{i+2} - t_{i+1}$

ГОСТ 13109–97 устанавливает нормы по колебаниям напряжения в зависимости от их размахов и частоты повторения по кривой предельно

допускаемых размахов, измеренных на 10-минутных интервалах за 24 ч непрерывных наблюдений.

*Несинусоидальность напряжения.* Значительную долю нагрузки в электрической сети представляют ЭП с нелинейной вольтамперной характеристикой. Такие ЭП потребляют ток, форма которого существенно отличается от синусоидальной. Пример искажения синусоидальной формы кривой и ее гармонических составляющих приведен на рис. 10.

Наиболее распространенными источниками нелинейных искажений являются преобразователи. Ток, потребляемый преобразователем, в первом приближении имеет не синусоидальную, а трапецеидальную форму.

В соответствии с известными в математике методами (разложение Фурье) несинусоидальный ток может быть представлен как сумма синусоидальных токов, каждый из которых имеет свою частоту, кратную основной. Эти составляющие называются гармониками. Тогда ток определяется выражением:

$$i(\omega t) = I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t + I_3 \sin 3\omega t + \dots + I_n \sin n\omega t,$$

где  $I_n$  – амплитуда гармоники;  $n$  – кратность гармоники по отношению с основной частоте или порядок гармоники.

Эти токи, в элементах сети (линии, трансформаторы) создают на них падение напряжения. В результате напряжение в точке присоединения преобразователя отличается от напряжения источника питания. Причем эти падения напряжения устанавливаются для каждой гармоники в отдельности так, что, суммируясь, они обуславливают несинусоидальные напряжения в указанной точке, где

$$u(t) = U_{\text{ист}} \sin \omega t + \Delta U_{(1)} \sin \omega t + \Delta U_{(2)} \sin 2\omega t + \dots + \Delta U_{(n)} \sin n\omega t.$$

Такое искажение синусоидальной формы кривой показано на рис. 10.

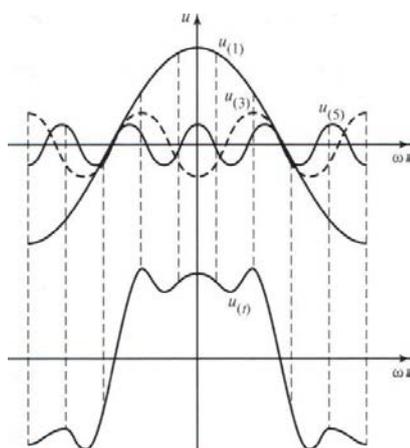


Рисунок 10 – Искажение синусоидальной формы кривой напряжения  $u_{(1)}$  гармониками: вверху – гармонический состав напряжения (1, 3, 5-я гармоники); внизу – результирующая (искаженная) форма кривой

$$u(t) = u_{(1)}(t) + u_{(3)}(t) + u_{(5)}(t)$$

Результирующая кривая напряжения  $u(t)$  обусловлена наличием в ней составляющих (гармоник) 1-го порядка  $u_{(1)}$  (основная гармоника частотой 50 Гц) и высших порядков: 3-го –  $u_{(3)}$  и 5-го –  $u_{(5)}$ , частота которых в 3 и 5 раз больше основной.

Гармонический состав кривой напряжения характеризуют коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ , %:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100,$$

где  $U_{(n)}$  - амплитуда  $n$ -й гармоники, В;  $U_{(1)}$  - амплитуда 1-й гармоники, В.

В целом несинусоидальность напряжения характеризуется коэффициентом искажения синусоидальной формы кривой напряжения  $K_U$ :

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100.$$

ГОСТ 13109–97 устанавливает нормы как по  $K_U$ , так и по  $K_{U(n)}$  в зависимости от номинального напряжения сети и порядка гармоник.

*Несимметрия напряжения.* Электроприемники, которые получают питание только от одной или двух фаз трехфазной сети, образуют несимметричную нагрузку. Типичным видом таких ЭП является бытовая аппаратура, освещение. В промышленности – это сварочное оборудование, индукционные печи, тяговые подстанции железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе. Суммарная нагрузка отдельных предприятий, а также коммунально-бытовая нагрузка содержат 85–90 % электроприемников, которые становятся причиной несимметрии.

Несимметрия напряжений характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения основной частоты по обратной последовательности  $K_{2U}$  и по нулевой последовательности  $K_{0U}$ . Эти коэффициенты рассчитываются только для трехфазных систем по формулам

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100; \quad K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100,$$

где  $U_{1(1)}, U_{2(1)}, U_{0(1)}$  - действующие значения напряжения основной частоты прямой, обратной и нулевой последовательностей, В.

ГОСТ 13109–97 устанавливает одинаковые нормы по коэффициентам несимметрии напряжения для сетей любых номинальных напряжений. Нормально допустимые значения составляют для  $K_{2U} = 2\%$  и  $K_{0U} = 2\%$  напряжения основной частоты прямой последовательности, а предельно допустимые значения для соответствующих коэффициентов – 4 %.

*Провалы напряжения.* К провалам напряжения относится внезапное значительное снижение напряжения (более чем на 10%  $U_{ном}$ ) в точке

электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от нескольких периодов до нескольких десятков секунд. В отличие от ранее рассмотренных ПКЭ провалы напряжения являются совершенно случайными, но весьма вероятными событиями и характеризуют аномальные режимы работы системы электроснабжения.

Глубина провала напряжения рассчитывается по формуле, %:

$$\delta U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100,$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение, В.

Форма провала напряжения может быть многоступенчатой, что вызвано действием нескольких средств защиты и автоматики.

Длительность провала напряжения рассчитывается как разница между временем восстановления напряжения  $t_{\text{к}}$  и временем начала провала  $t_{\text{н}}$  так, что  $\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{к}} - t_{\text{н}}$ . Установлено, что длительность восстанавливаемого провала напряжения не превышает 30 с.

Характеристики провала различны для разных точек сети и зависят от схемы, типа и состояния ее оборудования, степени автоматизации и защиты. Характеристики провала напряжения не нормируются.

*Временное перенапряжение.* По определению, временное перенапряжение – это повышение напряжения в точке электрической сети выше продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или КЗ. Причинами появления кратковременных перенапряжений являются коммутации ненагруженных линий передачи, конденсаторных батарей или малонагруженных трансформаторов, подключение или отключение большой нагрузки.

Перенапряжения могут иметь периодический или аperiodический характер. Их можно разделить на кратковременные, длительные (периодические) и импульсные (aperiodические).

Коэффициент временного перенапряжения не нормируется и рассчитывается по формуле, отн. ед.:

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{a \text{ max}}}{\sqrt{2}U_{\text{ном}}},$$

а длительность временного перенапряжения по формуле, с:

$$\Delta t_{\text{пер}U} = t_{\text{к.пер}} - t_{\text{н.пер}},$$

где  $U_{a \text{ max}}$  – амплитудное значение напряжения основной частоты, В;  $t_{\text{к.пер}}$  и  $t_{\text{н.пер}}$  – момент (конечный и начальный) превышения уровня действующих значений напряжения, равного  $1,1U_{\text{ном}}$ .

*Импульсное напряжение* – это резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до

первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд.

Импульсные напряжения вызываются грозовыми явлениями, а также переходными процессами при коммутациях в системе электроснабжения. В этой связи различают грозовые и коммутационные импульсы напряжения, которые существенно различаются по своим характеристикам и форме. Грозовые импульсы – весьма распространенное явление. При ударах молния попадает в грозозащитное устройство зданий и подстанций, соединенных кабелями высокого и низкого напряжения ; линиями связи и управления. При одной молнии могут наблюдаться до 10 импульсов, следующих друг за другом с интервалом от 10 до 100 мс.

## 6. Трансформаторное оборудование

### 6.1. Трансформаторы напряжения. Конструкция и принцип действия

*Трансформатором* называется электромагнитное статическое устройство, предназначенное для преобразования параметров электрической энергии в цепях переменного тока. С помощью трансформаторов можно изменить величину напряжения, тока, начальные фазы и частоты, т.е. любого из параметров, определяющих напряжение или ток в цепи.

Для усиления магнитной связи между обмотками они помещаются на стальном сердечнике (рис. 11). Трансформаторы, не имеющие стального сердечника, называются воздушными. Они применяются в специальных случаях при преобразовании переменных токов высокой частоты (от 10000–20000 Гц и выше).

Основными частями трансформатора являются его сердечник и обмотки. Сердечник для уменьшения потерь от вихревых токов собирается из листов специальной электротехнической стали с относительным содержанием кремния до 4–5%. Толщина стали берется 0,5 или 0,35 мм (еще более тонкие листы применяются при повышенной частоте тока). Листы перед сборкой сердечника покрываются с обеих сторон лаком, что дает более прочную и тонкую изоляцию между листами, чем бумага, которой иногда оклеиваются листы до нарезки их на полосы.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции, в соответствии с которым значение электродвижущей силы ЭДС, наведенной в контуре, пропорционально скорости изменения потока  $\Phi$ , пронизывающего этот контур. Если в контуре имеется несколько последовательно соединенных витков  $w$ , то наведенная в катушке ЭДС будет в  $w$  раз больше:

$$e = w \frac{d\Phi}{dt}$$

Принцип работы трансформатора рассмотрим на примере простейшего однофазного двухобмоточного трансформатора, электромагнитная система которого представлена на рис. 11. Трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода  $\mathcal{L}$  и двух обмоток с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ . Обмотки трансформатора служат для создания магнитного поля, посредством которого осуществляется передача электрической энергии и обеспечивается наведение в обмотках ЭДС, требуемой по условиям эксплуатации. Обмотки выполняют из медных или алюминиевых изолированных проводов круглого или прямоугольного сечения.

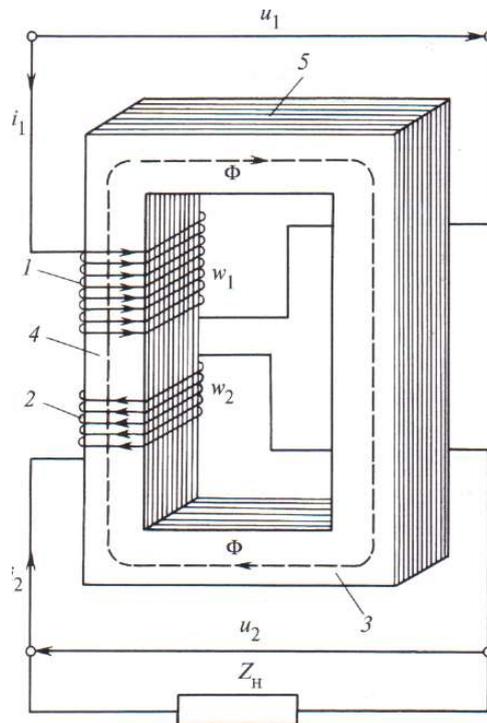


Рисунок 11 – Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора: 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3, 4, 5 – магнитопровод; 4 – стержень магнитопровода; 3, 5 – ярма магнитопровода

Обмотку  $w_1$  трансформатора, к которой подводится электрическая энергия (напряжение  $u_1$ ), называют *первичной*, а обмотку  $w_2$ , от которой энергия отводится (напряжение  $u_2$ ), – *вторичной*.

Магнитопровод трансформатора служит для усиления магнитной связи между обмотками и является конструктивным основанием (остовом) для установки и крепления обмоток, отводов и других деталей трансформатора.

Часть магнитопровода, на которой располагается обмотка, называют стержнем, а часть магнитопровода, замыкающая стержни, на которых не располагаются обмотки, называется ярмом.

Если первичную обмотку трансформатора при разомкнутой вторичной включить в сеть переменного тока с напряжением  $u_1$  то по ней потечет ток  $i_0$ , называемый током холостого хода. Обусловленная током магнитодвижущая сила (МДС) первичной обмотки  $i_0 w_1$  создает в магнитопроводе трансформатора переменный магнитный поток  $\Phi$ , который полностью, за исключением потока рассеяния, сцеплен со всеми катушками первичной и вторичной обмоток. Магнитный поток  $\Phi$  в соответствии с законом электромагнитной индукции наведет в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_1$ , значение которой пропорционально числу витков  $w_1$ , а во вторичной обмотке – ЭДС  $e_2$ , пропорциональную числу витков  $w_2$ .

## 6.2. Автотрансформаторы

Для передачи электрической энергии с незначительным изменением напряжения и тока применяются автотрансформаторы, у которых, в отличие от обычного трансформатора, обмотки имеют не только магнитные, но и электрические связи. Автотрансформатор, как и трансформатор, быть понижающим или повышающим (рис. 12). Электромагнитная (расчетная) мощность автотрансформатора меньше расчетной мощности двухобмоточного трансформатора вследствие того, что часть мощности передается во вторичную сеть за счет непосредственной электрической связи обмоток.

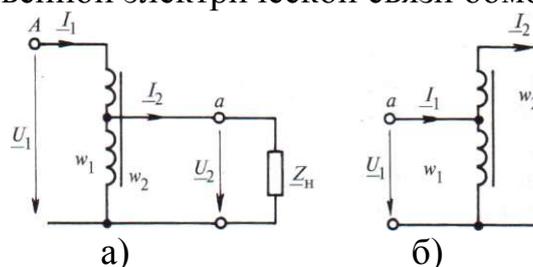


Рисунок 12 – Однофазный понижающий (а) и повышающий (б) автотрансформаторы

За счет уменьшения массы металла обмоток и стали магнитопровода КПД автотрансформатора выше по сравнению с трансформатором такой же номинальной мощности.

К числу недостатков автотрансформаторов, ограничивающих их применение, относится усложнение их релейной защиты и регулирования напряжения, а также повышенная опасность атмосферных перенапряжений из-за электрической связи обмоток. Автотрансформатор имеет, кроме того, повышенные токи короткого замыкания.

Автотрансформаторы используются для соединения электрических сетей высокого напряжения, пуска двигателей переменного тока большой мощности и т.д.

## 6.3. Трансформаторы специального назначения

### Измерительные трансформаторы

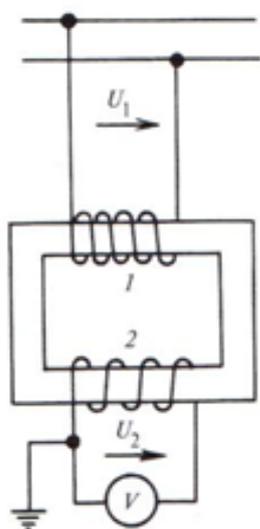
а) Трансформаторы напряжения (ТН на рис. 13а) служат для понижения напряжения (обычно до 100 – 150 В), так как вольтметры и катушки напряжения ваттметров и счетчиков (или реле) не могут быть включены непосредственно на высокое напряжение из-за недостаточной изоляции измерительных приборов и необходимости обеспечить безопасность обслуживающего персонала.

Они выполняются как двухобмоточные трансформаторы и электрически отделяют цепь приборов от цепи высокого напряжения; их вторичная цепь надежно заземляется.

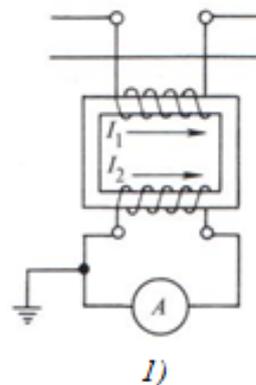
б) Трансформаторы тока (ТТ на рис. 13б) также выполняются в виде двухобмоточных трансформаторов. Их первичная обмотка включается в цепь последователи с потребителями, ток которых надо измерить; во вторичную обмотку включаются амперметр, реле, а при измерении мощности и энергии – токовые катушки ваттметра и счетчика. Все приборы во вторичной цепи соединяются последовательно.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока применяются:

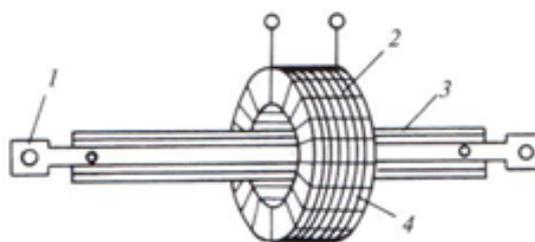
- для отделения цепей измерительных приборов и защитной аппаратуры от цепей с высоким напряжением с целью обеспечения безопасности обслуживания и снижения требований к изоляции приборов;
- для преобразования напряжения и тока к величинам, доступным измерению стандартными приборами.



а)



1)



2)

б)

Рисунок 13 – а) Схема включения трансформатора напряжения: 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка, б) Схема включения трансформатора тока (1) и общий вид проходного трансформатора тока (2): 1 – медный стержень (первичная обмотка); 2 – вторичная обмотка; 3 – изоляция; 4 – магнитопровод

### Сварочные трансформаторы

Для дуговой электросварки применяются трансформаторы с повышенным рассеянием или трансформаторы при последовательном включении с дугой регулируемой реактивной катушки.

Повышение рассеяния в трансформаторе достигается размещением первичной и вторичной обмоток на разных стержнях и применением магнитного шунта между стержнями.

### **Регулировочные трансформаторы**

Регулировочными трансформаторами обычно называются трансформаторы, позволяющие регулировать вторичное напряжение под нагрузкой. Для этого используется переключатель, при котором осуществляется изменение числа витков обмотки без разрыва цепи. Наиболее часто применяется переключатель с токоограничивающим реактором.

### **Трансформаторы для радиоэлектроники**

Широкое применение в различных схемах радиоэлектроники находят трансформаторы малой мощности (от нескольких ВА до тысячных долей ВА). К таким трансформаторам предъявляются особые требования, которые могут быть удовлетворены только при применении специальных ферромагнитных материалов и специального устройства их обмоток и сердечника.

В современной электронной аппаратуре, применяемой в разнообразных отраслях техники, используются трансформаторы, преобразующие ток или напряжение электрических сигналов в широком спектре звуковых и сверхзвуковых частот. Они, как и усилители, рассчитанные на этот диапазон частот, условно называются трансформаторами и усилителями низких частот.

Также широко применяются «импульсные трансформаторы», преобразующие кратковременные импульсные токи, продолжительность которых измеряется микросекундами при числе импульсов в секунду до 1 000.

В электронной технике находят себе также применение трансформаторы, которые на выходе дают периодически изменяющееся напряжение резко заостренной (пикообразной) формы. Они получили название пик-трансформаторов. Применяются они, например, при регулировании сеточного напряжения тиратронов.

## 7. Электрические машины электростанций

### 7.1. Классификация электрических машин

В различных генераторах энергосистемы для преобразования энергии пара, газа, движущейся воды и тп. в электрическую энергию используются различные электрические машины. Также электрические машины используются в работе различных потребителей для выполнения различных технологических операций и процессов. Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным назначением, так как связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий.

Однако применение электрических машин в различных отраслях техники может иметь и другие цели. Так, потребление электроэнергии часто связано с преобразованием переменного тока в постоянный или же с преобразованием тока промышленной частоты в ток более высокой частоты. Для этих целей применяют электромашинные преобразователи.

Электрические машины используют также для усиления мощности электрических сигналов. Такие электрические машины называют электромашинными усилителями. Электрические машины, используемые для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии, называют синхронными компенсаторами. Электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока, называют индукционными регуляторами.

Очень разнообразно применение микромашин в устройствах автоматики. Здесь электрические машины используют не только в качестве двигателей, но и в качестве тахогенераторов (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал), сельсинов, вращающихся трансформаторов (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т.п. Из приведенных примеров видно, сколь разнообразны электрические машины по назначению.

Рассмотрим классификацию электрических машин по принципу действия, согласно которой все электрические машины подразделяют на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией. Бесколлекторные машины – это машины переменного тока. Их делят на асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяют преимущественно в качестве двигателей, а синхронные – как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов. Коллекторные машины используют главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока.

Электрические машины одного принципа действия могут различаться схемами включения либо другими признаками, влияющими на эксплуатационные свойства этих машин. Например, асинхронные и синхронные машины могут быть трехфазными (включаемыми в трехфазную сеть) или однофазными. Асинхронные машины в зависимости от конструкции обмотки ротора разделяют на машины с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Синхронные и коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания в них магнитного поля возбуждения разделяют на машины с обмоткой возбуждения и машины с постоянными магнитами. На рис. 14 представлена диаграмма классификации электрических машин, содержащая основные их виды, получившие наибольшее применение в современном электроприводе.



Рисунок 14 – Классификация электрических машин

Электрические машины и трансформаторы – основные элементы любой энергетической системы или установки, поэтому для специалистов, работающих в сфере производства или эксплуатации электрических машин, необходимы знания теории и понимание физической сущности электромагнитных, механических и тепловых процессов, протекающих в электрических машинах и трансформаторах при их работе.

## 7.2. Асинхронные машины

*Асинхронные машины* относятся к классу электромеханических преобразователей, т.е. преобразователей электрической энергии в механическую или механической в электрическую. В первом случае они называются двигателями, а во втором – генераторами. Все электрические машины обладают свойством обратимости и могут осуществлять преобразование энергии в обоих направлениях, поэтому при изучении процессов в машинах пользуются понятиями двигательного и генераторного режимов. Однако при разработке и изготовлении машины оптимизируются для условий работы в одном из режимов и используются в соответствии с назначением. Асинхронные машины не являются исключением из этого правила, но асинхронные генераторы значительно уступают синхронным по многим параметрам и редко используются на практике, в то время как асинхронные двигатели являются самыми распространёнными электромеханическими преобразователями. Суммарная мощность асинхронных двигателей составляет более 90% общей мощности всех существующих двигателей.

Асинхронные двигатели относятся к бесколлекторным машинам переменного тока или машинам с вращающимся магнитным полем. Название асинхронные (несинхронные) объясняется тем, что в статическом режиме работы скорость вращения ротора (вращающейся части) двигателя отличается от скорости вращения магнитного поля, т.е. ротор и поле вращаются несинхронно.

Причиной широкого распространения асинхронных двигателей является их предельная простота, надежность и экономичность. В последнее время в связи с появлением полупроводниковых преобразователей частоты для питания асинхронных двигателей область их применения существенно расширилась. Они стали широко применяться в высокоточных приборных приводах там, где ранее использовались в основном двигатели постоянного тока.

Основными частями машины являются статор и ротор (рис. 15). Их сердечники собираются из листов электротехнической стали, которые до сборки обычно покрываются с обеих сторон специальным лаком. Тем самым предотвращается образование больших вихревых токов в стали сердечников.

Обмотки и сердечники статора и ротора являются основными частями электрической машины. Они и создают в ней условия для электромагнитных процессов, протекающих при преобразовании электрической энергии в механическую или при обратном преобразовании.

Статор (неподвижная часть машины) асинхронного двигателя состоит из корпуса, сердечника и обмоток. Обмотки состоят из витков, заложенных в пазы сердечника статора и соединенных между собой по особым правилам.

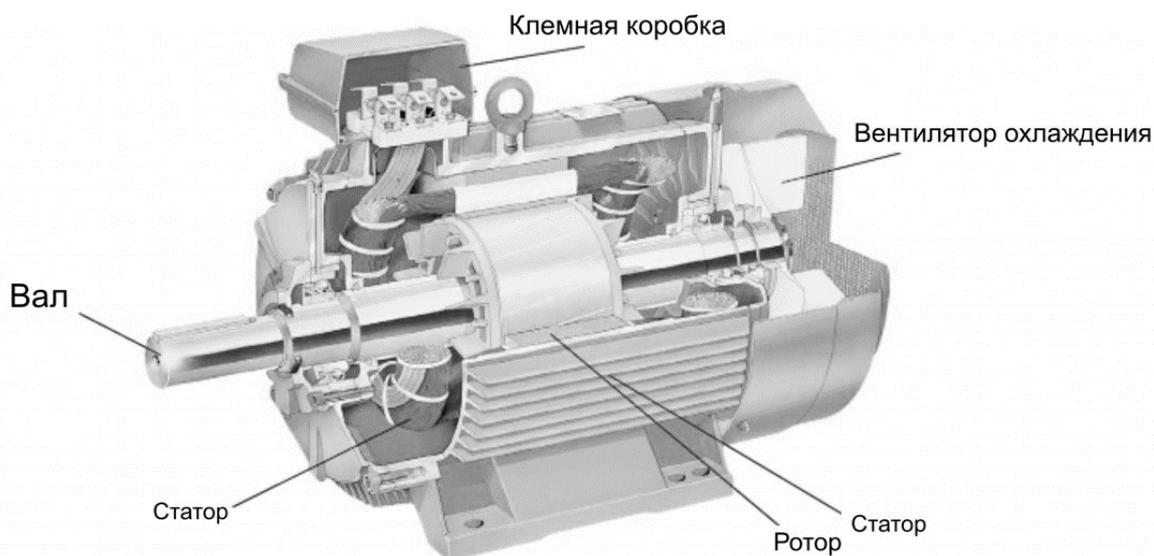


Рисунок 15 – Устройство асинхронной машины

Ротор асинхронной машины изготавливается из листов электротехнической стали, собирается в пакет и напрессовывается на вал. В листах сердечника вырублены отверстия, образующие при сборке пакета продольные каналы, которые заполняются расплавленным алюминием или медью. В результате создаётся обмотка ротора типа «беличья клетка». Ротор такой конструкции называется короткозамкнутым и используется в подавляющем большинстве асинхронных двигателей. Скорость вращения короткозамкнутого ротора ограничивается только условиями механической прочности его конструкции и опор, поэтому асинхронные короткозамкнутые двигатели используются в приводах со скоростями вращения до 300000 об/мин. Более сложную конструкцию имеет фазный ротор. В пазы пакета сердечника этого ротора уложены три фазные обмотки, аналогичные обмоткам статора. Они соединены звездой, а начала обмоток выведены через контактные кольца и щётки и подключены к регулировочным реостатам. Асинхронные двигатели с фазным ротором используются в основном в регулируемом приводе подъёмно-транспортных механизмов, но в последнее время их вытесняют из этой области двигатели с короткозамкнутым ротором с питанием от преобразователей частоты.

### 7.3. Синхронные машины

Синхронными называются бесколлекторные электрические машины переменного тока, у которых скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля, т.е. поле и ротор вращаются синхронно. Синхронные машины, в отличие от асинхронных, преимущественно представлены в классе генераторов. Практически вся электрическая энергия промышленным способом вырабатывается с помощью синхронных генераторов. Они также очень часто используются в автономных источниках

питания переменного тока. Синхронные двигатели используются там, где требуется строго постоянная скорость вращения. Как правило, это мощные приводы в металлургической и горнодобывающей промышленности, приводы насосов и компрессоров магистральных нефте- и газопроводов. Однако в последнее время в сочетании с полупроводниковыми преобразователями частоты они успешно применяются в высококачественных приборных приводах малой и средней мощности с широким диапазоном регулирования скорости вращения.

Очень важным свойством синхронных машин является их способность работать при токе, опережающем по фазе напряжение, т.е. генерировать реактивную мощность, компенсируя её потребление другими машинами и установками, питающимися от той же сети.

Синхронная машина в обычном исполнении состоит из неподвижной части – статора, в пазах которого помещается трехфазная обмотка, и вращающейся части – ротора с электромагнитами, к обмотке которых подводится постоянный ток при помощи контактных колец и наложенных на них щеток (рис.16).

Статор синхронной машины ничем не отличается от статора асинхронной машины. Ротор её выполняется или явнополюсным (с выступающими полюсами, рис.), или неявнополюсным (цилиндрический ротор).



Рисунок 16 – Синхронный электродвигатель со встроенными постоянными магнитами

В зависимости от рода первичного двигателя, которым приводится во вращение синхронный генератор, применяются названия: паротурбинный генератор или сокращенно турбогенератор (первичный двигатель – паровая турбина), гидротурбинный генератор или сокращенно гидрогенератор (первичный двигатель – гидравлическая турбина) и дизель-генератор (первичный двигатель – дизель). Турбогенераторы – быстроходные

невнополюсные машины, выполняемые в настоящее время, как правило, с двумя полюсами. Турбогенератор вместе с паровой турбиной, с которой он механически соединяется называется турбоагрегатом. Гидрогенераторы – в обычных случаях тихоходные явнополюсные машины, выполняемые с большим числом полюсов и с вертикальным валом.

#### 7.4. Двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока исторически были первыми устройствами, преобразующими электрическую энергию в механическую. Позднее они уступили свои позиции бесколлекторным двигателям, но в регулируемом приборном приводе и в системах автоматики до настоящего времени достаточно часто применяются. Это объясняется широким диапазоном и плавностью регулирования скорости вращения, а также более простыми методами и устройствами управления.

Устройство двигателя постоянного тока подробно раскрыто на рис. 17.

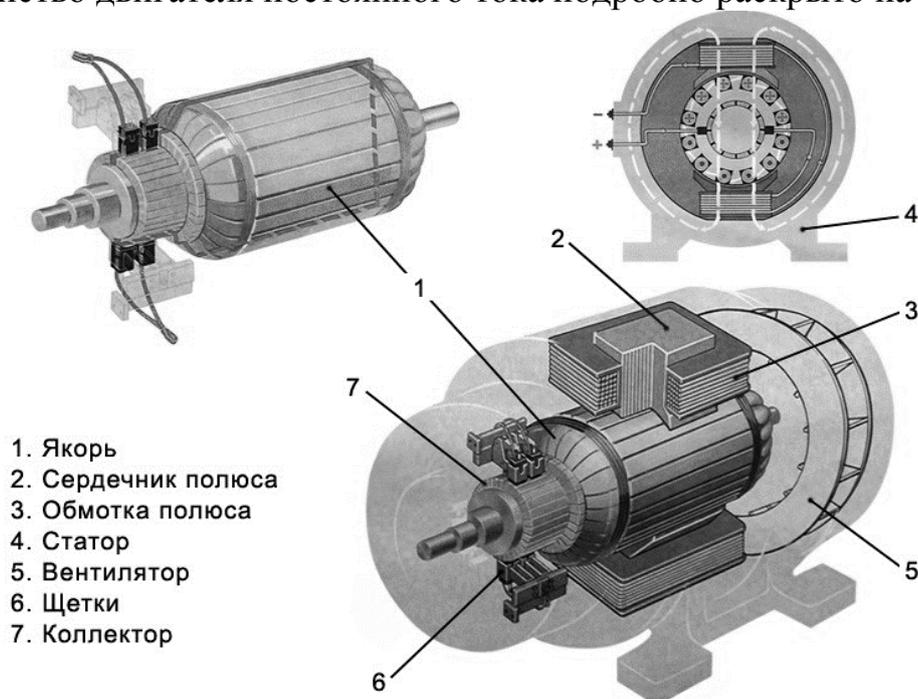


Рисунок 17 – Устройство двигателя постоянного тока

Кроме двигателей широко распространены также генераторы постоянного тока. Однако область их применения сокращается в связи с развитием преобразовательной техники и выбор генератора постоянного тока в качестве источника питания производится обычно с учётом множества факторов, исключающих иное решение.

## 7.5. Вопросы вибрации и выбора электрических машин

В настоящее время в электромеханике все актуальнее становятся вопросы обеспечения необходимых уровней шума и вибраций электропривода. Требования, предъявляемые к вибрациям приводов, постоянно ужесточаются, уровень шума наряду с электроэнергетическими и механическими параметрами является одним из ключевых показателей качества электрической машины. За долгие годы исследования шумов и вибраций в электрических машинах были разработаны научно обоснованные методы проектирования электрических машин, удовлетворяющих жесточайшим требованиям по вольтамперным характеристикам (ВАХ) [1]. Вибрации в электрической машине можно разделить на вибрации электромагнитного и механического происхождения. Для минимизации уровней электромагнитных вибраций машины на стадии проектирования проводится моделирование магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины и выделение его гармонических составляющих. При анализе гармонических составляющих выделяются пары гармоник, которые имеют достаточно большую амплитуду и взаимодействие которых порождает пространственные формы колебаний с порядком  $r \leq 4$ . Далее производится расчет возмущающих радиальных усилий как от самих гармонических составляющих, так и от взаимодействующих пар гармонических составляющих. Возмущающие усилия позволяют рассчитать уровни вибрации электрической машины, обусловленные электромагнитными полями. Снижение уровня электромагнитных возмущающих усилий достигается за счет снижения амплитуды гармонических составляющих магнитного поля в зазоре электрической машины.

Поэтому одним из важнейших аспектов при подходе к проектированию электродвигателей является выбор типа электрической машины. В общем случае выбор электрической машины определяется конкретными требованиями к характеристикам машины. Однако с точки зрения обеспечения минимальных уровней ВАХ самым оптимальным выбором являются машины, которые питаются синусоидальным током и имеют магнитное поле в зазоре наиболее приближенное к синусоиде и, следовательно, содержат минимум гармонических составляющих (например, асинхронные и синхронные).

В последнее время получили развитие электрические машины, имеющие импульсное питание. К таким типам электрических машин относится вентиляторно-индукторный двигатель, который, помимо импульсного питания, имеет ярко выраженную зубчатость на поверхности статора и ротора, что неизбежно приводит к высоким уровням гармонических составляющих магнитного поля в воздушном зазоре и, следовательно, повышенным магнитным вибрациям. На практике наибольшее использование в качестве электродвигателя морского исполнения получил асинхронный двигатель, который обладает простотой изготовления, распределением магнитного поля в зазоре близким к синусоиде, обладает высокой надежностью и способностью работать напрямую от сети и/или от преобразователя частоты.

## **8. Устройства, основанные на применении возобновляемых источников энергии**

### **8.1. Состояние возобновляемых источников энергии в мире**

Становится очевидным, что традиционные энергетические ресурсы не безграничны и обеспечение в обозримом будущем даже современного уровня их потребления проблематично. Существует реальная опасность истощения разведанных запасов органического ископаемого топлива, добыча которых экономически обоснована. Все большее беспокойство вызывает рост загрязнения окружающей среды, связанный с энергопроизводством. В связи с этим освоение доступной возобновляемой энергии, производство и потребление которой сопровождается минимальным влиянием на окружающую среду, в мире осознается важнейшей задачей.

Энергетика на возобновляемых ресурсах, ориентирующаяся в основном на местные (локальные) запасы, дает возможность решать экономические и социо-культурные задачи на местном уровне, повышает уровень энергобезопасности регионов, создает новые высокотехнологичные отрасли производства и рабочие места.

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире имеет устойчивую тенденцию к росту. По различным прогнозным оценкам, доля нетрадиционных источников в энергобалансе к 2015 гг. во многих государствах достигнет или превзойдет 10%. В ведущих странах мира (КНР, Индия, США, Франция, Италия) за последние 10 лет использование ветроустановок (ВЭУ) и фотоэлектрореобразователей выросло в 10–15 раз. В Дании, Германии, Испании, Норвегии уже сейчас возобновляемые источники энергии вносят существенный вклад в энергобаланс. С учетом полных затрат на природоохранные мероприятия при добыче, транспортировке, переработке и сжигании углеводородов конкурентоспособность ВИЭ возрастает.

Развитие энергетики возобновляемых источников за последние 15–20 лет происходит по очень оптимистичному сценарию с постоянным возрастанием установленной мощности установок на базе ВИЭ и их доли в топливно-энергетическом балансе. При общем производстве электроэнергии в мире в 2007 году 19771 ТВт·ч доля ВИЭ составила (вместе с большой гидроэнергетикой) около 18,2%. В 2010 году производство электроэнергии в мире за счет ВИЭ составило 2340,0 ТВт·ч.

Рост установленной мощности установок ВИЭ характеризуется и соответствующим увеличением объема инвестиций в отрасль возобновляемой энергетики. В 2011 году инвестиции в развитие возобновляемых источников энергии достигли \$150 млрд.

Мониторинг развития энергетики возобновляемых источников показывает значительный ежегодный прирост установленной мощности электростанций на их основе. Общая установленная электрическая мощность в 2011 составила 480 ГВт и более 1400 ГВт вместе с "большой"

гидроэнергетикой, что составляет 29% от общей установленной мощности электростанций в мире (всего в мире общая мощность электрических станций составляет около 4900 ГВт).

Темпы развития электроэнергетики составляют около 2 – 3 % в год, в том числе: крупной гидроэнергетика – 2% и атомной – 1,6%. Темпы развития ВИЭ значительно выше. Так, например, с начала 2000 г, темпы роста ветроэнергетики составляют 25 – 30% в год и к концу 2011 года совокупная установленная мощность ветроэлектростанций составила 238,0 ГВт (в 1997 г. было всего 7,5 ГВт).

Совокупные мощности малой гидроэнергетики в мире в 2008 г. достигли 85 ГВт (темп роста 7 – 8%), биомассы 52ГВт (5-8%), геотермальной энергии – 10 ГВтэл (3%). Установленная мощность фотоэлектрических станций в 2011 году достигла 67 ГВт (тем роста 50%).

Использование солнечных тепловых установок и производство биотоплива продолжает ежегодно расти с темпом 15-20%. Солнечные коллекторы имеют площадь около 200 млн. кв.м.

Также растет использование низкопотенциальных приповерхностных геотермальных установок (на базе тепловых насосов) и биомассы. Ежегодное производство биотоплив (этанол и биодизель) достигло 65 млрд. литров в год, что составляет около 3% от мирового потребления бензина и дизтоплива. В настоящее время в мире насчитывается около 25 миллионов населенных пунктов, полностью обеспечиваемых установками на базе ВИЭ.

Основной объем вводимых мощностей ВИЭ в мире формируется за счет ввода малых ГЭС (МГЭС), ВЭС и биоЭС, причем в развивающихся странах вводятся преимущественно МГЭС и биоЭС, а в Евросоюзе – ВЭС, прежде всего в Германии и Испании. Среди развивающихся стран лидирует Китай, в котором динамично развиваются все виды ВИЭ, причем быстрее всего «большая» гидроэнергетика и ветроэнергетика. В 2011 году общая установленная мощность ВЭС в Китае достигла 62,4 ГВт, при этом только в 2011 году введено 17,6 ГВт.

Наибольшее распространение на настоящее время имеет ветроэнергетика в связи с тем, что удельные капиталовложения в ветроэнергетические установки ВЭУ ниже, чем при использовании большинства других видов ВИЭ. Суммарная мировая установленная мощность крупных ВЭУ и ВЭС, по разным оценкам, составляет от 10 до 20 ГВт, а их единичная мощность превысила 1 МВт. При этом в ряде стран возникла новая отрасль машиностроения - ветроэнергетическое. Мировыми лидерами по применению энергии ветра являются США, Германия, Нидерланды, Дания, Индия.

Второе место по масштабам применения занимает геотермальная энергетика. Суммарная мощность ГеоТЭС в мире составляет не менее 6 ГВт. ГеоТЭС конкурентоспособны по сравнению с традиционными топливными электростанциями, но географически привязаны к месторождениям парогидротерм или к термоаномалиям, что ограничивает область применения

геотермальных установок. Наряду с ГеоТЭС, широкое распространение получили системы геотермального теплоснабжения.

Солнечная энергия сейчас используется в основном для производства низкопотенциального тепла для коммунально-бытового горячего водоснабжения и теплоснабжения. Преобладающим видом оборудования здесь являются плоские солнечные коллекторы. Их общемировое производство составляет, по оценкам, не менее 2 млн. м<sup>2</sup> в год, а выработка низкопотенциального тепла за счет солнечной энергии достигает 5 10<sup>6</sup> Гкал. Однако все активнее развивается солнечной энергии в электроэнергию. Используются два метода - термодинамический и фотоэлектрический, особенно интенсивно развивающийся в последнее время. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии является весьма перспективным направлением возобновляемой энергетики. Объем производства солнечных батарей в мире растет в среднем на 30-40% в год. Суммарная мировая мощность автономных фотоэлектрических установок достигла 500 МВт. Согласно прогнозам, общий объем установленных фотоэнергосистем в 2020 г. превысит 150 ГВт. Основной проблемой, ограничивающей темпы развития солнечной фотоэнергетики, является относительно высокая стоимость «солнечной» электроэнергии, определяемая в значительной степени стоимостью монокристаллического кремния, являющегося базовым материалом солнечных батарей. Снижение удельной стоимости систем солнечного электроснабжения возможно по двум направлениям: первое - снижение стоимости полупроводникового материала и солнечного элемента; второе - предварительная концентрация солнечного излучения. Создание технологий производства фотоэлектрических модулей с концентраторами позволяет обеспечить выпуск высокоэффективных, более дешевых модулей, чем существующие аналоги. Энергоустановки, включающие фотоэлектрический модуль, ветроагрегат и устройства для аккумуляции энергии, позволяют создавать принципиально новые схемы электроснабжения автономных потребителей.

В ряде стран приняты нормативно-законодательные акты в сфере использования ВИЭ, составившие правовую, экономическую и организационную основу этого направления технического развития. Правовая база состоит в установлении права производителей электроэнергии на нетрадиционных источниках на подключение к сетям энергоснабжающих компаний, которые обязаны принимать эту энергию. Экономическая основа сводится к мерам по стимулированию применения ВИЭ, необходимому на этапе продвижения, становления и адаптации на энергетическом рынке. Способы стимулирования могут быть разные: налоговые и кредитные льготы, благоприятные тарифы, дотации и т.п. Организационная основа решения проблемы состоит в определении государственного (федерального) органа (ведомства), ответственного в целом за данное направление. В функции такого органа входят разработка государственных программ развития ВИЭ, в том числе программы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

(НИОКР), создание демонстрационных объектов, проведение маркетинга на внутреннем и внешнем рынках, пропаганда и популяризация и т.п. Ежегодные расходы на НИОКР в сфере нетрадиционной энергетики составляют в мире не менее 1 млрд долларов.

## 8.2. Возобновляемые источники энергии в России

Россия радикально отстает от мира в разработке возобновляемых источников энергии.

В стране в сельской местности и на отдаленных и труднодоступных территориях, составляющих более 70% территории с населением 15-20 млн. чел. существуют проблемы с энергоснабжением, несмотря на наличие местных и возобновляемых энергоресурсов.

В соответствии с Программой развития электроэнергетики до 2030 года, целевыми ориентирами развития до 2030 года являются:

- развитие централизованной ЕЭС России, в т.ч. развитие крупной системной генерации и линий электропередач,
- развитие распределенной генерации в регионах децентрализованного энергоснабжения и удаленных территорий; ввод объектов распределенной генерации должен развиваться опережающими темпами и может составить до 5 % от суммарной потребности во вводах (суммарный ввод 9,2 ГВт, в т.ч. ВИЭ – 6,1 ГВт).

Развитие распределенной генерации в России должно дать следующие эффекты:

1) Повышение энергетической безопасности отдаленных регионов России за счет повышения самообеспеченности «местными» топливно-энергетическими ресурсами.

2) Приближение объектов производства и потребления энергии, что позволит снизить на 15-20% потери энергии на транспортировку и распределение, повысить надежность энергоснабжения и снизить стоимость энергии у конечного потребителя; особенно заметен эффект распределенной генерации при сооружении генерирующих объектов на концах длинных линий электропередач низкого напряжения, (10 кВ и ниже и передаваемой мощности до 10 МВт), часто изношенных и ненадежных.

3) Уменьшение объемов «дальнепривозного» топлива: при замещении с помощью ВИЭ до 50% дизельной распределенной генерации (около 100 ТВт·ч) экономия составит около 17,5 млн. т в год, в т.ч. на Севере – 2,5 млн. т.

- Повышение экологической безопасности распределенной энергетики путем снижения вредных выбросов в окружающую среду (в т.ч. газообразных: 40 млн. т. CO<sub>2</sub>, 80 тыс. т SO<sub>x</sub>, 600 тыс.т NO<sub>x</sub>).

4) Важнейшей составляющей внедрения объектов на основе ВИЭ является правильная оценка потенциала ВИЭ на данной территории, которая позволит обоснованно выбрать параметры объекта и его энергоэкономические показатели.

Аналогичные данные известны и по Ленинградской области.

С помощью экологически чистых нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в Санкт-Петербурге и Ленинградской области могут быть решены следующие задачи:

- снижено потребление ископаемых топлив и связанное с этим загрязнение окружающей среды;

- улучшено энергоснабжение удаленных районов Ленинградской области, в которых энергообеспечение ненадежно, а также в районах коттеджной застройки;

- уменьшена доля привозного топлива как в целом в регион, так и в отдельные районы и населенные пункты при одновременном развитии коммунально-бытового сектора;

- улучшено экологическое состояние отдельных населенных пунктов, снижено загрязнение окружающей среды, что особенно существенно при обеспечении теплом и горячей водой оздоровительных зданий и сооружений.

Областью внедрения нетрадиционной энергетики, основанной на использовании таких возобновляемых источников энергии (ВИЭ), как растительная биомасса, ветровая, солнечная энергия, энергия малых водотоков, являются энергоустановки малой и средней мощности. Такие установки могут работать как в составе энергосистем, так и как автономные источники для децентрализованного энергоснабжения. В экологическом отношении такие установки существенно чище замещаемых малых установок на органическом топливе с низким КПД и значительными выбросами в атмосферу, эксплуатируемых в настоящее время.

Для Ленинградской области и Санкт-Петербурга практическое значение имеет использование энергии растительной биомассы и сельскохозяйственных отходов, энергии малых водотоков, ветровой энергии. Возобновляемые источники энергии могут внести существенный вклад в решение проблемы энергообеспечения региона, повышая надежность и качество энергоснабжения и обеспечивая экономию топлива.

### **Использование ветроэнергетического потенциала Санкт-Петербурга и Ленинградской области**

Северо-запад России является регионом, в котором присутствуют необходимые условия для применения ветроэнергетических установок (ВЭУ) различных классов мощности. Основным из них является наличие высокого уровня теоретического (или природно-климатического) потенциала ветровой энергии.

Анализ ветрового режима проводился по 79 метеостанциям региона на территории, ограниченной координатами: 27–36 градусов восточной долготы и 58–62 градуса северной широты.

Часть рассмотренных площадок для размещения ВЭУ имеет высокое число часов использования (выше 3000 ч.), достигая в отдельных случаях 4000-

4500 часов. Большой интерес представляет использование побережья и мелководных акваторий Финского залива и Ладожского озера, где небольшая глубина 2–10 м. и высокие среднегодовые скорости ветра создают благоприятные условия для сооружения ВЭС. Для расчета удельных технических ресурсов ветроэнергетики на 1 км<sup>2</sup> поверхности были рассмотрены системные ВЭУ иностранного производства. Сделано допущение о том, что расположения ВЭУ - "шахматное", равномерное по территории с расстоянием между агрегатами в 10 диаметров ротора. Общая установленная мощность региона восточной части Финского залива с учетом мелководных акваторий глубиной до 10 м может составить 11250 МВт. Годовая выработка электроэнергии может составить около 25 млрд. кВт·ч/год. Полученные значения удельных ветроэнергетических ресурсов свидетельствуют о хороших возможностях ветроэнергетики в регионе Санкт-Петербурга.

Из рассмотренных зон размещения площадок для ВЭС по ветроэнергетическим условиям наиболее эффективными являются площадки на дамбе, защищающей Санкт-Петербург от наводнений, на Лондонской отмели, на западной оконечности о. Котлин, на мысе Шепелево и в районе Кургальского рифа.

Строительство ВЭС в районе о. Котлин и защитной дамбы удобно тем, что там существует строительная база, имеются подъездные пути, не затрагиваются сельскохозяйственные земли. В случае сооружения ВЭС в районе о.Котлин, г.Кронштадт будет обеспечен независимым энергоснабжением и надежным резервным источником энергии для защитных сооружений г.Санкт-Петербурга от наводнений, а также будет выполнено благоустройство и берегоукрепление южного побережья о. Котлин. Эта и другие ВЭС, которые могут быть сооружены в нашем регионе, позволят иметь до 100 МВт мощности уже в ближайшей перспективе.

Кроме крупных системных ВЭС, предназначенных для работы на сеть, весьма перспективно внедрение ветроэнергетических установок как энергосберегающих систем при энергоснабжении предприятий и индивидуальных застройщиков.

Опыт сооружения ВЭУ для такого использования на одном из предприятий в Красном Селе показал высокую энергосберегающую эффективность.

### **Развитие технологий малой гидроэнергетики Санкт-Петербурга и Ленинградской области**

Гидроэнергетический потенциал Санкт-Петербурга и Ленинградской области оценивается примерно в 480–500 млн. кВт·ч; на территории Ленинградской области сооружены 6 крупных ГЭС: Волховская на р. Волхов; Нижне-Свирская и Верхне-Свирская на р. Свирь; Лесогорская и Светогорская на р. Вуокса; Нарвская на р. Нарва.

В настоящее время используется незначительная доля (~0,2%) потенциальных гидроэнергетических ресурсов малых рек региона, в то время, как в годы расцвета малой гидроэнергетики (50-60 годы 20 века) на территории области эксплуатировалось несколько десятков малых ГЭС, которые затем в условиях сплошной сетевой электрификации были выведены из эксплуатации и были заброшены. Они могут быть реконструированы, восстановлены и технически перевооружены. На ряде малых ГЭС сохранились гидротехнические сооружения и бьефы, которые используются в рекреационных и мелиоративных целях, что упрощает задачу восстановления объектов и снимает ряд задач, связанных с экологией. При пуске 100 малых ГЭС (до 1МВт) и микроГЭС (до 100 кВт) можно рассчитывать на получение в год до 0,15 млрд. кВт·ч. электроэнергии, что составит 5–10% от электропотребления в сельском хозяйстве области и существенно повысит стабильность энергообеспечения сельского хозяйства. Примером в этом направлении может явиться разрабатываемый проект реконструкции и восстановления Андреевской малой ГЭС в Выборгском районе Ленинградской области мощностью 700 кВт.

В Санкт-Петербурге есть возможность выпускать оборудование для малых ГЭС (МГЭС). На предприятии отработан процесс проектирования МГЭС и оценки ресурсов МГЭ, разработан типоразмерный ряд агрегатов (тип и мощность в зависимости от напора и расхода), для 7 регионов России на основе изучения реальных створов размещения МГЭС определены технические ресурсы МГЭ и перспективные направления сооружения малых ГЭС. Себестоимость электроэнергии может меняться от 0,4 до 1,3 руб/кВт·ч (в основном расходы на обслуживание); затраты на оборудование и организацию водозабора в зависимости от мощности – от 1500 до 3000 долларов США за 1 кВт установленной мощности.

### **Использование потенциала солнечной энергии в Санкт-Петербурге и Ленинградской области**

Опыт развития стран, пропагандирующих, рекламирующих и внедряющих установки для преобразования солнечной энергии, наглядно демонстрирует возможности сочетания традиционной и нетрадиционной энергетики.

Для Санкт-Петербурга и Карельского перешейка удельные технические гелиоресурсы в зависимости от варианта (приемная площадка наклонена на юг под углом 60 град. или приемная площадка непрерывно следит за Солнцем) составляют 680 - 1070 кВт·ч./кв.м при использовании теплового коллектора и 160 - 220 кВт·ч./кв.м при использовании фотоэлектрических преобразователей.

Принципиально новыми являются методы и технологии получения сильно концентрирующих солнечных элементов и создания фотоэлектрических модулей, а также схемы формирования автономных энергоисточников для электроснабжения потребителей с разными запросами. Предлагаемые

технологии существенно (в 100–1000 раз) снижают расход материалов для солнечного элемента.

Разработанные в ФТИ им. А.Ф.Иоффе концентраторные фотоэнергоустановки нового поколения обеспечивают существенное снижение стоимости получаемой электроэнергии за счет высокой эффективности наногетероструктурных каскадных солнечных элементов (КПД 35-40%), слежения за Солнцем и снижения в сотни раз площади солнечных элементов. Такие установки экономически рентабельны уже сейчас для обеспечения электроэнергией автономных потребителей в ряде регионов России. Стоимость установленного ватта при серийном производстве (без затрат на систему слежения за Солнцем) ~ 1,5 дол.США/Вт.

При участии РОСНАНО в Санкт-Петербурге предполагается организовать серийное производство фотоэнергоустановок с концентраторами солнечного излучения и наногетероструктурными ФЭП. Подготовка производства этих установок, включая проведение полевых испытаний и сертификации ФЭП является важным направлением работы в ФТИ.

Для широт региона возможно использование солнечной энергии для низкотемпературных процессов, таких как нагрев воды до температур ~80 °С с помощью солнечных тепловых коллекторов для систем горячего водоснабжения с сезонным циклом использования. Системы солнечного теплоснабжения могут использоваться для удовлетворения коммунальных нужд, в сельском хозяйстве, в фермерских и приусадебных хозяйствах, а для Санкт-Петербурга - при строительстве коттеджей (учитывая предполагаемые объемы индивидуального строительства). При обеспечении семьи из 4 человек горячей водой в объеме 200 л/сутки система солнечного теплоснабжения площадью 10 кв.м дает экономию от 300 до 900 литров топлива (мазут) в год. Срок возврата капитальных вложений при этом составит от 7 лет (в оптимальном варианте) до 20 лет (в неблагоприятном варианте).

Учитывая дополнительные положительные экологические и социальные факторы, связанные с привлекательностью для населения этого вида энергии (в т.ч. благодаря своей автономности), отсутствием негативного влияния на окружающую среду, такие системы должны получить значительный импульс в своем развитии.

### **Энергетические технологии утилизации твердых бытовых отходов Санкт-Петербурга и Ленинградской области**

Одним из перспективных источников энергии может стать биогаз, образующийся при разложении твердых бытовых отходов (ТБО). В отличие от технологий сжигания ТБО, получение и использование биогаза является экологически чистой технологией. В среднем одна тонна мусора выделяет 100-200 м<sup>3</sup> биогаза. Ежегодная эмиссия метана (энергетически ценного компонента биогаза) с поверхности свалок земного шара составляет около 30 – 70 млн. т, что сопоставимо с мощностью основных биогенных источников метана.

Известно, что метан является одним из основных планетарных источников парникового эффекта и сегодня остро стоит проблема стабилизации концентрации в атмосфере этого газа. Кроме того, метан часто является причиной самовозгорания свалочных отложений и сильного загрязнения атмосферы продуктами горения, так как при его взаимодействии с воздухом создаются горючие и взрывоопасные смеси. Ввиду непрерывного процесса образования свалочных отложений и постоянной эмиссии биогаза, этот источник можно отнести к возобновляющимся. В г. Санкт-Петербурге ежегодно образуется около 4,5 млн. м<sup>3</sup> твердых бытовых отходов. Ориентировочный объем запасов метана при разложении органического вещества свалочных масс только двух действующих полигонов “Южный” и “Новоселки” оцениваются в размере около 1 млрд. м<sup>3</sup>. Учеными СПбГПУ совместно с другими организациями разрабатываются экологически безопасные энергетические технологии переработки ТБО на полигонах, в том числе с получением биогаза. Одна из таких технологий предусматривает создание автономной энергетически независимой системы переработки свалочных отложений на основе возобновляемых источников энергии. В этой технологии источником энергии для добычи и транспортировки биогаза и других нужд полигона является ветроэнергетическая станция (ВЭС). Свалочные отложения, достигая высот в несколько десятков метров, увеличивают потенциал ветровой энергии и могут использоваться в качестве площадки для установок ВЭС. Такое комбинированное решение энергокомплекса избавляет от необходимости строительства линий энергопередач, а также отчуждения земель для сооружения ВЭУ. После завершения эксплуатации полигона такое размещение ВЭУ обеспечивает энергетическую рекультивацию свалочного холма. Совмещение биогазовой электростанции и ВЭУ в единый энергетический комплекс позволяет эффективно использовать потенциал местных энергетических ресурсов, а также уменьшить загрязнение окружающей среды.

### **8.3. Ветроэнергетические установки**

Использование ветровых турбин является одной из новых технологий, использующих возобновляемые источники энергии. Развитие данных технологий началось в 1980 годы с ветряных турбин мощностью нескольких десятков кВт и в настоящее время достигает нескольких МВт. Таким образом, использование кинетической энергии ветра вначале не имело никакого влияния на энергосистемы, но с ростом мощностей и различных систем управления ветроэлектростанции могут активнее использоваться для электроснабжения потребителей. Основанные на превращении кинетической энергии в электричество, ветрогенераторы стали отличным выходом при электроснабжении отдалённых людских поселений.

Кинетическая энергия ветряного потока (ВП) определяется известным соотношением:

$$E_{ВП} = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{Дж}]$$

где  $m$  – масса воздуха, протекающего со скоростью  $v$  через сечение  $S$  в 1 секунду.

$$m = \rho Sv \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right]$$

где  $\rho$  – плотность воздуха ( $\rho=1.23 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $t=15^\circ\text{C}$  атмосферном давлении 760 мм.рт.ст.);  $S$  - площадь сечения  $\text{м}^2$ .

Таким образом, кинетическая энергия ВП ( $E_{ВП} = \frac{1}{2}\rho Sv^3$ ) пропорциональна третьей степени его скорости и площади поперечного сечения. Этой энергии свойственны низкая плотность и нестабильность, что и создает ограничения для ее применения в широких масштабах.

Для преобразования энергии ВП в механическую энергию вращения могут применяться ряд физических принципов:

- принцип подъемной силы (Lift Principle);
- принцип лобового сопротивления (Drag Principle);
- эффект Ранка-Хилша.

*Принцип подъемной силы* основан на применении фундаментального эффекта, который используется для преобразования кинетической энергии ВП в механическую [7]. Подъемная сила вызывается перепадами давлений, которые создаются при течении ВП по поверхностям. На рис. 18 показано, что асимметричный профиль вызывает различные длины направлений потоков. Следовательно, различные скорости течения приводят к разности давлений, которая создает в конечном итоге подъемную силу.



Рисунок 18 – Принцип подъемной силы на примере аэродинамического профиля

Подъемная сила крыла:

$$R = \frac{C_Y \rho V^2 S}{2}$$

где  $\rho$  - массовая плотность воздуха,  $V$  – скорость движения крыла относительно воздуха,  $S$  – площадь крыла,  $C_Y$  – коэффициент подъемной силы крыла (зависит от угла атаки по рис. 19).

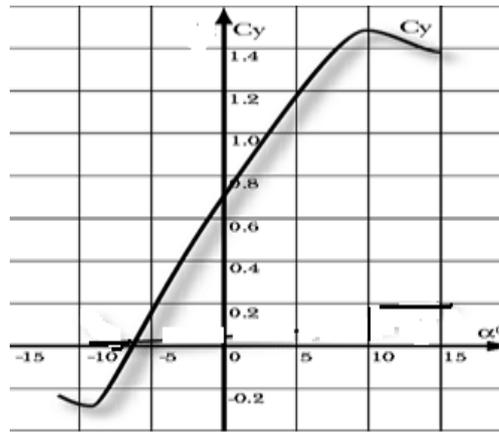


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента  $C_Y$  от угла атаки крыла

*Принцип лобового сопротивления* (Grag Principle) основан на возможности получать энергию из ВП только путем перемещения тела в ВП. ВП, согласно направлению, определяется проекцией градиента давления для всей площади элементов относительно силы торможения профиля, по отношению к ВП [8]. Соответствующая противодействующая сила, которая представлена сконцентрированной в центре тяжести профиля, называется силой давления ВП  $F$  (рис. 20). Если пластина неподвижна и перпендикулярна ВП, то на нее действует сила:

$$F = C_X \frac{\rho S}{2} V_B^2,$$

где  $F$  – сила давления ВП [Н],  $C_X$  – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы тела,  $\rho$  – плотность воздуха,  $V_B$  – скорость воздуха на пластине м/с,  $S$  – площадь профиля (поперечное сечение),  $m^2$ .

Когда пластина движется, она как бы “убегает” от ветра и относительная скорость воздушного потока, набегающего на пластину, снижается. Поэтому сила напора ВП также будет меньше

$$F = C_X \frac{\rho S}{2} (V_B - V_{\Pi})^2$$

Для достижения максимального КИЭВ (коэффициент использования энергии ветра) скорость пластины должна быть в три раза меньше скорости ВП, тогда  $\eta_{\max} = 0,148C_X$ . Для плоской пластины значение КИЭВ равно 0,164-0,197.

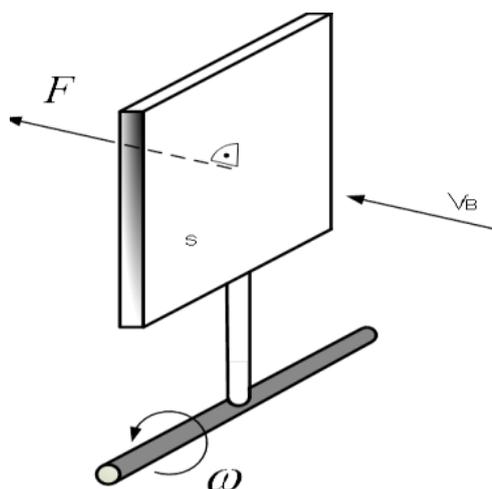


Рисунок 20 – Устройство использования принципа лобового сопротивления

Так называемый, *эффект Ранка-Хилша* (1933 г.) лежит в основе вихревой трубы [9]. Вихревая труба (рис. 21) представляет собой газодинамическое устройство с тангенциальным входом газа.

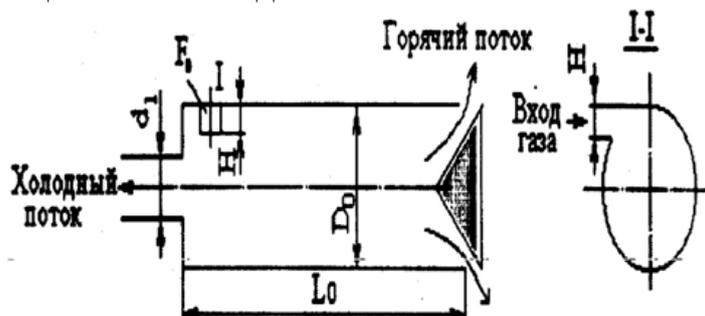


Рисунок 21 – Схема вихревой трубы

В закрученных потоках вязкого газа, при наличии поперечного градиента, скорости поверхности тока взаимодействуют между собой из-за наличия касательных сил вязкости. Большой вклад в перераспределение полной энергии принадлежит турбулентному механизму переноса. Вихревая труба состоит из корпуса, выполненного в виде цилиндрической или диффузорной трубы диаметром начального сечения  $D_0$  и длиной  $L_0$ , тангенциально расположенных по отношению к корпусу вводных сопел с площадью проходного сечения  $F_0$ , диафрагмы с диаметром отверстия  $d_1$ , расположенной вблизи соплового входа, и конического регулировочного вентиля на противоположном от диафрагмы конце корпуса.

Наибольшая эффективность преобразования ВП в вихреобразные закрученные потоки достигается профилированием по определенной зависимости криволинейных направляющих, определяющих форму входных каналов.

Изобретателями запатентовано большое количество ветрогенераторов, которые можно свести к трём большим группам (рис. 22):

- горизонтального вращения, с осью параллельной движению воздуха;

- горизонтального вращения, с осью перпендикулярной ветровому потоку;
- вертикального вращения, с осью перпендикулярной движению ветра;
- с вихревой трубой.

Прочие типы изобретений не нашли массового применения из-за своей неэффективности.

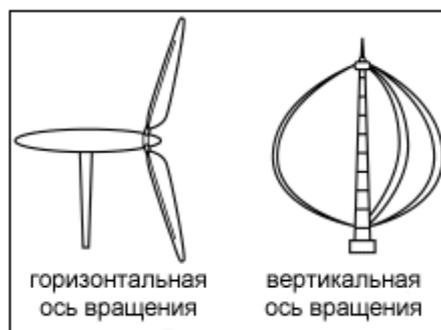


Рисунок 22 – Типы построения лопастей ветроэлектростанций

Самые распространённые на сегодня – ветроэлектростанции (ВЭ) с горизонтальной осью вращения могут использовать для модификации энергии ветра силу сопротивления или подъёмную силу. Второй вариант оказался предпочтительнее из-за его способности развивать большую мощность. Этот тип движителя более быстроходен, обладает лучшим соотношением массы и мощности, а также более экономичен. Количество лопастей ветроколеса бывает разным: от одного до 50, но наиболее распространены трёхлопастные колеса.

В местностях с преобладанием ветра одного направления ВЭ строят с фиксированным положением ветроколеса, в других районах система имеет возможность поворачиваться за ветром. В небольших ВЭ для этого служит хвостовое оперение, в промышленных – направлением управляет электроника. Кроме проблем с низкой скоростью ветра, когда ветрогенератор не может работать существует и противоположная задача: как уберечь ВЭ при ураганном ветре. Она решается разными методами, начиная от автоматического складывания лопастей до изготовления специальных клапанов, не дающих буре разрушить ветрогенератор.

Вертикальные ветрогенераторы, в силу своих конструктивных особенностей, имеют ряд преимуществ перед генераторами с горизонтальной осью:

- нет необходимости в устройствах, определяющих направление ветра;
- упрощается конструкция системы;
- снижаются гироскопические нагрузки на лопасти и систему передачи энергии.

Вместе с тем, вертикальные ВЭ менее быстроходны и имеют меньшую мощность.

В состав малой ветряной электроустановки обычно входят:

- мачта с растяжками;

- ветротурбина с хвостовым оперением;
- генератор, вырабатывающий ток с низким напряжением (24-48 вольт);
- аккумуляторы, запасающие ток на время отсутствия ветра;
- инвертор, преобразующий полученное электричество в стандартные 220 вольт с частотой 50 герц.

Промышленный ветрогенератор дополняется высокой башней с фундаментом, поворотным механизмом, управляемым электроникой, тормозной системой, системой изменения угла атаки лопастей, молниезащитой, системами пожаротушения и связи.

В настоящее время в мире и в России наибольшее распространение получили трехлопастные ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения. Рассмотрим более подробно строение ветряной установки, которое приведено на рис. 23.

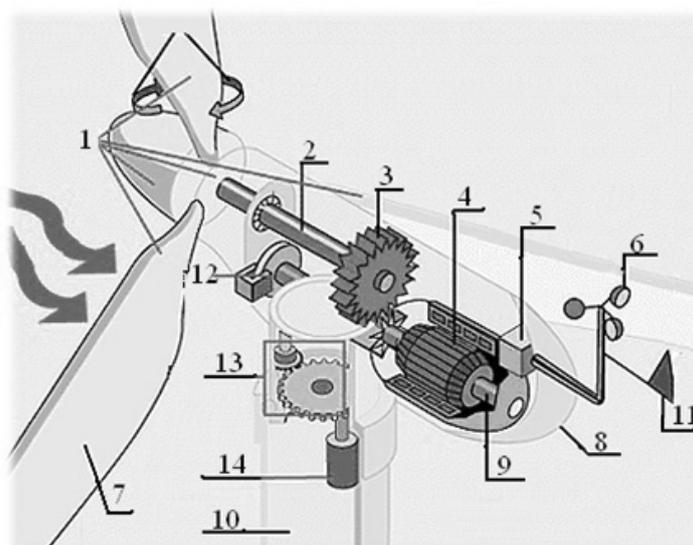


Рисунок 23 –Строение ветряной установки: 1 – ветроколесо, 2 – вал ветроколеса, 3 – редуктор, 4 – генератор, 5 – контроллер, 6 – анемометр, 7 – лопасти, 8 – корпус, 9 – вал генератора, 10 – опора, 11 – флюгель, 12 – тормозная система, 13 – коробка передач опоры, 14 – двигатель опоры.

Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения (ВЭУВО) изобретены позже ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения (ВЭУГО). До недавнего времени ошибочно считалось, что в ВЭУВО невозможно получить отношение максимальной линейной скорости лопастей к скорости ветра больше единицы (у ВЭУГО это отношение достигает более 5:1). Например, недостатком ВЭУВО с ротором типа ротор Дарье (рис. 24) с жестко фиксированными относительно траверс лопастями является высокая скорость ВП, при которой происходит самозапуск ротора во вращение и более низкий КИЭВ [7, 8]. Из-за этого проектировщики вынуждены снабжать такие ВЭУ дополнительными устройствами (электродвигатель, ротор Савониуса) для запуска ротора и выведения его в рабочий режим. Высокая скорость самозапуска такого ротора вызвана тем, что фиксированные жестко вертикальные лопасти ротора в статическом состоянии не могут создать (при

обтекании их ВП средней и малой скорости) необходимой величины и нужного направления действия аэродинамических сил на лопастях и, тем самым, достаточного крутящего момента на валу для приведения ротора во вращение. Мощность ВЭУВО типа ротора Дарье может достигать по оценкам экспертов, 10-30 МВт. Преимущество ВЭУВО – независимость функционирования от направления действия ВП, возможность перехода от консольного крепления оси ВЭУ к двухопорному, возможность размещения потребителя энергии в ее основании, упрощение конструкции лопастей и снижение их материалоемкости, уменьшение шумности и площади для ее размещения и т.д.

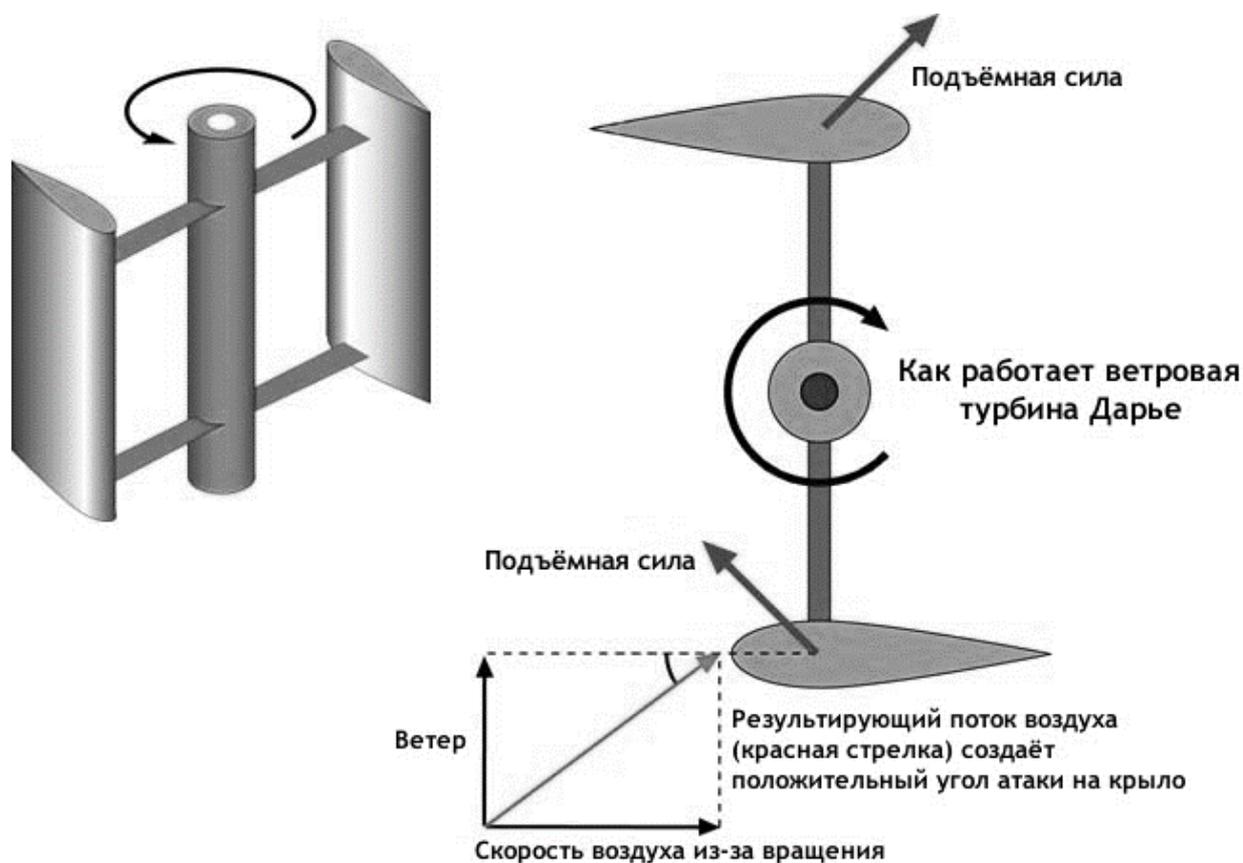


Рисунок 24 –Ветроустановка на базе ротора Дарье

В настоящее время ВЭУВО типа ротора Дарье может рассматриваться в качестве основного конкурента ВЭУГО. Такие роторы имеют различную форму (Ф-, Δ-, Y- и ромбообразную) с одной, двумя или большим числом лопастей. Применение в конструкции ветроротора механизма управления положением лопастей позволяет повернуть лопасти относительно траверс так, что величина и направление действия результирующей аэродинамической силы на лопастях повышает эффективность ВЭУ [7,8].



Рисунок 25 –Пример внешнего вида ветряных турбин, предназначенных для захвата воздушных потоков, веющих на крышах высотных зданий

Электрооборудование ВЭУ преобразует механическую энергию вращения в электрическую для использования потребителями. В конструкциях ВЭУГО наиболее распространены две концепции управления электроэнергией [1]:

- регулирование электрических параметров при помощи асинхронного генератора двойного питания (DFIG - doubly fed induction generator);
- регулирование параметров с помощью синхронного генератора с непосредственной передачей вращения (direct driven synchronous generator SG).

Обе эти концепции используют управление по тангажу как основную аэродинамическую концепцию для ограничения выходной мощности. Для

ВЭУГО с управлением по тангажу и активным регулированием изменения скорости лопасти могут активно поворачиваться относительно своей оси, и выходные параметры регулируются лучше. Недостатком этого способа является усложнение конструкции из-за наличия механизма тангажа и управляющего контроллера. Различие между управлением по тангажу и активным регулированием потери скорости изображено на рис. 26. Так как лопасти у регулируемых по тангажу ВЭУГО повернуты против ветра, для уменьшения выходной мощности, лопасти у ВЭУГО с активным контролем потери скорости вращаются в противоположном направлении.

ВЭУГО с регулируемой скоростью – это самый распространенный вариант среди действующих ветроэнергетических установок. Они позволяют достигать оптимальной выходной мощности в широком диапазоне скоростей ВП путем настройки частоты вращения при изменении входной скорости ВП. В этом случае генераторы не подсоединены непосредственно к сети, а с помощью преобразователей частоты. Это позволяет снизить связанность частоты сети и частоты генератора, и, следовательно, осуществить независимое регулирование скорости генератора.

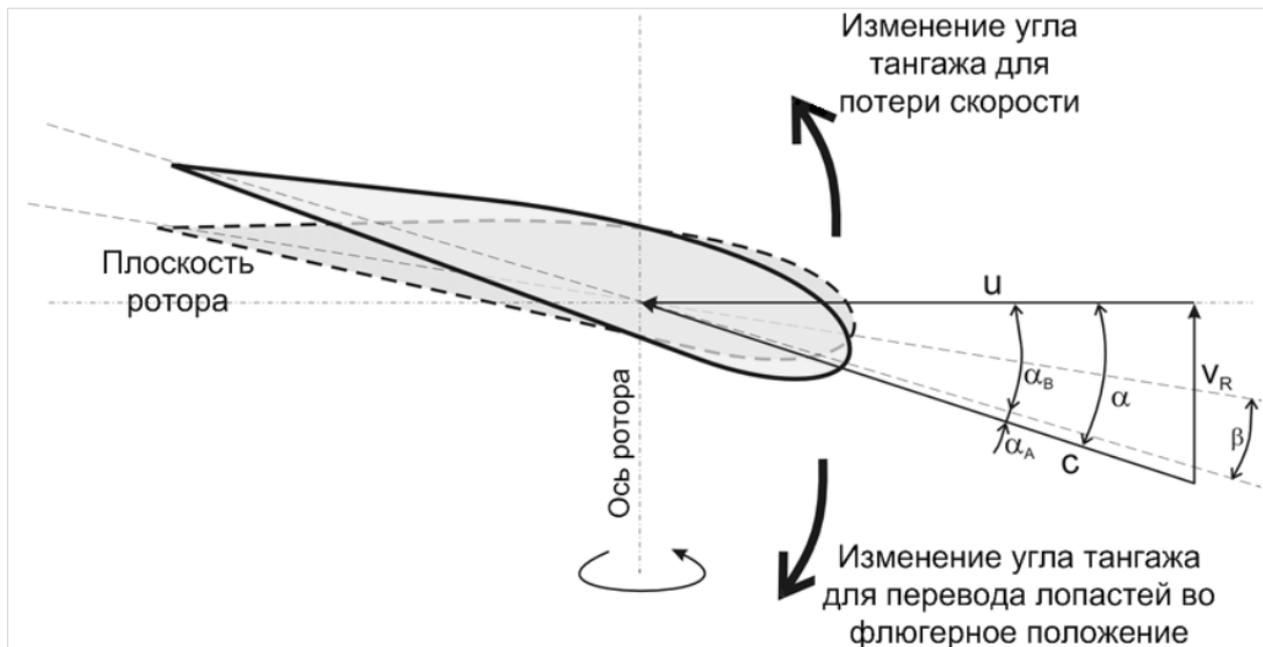


Рисунок 26 – Принцип активного контроля мощности: регулирование по тангажу и активное регулирование потери скорости

На рис. 27 представлена однолинейная схема ВЭУ на основе асинхронного генератора двойного питания [7]. В этой схеме применен асинхронный генератор с трехфазной обмоткой ротора и токосъемными кольцами. Трехфазная обмотка статора генератора связана непосредственно или использует трансформатор для подключения к сети, в то время как ротор включен на сеть при помощи силового преобразователя. Наличие преобразователя позволяет изменять угловую скорость в определенном интервале. Этот диапазон ограничен как механическими параметрами ВЭУ, так и техническими характеристиками преобразователя. Большинство ВЭУ с DFIG содержат редуктор, который позволяет соединить тихоходный вал ВЭУ с быстроходным валом генератора.

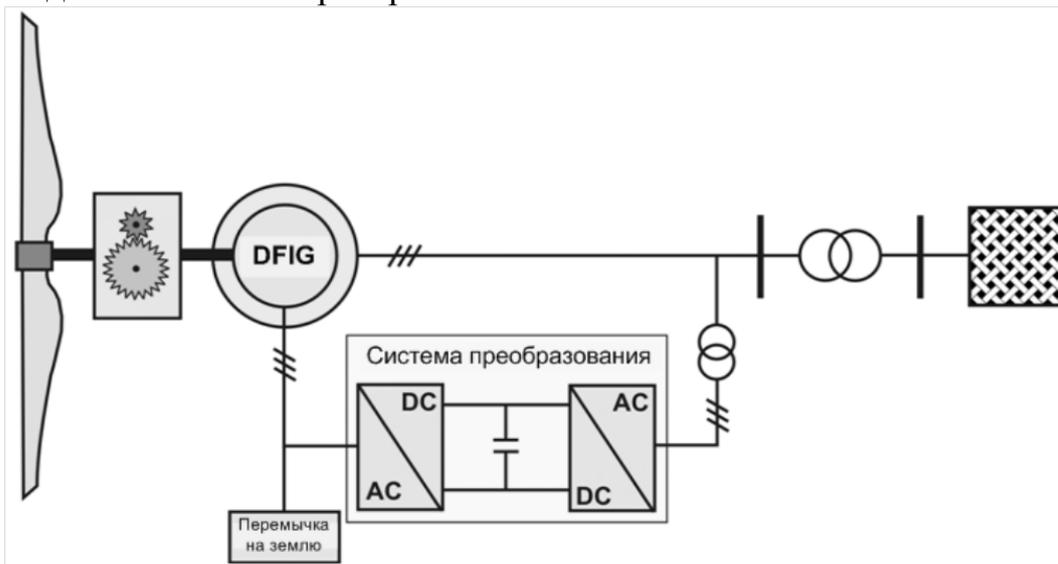


Рисунок 27 – Общая схема ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания (DFIG)

В ряде случаев для стабилизации параллельной работы ВЭУ с сетью используют дополнительные накопители энергии (рис. 28), в частности суперконденсаторы [4]. Основным преимуществом электрохимических конденсаторов по сравнению с аналогами является их потенциально более высокая емкость при сопоставимой мощности. Для современных электродов на основе оксидов и гидроксидов емкость 600-700 Ф/Г не является предельной. Система хранения энергии суперконденсаторов (ESS) управляется контроллерами низкого уровня ВЭУ и координируется управляющим контроллером сети (ветропарка), при этом недостаток активной мощности компенсируется блоком ESS.

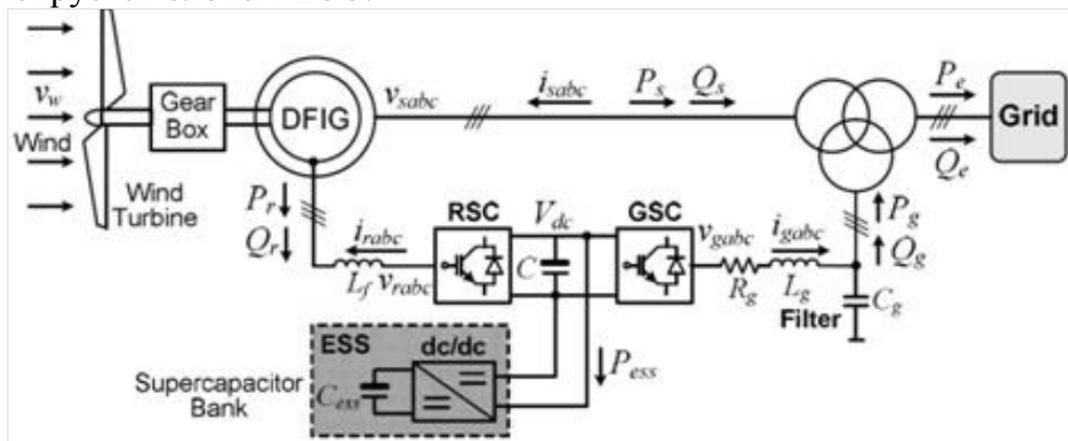


Рисунок 28 – Схема ВЭУ с DFIG, оснащенной суперконденсаторами

Схема электрооборудования ВЭУ с применением синхронного генератора показана на рис. 29. Статор генератора подключен к сети при помощи преобразователей. Это позволяет функционировать ВЭУ с регулируемой угловой скоростью генератора. Если скорость вращения ветротурбины изменяется из-за изменения скорости ВП, частота индуцированного напряжения генератора тоже изменяется. Поэтому напряжение генератора должно быть сначала преобразовано при помощи выпрямителя в напряжение постоянного тока, а потом при помощи инвертора – в напряжение переменного тока с постоянной частотой сети.

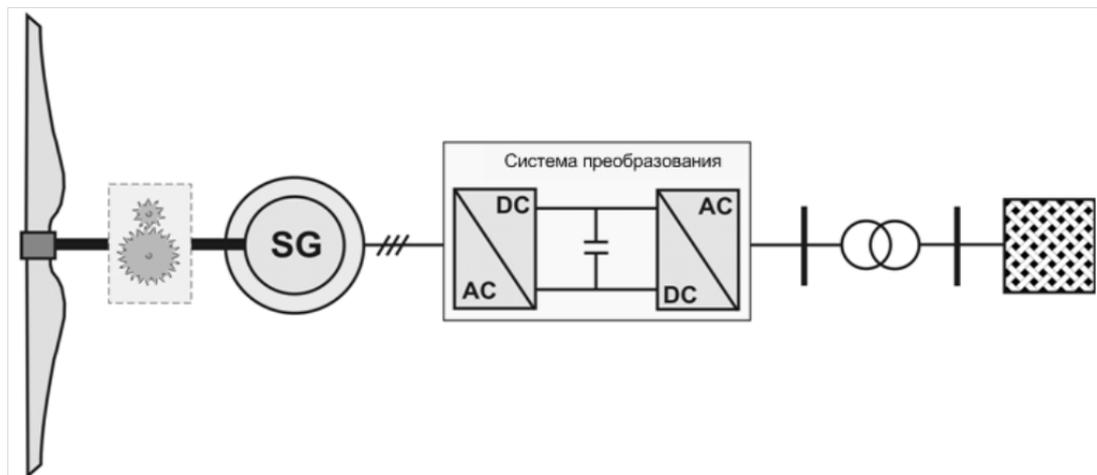


Рисунок 29 – Однолинейная схема ВЭУ с синхронным генератором непосредственной передачи вращения

На рис. 30 представлена однолинейная схема постоянной по скорости ВЭУ с асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором. Применение такого генератора для преобразования энергии представляется весьма перспективно, так как в качестве генератора можно использовать обычный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

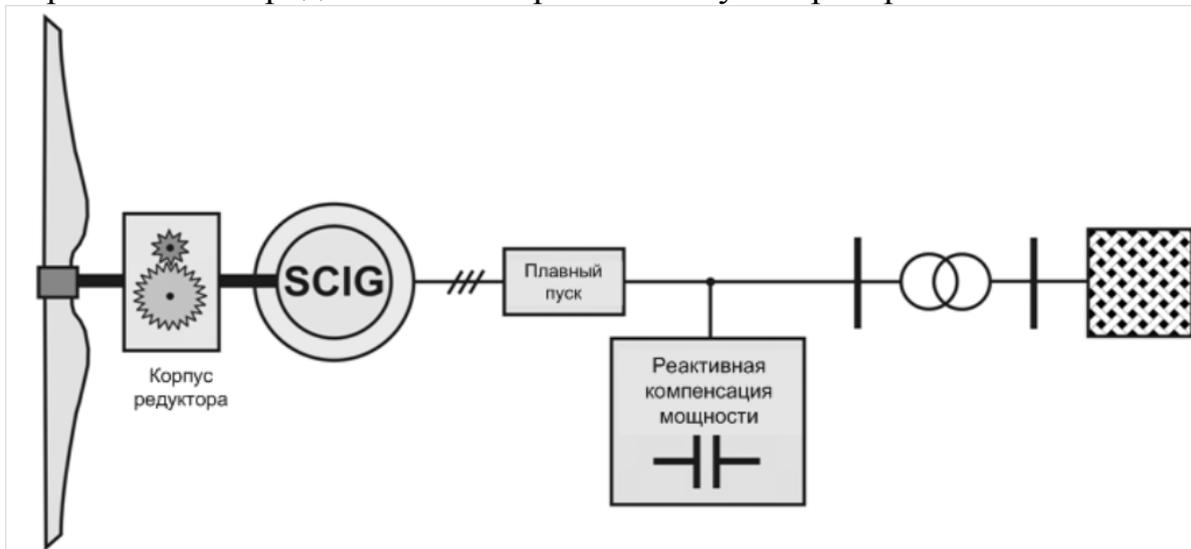


Рисунок 30 – Однолинейная схема ВЭУ с асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором

Благодаря полному устранению зависимости генератора от частоты вращения функционирование таких ВЭУ более гибкое, и электрические параметры в точке общего соединения, такие как напряжение и частота, могут регулироваться более качественно. Если скорость ветра становится слишком высокой и превышает номинальное значение, как выходная мощность турбины, так и ее угловая скорость должны быть ограничены, чтобы не превышать номинальных значений электрических параметров и не повредить ВЭУ. Уменьшение выходной мощности может быть достигнуто увеличением угла тангажа,

По мощности ветрогенераторы делят на ВЭУ персонального использования (до 5 кВт) и промышленные (их мощность доходит до 5–8 МВт). Последние достигают высоты в сотни метров и массы в тысячи тонн.

Различием между ними также является то, что малые ВЭ могут работать автономно, снабжая электричеством обособленного потребителя, а промышленные усложняются системами синхронизации с существующими электрическими сетями по частоте. Поэтому в настоящее время экономически целесообразно использовать энергию ветра не для получения промышленного электричества, а для отопления жилых и промышленных зданий, упрощая конструкцию и автоматику, снижая тем самым стоимость полученной энергии.

## 8.4. Солнечные электростанции

Солнце излучает в окружающее пространство поток мощности, эквивалентный  $4 \cdot 10^{23}$  кВт. Поток солнечной радиации, достигающей Земли, по разным оценкам составляет  $(7,5-10) \cdot 10^7$  кВт·ч/год, или  $(0,85 - 1,2) \cdot 10^{14}$  кВт, что значительно превышает ресурсы всех других возобновляемых источников энергии. В настоящее время в мире, и в России наиболее перспективными являются два вида солнечных энергетических установок (СЭУ): солнечные коллекторы и солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ). Солнечные коллекторы – это технические устройства, предназначенные для прямого преобразования солнечного излучения в тепловую энергию в системах теплоснабжения для нагрева воздуха, воды [1].

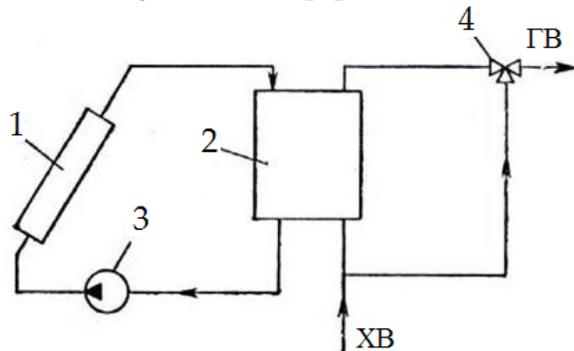


Рисунок 31 – Солнечная водонагревательная установка с принудительной циркуляцией: 1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – насос; 4 – клапан; ХВ и ГВ – холодная и горячая вода

Солнечные фотоэлектрические установки состоят из солнечных батарей (приемных площадок) и получили наибольшее распространение в электроснабжении мегаполисов с преобладанием коттеджной застройки. Наибольшее распространение получили СФЭУ на основе кремния и арсенид галлия.

Из трех составляющих солнечного излучения на Земле – прямая, диффузная (рассеянная) и отраженная от поверхности земли мощность в солнечной энергетике наибольшее значение имеет прямое солнечное излучение  $R_F(t)$  как для горизонтальных, так и произвольно наклоненных приемных площадок. Мощность потока прямого солнечного излучения на произвольно ориентированную приемную площадку площадью  $F(m^2)$  на Земле в любой момент времени ( $R_F(t)$ ) определяется следующим соотношением [2]:

$$R_F(t) = R_m(t) \cdot \cos \theta^0(t),$$

где  $R_m(t)$  – мощность потока прямого солнечного излучения на поверхности Земли на приемную площадку, перпендикулярную  $R_m(t)$  при оптической массе атмосферы  $m$ ,  $\theta^0(t)$  – угол падения прямого солнечного излучения на

произвольно-наклоненную под углом  $\beta^0 > 0$  приемную площадку с азимутом  $\gamma^0(t)$ .

$\theta^0(t)$  можно рассчитать по формуле:

$$\cos \theta^0(t) = \cos \beta^0(t) \cdot \sin \alpha^0(t) + \sin \beta^0(t) \cdot \cos \alpha^0(t) \cdot \cos(a^0(t) - \gamma^0(t)),$$

где  $\alpha^0(t)$  – высота солнца над горизонтом,  $a^0(t)$  – азимут солнца,  $\gamma^0(t)$  – азимут приемной площадки солнечного излучения.

Учитывая взаимосвязь  $\alpha^0(t)$  и  $a^0(t)$  с другими основными и дополнительными углами для приемной площадки последнее выражение можно представить как:

$$R_F(t) = R_m(t) \cdot (\cos \beta^0(t) \cdot (\sin \varphi^0 \cdot \sin \delta^0(t) + \cos \varphi^0 \cdot \cos \delta^0(t) \cdot \cos \omega^0(t)) + \sin \beta^0(t) \cdot (\cos \gamma^0(t) \cdot (\operatorname{tg} \varphi^0 \cdot (\sin \varphi^0 \cdot \sin \delta^0(t) + \cos \varphi^0 \cdot \cos \delta^0(t) \cdot \cos \omega^0(t)) - \sin \delta^0(t) \cdot \sec \varphi^0) + \sin \gamma^0(t) \cdot \cos \delta^0(t) \cdot \sin \omega^0(t)))$$

где  $\varphi^0$ , (град) – широта заданной точки на поверхности земли,  $\delta^0(t)$  – склонение Солнца,  $\omega^0(t)$  – часовой угол Солнца.

Основные положения движения Солнца по небосклону заключается в следующем; положение точки А на земной поверхности относительно солнечных лучей в данный момент времени определяется тремя основными углами – широтой местоположения точки  $\varphi$ , часовым углом  $r$  и склонением Солнца  $\delta$ . Эти углы показаны на рисунке 32

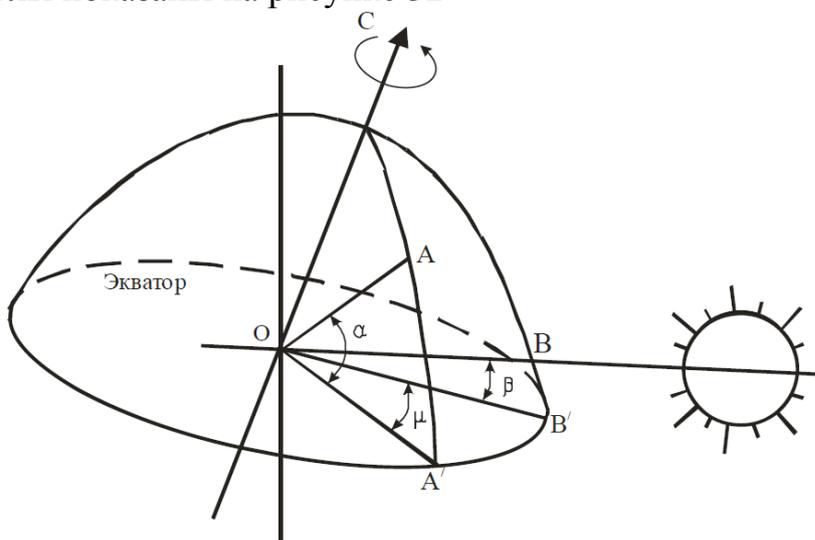


Рисунок 32 – Схема движения Солнца по небосклону

Широта  $\varphi$  – это угол между линией, соединяющей точку А с центром Земли, и ее проекцией на плоскости между проекцией ОА и проекцией линии, соединяющей центры Земли и Солнца. Угол  $r=0$  в полдень, а 1 час соответствует  $15^\circ$ . Склонение Солнца  $\delta$  – это угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и ее проекцией на плоскость экватора. Склонение Солнца в течение года непрерывно меняется от  $-23^{\circ}27'$  в день

зимнего солнцестояния 22 декабря до +23027' в день летнего солнцестояния 22 июня.

Сегодня в России имеются хорошая научная база для развития фотоэнергетики, так в Санкт-петербургском научно-техническом центре тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе ведутся работы по совершенствованию выпуска тонкопленочных модулей – солнечных батарей. В России уже существует несколько заводов по производству солнечных модулей.

Солнечные электростанции (СЭС) подразделяются на термодинамические и фотоэлектрические.

### **Фотоэлектрические солнечные электростанции**

*Фотоэлектрические СЭС* – непосредственно преобразуют солнечную энергию в электроэнергию при помощи фотоэлементов. Главным элементом фотоэлектрических солнечных станций являются фотоэлектрические батареи.

Фотоэлектрические СЭС подразделяются на два типа: стационарные и трекинговые.

Стационарные фотоэлектрические солнечные электростанции объединяют комплексы солнечных модулей, закрепленных на ферме статически под оптимальным углом по отношению к солнцу (оптимальный угол 90 град), с такой целью, что бы на протяжении светового дня как можно больше поверхности фотопластин и на протяжении большего времени находились под воздействием прямых солнечных лучей.

Панели трекинговых фотоэлектрических СЭС располагают на подвижных фермах, благодаря чему солнечные модули могут двигаться по траектории движения солнца, подставляя ему свою плоскость. В этом случае эффективность данных СЭС выше, чем стационарных. Но трекинговые системы значительно дороже в производстве и обслуживании чем стационарные.

Преобразование солнечной энергии в фотоэлектрических панелях (ФЭП) основано на фотоэлектрическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Простейшая солнечная панель состоит из батареи солнечных элементов и полупроводникового фотоэлектрического генератора. Действие солнечных элементов основано на использовании явления внутреннего фотоэффекта. В результате работы солнечные батареи генерируют постоянный ток. Энергия может использоваться как напрямую различными приборами, так и запасаться в аккумуляторных батареях для последующего использования или же преобразовываться в переменный ток напряжением 220 В.

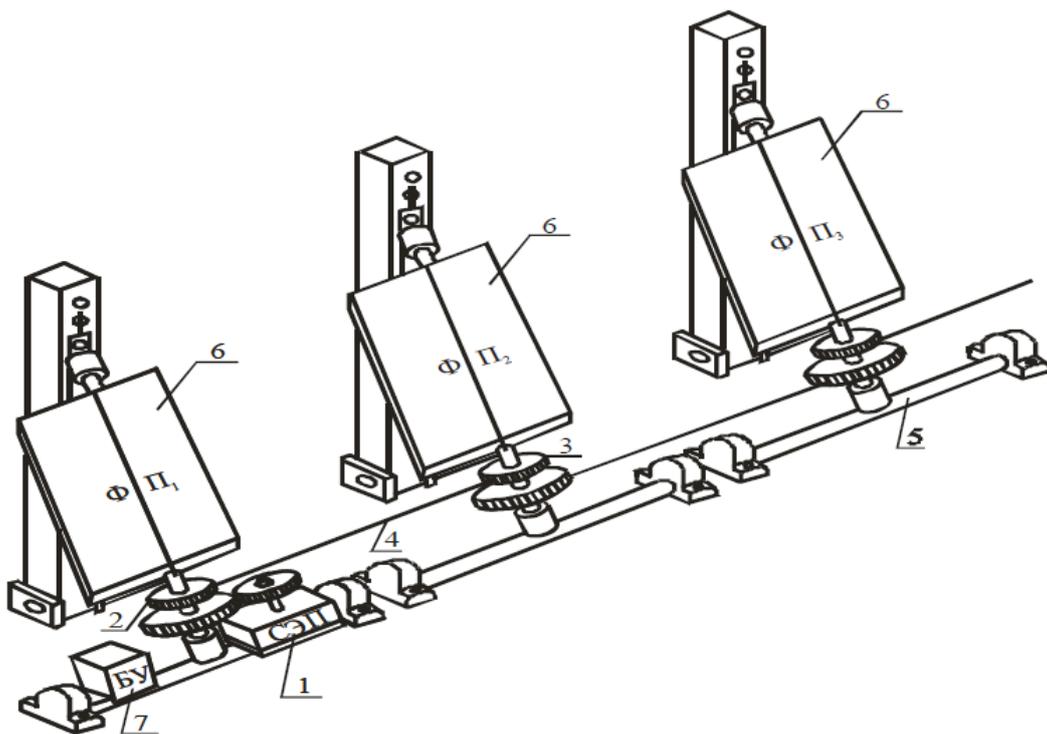


Рисунок 33 –Конструкция модульной энергетической фотоэлектрической станции

Модульный тип конструкции позволяет создавать установки практически любой мощности и делает их весьма перспективными (рис. 33). Установки имеют малую массу и отличаются простотой обслуживания. Недостатком фотоэлектрического преобразователя является высокая стоимость и низкий КПД. Фотоэлектрический эффект возникает в солнечном элементе при его освещении светом в ближней инфракрасной области спектра. В солнечном элементе из полупроводникового кремния толщиной 50мкм поглощаются фотоны, и их энергия преобразуется в электрическую посредством р-п соединения. Переход на гетеро соединение типа арсенида галлия и алюминия, применение концентраторов солнечной радиации с кратностью концентрации 50–100 позволяет повысить КПД до 35%. Однако стоимость элементов на базе соединения арсенида галлия и алюминия значительно выше, чем на базе кремния [5].

В состав сетевой фотоэлектрической системы, кроме солнечных батарей, также входят (рис. 34):

- сетевые инверторы, преобразующие постоянный ток (DC), генерируемый солнечными панелями, в переменный (AC);
- система мониторинга, позволяющая отслеживать параметры работы солнечной электростанции;
- счетчики, предназначенные для мониторинга производительности системы и продажи электроэнергии по "зеленому" тарифу;
- поддерживающие металлоконструкции для размещения солнечных батарей на земельном участке, крыше здания и т.п.;

- централизованная сеть - линия электропередач, к которой подсоединена электростанция;
- собственные потребители электроэнергии (промышленные или бытовые электроприборы).

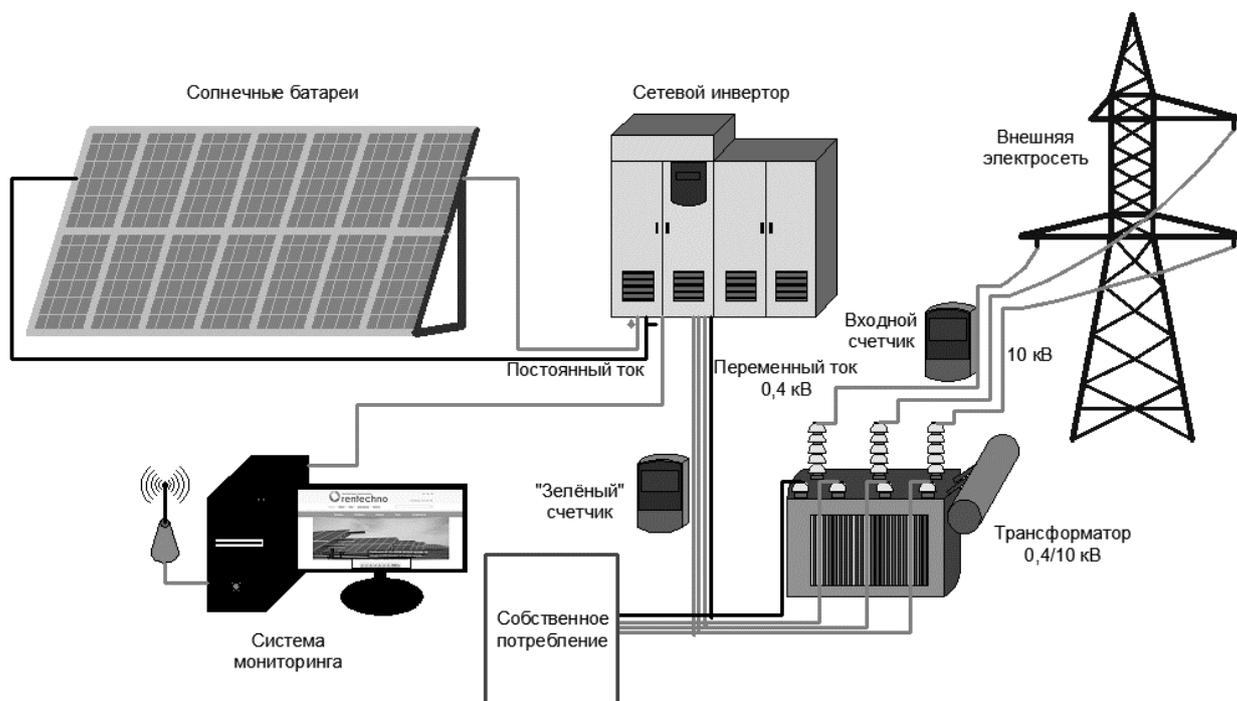


Рисунок 34 – Структурная схема фотоэлектрической станции

КПД производимых в промышленных масштабах фотоэлементов в среднем составляет 16%, у лучших образцов до 25%. Но в лабораторных условиях уже достигнут показатель КПД 43,5 %.

Фотоэлектрические солнечные электростанции в настоящее время очень распространены, так как в общем случае эти СЭС состоят из большого числа отдельных модулей различной мощности и выходных параметров. Данные СЭС широко применяются для энергообеспечения как малых, так и крупных объектов (частные коттеджи, пансионаты, санатории, промышленные здания и т. д.). Фотоэлектрические солнечные батареи бывают различного размера: от встраиваемых в микрокалькуляторы до занимающих крыши автомобилей и зданий. Устанавливаться фотобатареи могут практически везде, начиная от кровли и фасада здания и заканчивая специально выделенными территориями. Установленные мощности тоже колеблются в широком диапазоне, начиная от снабжения отдельных насосов, заканчивая электроснабжением небольшого посёлка или города.

### Термодинамические солнечные электростанции

*Термодинамические СЭС* – преобразуют солнечную энергию в тепловую, а потом в электрическую.

Различают следующие термодинамические СЭС:

- солнечные электростанции башенного типа с центральным приемником;
- СЭС тарельчатого типа;
- СЭС, использующие параболические концентраторы;
- аэростатные солнечные электростанции.

Рассмотрим данные термодинамические СЭС более подробно.

1) Солнечные электростанции башенного типа с центральным приемником (рис. 35)

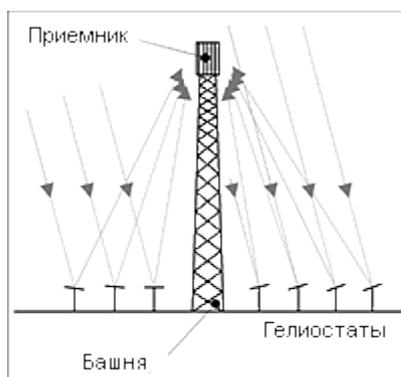


Рисунок 35 – Солнечная электростанция башенного типа

В этих системах используется вращающееся поле отражателей-гелиостатов. Они фокусируют солнечный свет на центральный приемник, сооруженный на верху башни, который поглощает тепловую энергию и приводит в действие турбогенератор. Управляемая компьютером двусная система слежения устанавливает гелиостаты так, чтобы отраженные солнечные лучи были неподвижны и всегда падали на приемник. Циркулирующая в приемнике жидкость переносит тепло к тепловому аккумулятору в виде пара. Пар вращает турбину для выработки электроэнергии, либо непосредственно используется в промышленных процессах. Температуры на приемнике достигают от 538 до 1482 °С.

2) Солнечная установка тарельчатого типа (рис. 36)

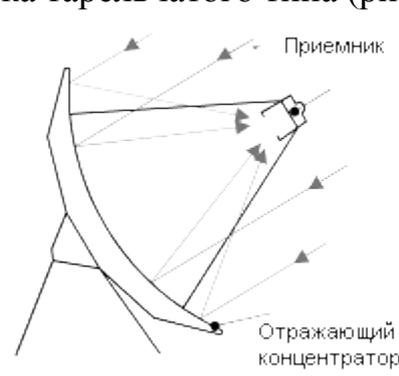


Рисунок 36 – Солнечная установка тарельчатого типа

Этот вид гелиоустановки представляет собой батарею параболических тарелочных зеркал (схожих формой со спутниковой тарелкой), которые фокусируют солнечную энергию на приемники, расположенные в фокусной точке каждой тарелки. Жидкость в приемнике нагревается до 1000 градусов и

непосредственно применяется для производства электричества в небольшом двигателе и генераторе, соединенном с приемником.

В настоящее время в разработке находятся двигатели Стирлинга и Брайтона. Несколько опытных систем мощностью от 7 до 25 кВт работают в Соединенных Штатах. Высокая оптическая эффективность и малые начальные затраты делают системы зеркал/двигателей наиболее эффективными из всех гелиотехнологий. Системе из двигателя Стирлинга и параболического зеркала принадлежит мировой рекорд по эффективности превращения солнечной энергии в электричество. В 1984 году на Ранчо Мираж в штате Калифорния удалось добиться практического КПД 29%.

### 3) Солнечные параболические концентраторы (рис. 37)



Рисунок 37 – Солнечный параболический концентратор

В этих установках используются параболические зеркала (лотки), которые концентрируют солнечный свет на приемных трубках, содержащих жидкость-теплоноситель. Эта жидкость нагревается почти до 400 °С и прокачивается через ряд теплообменников; при этом вырабатывается перегретый пар, приводящий в движение обычный турбогенератор для производства электричества. Для снижения тепловых потерь приемную трубку может окружать прозрачная стеклянная трубка, помещенная вдоль фокусной линии цилиндра. Как правило, такие установки включают в себя одноосные или двухосные системы слежения за Солнцем. В редких случаях они являются стационарными.

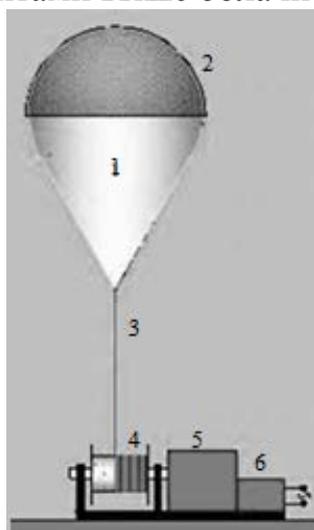
Построенные в 80-х годах в южно-калифорнийской пустыне фирмой “Luz International”, девять таких систем образуют крупнейшее на сегодняшний день предприятие по производству солнечного теплового электричества. Эти электростанции поставляют электричество в коммунальную электросеть Южной Калифорнии. Еще в 1984 г. “Luz International” установила в Деггетте (Южная Калифорния) солнечную электрогенерирующую систему “Solar Electric Generating System I” (или SEGS I) мощностью 13,8 МВт. В приемных трубках масло нагревалось до температуры 343 °С и вырабатывался пар для производства электричества. Конструкция “SEGS I” предусматривала 6 часов аккумуляции тепла. В ней применялись печи на природном газе, которые использовались в случае отсутствия солнечной радиации. Эта же компания построила аналогичные электростанции “SEGS II - VII” мощностью по 30 МВт.

В 1990 г. в Харпер Лейк были построены “SEGS VIII и IX”, каждая мощностью 80 МВт.

#### 4) Аэростатные солнечные электростанции (рис. 38)

Основным достоинством этих энергетических установок в сравнении с другими солнечными энергоустановками является постоянство генерации электроэнергии в любое время суток и при любой погоде.

Независимость генерации от времени суток достигается за счет возможности днем аккумулировать энергию при подъеме груза на высоту нескольких километров, а ночью вырабатывать электроэнергию за счет опускания этого груза. Независимость генерации от погодных условий достигается за счет размещения баллона аэростата с тонкопленочными солнечными элементами выше облачного слоя.



- 1 – оболочка баллона аэростата
- 2 – тонкопленочные солнечные элементы
- 3 – канат с электрическим кабелем
- 4 – барабан
- 5 – электромотор-редуктор
- 6 – инвертор

Рисунок 38 – Аэростатная солнечная электростанция

В светлое время суток часть электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими элементами, затрачивается на подъем с помощью электромоторов груза по канату, соединяющему баллон с земной поверхностью. В темное время суток груз опускается и электромоторы, работая в режиме генератора, вырабатывают электроэнергию. Коэффициент полезного действия такой аккумулирующей системы достигает 95% при относительной небольшой стоимости оборудования. В качестве груза предполагается использовать резервуар, с водой или песком. Углепластиковые канаты позволяют удерживать заполненный легким газом баллон диаметром до 300 м на высотах до 7 км при скорости ветра до 50 м/сек. Разработан проект аэростатной гелиостанции с диаметром баллона 200 м, способной при 8-часовом световом дне вырабатывать постоянно в течение суток электрическую мощность 1000 кВт. При 12-часовом световом дне этот показатель составляет 1500 кВт. Размещать аэростатные солнечные электростанции из условия безопасности лучше всего на сельскохозяйственных землях.

Рассмотрим более подробно систему наведения в солнечных фотоэлектрических станциях (СФЭС), а также основные принципы построения электропривода в системах наведения (СЭП). Специфика СЭП заключается в

наличии автономного источника питания, усложняющего реализацию системы с заданными показателями качества регулирования [21]. Это связано с ограниченными ресурсами энергопитающей установки, что обуславливает требования минимизации потерь, максимума КПД СЭП в целом и высокого качества протекания динамических процессов. Реализовать эти требования возможно путем создания высокودинамичных систем СЭП с широким диапазоном регулирования скорости при высокой плавности ее изменения. Специфической особенностью установок СФЭС является в некоторых случаях пониженное напряжение автономного источника питания. В подобных системах технически нецелесообразно или запрещено использовать в качестве питающего стандартного напряжения 220/380В, что связано с обеспечением безопасности обслуживания электрооборудования в полевых условиях, невозможностью в аварийных ситуациях гарантированной защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током. К рассматриваемому классу автономных устройств могут быть отнесены устройства мобильных установок с питанием от аккумуляторных батарей (АКБ) с рабочим напряжением 12–144 В, переносные инструменты, передвижные комплексы СФЭС, механизмы космического и глубоководного назначения.

Количество требований, предъявляемых к автономным системам ЭП, условно можно поделить на две группы:

- общие требования, задаваемые технологическим процессом (диапазон скорости, статическая и динамическая точности ее поддержания, пределы изменения момента и ускорения, полоса пропускания частот, предельное время регулирования и т.д);

- специальные требования, определяемые технико-экономическими особенностями самих устройств (массогабаритные и стоимостные показатели, энергетические характеристики, надежность и другие технико-экономические показатели).

Важным требованием к СЭП СФЭС является требование по минимуму массы и габаритов системы, что связано с необходимостью размещения в ограниченном объеме всей требуемой аппаратуры, удобством компоновки двигателя и ПЧ, а также с экономией энергоресурсов СФЭС. В целях обеспечения заданного ресурса работоспособности оборудования следует учитывать также требования по улучшению его защищенности от неблагоприятных условий окружающей среды. Требования по защите от атмосферных осадков и влаги, от попадания воды, пыли, грязи, от повышенной влажности и перепада давления, недопустимого температурного режима, разреженного ионизированного пространства и других неблагоприятных условий, в которых приходится функционировать СЭП СФЭС, находятся в определенном противоречии с требованиями по улучшению массогабаритных показателей ЭМС. Следует осуществлять поиск оптимальных решений одновременно в двух направлениях – повышение массогабаритных показателей и улучшение защищенности от неблагоприятных условий окружающей среды.

Большое значение при разработке СЭП СФЭС имеет принятие решений, направленных на повышение надежности силовой части ЭМС. Одно из важных замечаний к СЭП СФЭС обусловлено широким использованием полупроводниковых статических преобразователей [22]. Электроника телекоммуникационных установок чувствительна к электромагнитным помехам и не допускает значительных в отношении электромагнитным помехам отклонений параметров питающего напряжения от номинальных [23].

Среди технико-экономических требований, предъявляемых к СЭП СФЭС, необходимо выделить следующие:

- высокие значения мощности и момента на валу исполнительного двигателя при минимальных массе и габаритах;
- повышенная перегрузочная способность привода в кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы привода;
- высокая ремонтпригодность;
- малая энергоемкость;
- унификация узлов и элементов;
- экономичность и низкая стоимость.

На рисунке 39 приведена модель одноконтурного следящего электропривода солнечной фотоэлектрической станции, где ИУ – измерительное устройство; РП – регулятор положения; УП – управляемый преобразователь напряжения; М- двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения; ИМ – исполнительный механизм.

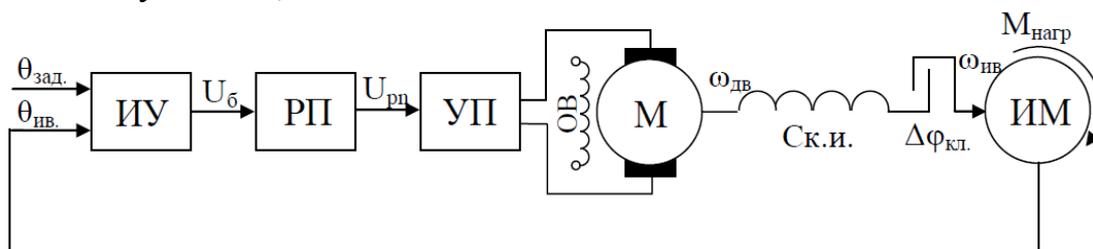


Рисунок 39 – Функциональная электромеханическая схема одноконтурной СЭП СФЭС

В настоящее время во всех странах, активно использующих ВИЭ, в частности СФЭС, применяются системы слежения за Солнцем [46,47]. Существуют основные типы следящих электроприводов:

- шаговый электропривод в режиме программного управления от вычислительной машины;
- следящий шаговый электропривод в режиме автосопровождения с управлением от датчика рассогласования;
- шаговый электропривод в режиме часового завода с управлением от задающего генератора импульсов (только для однокоординатных (экваториальных) систем);
- электропривод постоянного тока непрерывного автосопровождения;
- следящий релейный электропривод постоянного тока в режиме шагового автосопровождения.

Шаговые электроприводы представляются необоснованно дорогими и сложными для гелиоустановок. Кроме этого, работа шагового двигателя на малых частотах вращения сопровождается шумом и вибрациями. Поэтому наиболее предпочтительными по следующим причинам являются простые, надежные и недорогие приводы релейного типа:

- при допустимой погрешности  $\delta_{\text{п}} = \pm 10^0$  нет смысла в непрерывном автосопровождении – достаточно 8 раз повернуть за световой день фотопанель на  $20^0$ , в этом случае допустимая погрешность не превысит  $\delta_{\text{max}} = 10^0$ ;

- электрические потери в шаговом режиме намного ниже, чем в режиме непрерывного автосопровождения;

- режимы слежения и переброса осуществляются одним двигателем с номинальной частотой вращения, что упрощает кинематическую цепь и электромеханическую часть привода.

Потребители часто используют неподвижные, сориентированные строго на юг системы, но это в основном в частных домах, когда на крышу имеющегося строения крепят неподвижные СФЭС; либо на крышу зданий, где нет возможности устанавливать системы слежения, либо в районах, подверженных сильным ветровым воздействиям. Но в подавляющих случаях все конструкторы стараются устанавливать системы слежения, электроприводы гелиоустановок, так как системы привода СФЭС позволяют экономить и вырабатывать значительное количество электроэнергии.

Башни и параболоцилиндрические концентраторы оптимально работают в составе крупных, соединенных с сетью электростанций мощностью 30–200 МВт, тогда как системы тарельчатого типа состоят из модулей и могут использоваться как в автономных установках, так и группами общей мощностью в несколько мегаватт. Параболоцилиндрические установки - на сегодня наиболее развитая из солнечных энергетических технологий и именно они, вероятно, будут использоваться в ближайшей перспективе. Электростанции башенного типа, благодаря своей эффективной теплоаккумулирующей способности, также могут стать солнечными электростанциями недалекого будущего. Модульный характер “тарелок” позволяет использовать их в небольших установках. Башни и “тарелки” позволяют достичь более высоких значений КПД превращения солнечной энергии в электрическую при меньшей стоимости, чем у параболических концентраторов. Однако, остается неясным, смогут ли эти технологии достичь необходимого снижения капитальных затрат. Параболические концентраторы в настоящее время - уже апробированная технология, ожидающая своего шанса на совершенствование. Башенные электростанции нуждаются в демонстрации эффективности и эксплуатационной надежности технологии расплавленных солей при использовании недорогих гелиостатов. Для систем тарельчатого типа необходимо создание хотя бы одного коммерческого двигателя и разработка недорогого концентратора.

## 9. Автоматизированный электропривод

### Основные определения и структурная схема электропривода

По данным экономически развитых стран более 70% всей вырабатываемой энергии расходуется на электропривод. *Электроприводы* – устройства, функциональное назначение которых состоит в преобразовании электрической энергии в механическую.

Современный электропривод является *автоматизированным*. Он выполняет две основные функции: преобразование электрической энергии в механическую и управление преобразованной энергией в целях эффективного ведения технологического процесса. Современное промышленное и сельскохозяйственное производство, транспорт, коммунальное хозяйство, сферы жизнеобеспечения и быта связаны с использованием разнообразных технологических процессов, большинство из которых основаны на применении рабочих машин и механизмов, которые приводятся в движение электрическими двигателями. Каждая рабочая машина нуждается в управлении: нужно включать и выключать двигатели, изменять скорость и усилие на рабочих органах, осуществлять необходимые защиты и блокировки, обеспечивающие безаварийную работу машин.

Важная роль принадлежит электроприводу и в создании энергосберегающих технологий. Характерным примером являются системы тепло- и водоснабжения. Насосные установки, подающие горячую и холодную воду потребителям, ранее оборудовались нерегулируемым электроприводом. Производительность насосов при этом не регулировалась или изменялась дросселированием на нагнетательном трубопроводе насоса, но производительность насосных установок не остается постоянной, а существенно изменяется по времени суток и временам года. В связи с этим, с развитием элементной базы, для регулирования скорости асинхронных двигателей для привода насосов в системах тепло- и водоснабжения стали применяться регулируемые электроприводы. Регулируемый электропривод насоса выполняет две функции: преобразует электрическую энергию в механическую, необходимую для подачи воды потребителю, и управляет работой установки таким образом, чтобы поддерживать требуемую величину напора и расхода воды. Это дает экономию электроэнергии около 30%, воды – до 25%, тепла – до 10% [3].

Автоматизированный электропривод, в общем виде, состоит из нескольких составляющих (рис. 40):

1. Энергетическая часть системы управления (ЭСУ). В электроприводе чаще всего содержит управляемый преобразователь электрической энергии того или иного вида. Например, инвертор или активный выпрямитель

2. Информационная часть системы управления (ИСУ) – строится на базе микроконтроллера, который содержит в своем составе микропроцессор в

виде ядра, выполняющего вычислительные операции, различные периферийные устройства диагностирования и защиты. Такое устройство вырабатывает сигналы воздействия, управляющие ЭСУ, на основе информации полученной с датчиков о текущем состоянии системы.

3. Электромеханический преобразователь (ЭМП) – представляет собой идеализированный электродвигатель, ротор которого не обладает механической инерцией.

4. Ротор двигателя (РД) – механическое звено, которое учитывает потери механической энергии в его массе.

5. Передаточный механизм (ПМ) – в общем случае представляет собой редуктор. Выполняет роль преобразователя параметров механической энергии.

6. Исполнительный механизм (ИМ) – рабочий орган всей системы, который совершает полезную механическую работу.

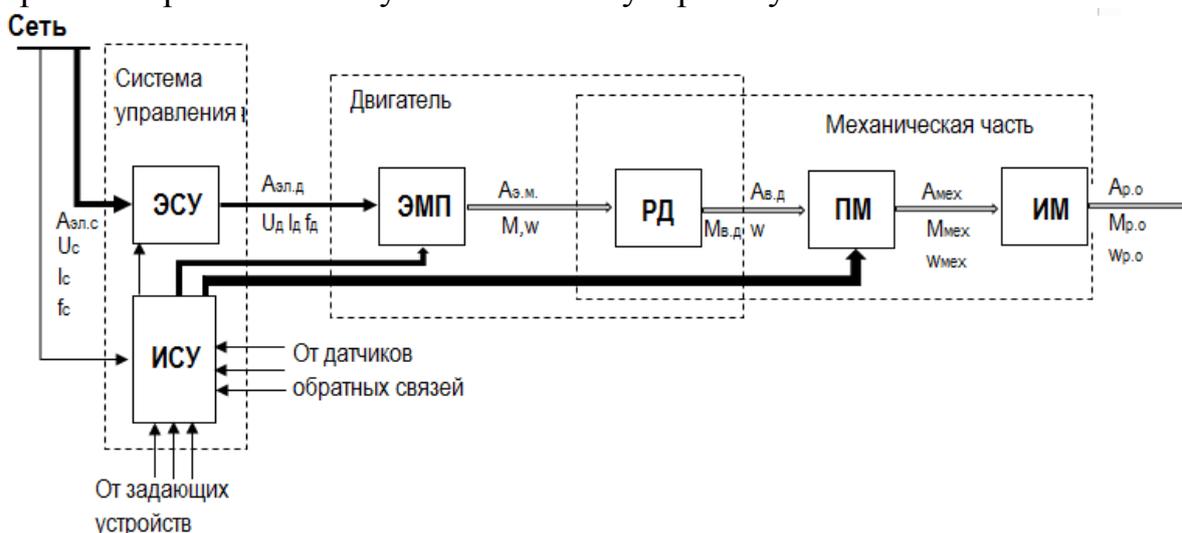


Рисунок 40– Структурная схема автоматизированного электропривода

Возможность энергосбережения средствами электропривода на практике реализуется следующими путями. Первый путь – правильный выбор двигателей по мощности, что имеет важное значение для массовых электроприводов продолжительного режима работы. Второй путь – использование специальных энергосберегающих двигателей (также при условии правильности выбора по мощности), в которых за счет увеличения массы активных материалов (сталь, медь) повышены номинальные значения КПД и  $\cos\phi$ . Этот путь особенно важен для приводов, работающих с постоянной нагрузкой. Третий путь – оптимизация электроприводов по критерию минимума потерь энергии (или максимума энергетической эффективности).

Проведенные за последние годы исследования показывают, что наряду с улучшением технологических характеристик механизмов, переход от нерегулируемого к регулируемому электроприводу может обеспечить в среднем снижение на 20-30% электроэнергии, потребляемой электродвигателями, что позволяет экономить более 10% производимой

электроэнергии [3]. Дополнительные затраты связанные с применением регулируемого электропривода окупаются в течение одного года, до трех лет.

### **Вопросы использования в электроприводе различных двигателей**

В области автоматизированного электропривода до настоящего времени идет конкурентная борьба между двигателями постоянного и переменного тока. Практически промышленность оснащается сейчас в разных долях приводами двух родов тока.

Единственным существенным недостатком привода на постоянном токе остался коллектор машины постоянного тока, который требует пристального внимания при эксплуатации и затраты на его изготовление весьма существенны. Наличие коллектора обуславливает значительное превышение стоимости двигателя постоянного тока, относительно короткозамкнутого двигателя. Кроме того, достаточно сложная конструкция коллектора не позволяет организовать изготовление машин постоянного тока на поточных производственных линиях с минимальным обслуживающим персоналом.

В связи с отмеченными недостатками машин постоянного тока, наряду с асинхронными и синхронными машинами в настоящее время большое внимание уделяется вентильным машинам, имеющим также наименование бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ).

Вопросы возможности построения бесконтактных двигателей постоянного тока, в которых коллектор заменен полупроводниковым коммутирующим устройством, уже давно решены в теоретическом плане и с середины XX столетия началось практически серийное производство вентильных двигателей малой мощности. В настоящее время в связи с появлением силовых транзисторов оказалось возможным построение вентильных двигателей большой мощности.

Вентильный двигатель (ВД) конструктивно является синхронной машиной, ротор которой представляет постоянный магнит, выполненный из редкоземельных материалов или из магнитного сплава ЮДНК. Изменение напряжения на обмотках статора осуществляется по сигналам от датчика положения ротора (ДПР), ось которого жестко связана с осью ротора двигателя. Функциональная схема ВД представлена на рисунке 41.

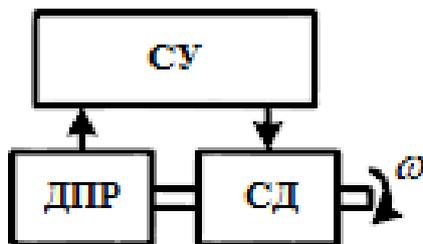


Рисунок 41 – Функциональная схема вентильного двигателя

Характеристики вентильного двигателя соответствуют характеристикам обычного двигателя постоянного тока. Преимущество его - отсутствие коллектора. Стоимость синхронного двигателя меньше, чем машины постоянного тока. Однако стоимость всего комплекта, т.е. БДПТ превышает стоимость машины постоянного тока соответствующей мощности.

С внедрением цифровой техники в управление электроприводами появилось стремление к использованию шаговых двигателей – это синхронных бесщёточных электродвигателей с несколькими обмотками, в которых ток, подаваемый в одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора. Современные шаговые двигатели, обеспечивающие вращательное движение, изготавливаются по типу синхронных машин и имеют зубчатую структуру. При каждом импульсе, поступающем на обмотки двигателя, происходит поворот ротора на одно зубцовое деление. Шаг двигателя для активного варианта ротора, выполненного как постоянный магнит, составляет не менее  $\pi/8$  или  $22,5^\circ$ . Питание двигателя осуществляется от источника с импульсным напряжением частотой 0,4-1 кГц. Характерным параметром шагового двигателя является частота приемистости – максимальная частота импульсов, при которой двигатель может разогнаться без пропуска импульсов. К сожалению, приводы с шаговыми двигателями не получили широкого применения из-за худших их динамических свойств и более низкого к.п.д., чем у обычных двигателей (с непрерывным питанием). При импульсном управлении, среднеквадратичное значение тока всегда больше среднего и соответственно потери в обмотках и их нагрев значительнее.

### **Полупроводниковый преобразователь как часть системы управления электропривода**

Электроприводы строятся как системы с индивидуальными источниками питания, снабженными соответствующими системами управления, а именно с преобразователями переменного сетевого напряжения в напряжение или ток, непосредственно используемый для питания двигателя.

В приводах постоянного тока преобразователь обычно представляет управляемый выпрямитель, регулируя выходное напряжение которого, осуществляют управление двигателем. Наряду с этим используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП), в котором выходное напряжение имеет импульсный характер и регулирование его среднего значения осуществляется за счет изменения ширины импульсов при неизменной суммарной длительности импульса и паузы  $T$ .

На переменном токе, сетевое напряжение предварительно выпрямляется, а затем напряжение нужной частоты получается за счет использования автономного инвертора или ШИП, обеспечивающего синусную характеристику напряжения на выходе. При этом потери в двигателе уменьшаются, так как снижается влияние гармонических составляющих.

Во второй половине прошедшего столетия в основном использовались тиристорные преобразователи. Транзисторные преобразователи, обладающие несравненно лучшими свойствами, из-за ограниченных номинальных значений токов и напряжений могли применяться только в маломощных установках приборного типа. Тиристор, как известно, представляет собой не полностью управляемый аппарат. Включение его осуществляется подачей сигнала на управляющий электрод, а для отключения либо должна быть разорвана цепь тока, либо подано встречное напряжение, гасящее протекавший до этого ток. В двигательном режиме это обстоятельство не вызывает существенных осложнений, а в тормозном режиме часто приводит к необходимости использования искусственной коммутации. Кроме того, тиристорные преобразователи обладают нелинейной зависимостью напряжения на выходе от управляющего сигнала, которым является так называемый угол регулирования, т.е. разностью между углами, соответствующими моменту подачи управляющего сигнала и моменту естественного перехода тока с одного аппарата (тиристора) на другой в неуправляемом выпрямителе. Для компенсации возникающей нелинейности обычно приходится вводить дополнительное последовательное звено с арккосинусной характеристикой. Картина существенно изменилась с появлением в конце XX столетия силовых транзисторов на токи сотни ампер и напряжение до одного киловольта и выше. При этом оказалось возможным строить преобразователи как линейные усилители. Все осложняющие обстоятельства, связанные с применением тиристорных преобразователей отпали. Вопросы выбора схемы преобразователя и расчет динамики существенно упростились. Никакие новые теоретические исследования практически не потребовались. Таким образом, как в преобразователях, питающих обычные двигатели постоянного тока, так и для построения приводов переменного тока в настоящее время используются:

- а) полевые транзисторы с изолированным затвором;
- б) транзисторы типа IGBT – те же полевые транзисторы, но с дополнительным р-n переходом.

### **Микроконтроллер как часть системы управления электропривода**

Микроконтроллеры составляют основу информационных подсистем, определяют их интеллектуализацию и представляют собой однокристалльные микро-ЭВМ, цифровые сигнальные процессоры, адаптированные к задачам управления в реальном времени с целым рядом интегрированных устройств; аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) для ввода сигналов аналоговых датчиков, формирователями выходных ШИМ-сигналов для прямого цифрового управления силовыми преобразователями, портами для сопряжения с системами управления более высокого уровня и т.д. [3].

Среди преимуществ микроконтроллеров следует назвать:

- гибкость, понимаемую как возможность оперативного изменения структуры, алгоритмов и параметров системы управления;

- возможность реализации наряду с традиционными алгоритмами управления, принятыми в аналоговых системах, более сложных алгоритмов, характеризующих адаптивные, самонастраивающиеся, взаимосвязанные и многоконтурные системы управления;

- оперативное тестирование и диагностику текущего состояния управляемой системы и ее элементов, способствующих раннему обнаружению неисправностей и предупреждению аварий;

- более высокую точность обработки информации, поскольку в цифровых системах отсутствуют источники погрешностей, характерные для аналоговых управляющих устройств;

- простота запоминания, хранения и визуализации параметров процессов управления, возможность оперативного взаимодействия с обслуживающим персоналом;

- большую надежность, меньшую массу, габариты и стоимость микроконтроллерных и компьютерных систем управления.

Наличие в составе микропроцессоров запоминающих устройств большого объема позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы обработки данных и сделать энергетические объекты информационно прозрачными. При этом даже при наличии широко известных методов прямого измерения, необходимых для управления величинами (например, динамическим моментом), становится возможным, имея небольшое число датчиков, и соответственно, каналов сбора первичной информации, определять необходимую дополнительную информацию с помощью моделей в реальном масштабе времени и повышать качество управления с помощью различных схем наблюдателей.

### **Основные способы управления двигателями постоянного и переменного тока**

Как уже говорилось, основные способы управления двигателями связаны с изменением напряжения питания. Системы с питанием двигателя от самой сети с параметрическим управлением посредством введения добавочных элементов, обычно резисторов, в настоящее время используются лишь в редких случаях, когда не требуется стабилизация скорости и управление осуществляется вручную постоянно присутствующим машинистом. Как примеры могут быть указаны подъемно-транспортные установки и электрическая тяга на транспорте. В этих случаях скорость перемещения механизмов и соответственно скорость двигателя выбирается машинистом в соответствии с имеющейся ситуацией. Если в установке используется два двигателя, то, как правило, применяется схема с переключением двигателей с последовательного на параллельное соединение. При этом достигается существенная экономия электроэнергии. Подобная схема, как правило, используется на железных дорогах (пригородные секции) и городском транспорте (трамвай). Системы электропривода с параметрическим

управлением преимущественно являются системами с двигателями постоянного тока. На переменном токе в этом случае пришлось бы использовать асинхронные двигатели с так называемым фазным ротором, снабженным обмоткой, концы которой выведены на вращающиеся кольца. При этом двигатель становится эксплуатационно неудобным, стоимость его возрастает.

С появлением силовых транзисторов на западе началась разработка и налаживание производства регулируемых систем частотно-регулируемых приводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Теоретические предпосылки для создания такого рода приводов уже давно были подготовлены трудами многих ученых и инженеров, фамилии некоторых из которых были указаны выше. В связи с этим уже к концу закончившегося столетия многими зарубежными фирмами был налажен серийный выпуск частотно-регулируемых систем. Основным преимуществом их является использование наиболее простого и соответственно дешевого короткозамкнутого двигателя. Однако система управления таким типом привода существенно дороже, чем других регулируемых приводов.

Для ЭДС обмотки статора асинхронного двигателя, которая уравнивает приложенное напряжение, может быть написано следующее выражение:

$$U \approx E = \sqrt{2\pi K_w w \Phi f}$$

где  $K_w$  – обмоточный коэффициент, близкий к единице,  $w$  - число витков фазы обмотки статора,  $\Phi$  - магнитный поток,  $f$  - частота тока статора.

При частотном управлении, когда скорость регулируется изменением частоты статора, при уменьшении скорости соответственно уменьшается ЭДС. Если при этом сохранить питающее напряжение неизменным, то для соблюдения равновесия  $U \approx E$  магнитный поток должен возрасти. Это приведет к насыщению магнитной цепи. Соответственно возрастет индукция в зазоре, увеличится ток статора, резко увеличатся потери. В связи с этим обстоятельством, при частотном управлении, одновременно с изменением частоты необходимо регулировать и напряжение в цепи статора. Как показал М.П. Костенко, при наличии постоянного статистического момента на оси двигателя, следует обеспечивать пропорциональное изменение напряжения и частоты. При, так называемой, вентиляторной нагрузке, когда статистический момент пропорционален квадрату скорости, напряжение должно изменяться пропорционально квадрату частоты и, соответственно, скорости вращения ротора. Для обеспечения неизменности магнитного потока напряжение может регулироваться в зависимости от тока статора, непосредственно по информации о величине магнитного потока (используя, соответственно, датчики Холла), или по величине, так называемого, абсолютного скольжения, т.е. по соотношению частот токов ротора и статора.

Все ужесточаемые требования, предъявляемые к различным технологическим процессам (например, точное поддержание какой-либо

величины на заданном уровне), приводят к появлению прецизионных (сверхточных) систем электропривода, включающих разнообразные элементы и использующих различные методы и способы управления.

Большинство прецизионных приводов выполняются как электроприводы с подчиненным регулированием координат. В этом случае, весь тракт управления в структурной схеме разбивается на ряд звеньев, каждый с одной инерционной постоянной. При охвате звеньев обратными связями образуется ряд контуров (контур управления моментом, скоростью, положением) с регуляторами, причем выходной сигнал предыдущего (внешнего) является входным для последующего (внутреннего). Для управления каждой координатой организуется отдельный контур со своей обратной связью и своим регулятором. На рис. 42 датчики координат представлены звеньями с коэффициентами передачи  $K_{x1}$ ,  $K_{x2}$  и  $K_{x3}$ , передаточные функции регуляторов обозначены через  $W_{R1}$ ,  $W_{R2}$ ,  $W_{R3}$ .

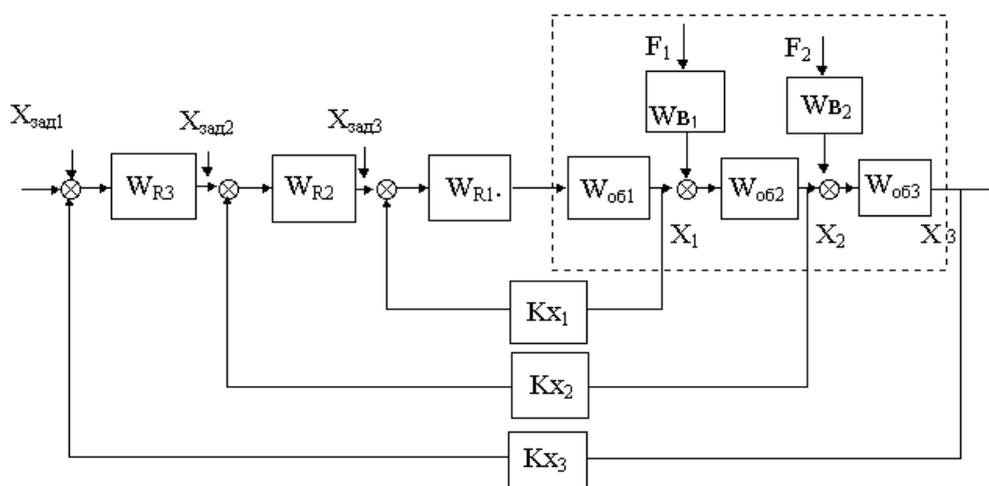


Рисунок 42 – Структурная схема подчиненного регулирования

Система подчиненного регулирования позволяет скомпенсировать большие постоянные времени и тем самым обеспечить требуемое быстродействие привода при отсутствии существенного перерегулирования, а также иметь сравнительно малые погрешности. В настоящее время, большинство приводов станочного оборудования и других механизмов снабжают приводами с подчиненным регулированием.

Разработка прецизионного электропривода является сложной многокритериальной задачей. Одной из таких сложностей состоит в том, что кинематические цепи механической части привода могут осуществлять жесткие, упругие, а также нелинейные связи между элементами (рис. 43). Увеличение жесткости передач не всегда реализуемо, так как при этом увеличиваются их габариты и масса. Реальным средством ограничения упругих колебаний является введение корректирующих средств – обратных связей по положению, скорости и ускорению рабочего вала приводимого в движение механизма.

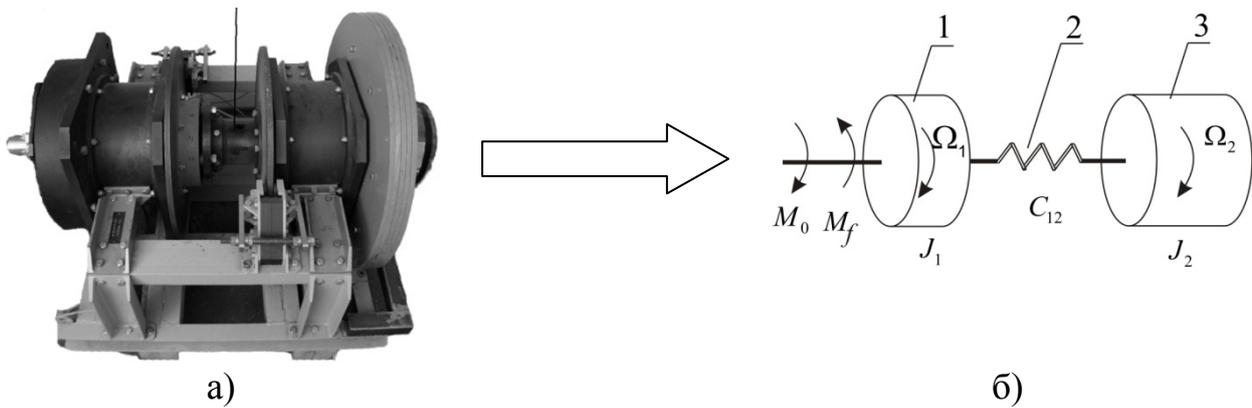


Рисунок 43 – Модель стенда с упругими звеньями, где 1 – первая масса с моментом инерции  $J_1$ , 2 – нежесткость, 3 – вторая масса с моментом инерции  $J_2$

### Примеры современных прецизионных электромеханических систем

Электроприводы различаются по функциональному значению. Основные из них:

1. Обеспечивающий стабильную скорость,
2. Позиционный,
3. Программно-управляющий,
4. Следящий.

#### *Приводы, обеспечивающие стабильную скорость*

##### **Электропривод вентилятора**

На рисунке 44 показана электрическая схема электропривода вентилятора, служащего для обмена воздуха в помещении. Преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для приведения рабочего колеса вентилятора во вращение, осуществляется асинхронным двигателем М. Однако состав электропривода вентилятора не ограничивается только двигателем. Чтобы вентиляторная установка могла работать, двигатель нужно включать и отключать. Эта функция управления реализуется с помощью магнитного пускателя КМ и кнопок управления SB1, SB2. Схема содержит также защитные устройства: защиту от токов короткого замыкания в проводниках или в обмотке статора двигателя. Эта защита обеспечивается автоматическим выключателем QF, имеющим максимальный расцепитель. Защита двигателя от перегрузок реализуется посредством тепловых реле КК, входящих в состав магнитного пускателя КМ.

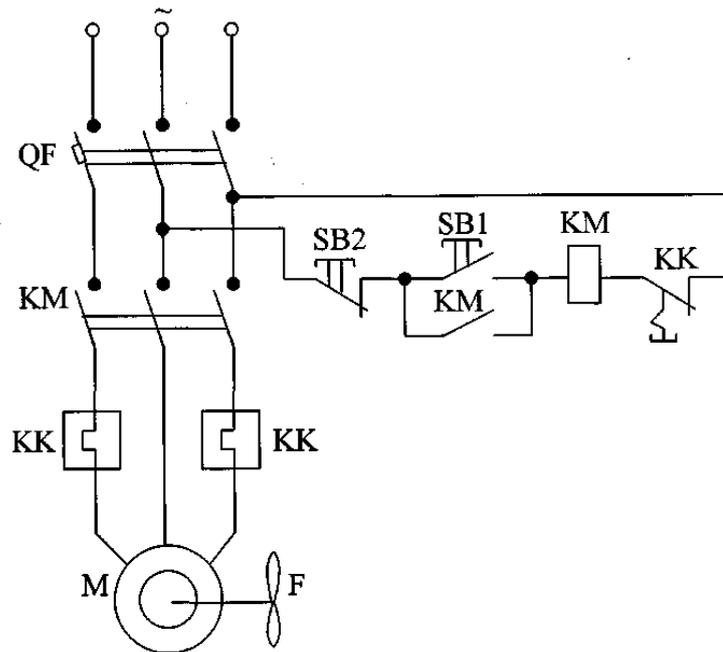


Рисунок 44 – Схема электропривода вентилятора

### Электропривод лифта

Рассмотрим электропривод лифтов (см.рис.45). Лифт – автоматизированное электромеханическое средство пассажирского вертикального транспорта. Пассажир, войдя в кабину лифта, нажимает кнопку нужного ему этажа, после чего автоматически закрываются двери кабины и лифтовой шахты. Кабина лифта движется в нужном направлении и точно останавливается на уровне заданного этажа, двери открываются. Электродвигатель через редуктор, канатоведущий шкив и канатную передачу приводит кабину лифта в движение, выполняя преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для осуществления движения механической системы. Второй электромеханической системой является устройство открывания и закрывания дверей, состоящее из электродвигателя и кинематических механических звеньев.

Система управления лифтом осуществляет автоматическое управление дверями, выбор направления движения кабины, обеспечивает плавный пуск, движение с установившейся скоростью, торможение и точную остановку кабины. Кроме управления движением система управления лифтом содержит необходимые защиты и блокировки, обеспечивающие безопасность пассажиров и безаварийную работу оборудования, а также информацию о положении кабины.

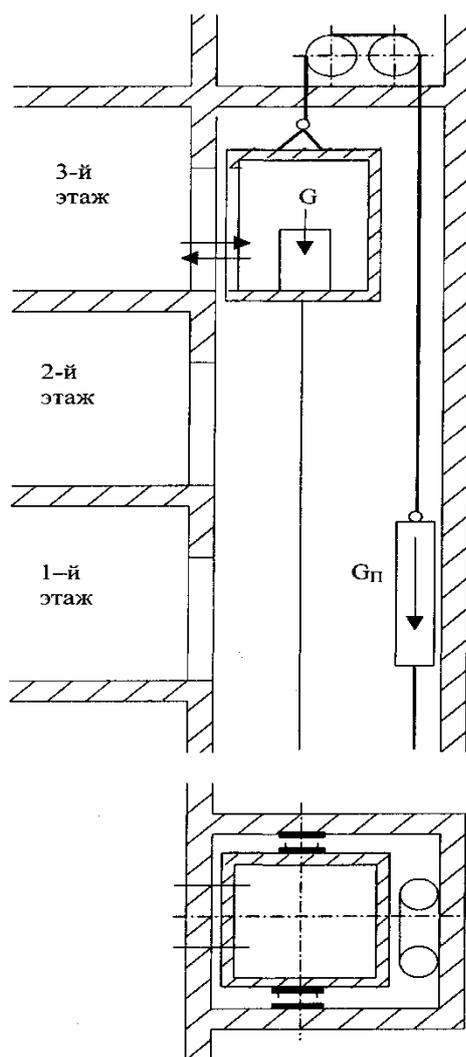


Рисунок 45 – Схема лифтовой установки

### Электропривод стиральной машины

Еще одним примером электропривода является электромеханическая система автоматической стиральной машины активаторного типа. Машина представляет собой электромеханическое устройство, содержащее многоскоростной электродвигатель вращения барабана, электронасос, электрические клапаны и аппаратуру программного управления. В соответствии с устанавливаемой программой машина автоматически производит стирку, полоскание и отжим белья, налив и слив воды. Работа различных электрических и механических элементов функционально объединена устройством программного управления. Работу отдельных элементов нельзя рассматривать порознь, т.к. совместно они образуют автоматическую электромеханическую систему, выполняющую требуемый технологический процесс, причем в состав этой электромеханической системы входят электродвигатели, осуществляющие преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для осуществления данного

технологического процесса, и устройство управления, обеспечивающее управление этим процессом.

### **Применение электропривода в автомобилях**

Все большее распространение, особенно в США и Японии, получают электромобили (ЭМ). Например, фирмой *General Motors* созданы легковые электромобили, по своим эксплуатационным характеристикам не уступающие традиционным автомобилям. Основное достоинство электромобилей – экологическая безопасность – обеспечит их широкое использование в ближайшие десятилетия. Существуют две схемы электромобилей: гибридная и с зарядными устройствами. В обеих схемах колеса автомобиля приводятся во вращение электродвигателями. В гибридных схемах, источником энергии служит двигатель внутреннего сгорания, работающий в постоянном режиме, оптимальном с точки зрения расхода топлива и минимизации токсичности выхлопных газов. Двигатель внутреннего сгорания приводит во вращение электрический генератор, осуществляющий подзарядку буферных аккумуляторных батарей. Приводные электродвигатели переменного тока получают питание от аккумуляторных батарей или суперконденсаторов через полупроводниковый преобразователь частоты.

В схеме электромобилей с зарядными устройствами дизель-генераторная установка отсутствует, и приводные электродвигатели получают питание от аккумуляторных батарей, которые периодически заряжаются (рис. 46).

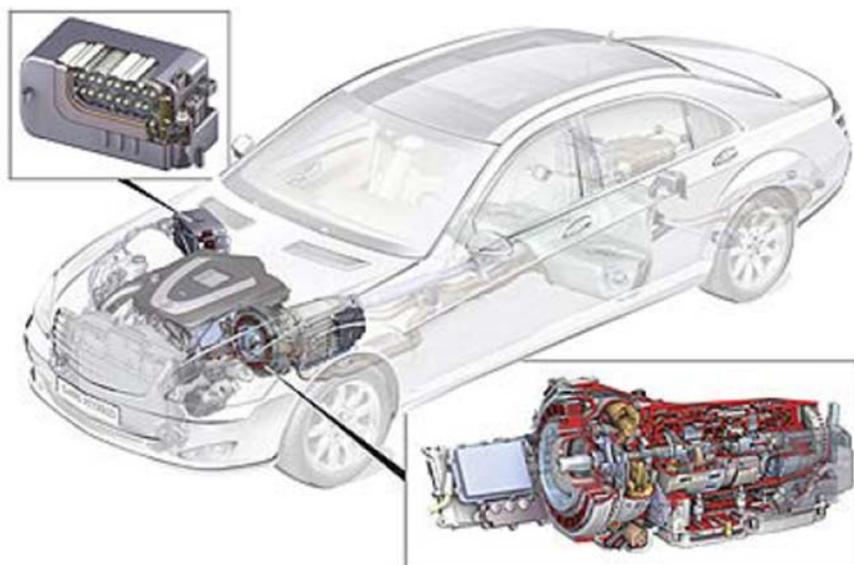


Рисунок 46 – Схематичное изображение строения электромобиля

В состав электропривода входят электрические двигатели колес, источник электропитания, преобразователь частоты и система управления, обеспечивающая регулирование скорости электромобиля и электрическое рекуперативное торможение с возвратом энергии на подзарядку аккумуляторов.

Конструктивное исполнение электропривода электромобиля может иметь несколько вариантов. Основные из этих вариантов представлены на рис. 47.

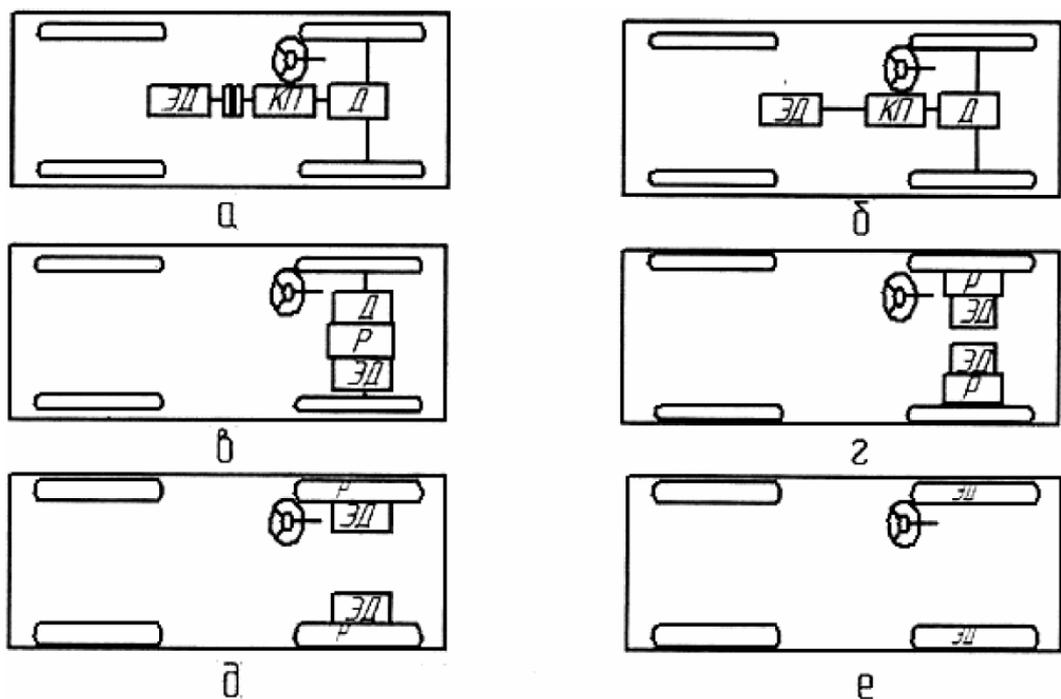


Рисунок 47 –Варианты конструктивного исполнения ЭМ, где Д- дифференциал; КП- коробка передач; ЭД- электродвигатель; Р- редуктор

На рис. 47,а изображен электропривод, состоящий из электродвигателя, сцепления, коробки передач и дифференциала. Сцепление и коробка передач могут быть заменены автоматической коробкой передач. Сцепление используется для соединения и разъединения электродвигателя с ведомыми колесами. Коробка передач обеспечивает ряд передаточных отношений, чтобы изменять вращающий момент на колесе автомобиля. Дифференциал - механическое устройство (ряд планетарных механизмов), обеспечивающее движение транспортного средства на поворотах.

На рис. 47,б изображен электропривод для ЭМ с электродвигателем постоянной мощности в большом диапазоне скорости. Эта конструкция не только уменьшает размер и массу механической передачи, но и упрощает контроль за тягой, так как исключает необходимость переключения передачи.

На рис. 47,в изображен электропривод, в котором электродвигатель, неподвижная передача и дифференциал объединены в единую конструкцию.

На рис. 47,г изображен электропривод, в котором механический дифференциал отсутствует и заменен двумя двигателями. Каждый из них вращает одно колесо и обеспечивает различные скорости, когда транспортное средство движется по извилистой трассе.

На рис. 47,д изображен электродвигатель, который встроен в колесо. Это так называемый “мотор-колёсный” привод.

На рис. 47,е изображен электропривод, в котором полностью отсутствует механическая передача между электродвигателем и ведущим колесом, и ротор электродвигателя непосредственно связан с ведущим колесом. Изменение скорости электродвигателя эквивалентно изменению скорости колеса и

скорости транспортного средства. Однако это расположение требует, чтобы у электродвигателя был высокий вращающий момент.

### *Позиционные электроприводы*

Позиционные приводы – это приводы предназначены для отработки заданных перемещений. Примером может служить привод транспортного устройства, подающего заготовки к штамповочному или прессовому механизму. Для такого рода устройств обычно также используют приводы с подчиненным управлением. Основное требование – обеспечение минимальной погрешности позиционирования и отработка перемещения за заданный минимальный промежуток времени. Обычно устройство должно иметь возможность перенастройки. С этой целью, в настоящее время преимущественно используются средства цифровой техники.

Другим примером может служить привод механизма управления рулевым устройством судна (рис. 48). В прошлом столетии еще использовались устанавливаемые на корме судна механизмы, снабженные штурвалом больших размеров. Либо использовалась цепная передача с капитанского мостика к рулевому устройству. В настоящее время всегда применяется система позиционного привода, обеспечивающая должную точность установки руля. При этом, обычно, на мостике имеется программное устройство, которое позволяет обеспечить движение судна по заданному пути.

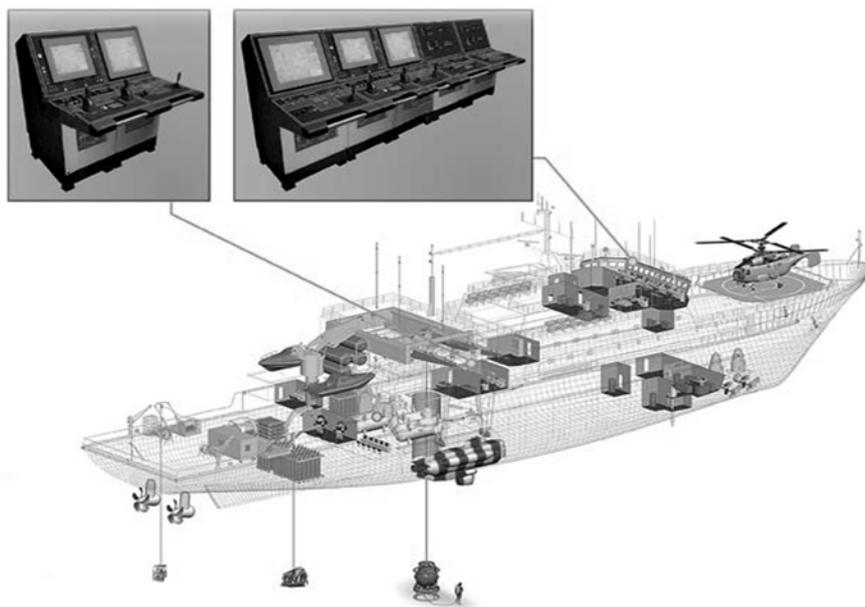


Рисунок 48 – Модель корабля с пультами управления судном  
*Программно - управляющий электропривод*

Существует ряд изделий (деталей), форма которых столь сложна, что обработка их на обычных станках практически невозможна. В этом случае используются специальные станки (обычно фрезерные) с программным управлением. В настоящее время программа, естественно, закладывается в

память управляющей машины. Обработка программы ведется одновременно по двум координатам. Обработка заготовки ведется по сечениям в результате последовательного перемещения ее по третьей координате.

В недалеком прошлом, до широкого внедрения средств вычислительной техники в системы электропривода, для обработки изделий сложного профиля, а также для резки листовой стали по предварительно рассчитанным контурам, использовались фотоэлектрические системы, в которых управление движением осуществлялось в результате слежения по чертежу. При перемещении инструмента или газовой горелки (резака) фотоэлектрический датчик следил за краем или серединной линии чертежа. При пересечении линии чертежа в датчике дважды за оборот светового луча возникают импульсы. При равенстве промежутков между импульсами слежение идет в соответствии с требуемым профилем. При их неравенстве возникает команда на перемещение датчика и инструмента в перпендикулярном линии чертежа направлении.

В настоящее время, фотоэлектрические системы слежения для металлообработки практически уже не используются. Однако существуют объекты, для которых рисунок всегда является первичным и переносить его контуры на программу нецелесообразно. К таким объектам следует отнести устройства для нанесения алмазной грани на поверхность изделия из хрусталя. В этом случае фотоэлектрическая система слежения, несомненно, имеет преимущество. Однако процесс реализации фотоэлектрического устройства оказался весьма затрудненным, так как, к сожалению, заготовки далеко не всегда имеют требуемую согласно чертежу форму и расчетную толщину стекла. Внесение поправок по результатам предварительного обмера изделия весьма сложно. В итоге проект фотоэлектрического устройства пока не реализован.

### *Следящие электроприводы*

Следящие электроприводы обеспечивают перемещение исполнительных органов рабочей машины согласно с произвольно изменяющимися задающими сигналами. Примером следящих приводов могут служить приводы робота, обеспечивающие перемещение его руки, а иногда и самого робота. Движение схвата, как правило, обеспечивается одновременной работой нескольких приводов, число которых обычно близко к 6–10 (рис. 49). Конструктивно приводы робота оформляются в двух вариантах:

- а) с установкой двигателей на общей неподвижной платформе и с передачей движения к схвату посредством шестеренных передач и тросов,
- б) в антропоморфном варианте с размещением двигателей в сочленениях (аналогично размещению мышц на руке человека).

Первый вариант недостаточно совершенен, так как требует очень сложных механических передач, которые между собой должны быть развязаны. Реализация второго варианта требует минимизации массы и габаритов

двигателей. Как правило должны использоваться высокоскоростные двигатели с номинальной частотой вращения 10-12 тысяч об/мин.

Работа приводов робота должна протекать без колебаний в режиме близком к пограничному апериодическому режиму (при равных вещественных корнях характеристического уравнения). Однако, электрические параметры приводов робота существенно изменяются при перемещении руки. Так как при перемещении руки от вертикального положения и перехода к горизонтальному величина момента инерции системы привода поворота руки может варьировать в 5-6 раз. Это обстоятельство требует использования адаптивного управления, то есть автоматического приспособления системы к реальным условиям функционирования. С этой целью используются как называемые наблюдатели, представляющие собой математическую модель привода, которая позволяет оценивать реальные параметры и вносить соответствующие коррективы в систему управления.



Рисунок 49 – Робот-манипулятор

Вторым классическим примером могут служить информационные оптико-электронных комплексы, оси телескопов которых наводятся и могут длительное время удерживаться на объектах наблюдения с суммарной погрешностью не более одной угловой секунды. Основные функциональные характеристики таких комплексов в значительной степени определяются реальной точностью слежения за наблюдаемыми объектами. В решении подобных задач важную роль играет конструктивное исполнение всех элементов измерительного телескопа и его опорно-поворотного устройства (ОПУ), представляемое в процессе моделирования и проектирования электроприводов, как правило, двухмассовым механизмом.

В составе ОПУ наземного телескопа можно выделить следующие структурные элементы (рис. 50, а):

– азимутальная ось (А) в составе вертикального вала (1) с моментом инерции  $J_4$ , бесконтактного моментного электродвигателя с моментом инерции статора относительно неподвижного основания  $J_1$  и моментом инерции ротора (3) относительно статора  $J_2$ , твердотельной частью вала (5) в поясе верхней

опоры с моментом инерции  $J_3$ , подшипниковых узлов верхней и нижней опор (2 и 2' соответственно) и кабельного перехода (4) с крутильной жесткостью  $c_{30}$ ;

– вилка (6) в сборе с опорами угломестной оси и горизонтальными цапфами с суммарным моментом инерции  $J_5$ ;

– угломестная ось, включающая подшипниковые узлы опор оси (7), средник с трубой телескопа (8) с моментом инерции  $J_8$ , бесконтактный моментный двигатель с моментом инерции статора относительно вилки  $J_6$  и ротора относительно угломестной оси  $J_7$  и кабельный переход (10) с крутильной жесткостью  $c_{85}$ .

Статоры двигателей связаны с основанием (двигатель азимутальной оси) и вилкой (двигатель угломестной оси) упругими и демпфирующими элементами, характеристики которых определяются размерами элементов и свойствами конструкционных материалов. Роторы двигателей закреплены на валах осей и представляют собой диски с постоянными магнитами. Упругие и демпфирующие характеристики соединений роторов с валами определяются конструктивными элементами (болты, штифты и др.).

Часть вала азимутальной оси, элементы крепления подшипников верхней опоры, внутренние кольца подшипников, а также соответствующее число подвижных шариков могут рассматриваться как самостоятельный инерционный элемент.

Нижняя часть вала азимутальной оси опирается на узел опорных подшипников. Элементы крепления подшипников, их внутренние кольца, соответствующие доли подвижных шариков и роликов включаются в инерционный элемент этой части вала.

Упругие и демпфирующие свойства связей элементов ОПУ между собой и с неподвижным основанием определяют амплитуды и декременты крутильных колебаний азимутальной и угломестной осей, в том числе при их одновременном движении, что характерно для наблюдения за реальными космическими объектами. Расчетная схема ОПУ должна учитывать все отмеченные элементы (рис. 50, б)

В этих условиях именно на цифровой следящий электропривод возлагается задача компенсировать все возможные несовершенства конструкции механических узлов телескопа, его кабельного перехода и обеспечить заданную точность при относительно невысоком быстродействии системы, определяемом низкой резонансной частотой осей ОПУ.

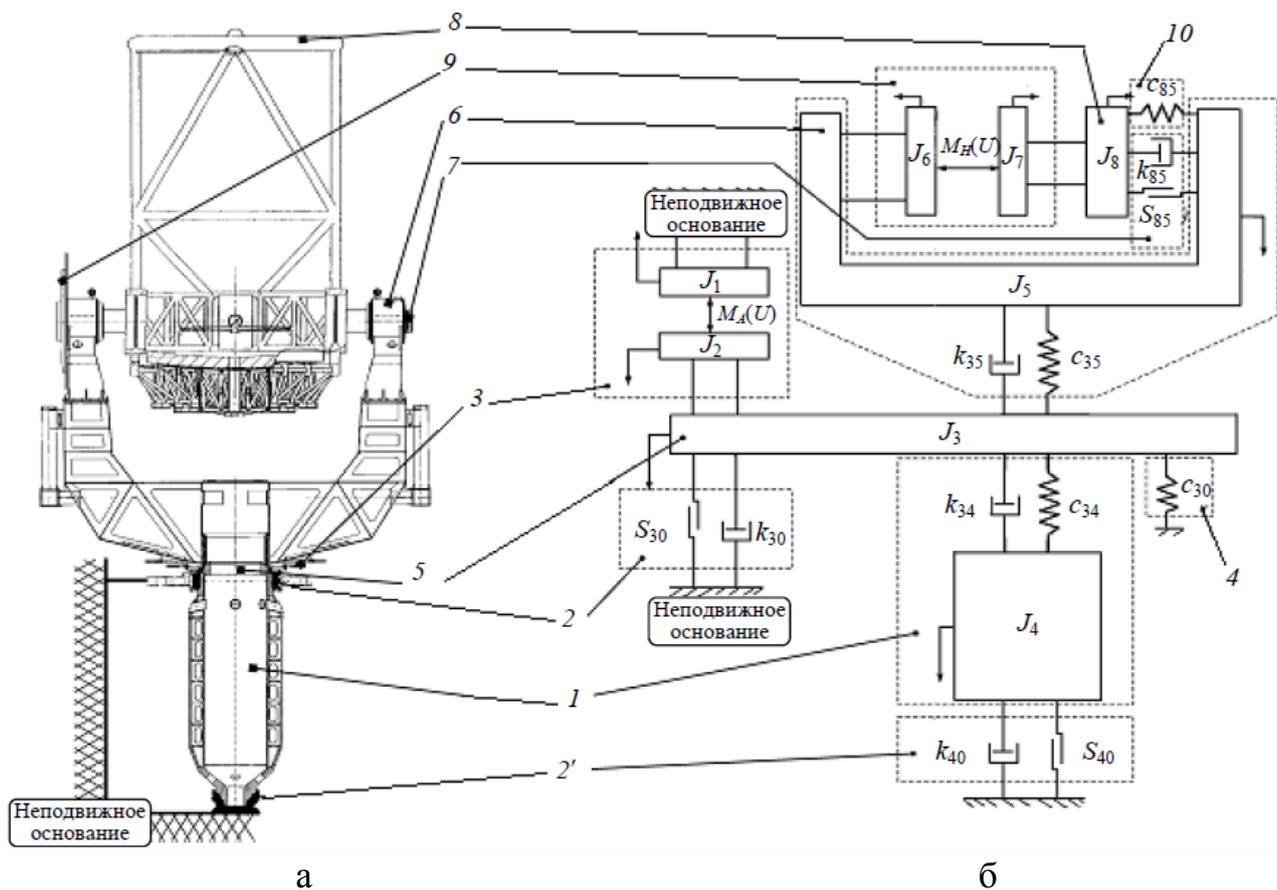


Рисунок 50 – Конструкция телескопа (а) и его расчетная модель (б)

### Тенденции развития современного электропривода

Характерными чертами современного этапа развития техники электропривода являются:

- глобальное использование регулируемых электроприводов с двигателями переменного тока;
- построение регулируемых электроприводов на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии, построенных на основе транзисторах или тиристорах с комбинированным управлением;
- использование прямого цифрового управления на базе микропроцессорной техники;
- современный электропривод базируется на использовании новых электродвигателей: энергосберегающих асинхронных, вентильных и других;
- использование сложных систем автоматического управления на основе нейронных сетей, нечеткой логики, наблюдателей состояния и других;
- замена нерегулируемого электропривода на регулируемый в целях энергосбережения, экономии и повышения надежности.

## **Заключение**

В заключении отметим, что необходимо развитие системного подхода к проектированию и исследованию как энергосистем, так и отдельных электромеханических систем и электротехнических комплексов, то есть все эти системы необходимо рассматривать как комплекс взаимодействующих составляющих: потребителей электроэнергии, преобразователей, устройств коммутации и защиты, силовой сети, первичных источников. Это дает возможность анализировать, сравнивать и синтезировать системы в целом, определять направления их развития. Новые системы следует создавать, рассматривая и принимая в расчет весь трактат преобразования энергии от первичного источника до каждого конкретного потребителя энергии независимо от его конструктивного и компоновочного положения в системе, учитывая переходные процессы в системе в целом, особенно там, где источники энергии обладают мощностью, соизмеримой с мощностью потребителей.

## Литература

1. Б. Вайнзихер. Электроэнергетика России 2030. Целевое видение – М.:Альпина Паблишер, 2008. - 360 с.
2. А. Макаров. Электроэнергетика России в период до 2030 года. Контуры желаемого будущего – ИНЭИ РАН 2007 – 184с.
3. Е. Аметистов, Алексей Бурман, Владимир Строев. Основы современной энергетики. В 2 томах. Том 2. Современная электроэнергетика – М.:МЭИ, 2010 – 850с.
4. Д. Лазарев, Д. Ефимов, С. Киселева, В. Синельщиков. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы – М.:МЭИ, 2010 – 704с.
5. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. Изд. Второе, перераб и доп – СПб.: НИУ ИТМО, 2013 – 305 с.
6. Усольцев А.А. Электрические машины: Учебное пособие – СПб.: НИУ ИТМО, 2013 – 123 с.
7. Н. Баранов. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии МЭИ, 2012 - 384с.
8. Ю. Руденко, В. Семенов. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике МЭИ, 2000 - 648с.
9. А.Б. Красовский. Основы электропривода. Учебное пособие – М.:МГТУ им. Баумана, 2015 – 406с.
10. Л. Беляев, М. Ластовская, А. Лебедев, О. Марченко, П. Сергеев, С. Соломин, С. Филиппов. Мировая энергетика. Состояние, проблемы, перспективы – М.: Энергия, 2007, 664с.

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В 1930 году техникум точной механики и оптики был реорганизован в учебный комбинат, состоящий из института, техникума и ФЗУ в системе Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности.

В те годы электротехническую подготовку в нашем институте проводили кафедры «Электротехники» и «Электроизмерительных приборов». Кафедрой «Электротехники» руководил проф. Салтыков Л.Н., а кафедрой «Электроизмерительных приборов» проф. Шишелов Л.П.

С сентября 1933 года исполнять обязанности заведующего кафедрой «Электротехники» нашего института начинает Рукавишников Н. Н., а с ноября 1937 года, на заведование кафедрой назначается Солодовников А. А., известный специалист в области электротехники, электроизмерительных приборов и оборудования.

Во время войны при эвакуации ЛИТМО в г. Черепаново кафедрой руководил доц., к.т.н. Березниковский С. Ф.; штатное расписание кафедры в те годы насчитывало всего 4 человека.

После возвращения ЛИТМО из эвакуации в 1944 году кафедрой заведует Березниковский С.Ф., которого 25 января 1945 года освобождают от обязанностей заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» и назначают заведующим этой кафедрой профессора Зилитенкевича С.И.

В послевоенные годы в целом по стране и в Ленинграде ощущался дефицит опытных преподавателей высшей школы и руководство институтом пригласило в качестве заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» известного ученого, педагога и методиста Пиотровского Л. М. Большинство учебников по электрическим машинам в ту пору было написано Пиотровским Л.М. лично или в соавторстве с другими видными учеными.

В 1948 году на базе кафедры «Общей и специальной

электротехники» образуются кафедры: «Общей электротехники и электрических машин» зав.каф.доц. Березниковский С.Ф., «Теоретических основ электротехники» зав. каф.проф. Слепян Л.Б. и «Электроизмерительных приборов» исполняющий обязанности зав. каф. проф. Слепян Л.Б.

В 1951 году кафедры «Электротехники» и «ТОЭ» объединяют в единую кафедру «Электротехники и ТОЭ» под руководством доц. Березниковского С.Ф. в составе Радиотехнического факультета.

В 1956 году на радиотехническом факультете вновь образуются две кафедры – «ТОЭ» зав. каф. доц. Сочнев А.Я. и «Электрических машин» зав. каф. доц. Березниковский С.Ф.

В июле 1958 года доц. Сочнева А.Я. освобождают от обязанностей зав. каф. «ТОЭ», а доц. Фунтова Н.М. назначают в.и.о. зав. каф. и избирают по конкурсу на должность заведующего в 1960 году.

В 1961 году в ЛИТМО на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» приглашают профессора Сахарова А.П.

В 1965 году на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» избирается доц., к.т.н. Глазенко Т.А.

В 1968 году кафедры «ТОЭ» и «Электрических машин» объединяются в единую кафедру «Электротехники» под руководством Т.А. Глазенко.

Татьяна Анатольевна Глазенко в 1948 году с отличием закончила энергетический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1953 году она защитила кандидатскую диссертацию и в 1966 году докторскую диссертацию. Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, почетный член Электротехнической академии России проф. Глазенко Т.А. двадцать пять лет возглавляла кафедру. Она являлась видным, творчески активным ученым, автором более 200 научных работ.

В 1990 году на должность заведующего кафедрой избирается профессор, д.т.н. Герман - Галкин С.Г.

В 1996 году кафедра «Электротехники» была переименована в кафедру «Электротехники и прецизионных электромеханических систем».

С 1991 года кафедрой руководит доцент, кандидат технических наук, Томасов Валентин Сергеевич.

С 1992 по 2005годы на кафедре работал заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Международной Энергетической академии, профессор, д.т.н., Сабинин Ю.А..

Сегодня на кафедре работают: профессор, д.т.н. Дроздов В.Н., проф. Вакуленко С.А.; доценты: Абдуллин А.А., Борисов П.В., Горшков К.С., Денисова А.В., Ильина А.Г., Лукичев Д.В., Никитина М.В., Толмачев В.А., Усольцев А.А.; ст. преподаватели: к.т.н. Махин И.Е., Денисов К.М.; ассистенты: Демидова Г.Л., Жданов И.Н., Кононова М.Е., Цветкова М.Х., тьюторы Гурьянов В.А., Махин И.Е.

На кафедре работает аспирантура и ведётся большая научно-исследовательская работа по созданию электроприводов прецизионных следящих систем наведения телескопов траекторных измерений.

Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем Университета ИТМО, является головным предприятием Российского космического агентства в части исследования, проектирования, изготовления и ввода в эксплуатацию электросиловых приводов на базе высокоэффективных п/п преобразователей и компьютерных систем управления для квантово-оптических систем нового поколения. Разработанные электропривода используются в составе высокоточных оптико-электронных и лазерных комплексов для космической навигации и геодезии (система «Глонасс»), обзора и контроля космического пространства, полигонных испытаний и сертификации ракетного вооружения, а также контроля испытаний стратегических ракет, предусмотренного международными договорами в области ограничения стратегических вооружений.

Основные направления исследований:

- Разработка алгоритмов прецизионного управления оптическими телескопами в том числе на инфранизких скоростях в условиях переменных внешних воздействий с учетом упругости механизмов и нелинейного характера сил сопротивления движению;
- Разработка и создание специального программно-математического обеспечения, реализующего современные алгоритмы управления, а также создание автоматизированных систем дистанционного управления электроприводами;
- Разработка методов идентификации сложных механических объектов, быстрого прототипирования прецизионных электромеханических систем, управляющих ими;
- Разработка и создание специализированных высокопроизводительных микропроцессорных систем многоконтурного управления электроприводами;
- Разработка и создание блоков силовой электроники для управления моментными электродвигателями в том числе энергоэффективных полупроводниковых преобразователей с возможностью двустороннего обмена энергией;
- Разработка устройств бесконтактной передачи энергии.

Демидова Галина Львовна  
Лукичев Дмитрий Вячеславович

**Введение в специальность**  
**Электроэнергетика и электротехника**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 27 сентября 2016

Заказ № 3730

Тираж 20 экз.

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49