

044.3  
Ф32

**В.Т.Федин**

**ИННОВАЦИОННЫЕ  
ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ  
В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Минск  
БНТУ  
2012**

**В.Т. Федин**

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ  
РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Минск  
БНТУ  
2012**

*Ф32*

**Федин, В.Т.** Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии / В.Т. Федин. – Минск : БНТУ, 2012. – 222 с. – ISBN 978-985-550-132-0.

В монографии изложены направления технического совершенствования электропередач и электрических сетей, рассмотрены принципы выполнения линий электропередач с элементами из материалов с памятью формы, электропередач и электрических сетей повышенной живучести, электропередач с фазовым сдвигом с расширяющимися функциональными возможностями и сокращенным количеством линейных проводов, распределенных систем генерации и накопления энергии.

Издание предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов, слушателей центров подготовки и повышения квалификации инженеров-энергетиков, инженеров энергетического профиля, чья деятельность связана с разработкой и эксплуатацией элементов электроэнергетических систем.

Табл. 7. Ил. 99. Библиогр. 28 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 7 от 07.09.2012 г.)

**Рецензенты:**

заведующий кафедрой «Электрические станции»  
Белорусского национального технического университета,  
доктор технических наук, профессор *И.И. Сергей*;  
профессор Белорусского государственного аграрного технического  
университета, доктор технических наук, профессор *В.И. Русан*

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
1. Воздушные линии электропередачи с элементами из материалов с эффектом памяти формы .....	7
1.1. Свойства материалов с эффектом памяти формы .....	7
1.2. Термокомпенсаторы для воздушных линий электропередачи .....	8
1.3. Области возможного использования термокомпенсаторов .....	9
Вопросы для самопроверки .....	25
2. Электропередачи и электрические сети повышенной живучести .....	27
2.1. Предварительные замечания .....	27
2.2. Линии электропередачи с резервной фазой .....	29
2.3. Электропередачи с возможностью изменения количества фаз .....	34
2.4. Гибкие схемы коммутации электропередачи .....	37
2.5. Гибкая система электропередачи на основе электромеханических преобразователей частоты .....	58
Вопросы для самопроверки .....	61
3. Электропередачи с фазовым сдвигом с расширенными функциональными возможностями .....	63
3.1. Принципы устройства и работы .....	63
3.2. Схемно-конструктивные решения разноцепных компактных управляемых электропередач .....	69
3.3. Управляемость, ремонтоспособность и живучесть разноцепных компактных управляемых электропередач .....	76
3.4. Система электропередачи с плавным регулированием фазового сдвига .....	103
Вопросы для самопроверки .....	107

4. Системы передачи электроэнергии с сокращенным количеством линейных проводов и уменьшенным расстоянием между ними .....	109
4.1. Постановка задачи .....	109
4.2. Двухцепные системы передачи электроэнергии .....	113
4.3. Одноцепные системы передачи электроэнергии .....	136
4.4. Резонансные однопроводниковые системы передачи электроэнергии .....	164
Вопросы для самопроверки .....	167
5. Распределенные системы генерации и накопления энергии..	168
5.1. Общие положения .....	168
5.2. Некоторые пути реализации малых гидроэнергоресурсов .....	169
5.3. Некоторые направления создания локальных накопителей энергии .....	179
5.4. Трансформаторы с расширенными функциональными возможностями для распределительных систем передачи электроэнергии .....	192
5.5. Система контроля электропотребления в электрической сети .....	207
Вопросы для самопроверки .....	213
Литература .....	214
Патентные материалы .....	216

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга рассчитана на предварительно подготовленного читателя, знакомого с общими вопросами построения и функционирования систем передачи электроэнергии, линий электропередачи и электроэнергетических систем. В ней развиваются идеи, связанные с совершенствованием конструкций и схем систем передачи электроэнергии, опубликованные ранее в монографиях и учебных пособиях [1, 4 и др.]. Для общности и связанности материала с предыдущими публикациями даны краткие обзоры с указанием соответствующих источников.

В книге обобщен и систематизирован материал, основанный на патентных источниках, в значительной степени — на патентах автора и сотрудников, аспирантов, магистрантов, студентов кафедры “Электрические системы” Белорусского национального технического университета. Это определило в ряде мест соответствующий стиль изложения материала, отражающий принципы, используемые в патентных материалах. Для усиления данного акцента в конце кроме списка литературы приведен список патентов, на которые в тексте сделаны ссылки. Это позволяет читателю легко найти первоначальный источник того или иного технического решения.

Издание содержит большой материал для дальнейших разработок, в том числе в магистерских и кандидатских диссертациях. Оно направлено на развитие творческого мышления читателя, творческих способностей, освоение на практике механизмов изобретательства.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия для студентов энергетических специальностей при освоении таких дисциплин как “Перспективные направления развития электроэнергетических систем”, “Основы инженерного творчества” и других, а также при дипломном проектировании и в студенческой научной работе. Для таких случаев в конце каждой главы даны вопросы для самопроверки. Краткое описание конструкций, которые были разработаны ранее в других источниках, может служить хорошим тренингом для студентов. В этих случаях им могут быть предложены задачи по графическому изображению конструкций или схем по их словесному описанию.

Автор надеется, что данная книга будет способствовать пропаганде и развитию сложившегося десятилетиями научного направления кафедры “Электрические системы” Белорусского национального технического университета, реализации инновационных технических решений на практике в области электроэнергетики с соответствующей корректировкой нормативного документа [19].

Автор выражает глубокую благодарность и признательность ведущему инженеру Е.А. Заборской за огромный труд при подготовке рукописи к изданию.

Все отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, БНТУ, корп. 2.

# **1. ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

## **1.1. Свойства материалов с эффектом памяти формы**

Материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) были разработаны в 60-х годах XX века. Наиболее ярким представителями этих материалов является сплав никеля с титаном – никелид титана (нитинол). Из других материалов можно отметить сплавы Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Fe-Mn-Si.

Особенность материалов с ЭПФ заключается в том, что при их нагревании и охлаждении происходит мартенситное превращение, связанное с перестройкой кристаллической решетки. При этом изменение взаимного расположения атомов (или молекул) происходит путем их упорядоченного перемещения. В результате при нагревании эти материалы могут восстанавливать значительные деформации. При этом возникают существенные механические усилия. При охлаждении материал легко деформируется за счет незначительного усилия [2].

Так, в сплавах на основе меди реактивные напряжения достигают 500–600 МПа, а в сложных композициях на основе никелида титана – 1300 МПа [1п]. Вследствие этого материалы с ЭПФ имеют хорошие характеристики формозапоминания. Так, деформация никелида титана до 8% может полностью восстанавливаться.

Материалы с ЭПФ характеризуются температурами прямых и обратных мартенситных превращений. Прямое мартенситное превращение характеризуется начальной и конечной температурой при деформации, а обратное мартенситное превращение – соответственно начальной и конечной температурой при нагреве. Температуры мартенситных превращений зависят от марки сплава. Сверхупругость материалов наблюдается в области температур между началом прямого мартенситного превращения и концом обратного мартенситного превращения. Упругие свойства материалов с ЭПФ в желаемом диапазоне температур и пластические свойства при других диапазонах температур получают, подбирая соответствующий химический состав, например, добавляя Fe [1п].



Материалы с ЭПФ обладают высокой прочностью, хорошей коррозионной стойкостью. У таких материалов ЭПФ проявляется несколько миллионов циклов.

Материалы с ЭПФ находят применение в гидравлических системах, медицине, тепловой сигнализации, приборостроении, производстве термоусаживаемых материалов и других областях.

## 1.2. Термокомпенсаторы для воздушных линий электропередачи

Материалы с ЭПФ могут быть с успехом применены на воздушных линиях электропередачи. Для этого предложено использовать специальные термокомпенсаторы [3, 3п, 14п]. Термокомпенсатор выполняют в виде отрезка провода из материала с ЭПФ. При его нагревании одновременно с проводом линии электропередачи он подтягивает этот провод на несколько сантиметров, что оказывается вполне достаточно для изменения стрелы провеса провода линии в пролете, которая составляет несколько метров. Очевидно, что нагревание провода и термокомпенсатора может происходить как за счет повышения температуры воздуха, так и за счет тока по проводу.

Принципиально термокомпенсатор может быть подсоединен в рассечку провода линии [14п], либо параллельно проводу линии [2п, 4п, 5п]. По первому способу очевиден недостаток, заключающийся в том, что увеличивается количество контактных соединений на линии. В результате снижается надежность работы линии. По второму способу термокомпенсатор подсоединяется параллельно проводу (рис. 1.1), где 1 – провод линии, 2 – термокомпенсатор из материала с ЭПФ, 3 – узлы крепления, 4 – провод линии при срабатывании термокомпенсатора. При отсутствии термокомпенсатора и при его наличии в охлажденном состоянии провод линии занимает положение 1 (рис. 1.1, а,б). Элемент с ЭПФ деформирован. При нагреве элемент с ЭПФ “вспоминает” свою форму, сокращается и подтягивает провод (рис. 1.1,в).

В связи с тем, что удельное активное сопротивление материала с ЭПФ существенно выше удельного сопротивления алюминиевой части провода линии (у никелида титана в 20 и более раз), ток линии в термокомпенсатор, подсоединенный параллельно проводу,

ответвляться не будет. В результате устройство с термокомпенсатором реагировать на изменение температуры провода, связанное с изменением тока, не будет.

Для перераспределения тока линии между проводом и термокомпенсатором предложено снабжать провод под термокомпенсатором ферромагнитным экраном 5 (рис.1.1,г) [2, 9п]. За счет этого экрана увеличивается индуктивное сопротивление участка провода между узлами крепления с термокомпенсатором. В результате часть тока линии ответвляется в термокомпенсатор, который срабатывает при заданной температуре провода.

При используемых на линиях электропередачи длинах пролетов и стрел провеса длина термокомпенсатора может составлять не более 1% длины пролета, а ферромагнитного экрана 15...20 см с массой 0,5...1 кг.

### **1.3. Области возможного использования термокомпенсаторов**

Как уже отмечалось, нагревание и срабатывание термокомпенсатора может происходить как за счет повышения температуры окружающей среды, так и за счет тока, проходящего через термокомпенсатор. При этом срабатывание (сокращение длины) термокомпенсатора происходит при температуре окончания обратного мартенситного превращения материала с ЭПФ.

Для того, чтобы обеспечить ответвление части тока линии в термокомпенсатор, служит ферромагнитный экран (рис. 1.1,г), выполнимый в виде полого цилиндра с продольным немагнитным зазором. Параметры экрана (длина, толщина стенки, ширина зазора) выбираются такими, при которых обеспечивается нагрев и соответствующее срабатывание термокомпенсатора при заданном токе линии.

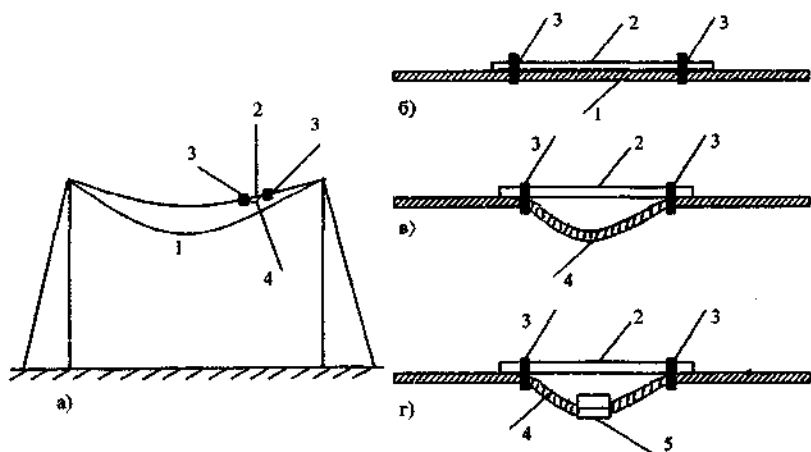


Рис. 1.1. Термокомпенсатор:

а – установка на линии; б – при охлажденном состоянии с возросшим натяжением;  
 в – при нагреве в сокращенном состоянии; г – с ферромагнитным экраном

Учет обоих факторов (температуры воздуха и тока линии) можно произвести, если обеспечить срабатывание термокомпенсатора по заданной температуре провода. Реализовать данный подход предложено в [9п] путем подбора состава элемента с ЭПФ с соответствующей температурой окончания обратного мартенситного превращения по режиму максимального тока линии при минимальной температуре воздуха и отсутствии ветра. В связи с тем, что срабатывание термокомпенсатора в этих двух крайних режимах происходит при одной и той же заданной температуре провода, то и при любых других сочетаниях температуры воздуха и тока линии срабатывание термокомпенсатора будет происходить при той же заданной температуре провода.

Путем соответствующих расчетов можно построить зависимость, характеризующую связь между температурой воздуха и током линии, при которых температуры провода и соответственно термокомпенсатора остаются неизменными и равными температуре срабатывания термокомпенсатора  $t_{пр} = t_{тк}$  (рис. 1.2). Здесь точка 1 соответствует требованию, при котором должно происходить срабатывание термокомпенсатора при максимальной температуре воздуха и отсутствии тока линии, а точка 2 – требованию срабатывания

термокомпенсатора при максимальном токе линии и минимальной температуре воздуха  $t_{\min}$ .

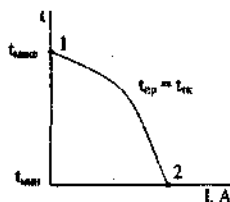


Рис. 1.2. Области заданной температуры провода и температуры срабатывания термокомпенсатора

Срабатывание термокомпенсатора в точке 1 происходит за счет выбора соответствующего состава материала с ЭПФ (в случае никелида титана – процентного соотношению никеля и титана), а срабатывание в точке 2 – выбором параметров ферромагнитного экрана. Поскольку в термокомпенсатор отводится одна и та же часть тока линии, то при отсутствии ветра температуры провода и термокомпенсатора будут равны во всем диапазоне токов линии и температур воздуха [9п].

Рассмотрим варианты возможного применения термокомпенсаторов из материалов с ЭПФ на воздушных линиях электропередачи.

### 1. Увеличение длины пролета линии.

Габарит проводов линии до земли должен обеспечиваться, как известно, при наихудших условиях: при наибольшей механической нагрузке от массы провода, которая возникает в случае максимальной температуры воздуха с одновременным максимальным током нагрузки. Если ограничивающим условием является фактор нагрева провода, то это ограничение можно снять с помощью термокомпенсаторов из материала с ЭПФ. Действительно, при известной длине пролета  $\ell_1$  и заданном габарите  $h_{r1}$  стрелы провеса без термокомпенсатора и с термокомпенсатором будут соответственно  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 1.3,а), причем  $f_2 < f_1$ , а габариты до земли  $h_{r1}$  и  $h_{r2}$ . Причем, габарит  $h_{r2}$  будет превышать нормируемый  $h_{r1}$ . Поэтому в случае применения термокомпенсатора длину пролета можно увеличить до  $\ell_2 > \ell_1$  (рис. 1.3,б), чтобы вернуться к допустимой стреле провеса  $f_1$ .

и допустимому габариту до земли  $h_{r1}$ . Следовательно, за счет применения термокомпенсаторов можно уменьшить количество опор на линии.

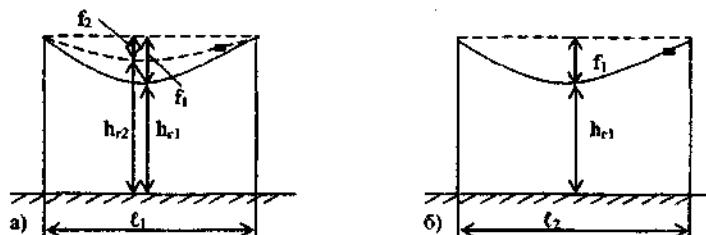


Рис. 1.3. Применение термокомпенсаторов для увеличения длины пролета: а – нормальная длина пролета; б – увеличенная длина пролета

Подобной экономии на материале опор можно добиться без увеличения длины пролета линии. Благодаря применению термокомпенсаторов стрела провеса провода будет уменьшаться с  $f_1$  до  $f_2$ . Тогда при заданной длине пролета  $l_1$  заданный габарит до земли  $h_{r1}$  при стреле провеса  $f_2 < f_1$  можно обеспечить, снизив высоту подвески проводов на опоре (рис. 1.4). В результате можно уменьшить высоту опор. Эффект получается как непосредственно от экономии материала на опоры, так и за счет уменьшения механических нагрузок на опоры при более низкой подвеске проводов.

Очевидно, что описанные приемы могут быть реализованы на стадии проектирования линии электропередачи.

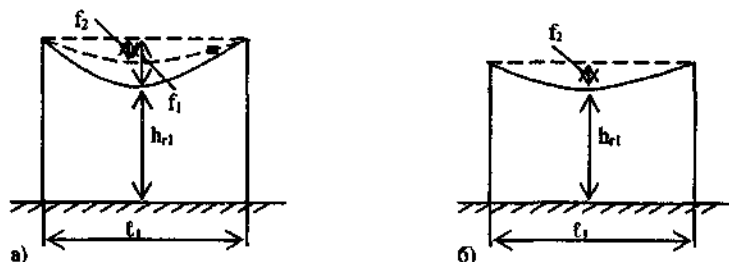


Рис. 1.4. Применение термокомпенсаторов для уменьшения высоты опор: а – нормальная высота опор; б – уменьшенная высота опор

## 2. Повышение пропускной способности линии по условию нагревания

Как известно [8], в настоящее время допустимая токовая нагрузка на провода воздушных линий устанавливается исходя из допустимой температуры нагревания провода  $70^{\circ}\text{C}$ , в основном, по условию работы контактных соединений. При хороших контактных соединениях рабочая температура провода в условиях эксплуатации может быть повышена до  $100...120^{\circ}\text{C}$ . В этих условиях ограничивающим фактором может оказаться стрела провеса и габарит провода до земли. Применение термокомпенсаторов позволяет без реконструкции действующей линии повысить ее пропускную способность по условию нагревания

$$P = \sqrt{3}UI_{\text{доп}} \cos \varphi,$$

где  $U$  – напряжение линии;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток с учетом повышенной температуры провода.

При этом габарит провода до земли нарушен не будет.

## 3. Повышение надежности пересечений воздушных линий с инженерными сооружениями

Установка термокомпенсаторов может быть полезной на пересечениях воздушной линии с другими линиями электропередачи, с линиями связи, авто- и железными дорогами и другими инженерными сооружениями. В этих случаях можно увеличить габарит между пересекающимися инженерными сооружениями. На рис. 1.5 показан вариант пересечения двух линий электропередачи. На верхней линии установлены термокомпенсаторы ТК с ферромагнитными экранами. В результате как при повышении температуры воздуха, так и при увеличении тока верхней линии происходит дополнительное нагревание верхнего провода. При этом срабатывают термокомпенсаторы, сокращая свою длину, и тем самым уменьшают стрелу провеса провода. В итоге увеличивается габарит  $h_r$  между проводами пересекающихся линий.

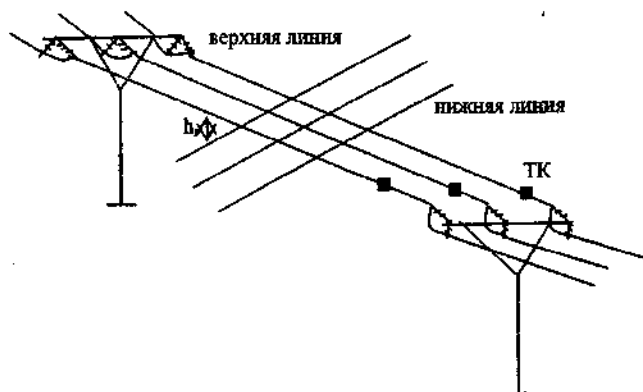


Рис. 1.5. Установка термокомпенсаторов на пересечении линий электропередачи

#### 4. Повышение пропускной способности и экономичности линий электропередачи.

Если провода фаз линии расположены в вертикальной плоскости, а также на опорах типа “бочка”, “елка”, “обратная елка”, то определенный эффект может быть получен при размещении термокомпенсаторов только на средней и нижней фазах [7п] (рис. 1.6). Здесь положение проводов 1 соответствует условиям расстановки опор при монтаже. При минимальных температурах провода занимают положение 2, а при максимальных - положение 3.

При максимальных температурах, когда провода займут положения 3, срабатывают термокомпенсаторы в средней и нижней фазах. При этом провод средней фазы подтягивается на  $\Delta f$ , занимая положение 4, соответствующее исходному положению 1. Провод нижней фазы подтягивается на  $\Delta f + \Delta f$ , занимая положение 4. В результате расстояния между фазами составят  $d_{bc}$  и  $d_{cn}$  без термокомпенсаторов ( $d_{bc} < d'_{bc}$ ,  $d_{cn} < d'_{cn}$ ). Значения  $\Delta f$  и  $2\Delta f$  определяются длиной и параметрами термокомпенсаторов.

Таким образом, в определенных условиях, а именно, при температурах воздуха, близких к максимальным, в результате воздействия термокомпенсаторов уменьшается среднегеометрическое расстояние между фазами, и, как следствие, уменьшается удельное индуктивное сопротивление  $x_0$  и увеличивается удельная емкостная

проводимость  $b_0$ . В итоге изменяется баланс реактивной мощности линии:

$$\delta Q = \Delta Q - Q_b = 3I^2 x_0 \ell - U^2 b_0 \ell,$$

где  $I$ ,  $U$  – рабочий ток и напряжение линии;  $\ell$  – длина линии;  $\Delta Q$  – потери реактивной мощности;  $Q_b$  – зарядная мощность.

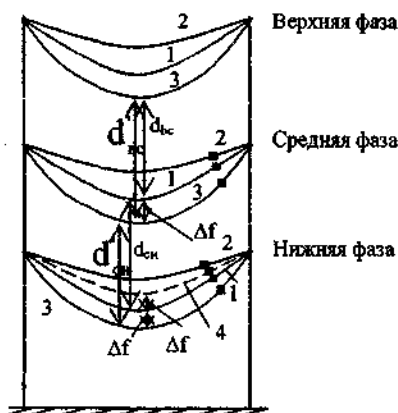


Рис. 1.6. Установка термокомпенсаторов в средней и нижней фазах

Однако, такое техническое решение обладает существенным недостатком. По условию баланса реактивной мощности в системе снижение потерь реактивной мощности и увеличение зарядной мощности линии обычно требуется при наибольших нагрузках, а не при максимальных температурах окружающей среды. Поэтому реализация такого предложения обычно будет приносить вред, а не пользу. Для получения положительного эффекта срабатывание термокомпенсаторов должно происходить не от изменения температуры окружающей среды, а в зависимости от тока линии.

Реализация такого подхода предложена в [16п]. На рис 1.7 схематически показан пролет воздушной линии с вертикальным расположением проводов фаз 1, 2, 3, закрепленных на опорах 4. Параллельно участкам средней 2 и нижней 3 фаз прикреплены при помощи зажимов 5 термокомпенсаторы 6 и 7 соответственно, выполненные из материала с ЭПФ и покрытые теплоизоляционным материа-



лом 8. На участке проводов 2 и 3 между точками 5 крепления термокомпенсаторов расположены ферромагнитные экраны 9 и 10, выполненные в виде полого цилиндра с продольным немагнитным зазором. Штриховыми линиями показано расположение проводов 1, 2, 3 в режиме, когда термокомпенсаторы не сработали, а сплошными — при сработавших термокомпенсаторах.

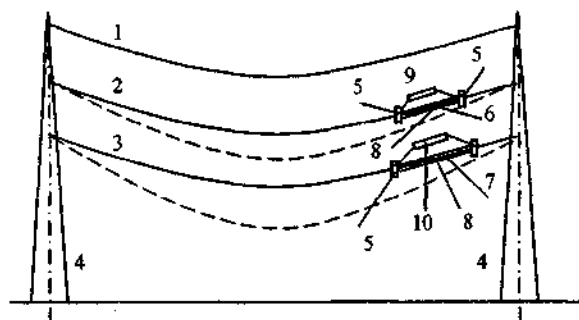


Рис. 1.7. Линия электропередачи с термокомпенсаторами и ферромагнитными экранами в средней и нижней фазах

При передаче по линии большой мощности в режиме наибольших нагрузок энергосистемы ток в проводах 1, 2, 3 фаз увеличивается, и термокомпенсаторы 6 и 7 срабатывают и подтягивают провод 2 средней фазы и провод 3 нижней фазы вверх. Причем подтягивание провода 3 нижней фазы происходит в большей степени, чем провода 2 средней фазы из-за большей длины термокомпенсатора 7 по сравнению с термокомпенсатором 6. В результате уменьшается расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 фаз в пролете, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления и увеличению емкостной проводимости линии, а следовательно, к уменьшению потерь реактивной мощности и увеличению зарядной мощности линии. При этом уменьшается волновое сопротивление и увеличивается натуральная мощность линии, что приводит к увеличению пропускной способности линии и улучшению устойчивой работы электрической системы.

В режиме наименьших нагрузок термокомпенсаторы 6 и 7 не работают, расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1 фаз увели-

чивается. При этом уменьшается емкостная проводимость линии и увеличивается индуктивное сопротивление, что приводит к уменьшению избыточной зарядной мощности, генерируемой линией электропередачи.

Применение ферромагнитных экранов 9 и 10, расположенных на проводах 2 и 3 между точками 5 крепления термокомпенсаторов 6 и 7, обеспечивает срабатывание термокомпенсаторов от заданного тока линии. Для предотвращения срабатывания термокомпенсаторов 6 и 7 от температуры окружающей среды они покрыты теплоизоляционным материалом 8. Одновременно при длительном увеличении тока нагрузки наличие теплоизоляционного материала 8 на термокомпенсаторах 6 и 7 способствует повышению температуры термокомпенсаторов и их срабатыванию при меньших токах, чем заданные с помощью ферромагнитных экранов 9 и 10, т.е. при этом увеличивается диапазон тока срабатывания термокомпенсаторов.

Таким образом, описанное техническое решение позволяет с помощью материалов с ЭПФ повысить роль воздушной линии в регулировании режимов работы электрической сети.

Рассмотрим другие технические решения, позволяющие использовать элементы с памятью формы для регулирования режимов линий электропередач [61п, 62п].

На рис.1.8 схематически показан пролет воздушной линии с вертикальным расположением фаз, содержащей провод 1 верхней фазы, провод 2 средней фазы, провод 3 нижней фазы, закрепленные на опорах 4. Параллельно участкам верхней 1 и нижней 3 фаз прикреплены при помощи точек 5 крепления термокомпенсаторы 6 и 7 соответственно, выполненные из материала с эффектом памяти формы и покрытые теплоизоляционным материалом 8. На участке проводов 1 и 3 между точками 5 крепления термокомпенсатора расположены ферромагнитные экраны 9, выполненные в виде полого цилиндра с продольным немагнитным зазором. Штриховыми линиями показано расположение проводов 1 и 3 в режиме наименьших нагрузок, а сплошными – в режиме наибольших нагрузок.

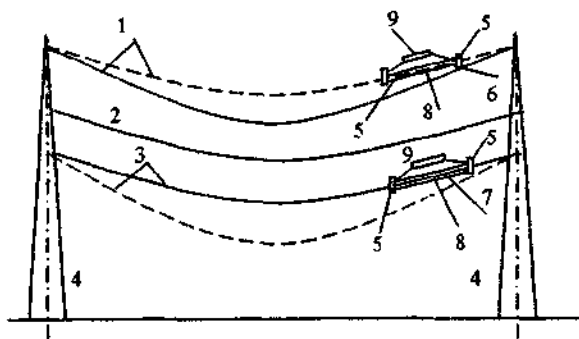


Рис. 1.8. Линия электропередачи с термокомпенсаторами и ферромагнитными экранами в крайних фазах

Линия электропередачи работает следующим образом. Материал термокомпенсатора 6 верхней фазы имеет температуру окончания обратного мартенситного превращения, соответствующую температуре его нагревания от рабочего тока линии в режимах наименьших нагрузок, а материал термокомпенсатора 7 нижней фазы имеет температуру окончания обратного мартенситного превращения, соответствующую температуре его нагревания от рабочего тока линии в режимах наибольших нагрузок. При передаче мощности по линии в режиме наименьших нагрузок энергосистемы ток в проводах 1, 2, 3 фаз имеет значение, при котором термокомпенсатор 6 нагревается до температуры окончания обратного мартенситного превращения его материала, сокращается и подтягивает провод 1 верхней фазы. Вследствие этого провод 1 верхней фазы занимает положение, показанное штриховой линией. Термокомпенсатор 7 нижней фазы не нагревается до температуры окончания обратного мартенситного превращения материала, из которого он изготовлен, и не сокращается, поэтому провод 3 нижней фазы остается в положении, показанном штриховой линией. Расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 фаз в пролете увеличивается. При этом уменьшается емкостная проводимость линии, что приводит к уменьшению избыточной зарядной мощности, генерируемой линией электропередачи.

При передаче мощности по линии в режиме наибольших нагрузок энергосистемы ток в проводах 1, 2, 3 фаз имеет значение, при котором термокомпенсатор 7 нагревается до температуры оконча-

ния обратного мартенситного превращения его материала, сокращается и подтягивает провод 3 нижней фазы вверх. Термокомпенсатор 6 в данном режиме имеет температуру, не соответствующую температуре окончания обратного мартенситного превращения материала, из которого он изготовлен. Провода 1, 2, 3 фаз занимают положения, показанные сплошными линиями. Расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 фаз в пролете уменьшается, что ведет к уменьшению индуктивного сопротивления и увеличению емкостной проводимости линии. Вследствие этого уменьшается волновое сопротивление, увеличивается натуральная мощность и зарядная мощность линии, что приводит к уменьшению потерь активной и реактивной мощности, увеличению пропускной способности линии электропередачи и улучшению устойчивой работы электрической системы.

Применение ферромагнитных экранов 9, расположенных на проводах 1 и 3 между точками 5 крепления термокомпенсаторов 6 и 7, обеспечивает срабатывание термокомпенсаторов 6 и 7 от заданного тока линии. Для предотвращения срабатывания термокомпенсаторов 6 и 7 от температуры окружающей среды они покрыты теплоизоляционным материалом 8. Одновременно при длительном изменении тока нагрузки наличие теплоизоляционного материала 8 на термокомпенсаторах 6 и 7 способствует повышению температуры термокомпенсаторов и их срабатыванию при меньших токах, чем заданные с помощью ферромагнитных экранов 9, т.е. увеличивается диапазон тока срабатывания термокомпенсаторов 6 и 7.

Данное техническое решение может быть использовано в электрических сетях для линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше.

На рис.1.9 показан еще один вариант применения на линии элементов с памятью формы. Пролет воздушной линии с вертикальным расположением фаз содержит провод 1 верхней фазы, провод 2 средней фазы, провод 3 нижней фазы, закрепленные на опорах 4. Параллельно участкам верхней 1, средней 2 и нижней 3 фаз прикреплены при помощи точек 5 крепления термокомпенсаторы 6, 7 и 8 соответственно, выполненные из материала с эффектом памяти формы и покрытые теплоизоляционным материалом 9. На участке проводов 1, 2 и 3 между точками 5 крепления термокомпенсатора расположены ферромагнитные экраны 10, 11 и 12, выполненные в

виде полого цилиндра с продольным немагнитным зазором. Штриховыми линиями показано расположение проводов 1, 2 и 3 в режиме наименьших нагрузок, а сплошными – в режиме наибольших нагрузок.

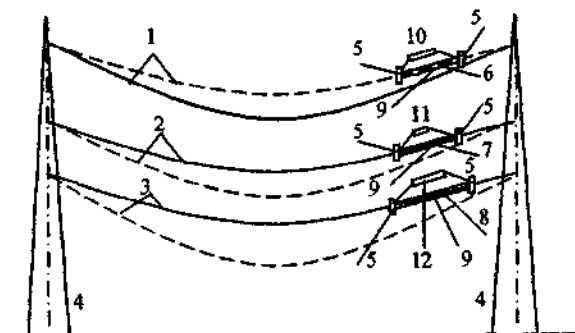


Рис. 1.9. Линия электропередачи с термокомпенсаторами и ферромагнитными экранами во всех фазах

Линия электропередачи работает следующим образом. Материал термокомпенсатора 6 верхней фазы имеет температуру окончания обратного мартенситного превращения, соответствующую температуре его нагревания от рабочего тока линии в режимах наименьших нагрузок, а материал термокомпенсатора 7 средней фазы и термокомпенсатора 8 нижней фазы имеет температуру окончания обратного мартенситного превращения, соответствующую температуре их нагревания от рабочего тока линии в режимах наибольших нагрузок. При передаче мощности по линии в режиме наименьших нагрузок энергосистемы ток в проводах 1, 2, 3 фаз имеет значение, при котором термокомпенсатор 6 нагревается до температуры окончания обратного мартенситного превращения его материала, сокращается и подтягивает провод 1 верхней фазы. Вследствие этого провод 1 верхней фазы занимает положение, показанное штриховой линией. Термокомпенсатор 7 средней фазы и термокомпенсатор 8 нижней фазы не нагреваются до температуры окончания обратного мартенситного превращения материала, из которого они изготовлены, и не сокращаются, поэтому провод 2 средней фазы и провод 3 нижней фазы остаются в положении, показанном штриховыми линиями. Расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 фаз в пролете увеличивается. При этом уменьшается емкостная проводимость ли-

нии, что приводит к уменьшению избыточной зарядной мощности, генерируемой линией электропередачи.

При передаче мощности по линии в режиме наибольших нагрузок энергосистемы ток в проводах 1, 2, 3 фаз имеет значение, при котором термокомпенсаторы 7 и 8 нагреваются до температуры окончания обратного мартенситного превращения их материала, сокращаются и подтягивают провод 2 средней фазы и провод 3 нижней фазы вверх. При этом подтягивание провода 3 нижней фазы происходит в большей степени, чем провода 2 средней фазы из-за большей длины термокомпенсатора 8 по сравнению с термокомпенсатором 7. Термокомпенсатор 6 в данном режиме имеет температуру, не соответствующую температуре окончания обратного мартенситного превращения материала, из которого он изготовлен. Провода 1, 2, 3 фаз занимают положения, показанные сплошными линиями. Расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 фаз в пролете уменьшается, что ведет к уменьшению индуктивного сопротивления и увеличению емкостной проводимости линии. Вследствие этого уменьшается волновое сопротивление, увеличивается натуральная мощность и зарядная мощность линии, что приводит к уменьшению потерь активной и реактивной мощности, увеличению пропускной способности линии электропередачи и улучшению устойчивой работы электрической системы.

Термокомпенсаторы 6 верхней и 8 нижней фазы выполняются в 1,5...3 раза длиннее термокомпенсаторов 7 средней фазы, чтобы расстояние между проводами 1 и 2, 2 и 3, 1 и 3 фаз в пролете максимально допустимо увеличивалось в режимах наименьших нагрузок, и максимально допустимо уменьшалось в режимах наибольших нагрузок.

Применение ферромагнитных экранов 10, 11 и 12, расположенных на проводах 1, 2 и 3 между точками 5 крепления термокомпенсаторов 6, 7 и 8 обеспечивает срабатывание термокомпенсаторов 6, 7 и 8 от заданного тока линии. Для предотвращения срабатывания термокомпенсаторов 6, 7 и 8 от температуры окружающей среды они покрыты теплоизоляционным материалом 9. Одновременно при длительном изменении тока нагрузки наличие теплоизоляционного материала 9 на термокомпенсаторах 6, 7 и 8 способствует повышению температуры термокомпенсаторов и их срабатыванию при меньших токах, чем заданные с помощью ферромагнитных экранов

10, 11 и 12, т.е. увеличивается диапазон тока срабатывания термокомпенсаторов 6, 7 и 8.

Такое решение может быть использовано в электрических сетях для линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Использование воздушной линии электропередачи по сравнению с известными позволяет повысить ее роль в регулировании режимов работы электрической сети.

### 5. Борьба с гололедом.

В [10п] предложен специальный провод с устройством для растапливания снега (рис. 1.10). На провод 1 воздушной линии электропередачи наматывается комбинированный провод 2, состоящий из центрального провода 3, изготовленного из материала с ЭПФ и магнитных элементов 4, наизинных на провод 3. Провод 2 прикреплен к проводу 1 одним концом или серединой, при этом другой конец или оба конца остаются свободными. В диапазоне температур образования гололеда (от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$ ) провод 2 плотно намотан на провод 1 с определенным шагом  $h$  при неизменной форме витков (рис. 1.10). При других температурах провод 2 ослабляется, и его витки провисают относительно провода 1 (рис. 1.10,б). За счет тока в проводе 3 создается магнитный поток, который наводит ЭДС и ток в магнитных элементах 4, нагревая их. При температуре образования гололеда провод 2 прижимается к проводу 1 и нагревает его, препятствуя образованию гололеда.

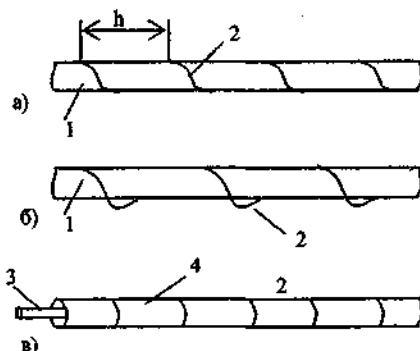


Рис. 1.10. Система для растапливания гололеда на проводе воздушной линии:  
а – состояние провода при температуре образования гололеда;  
б – состояние провода при нормальной температуре;  
в – специальный провод.

Имеется также ряд технических решений, направленных на очищение провода воздушной линии от образовавшегося гололеда. Так, в [1п] предложено на проводе 1 размещать очиститель 2 с помощью установочной прорези 3 (рис. 1.11,а). Для механического разрушения и удаления гололеда 4 очиститель снабжен разнотипными рабочими элементами 5 и 6 в виде отверстий и остроугольных пластин. Средство перемещения 7 очистителя выполнено в виде охватывающей провод спирали из материала с ЭПФ. В данном случае элемент из материала с ЭПФ выполняет функции как датчика образования гололеда, так и исполнительного устройства, совершающего работу. На определенном участке провода устройство закрепляется посредством элемента крепления 8.

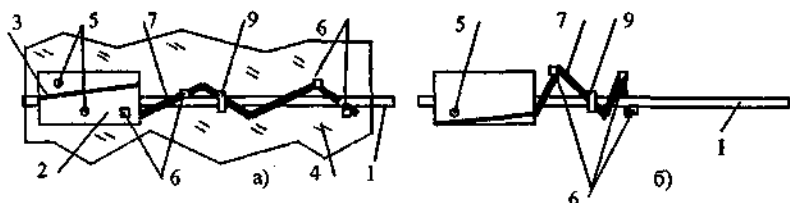


Рис. 1.11. Очиститель гололеда: а – элемент с ЭПФ в “растянутом” состоянии; б – элемент с ЭПФ в “сжатом” состоянии

Если элемент с ЭПФ выполняется из никелида титана, то для его срабатывания в диапазоне образования гололеда от  $t_n$  до  $t_k$  (рис. 1.12) химический состав подбирают, добавляя Fe. Прямая и обратная деформация элемента с ЭПФ характеризуются соответственно кривыми 1 и 2.

Если температура воздуха  $t > t_k$  то средство перемещения 7 будет находиться в “сжатом” состоянии (рис. 1.12). При снижении температуры до температуры начала образования гололеда  $t_n$  элемент с ЭПФ деформируется и “распрямляется”. При этом окончание деформации происходит при температуре конца  $t_k$  образования гололеда (рис. 1.12). В процессе деформации элемента с ЭПФ устройства 2 и 7 перемещаются относительно друг друга, рабочие элементы 5 и 6 воздействуют на гололед, раскалывая его и удаляя с поверхности провода.



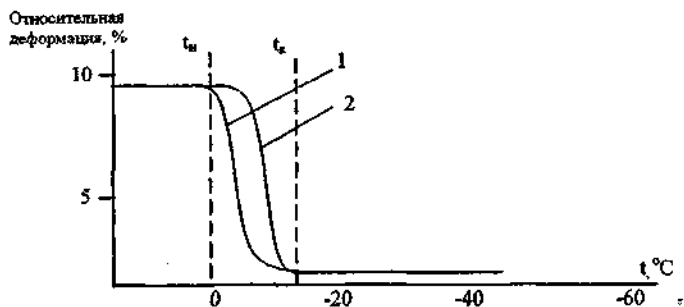


Рис. 1.12. Зависимости деформации элемента с ЭПФ от температуры

При повышении температуры выше  $t_k$  произойдет возвращение элемента с ЭПФ в первоначальное сжатое состояние (рис. 1.12).

Принцип работы другого устройства для сбрасывания гололеда [8п] показан на рис. 1.13. Параллельно проводу 1 с помощью креплений 2 присоединяется термокомпенсатор 3, выполненный из материала с ЭПФ. На проводе между креплениями термокомпенсатора устанавливается ферромагнитный экран 4 в виде полого цилиндра с продольным немагнитным зазором. В конце линии на приемной подстанции устанавливается короткозамыкатель 5. Для сбрасывания гололеда в начале линии на передающей подстанции формируется схема электрических соединений со специальным источником питания 6.

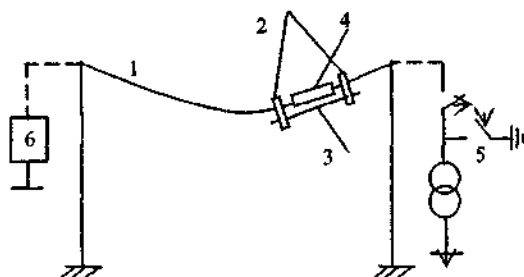


Рис. 1.13. Устройство для сбрасывания гололеда

При прохождении большого тока по проводу линии ферромагнитный экран намагничивается, создавая дополнительное реактив-

ное сопротивление провода. В результате часть тока начинает проходить через термокомпенсатор.

При необходимости сбрасывания гололеда к проводам линии подключают источник питания 6 и делают искусственное короткое замыкание в конце линии при помощи короткозамыкателя 5. При нагреве током короткого замыкания материал с ЭПФ термокомпенсатора импульсивно восстанавливает свою форму (сокращается), встряхивая провод. Возбужденные механические колебания распространяются в обе стороны от термокомпенсатора. При этом происходит разрушение и сбрасывание гололеда с провода. При срабатывании токовой релейной защиты источника 6 он отключается от линии. Описанный кратковременный процесс можно повторять неоднократно.

Для реализации рассмотренной схемы сбрасывания гололеда должны быть выполнены следующие требования:

- уставка релейной защиты по току источника 6, при котором срабатывает термокомпенсатор, не должна превышать тока короткого замыкания в конце линии;
- уставка по времени срабатывания термокомпенсатора не должна превышать время срабатывания токовой защиты.

### **Вопросы для самопроверки**

1. В чем особенности материалов с эффектом памяти формы?
2. В чем суть мартенситных превращений материалов с эффектом памяти формы?
3. За счет чего могут быть получены необходимые параметры материалов с эффектом памяти формы?
4. Каковы могут быть принципиальные конструкции термокомпенсаторов для воздушных линий?
5. Каково удельное активное сопротивление материалов с эффектом памяти формы по сравнению с сопротивлением проводов линии?
6. Каков принцип работы термокомпенсатора?
7. Каково назначение ферромагнитного экрана в устройстве линии с термокомпенсатором?
8. Какова конструкция ферромагнитного экрана?

9. Исходя из каких условий выбирают параметры термокомпенсатора и ферромагнитного экрана?

10. Каковы возможные области применения термокомпенсаторов на воздушных линиях электропередачи?

11. За счет чего можно увеличить длину пролета линии в случае применения термокомпенсаторов?

12. При каких условиях можно повысить пропускную способность линии по нагреванию за счет применения термокомпенсаторов?

13. Какой эффект можно получить на пересечениях линии с инженерными сооружениями за счет применения термокомпенсаторов?

14. С помощью каких технических решений, содержащих термокомпенсаторы, можно использовать линию для регулирования режимов работы электрической сети?

15. Как можно обеспечить срабатывание термокомпенсатора от нагрузки линии и исключить срабатывание при изменении температуры воздуха?

16. Какие известны технические решения, использующие материалы с эффектом памяти формы, для борьбы с гололедом?

17. Какая возможна конструкция провода для растапливания гололеда на нем?

18. Какая возможна конструкция очистителя гололеда, использующего материал с эффектом памяти формы?

19. Как можно организовать сбрасывание гололеда с проводов воздушной линии с установленными на ней термокомпенсаторами при помощи искусственных коротких замыканий?

20. Предложите и обоснуйте новые области применения материалов с эффектом памяти формы на линиях электропередачи и вообще в электроэнергетике. Разработайте соответствующие новые технические решения.

21. Какова конструкция линии электропередачи с термокомпенсаторами в крайних фазах и как они используются для регулирования режимов?

22. Какого эффекта можно достичь при установке термокомпенсаторов различной длины во всех фазах воздушной линии?

## 2. ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТИ

### 2.1. Предварительные замечания

Под живучестью понимают свойства объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением электроснабжения потребителей [11]. Таким образом, живучесть представляет собой одну из составляющих понятия надежности как комплексного свойства объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования. Применительно к электрической сети можно утверждать, что она обладает надежностью, например, если в случае повреждения одной из линий остальные оставшиеся в работе обеспечивают полностью передачу потребителям необходимой мощности. При этом сеть будет обладать живучестью, если отмеченное повреждение не приводит к другим аварийным ситуациям, а оставшиеся в работе линии обеспечивают передачу потребителям хотя бы части требуемой энергии.

В существующих электроэнергетических системах принято и считается естественным, что в сетях при двухфазных коротких замыканиях необходимо отключить все три фазы поврежденной линии. В сетях с заземленной нейтралью при повреждении одной из фаз линии отключаются от источника питания все три фазы. Таким образом, налицо недоиспользование возможностей линий, т.к. выводятся из работы две неповрежденные фазы. Это тем более важно, если учесть, что из всех повреждений в сетях 70-80% составляют однофазные повреждения.

Это нелепое положение может устраняться путем перевода поврежденной линии в неполнофазный режим для работы на двух фазах одноцепной линии, либо на пяти фазах двухцепной линии. Однако, из-за возникающей несимметрии параметров такой путь на практике используется редко.

Аналогичная картина недоиспользования возможностей линий имеет место и на воздушных линиях с расщепленными фазами. В этом случае при повреждении одного из проводов расщепленной фазы считается естественным вывод из работы не только этого провода, но и всех остальных проводов данной фазы. Если же по усло-

вию несимметрии параметров неполнофазный режим недопустим, то выводятся из работы вообще все провода всех фаз. Так, например, на линии напряжением 750 кВ с пятью проводами в фазе при повреждении одного из проводов будут также выведены из работы и оставшиеся 14 проводов.

Требуемая надежность может достигаться двумя путями:

- разработкой совершенных конструкций элементов электрических сетей с пониженной повреждаемостью. Однако, создание конструкций, полностью исключающих какие-либо повреждения, по-видимому, вряд ли возможно;

- применением резервирования путем построения соответствующих схем электроснабжения, например, за счет использования двухцепных линий. Однако, такой путь, как правило, требует существенных дополнительных затрат.

Известны предложения о выполнении воздушных линий с резервной фазой [17п-24п]. В этом случае в нормальном режиме одна из фаз состоит из двух проводов, а две другие – из одного провода каждая. При повреждении одного любого провода из оставшихся трех неповрежденных проводов формируется трехфазная система. Недостатком такой схемы является несимметрия параметров фаз в нормальном режиме и повышенная стоимость линии. При другом подходе один из проводов (резервная фаза) в нормальном режиме находится в резерве. При повреждении любой из рабочих фаз с помощью соответствующей коммутации проводов резервная фаза вводится в работу взамен любой поврежденной рабочей фазы. Однако, данный вариант линии также обладает рядом недостатков: в схеме содержится большое количество коммутационных аппаратов, при не использовании резервного провода в нормальных режимах недостаточна эффективность его применения. Для ослабления этих недостатков имеются предложения в качестве резервного провода использовать изолированный грозозащитный трос, применять специальное расположение проводов и их транспозицию, использовать упрощенные коммутационные аппараты в виде отделителей.

В общем плане возникает вопрос: нельзя ли разработать схемно-конструктивные решения, направленные на повышение живучести линий электропередачи за счет сохранения в работе максимального числа проводов при различных определенных видах повреждений? Нельзя ли предложить пути, позволяющие сохранять подключен-

ными к сети вообще все провода всех фаз при некоторых между-проводных (междуфазных) повреждениях? Эти вопросы особенно актуальны для компактных и управляемых воздушных линий с большим количеством проводов в фазах.

В последующих параграфах рассмотрен ряд технических решений, направленных на повышение живучести линий электропередачи. Естественно, эти решения не являются исчерпывающими. Читателю предлагается на основе анализа этих решений предложить собственные, более совершенные в техническом отношении решения.

## **2.2. Линии электропередачи с резервной фазой**

Как уже отмечалось, в качестве резервной фазы на одноцепной трехфазной воздушной линии может быть использован четвертый дополнительный провод. Такое решение может быть использовано также и на кабельной линии. Другим решением на воздушной линии может быть использование в качестве резервной фазы изолированного грозозащитного троса, выполненного из сталеалюминиевого провода соответствующего сечения [9, 10, 4].

Линии электропередачи с резервной фазой имеют следующие преимущества по сравнению с одноцепными трехфазными линиями:

- возможность осуществления электроснабжения при однофазных повреждениях;
- повышение пропускной способности в послеаварийных режимах;
- возможность пофазного ремонта линии с поочередным переключением ремонтируемой фазы на резервную фазу;
- возможность пофазной плавки гололеда.

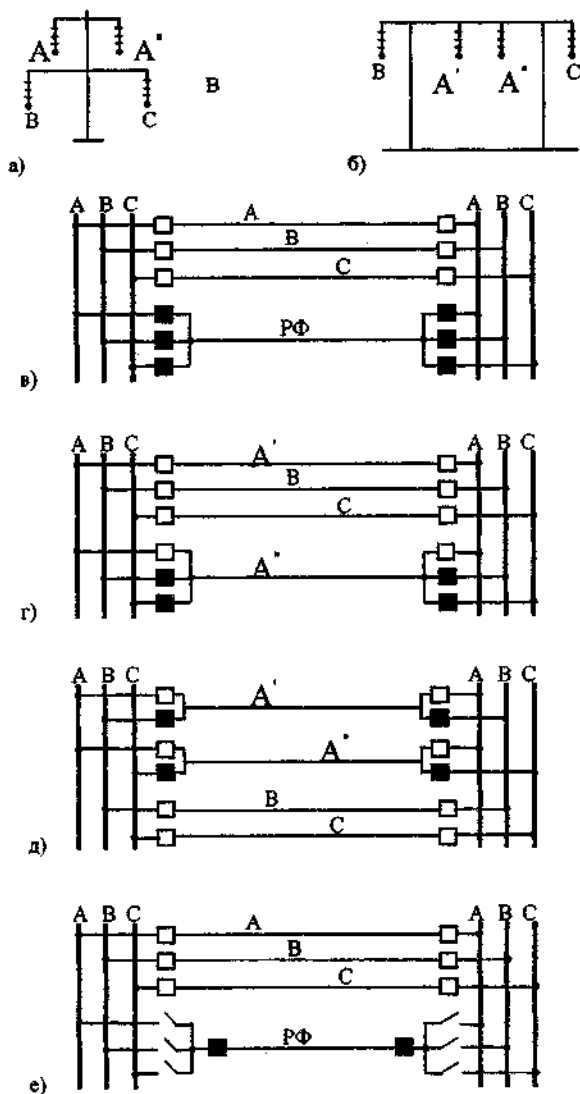


Рис. 2.1. Расположение проводов на опорах (а, б), и схемы нормальных режимов работы линии с резервной фазой (в, г, д, е)

По сравнению с двухцепной линией преимущества заключаются в значительном уменьшении стоимости линии и экономии проводниковых материалов и изоляционных элементов.

Линии с резервной фазой могут выполняться на весь срок ее службы, либо в качестве первого этапа строительства. Тогда при росте нагрузок подвешивается вторая цепь. Возможны различные варианты выполнения линии с резервной фазой (рис. 2.1, а, б). В первом случае четвертый провод используется в качестве резервного. В нормальном режиме он отключен, а в ремонтных и послеаварийных режимах от включается взамен одного из трех проводов основных фаз (рис. 2.1, в). В этом случае площадь сечения резервного провода целесообразно выбирать равной площади сечения основных фаз. Во втором случае одна из фаз выполняется в виде двух полуфаз (рис. 2.1, а, б, г, д). При этом обе полуфазы в нормальном режиме находятся в работе. Суммарная площадь сечения фазы из двух полуфаз должна быть примерно равной площади сечения одиночных проводов двух других фаз. Преимуществом такого решения является использование всех четырех проводов в нормальном режиме, недостатком — несимметрия параметров фаз. Указанный недостаток можно несколько сгладить соответствующим подбором расположения проводов в пространстве, выбором расстояния между проводами и площади сечения проводов полуфаз. В схемах по рис. 2.1, в, г, д отключение рабочей фазы и подключение резервного провода может осуществляться автоматически.

Для снижения стоимости оборудования подстанции на резервной фазе вместо трех однофазных выключателей (рис. 2.1, в, г) или двух (рис. 2.1, д) можно использовать лишь один однофазный выключатель резервной фазы (рис. 2.1, е), а подключение ее к соответствующей фазе или подстанций осуществлять с помощью разъединителей или отделителей. В этом случае, однако, потребуется дополнительное время на коммутации разъединителей.

В качестве резервной фазы может использоваться грозозащитный трос, изолированный от земли по всей длине на фазное напряжение (рис. 2.2). В цепи линии устанавливается выключатель В с трехфазным управлением. Разъединители  $P_1$  в основных фазах линии и разъединители  $P_2$  для подключения троса к одной из фаз линии должны иметь пофазное управление. Съемные перемычки  $P_3$  устанавливаются только в грозовой период. В нормальном режиме



работы линии разъединители  $P_1$  включены, а разъединители  $P_2$  отключены. При повреждении одного из проводов основных фаз выключатель В отключается от действия релейной защиты, после чего автоматически или вручную отключается разъединитель  $P_1$  поврежденной фазы и включается соответствующий разъединитель  $P_2$ . После этого включается выключатель В. В результате трос оказывается подключенным вместо поврежденного провода. Ограничением в использовании данной схемы является то, что в грозовой период трос должен использоваться по своему основному назначению с включенной съемной перемычкой  $P_3$ .

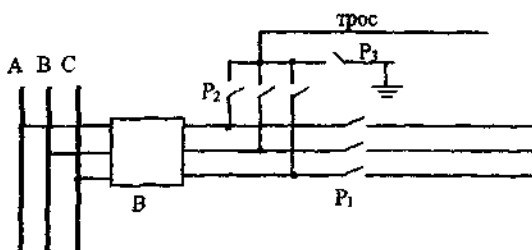


Рис. 2.2. Схема использования грозозащитного троса в качестве резервной фазы

Принципы подключения резервной фазы к подстанции с типовой схемой показаны на рис. 2.3. Схема изображена в трехфазном исполнении. Линии Л могут подключаться к одной из рабочих систем шин, соединенных между собой шинсоединительным выключателем ШСВ. Для возможности поочередного ремонта линейных выключателей В служит обходная система шин ОСШ и обходной выключатель ОВ. Резервная фаза РФ подключается к шинам с помощью трех однофазных выключателей ПВ с пофазным управлением. При этом выключатель каждой фазы может быть подключен через соответствующий разъединитель к соответствующей фазе первой или второй рабочей системы шин. В результате такого подключения при необходимости резервная фаза РФ линии может заменить любую рабочую поврежденную фазу линии Л, независимо от того, к какой из рабочих систем шин подключена эта линия.

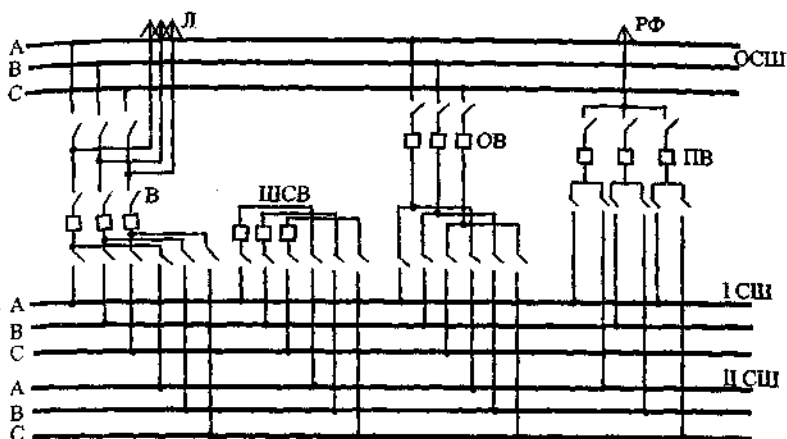


Рис. 2.3. Схема подключения резервной фазы к подстанции с двумя системами шин и обходной системой шин

При передаче по линии с резервной фазой больших мощностей на большие расстояния проявляется несимметрия параметров, в результате чего возникает необходимость применения симметрирующих устройств. Так, для линий напряжением 220 кВ целесообразно применение симметрирующих устройств при передаче мощности больше натуральной и длине линии свыше 100-150 км [9]. Предлагается рассматривать следующие технические мероприятия:

- применение устройств поперечной компенсации;
- применение устройств продольной компенсации;
- транспозиция рабочих и резервной фазы.

При использовании резервной фазы в нормальном режиме работы линии, когда одна из фаз выполняется двумя проводами (рис. 2.1, г, д) для компенсации зарядной мощности этой фазы по концам в данной фазе устанавливают шунтирующие реакторы (рис. 2.4, а), которые должны находиться в работе только в четырехпроводном режиме. Устройства продольной компенсации реактивных сопротивлений фаз с одиночными проводами могут быть реализованы по схеме рис. 2.4, б.

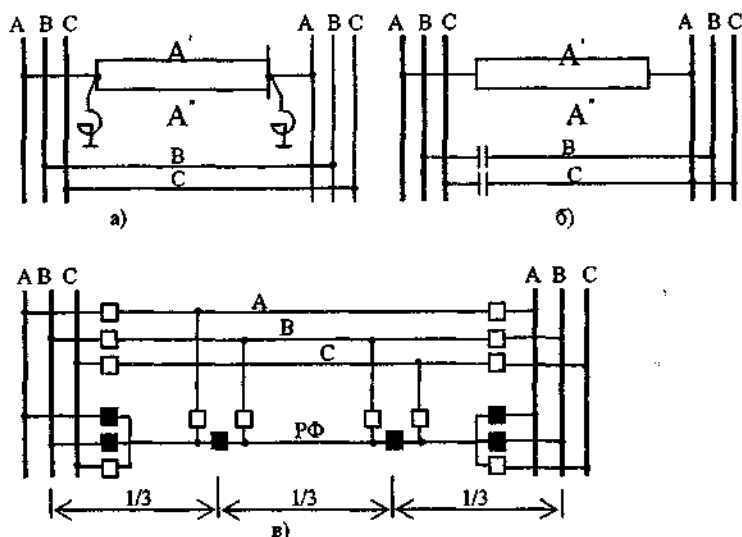


Рис. 2.4. Средства симметрирования параметров линии с резервной фазой:

- а – устройство поперечной компенсации;
- б – устройство продольной компенсации;
- в – транспозиция проводов.

Транспозиция проводов может выполняться по различным схемам [10, 9]. Один из вариантов транспозиции предусматривающих использование резервной фазы в нормальном режиме, показан на рис. 2.4, в. Здесь резервная фаза в нормальном режиме подключена поочередно к каждой из рабочих фаз на  $1/3$  длины линии.

### 2.3. Электропередачи с возможностью изменения количества фаз

Передача электроэнергии на переменном токе по трехфазным линиям электропередачи не является единственным возможным вариантом. Известны двухфазные, четырехфазные и многофазные системы переменного тока [4].

Рассмотрим принцип устройства четырехфазной электропередачи [25п, 12], позволяющей повысить живучесть системы передачи энергии. Фактически такую электропередачу можно рассматривать как трехфазную с резервной фазой, в которой, однако, в силу специфических особенностей резервная фаза в нормальном режиме используется как полноценная рабочая фаза передачи мощности. Принципиальная схема четырехфазной электропередачи изображена на рис. 2.5, а. На передающем конце линия электропередачи подключается к шинам с помощью специальных фазопреобразующих трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ . Эти трансформаторы имеют рабочие и аварийные обмотки. Трансформатор  $T_1$  в нормальном режиме преобразует трехфазную систему напряжений шин А, В, С в двухфазную систему  $\alpha_1, \beta_1$  с фазовым сдвигом  $90^\circ$  (рис. 2.5, б), а трансформатора  $T_2$  — соответственно в двухфазную систему  $\alpha_2, \beta_2$  с фазовым сдвигом также  $90^\circ$ . При этом сдвиг фаз напряжений  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а также  $\beta_1$  и  $\beta_2$  равен  $180^\circ$ . В результате на линию электропередачи с четырьмя проводами подается четырехфазная система переменного тока  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ . В основу преобразования трехфазной системы напряжений в четырехфазную положена схема американского инженера Ч.Ф. Скотта [13]. В двух независимых системах  $\alpha_1, \beta_1$  и  $\alpha_2, \beta_2$  токи и напряжения находятся в противофазе, что позволяет повысить натуральную мощность линии по сравнению с обычной трехфазной линией [1]. На приемном конце линии с помощью фазопреобразующих трансформаторов  $T_3$  и  $T_4$  происходит обратное преобразование четырехфазной системы в трехфазную.

В случае возникновения наиболее вероятного повреждения любой одной из фаз линии в фазопреобразующих трансформаторах  $T_1 - T_4$  включаются соответствующие аварийные обмотки, которые обеспечивают преобразование четырехфазной системы напряжений в обычную трехфазную систему (рис. 2.5, в). В этом режиме может быть передана мощность не менее 75% мощности в четырехфазном режиме [12].

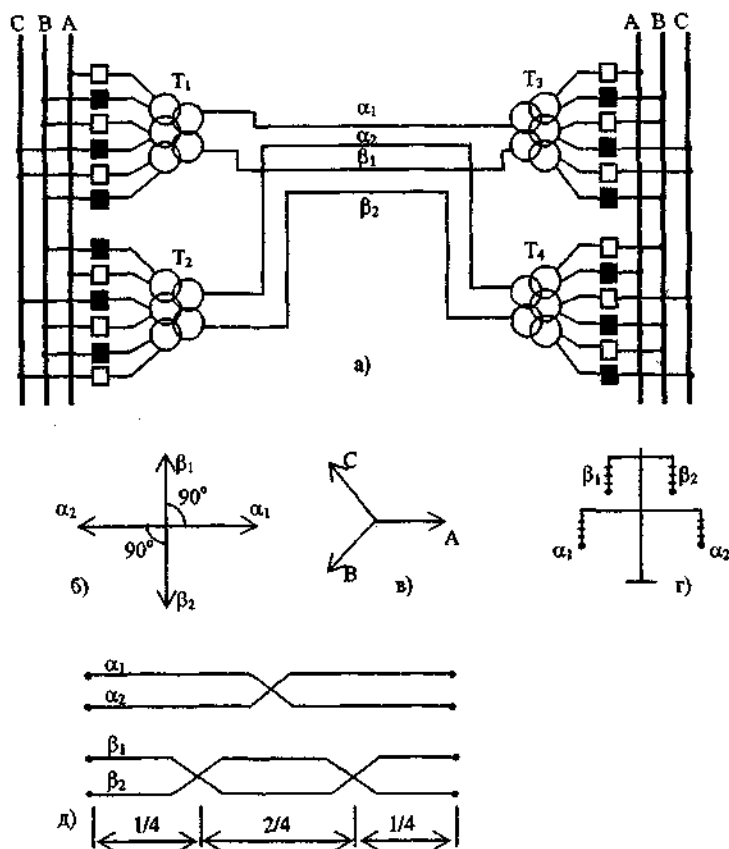


Рис. 2.5. Схема (а), векторные диаграммы (б, в), вариант подвески проводов (г), транспозиция проводов (д) четырехфазной электропередачи

Расположение проводов на опорах четырехфазной линии может быть горизонтальным либо на различных уровнях (рис. 2.5, г). Для симметрирования режима каждой из двухфазных линий трехфазной линии может быть применена транспозиция фаз (рис. 2.5, д). Для линий до 600 км оказывается достаточным однократный цикл транспозиции [12]. Конечно, при такой транспозиции переход от четырехфазного режима к аварийному трехфазному режиму будет

сопровождаться увеличением несимметрии параметров. Однако, считается, что из-за ограниченности во времени аварийных режимов требования к симметрированию параметров предъявляются менее жесткие.

#### 2.4. Гибкие схемы коммутации электропередач

Как уже отмечалось, в практике эксплуатации электрических сетей принято при любых повреждениях на линии (однофазных, междофазных коротких замыканиях) отключать от источника питания все три фазы линии. Вместе с тем, благодаря применению специальных схем коммутации по концам линии появляются возможности сохранения в работе поврежденных проводов. Рассмотрим некоторые принципы создания таких схем коммутации.

В [26п] предложен способ повышения живучести двухцепных линий электропередачи. Его суть заключается в том, что при двухфазных коротких замыканиях без земли между фазами одной и той же цепи или между фазами разных цепей производят переключения фаз на обеих цепях таким образом, что короткое замыкание получают между одноименными фазами. Это позволяет не прерывать передачу мощности по поврежденной линии, в работе сохраняются все провода обеих цепей.

Схема коммутации двухцепной линии показана на рис. 2.6. Она предполагает подключение к шинам подстанции каждой фазы линии через выключатели и пофазно управляемые коммутационные аппараты, в качестве которых могут быть пофазно управляемые трехфазные разъединители. В нормально режиме (рис. 2.6, а) каждая фаза каждой цепи подключена по концам к соответствующей фазе шин.

Рассмотрим теперь режимы двухфазного короткого замыкания, например, между фазами  $A_1$  и  $B_1$  первой цепи (рис. 2.6, б). Чтобы устранить такое короткое замыкание без вывода из работы проводов линии, надо эти фазы объединить, а из остальных четырех фаз создать еще две фазы, превратив линию в одноцепную. Это можно сделать так, как показано на рис. 2.6, б, где при объединении фазы  $A_1$ ,  $B_1$  составили фазу А, фазы  $A_2$ ,  $B_2$  — фазу В, фазы  $C_1$ ,  $C_2$  — фазу С. Таким образом, в этом режиме линия будет работать по схеме А-А-

С (первая цепь) и В-В-С (вторая цепь). Очевидно, что можно было бы создать режим В-В-С (первая цепь) и А-А-С (вторая цепь).

При другом коротком замыкании, например, между фазами В<sub>1</sub> и С<sub>1</sub> первой цепи работа может осуществляться с сочетанием фаз в первой цепи А-В-В и во второй цепи А-С-С. Возможные сочетания режимов при двухфазных коротких замыканиях между фазами одной цепи приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Режимы гибкой коммутации двухцепной линии

Короткое замыкание между фазами	Режим объединения фаз	
	первой цепи	второй цепи
А <sub>1</sub> , В <sub>1</sub>	А-А-С	В-В-С
	В-В-С	А-А-С
В <sub>1</sub> , С <sub>1</sub>	А-В-В	А-С-С
	А-С-С	А-В-В
А <sub>1</sub> , С <sub>1</sub>	А-В-А	С-В-С
	С-В-С	А-В-А

Очевидно, что в любом послеаварийном режиме при двухфазном коротком замыкании секционные выключатели на передающей и приемной подстанции должны быть включены, т.к. одна из фаз каждой цепи будет питаться с двух секций. В противном случае из-за возможного различия напряжений на секциях шин могут возникнуть уравнительные потоки мощности, что приведет к несимметрии напряжений по фазам.

На двухцепных линиях возможны различные варианты взаимного расположения фаз (рис. 2.7). В [14] показано, что вариант 6 является лучшим по натуральной мощности. Он позволяет увеличить натуральную мощность по сравнению с вариантом 1 линий напряжением 330-220 кВ на 10%, линий напряжением 110 кВ – на 5%. При больших потоках мощности он уменьшает падения напряжения и дает минимальную несимметрию токов в установившемся режиме. На преимущества расположения проводов по варианту 6 было указано еще в [15] и детально обосновано в [1, 5].

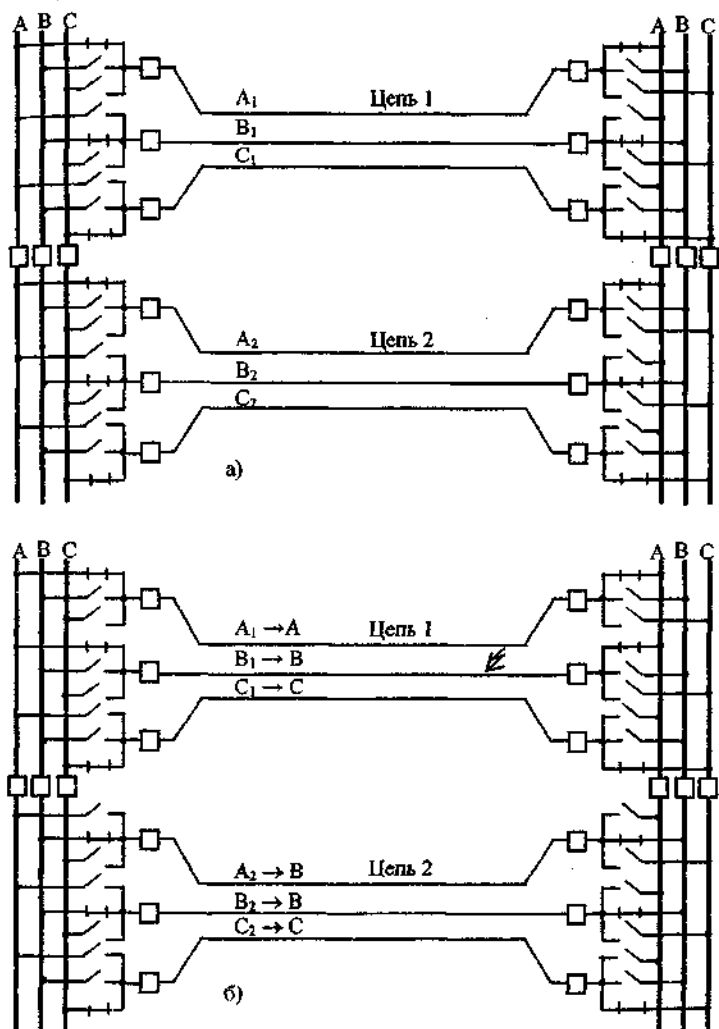


Рис. 2.6. Схема гибкой коммутации двухцепной линии электропередачи:  
 а – нормальный режим;  
 б – режим при коротком замыкании между фазами  $A_1$  и  $B_1$  первой цепи



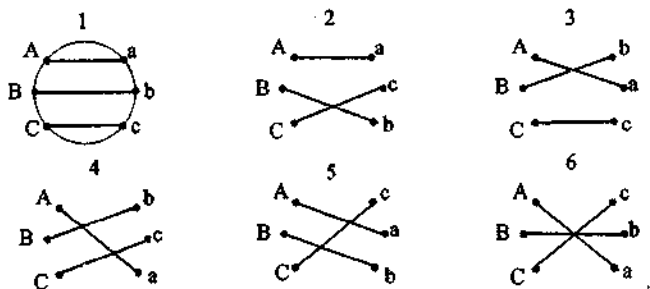


Рис. 2.7. Варианты размещения проводов фаз двухцепной воздушной линии

Рассмотрим техническое решение, направленное на повышение живучести двухцепной линии электропередачи за счет создания схемы гибкой коммутации с помощью дополнительных однопозиционных и двухпозиционных коммутационных аппаратов (рис. 2.8). При этом будем полагать, что провода фаз двухцепной линии расположены по одному контуру и чередуются на нем по варианту 6 (рис. 2.7), например, на опорах типа “бочка” (рис. 2.8, а). Здесь провода 1, 2, 3 составляют первую цепь (соответственно фазы а, b, с), а провода 4, 5, 6, относящиеся соответственно к фазам а, b, с – вторую цепь.

Особенность схемы электропередачи заключается в том, что она снабжена дополнительно двумя трехпозиционными коммутационными аппаратами  $A_T$ , двухпозиционным аппаратом  $A_D$  и однопозиционным аппаратом  $A_O$  (рис. 2.8, б). Аппараты  $A_T$  установлены между одной из двух фаз второй цепи ( $a_2, c_2$ ) и каждой из фаз первой цепи. Аппарат  $A_O$  установлен между второй фазой ( $b_2$ ) второй цепи и одной из фаз первой цепи (на рисунке – фаза  $b_1$ ). Кроме того двухпозиционный аппарат  $A_D$  установлен между данной фазой первой цепи ( $b_1$ ) и двумя другими фазами ( $a_1, c_1$ ) этой же цепи. Коммутационные аппараты могут быть выполнены в виде разъединителей либо автоматически управляемых аппаратов (отделителей, выключателей нагрузки и др.).

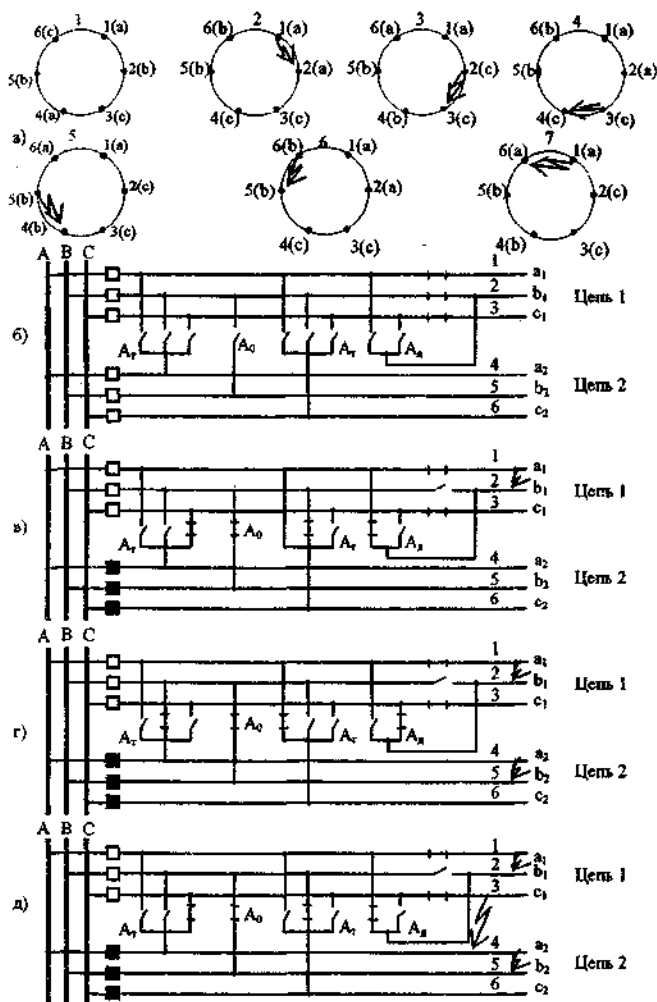


Рис. 2.8. Схема двухцепной линии с однопозиционными и двухпозиционными коммутационными аппаратами: а – режимы подключения проводов; б – нормальный режим; в – послеаварийный режим при коротком замыкании между проводами 1 и 2 первой цепи; г – послеаварийный режим при коротком замыкании между проводами 4 и 5 второй цепи; д – послеаварийный режим при коротком замыкании между проводами 3 и 4 разных цепей

В нормальном режиме работы контакты коммутационных аппаратов находятся в положении, указанном на рис. 2.8, б. При этом подключение проводов цепей к соответствующим фазам показано на рис. 2.8, а, режим 1.

Схема позволяет при повреждениях между двумя любыми смежными проводами, расположенными на контуре, проводить перекомпоновку фаз таким образом, чтобы провода, между которыми произошло короткое замыкание, оказывались подключенными к одной и той же фазе. В результате при данном виде повреждения ни один из проводов не выводится из работы. Подсоединение проводов к соответствующим фазам при всех возможных видах двухфазных повреждений между смежными проводами показано на рис. 2.8, а, режимы 2-7.

Рассмотрим повреждение между проводами 1 и 2 (режим 2) первой цепи, подключенными в нормальном режиме работы линии к фазам а и в. Для устранения короткого замыкания может быть создана схема (рис. 2.8, в), в которой провода 1, 2 подсоединены к фазе А шин, провода 3,4 – к фазе С, провода 5,6 – к фазе В.

Подобное подключение оказывается возможным с помощью двухпозиционного коммутационного аппарата  $A_d$ .

В случае повреждения между проводами второй цепи, например, между проводами 4 и 5 (рис. 2.8,а, режим 5) с помощью тех же дополнительных коммутационных аппаратов может быть создана схема, показанная на рис. 2.8,г. Здесь провода 1, 6 оказываются подключенными к фазе А, провода 4, 5 – к фазе В, провода 2, 3 – к фазе С.

И, наконец, при повреждениях между проводами разных цепей, например, между проводами 3 и 4 (рис. 2.8, а, режим 4) также может быть сформирована схема, в которой пары проводов двухцепной линии оказываются подключенными соответственно к фазам А, В, С (рис.2.8,д). В этом случае провода 1, 2 подключаются к фазе А, провода 5,6 – к фазе В, провода 3,4 – к фазе С.

Таким образом, в результате того, что при двухфазных повреждениях ликвидация аварии обеспечивается без вывода из работы каких-либо проводов, повышается живучесть линии. Важным обстоятельством является то, что во всех режимах (1-7, рис. 2.8,а) полностью сохраняется симметрия параметров по фазам.

В связи с тем, что силовые трансформаторы характеризуются существенно меньшей повреждаемостью, чем воздушные линии электропередачи, двухцепная электропередача может быть выполнена по схеме, содержащей на передающем и приемном концах по одному трансформатору [27п]. Отличительная особенность такой электропередачи заключается в том, что каждый трансформатор содержит 4 обмотки, две из которых 1, 2 и 7, 8 подключены к соответствующей цепи линии электропередачи 9 и 10 (рис. 2.9, а). Провода одноименных фаз разных цепей линии сближены попарно, и к ним подводятся напряжения, векторы которых сдвинуты на  $180^\circ$  (рис. 2.9, б, в). Это достигается тем, что обмотки трансформаторов концентрически расположены на общих стержнях магнитопровода, а обмотки 3, 4 и 5, 6 намотаны встречно относительно друг друга (рис. 2.9, г). В результате попарного сближения проводов разных цепей и подачи на них напряжений в противофазе уменьшается волновое сопротивление линии. Следствием этого является повышение натуральной мощности линии и предельной передаваемой мощности. При этом снижается уровень напряженности электрического поля под проводами линии электропередачи.

В нормальном режиме работы включены все коммутационные аппараты, и в работе находятся все обмотки трансформаторов на передающем и приемном концах линии. При этом, как уже отмечалось, векторы напряжений одноименных фаз на линии сдвинуты на  $180^\circ$ , а напряжения от обмоток 7, 8 трансформатора синфазны на шинах нагрузки и соответствуют напряжению питающей системы шин.

При повреждении или выводе в ремонт одной из цепей линии, например, первой, состоящей из проводов 9, отключаются коммутационные аппараты 11, 12 и питание потребителя осуществляется по второй цепи линии 10, обмоткам 1, 2, 4 трансформатора на передающем конце и обмоткам 6, 7, 8 трансформатора на приемном конце (рис. 2.9, а). Аналогичным образом электропередача работает при отключении второй цепи линии.

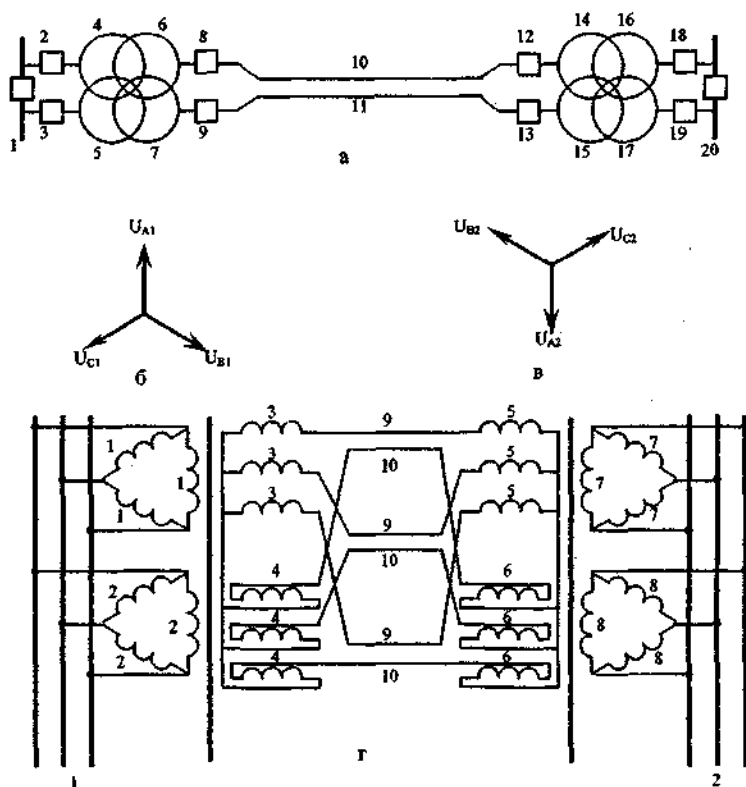


Рис. 2.9. Двухцепная электропередача с двумя первичными и двумя вторичными обмотками трансформаторов:

- а – схема электропередачи;
- б – векторная диаграмма напряжений первой цепи;
- в – векторная диаграмма напряжений второй цепи;
- г – схема соединения обмоток трансформаторов.

Таким образом, при повреждении или выводе в ремонт одной из цепей линии электропередачи, потребитель, с учетом допустимой нагрузки трансформаторов, сможет получать до 70% мощности от мощности, передаваемой в нормальном режиме без какого-либо перерыва электроснабжения, при этом напряжение на шинах нагрузки остается неизменным.

Гибкость схем коммутации и повышение живучести систем электроснабжения можно обеспечить также путем усовершенствования схем подстанций. В [28п] предложена схема подстанции с двумя системами шин, однофазной обходной системой шин и однофазным обходным выключателем (рис. 2.10).

Подстанция, изображенная в трехфазном исполнении, содержит первую трёхфазную рабочую систему 1 шин с фазами а, б, с, вторую трёхфазную рабочую систему 2 шин также с фазами а, б, с, шиносоединительный выключатель 3, 4, 5, каждая фаза которого присоединена к одноимённой фазе рабочих систем 1, 2 шин посредством разъединителей 6-11. Например, выключатель 3 в фазе а присоединён с помощью разъединителя 6 к фазе а первой рабочей системы 1 шин и разъединителя 7 к фазе а второй рабочей системы 2 шин. Подстанция содержит обходную систему 12 шин, обходной выключатель 13, присоединённый с одной стороны к обходной системе 12 шин посредством разъединителя 14, а с другой стороны - с помощью разъединителей 15-20 к рабочим системам 1, 2 шин. Например, выключатель 13 присоединён с помощью разъединителя 15 к фазе а первой рабочей системы 1 шин и разъединителя 18 к фазе а второй рабочей системы 2 шин. Аналогичным образом обходной выключатель 13 присоединён к фазам б, с первой рабочей системы 1 шин и фазам б, с второй рабочей системы 2 шин.

В состав подстанции входят трёхфазные присоединения в виде линии 21, 22, 23 и трансформатора 24, 25, 26, фазы которых содержат выключатели 27, 28, 29 - для линии, 30, 31, 32 - для трансформатора. Выключатели соединены с одной стороны посредством развилки 33-44 разъединителей с одноимённой фазой а, б, с первой рабочей системы 1 шин и а, б, с второй рабочей системы 2 шин, а с другой стороны - в их цепи содержатся два последовательно соединённых разъединителя 45-46, 47-48, 49-50, 51-52, 53-54, 55-56, между которыми соответственно подключены присоединения 21-26. Например, выключатель 27 фазы а линии 21 присоединён с одной

стороны через разъединитель 34 к фазе а первой рабочей системы 1 шин и через разъединитель 33 к фазе а второй рабочей системы 2 шин, а с другой стороны через последовательно соединённые разъединители 45, 46 к фазе обходной системы 12 шин, при этом фаза а линии 21 подключена между последовательно соединёнными разъединителями 45, 46. Аналогичным образом фазы b и c линии 22 и 23 присоединены к фазам b и c первой рабочей системы 1 шин и к фазам b и c второй рабочей системы 2 шин через развилки разъединителей соответственно 35-36 и 37-38.

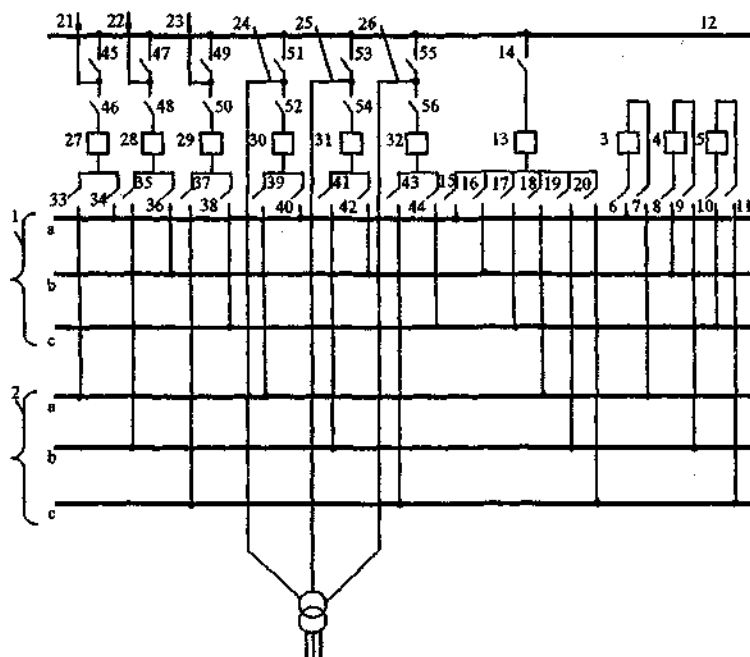


Рис. 2.10. Схема подстанции с двумя системами шин и однофазной обходной системой шин

Аналогично подключено присоединение в виде трансформатора. Число присоединений на подстанции может быть любым.

В результате такой оригинальной схемы каждая фаза каждого присоединения присоединена к фазе обходной системы шин.

Электрическая подстанция работает следующим образом. В нормальном рабочем режиме под напряжением находятся первая и вторая рабочие системы 1, 2 шин, к которым в зависимости от режима электрической сети подключены присоединения 21, 22, 23 и 24, 25, 26 с помощью выключателей 27, 28, 29 и 30, 31, 32, разъединителей 46, 48, 50 и 52, 54, 56. При этом разъединители 14, 45, 47, 49, 51, 53, 55 и обходной выключатель 13 отключены. При необходимости аварийного или планового ремонта выключателя любой фазы любого присоединения он заменяется обходным выключателем 13. Например, при выводе в ремонт выключателя 27 фазы а линии 21 включаются разъединители 15 или 18 (в зависимости от того, к какой системе шин была подключена фаза а линии 21), разъединители 14, 45 и обходной выключатель 13, при этом разъединители 16, 17, 19, 20 и 47, 49, а также выключатель 27 фазы а линии 21 отключены.

В результате три фазы линии 21, 22, 23 оказываются подключёнными к фазам а, б, с первой или второй рабочей системы 1, 2 шин, а именно, фаза б через разъединитель 48, выключатель 28 и разъединитель 35 или 36 (в зависимости от того, к какой системе шин была подключена фаза б линии 22), фаза с через разъединитель 50, выключатель 29 и разъединитель 37 или 38 (в зависимости от того, к какой системе шин была подключена фаза с линии 23), а фаза а через разъединитель 45, через фазу обходной системы шин 12, разъединитель 14, обходной выключатель 13 и разъединитель 15 или 18 (в зависимости от того, к какой системе шин была подключена фаза а линии 21).

Аналогичным образом обходным выключателем 13 поочерёдно могут быть заменены выключатели 28-32 любой фазы любого присоединения.

Эффективность такой подстанции заключается в уменьшении количества однофазных выключателей, разъединителей и количества фаз обходной системы шин. Для сооружения обходного выключателя, разъединителей и обходной системы шин требуется меньшая площадь. В то же время обеспечивается подключение любого присоединения к шинам в случае повреждения выключателя любой фазы.



Аналогичное решение может быть реализовано в схеме подстанции с двумя секциями шин, однофазной обходной системой шин и однофазным обходным выключателем [29п].

На рис. 2.11 изображена схема подстанции, которая содержит одну трехфазную рабочую секционированную систему шин с первой секцией 1 с фазами а, в, с и второй секцией 2 с фазами а, в, с, секционный выключатель 3, 4, 5 в трех фазах, соединяющий одноименные фазы первой секции 1 и второй секции 2 рабочей системы шин посредством разъединителей 6-7, 8-9, 10-11 соответственно. Например, выключатель 3 в фазе а присоединён с помощью разъединителя 6 к фазе а первой секции 1 рабочей системы шин и разъединителя 7 к фазе а второй секции 2 рабочей системы шин. Подстанция содержит обходную систему 12 шин, состоящую из одной фазы, однофазный обходной выключатель 13, присоединённый с одной стороны к обходной системе 12 шин посредством разъединителя 14, а с другой стороны с помощью разъединителей 15-20 к каждой из фаз а, в, с каждой секции 1 и 2 рабочей системы шин. Например, выключатель 13 присоединён с помощью разъединителя 15 к фазе а первой секции 1 рабочей системы шин и разъединителя 18 к фазе а второй секции 2 рабочей системы шин.

Аналогичным образом обходной выключатель 13 присоединён к фазам в, с первой секции 1 и фазам в, с второй секции 2 рабочей системы шин.

В состав подстанции входят трёхфазные присоединения в виде линий 21, 22, 23, присоединенных к первой секции 1 рабочей системы шин и 24, 25, 26, присоединенных ко второй секции 2 рабочей системы шин, а также трансформаторов 27, 28, 29, присоединённого к первой секции 1 рабочей системы шин и 30, 31, 32, присоединённого второй секции 2 рабочей системы шин. Трёхфазные присоединения содержат выключатели в каждой из трёх фаз, для линии, присоединённой к первой секции 1 рабочей системы шин, - выключатели 33, 34, 35, для линии, присоединённой ко второй секции 2 рабочей системы шин, - выключатели 36, 37, 38, для трансформатора, присоединённого к первой секции 1 рабочей системы шин, - выключатели 39, 40, 41, для трансформатора, присоединённого ко второй секции 2 рабочей системы шин, - выключатели 42, 43, 44. Выключатели соединены с одной стороны посредством шинных разъединителей 45, 46, 47 и 48, 49, 50 с каждой из фаз а, в, с первой

секции 1 рабочей системы шин и посредством разъединителей 51, 52, 53 и 54, 55, 56 с каждой из фаз а, б, с второй секции 2 рабочей системы шин, а с другой стороны в их цепи содержатся два последовательно соединённых разъединителя 57-58, 59-60, 61-62, 63-64, 65-66, 67-68, 69-70, 71-72, 73-74, 75-76, 77-78, 79-80, между которыми подключены присоединения 21-32. Например, выключатель 33 фазы а линии 21 присоединён с одной стороны через разъединитель 45 к фазе а первой секции 1 рабочей системы шин, а с другой стороны через последовательно соединённые разъединители 57-58 к фазе обходной системы 12 шин, при этом фаза а линии 21 подключена между последовательно соединёнными разъединителями 57-58. Аналогичным образом фазы б и с линии 22 и 23 присоединены к фазам б и с первой секции 1 рабочей системы шин.

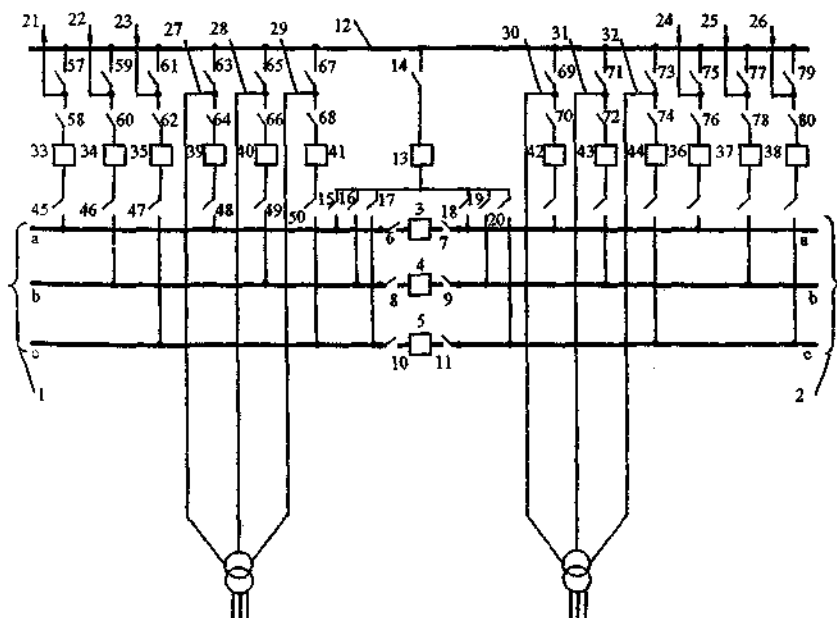


Рис. 2.11. Схема подстанции с двумя секциями шин и однофазной обходной системой шин

Аналогично подключаются присоединения в виде линии и трансформатора ко второй секции 2 рабочей системы шин. Число присоединений на подстанции может быть любым.

В результате такой оригинальной схемы каждая фаза каждого присоединения присоединена к фазе обходной системы шин.

Электрическая подстанция работает следующим образом. В нормальном рабочем режиме под напряжением находятся первая 1 и вторая 2 секции рабочей системы шин, к которым в зависимости от режима электрической сети подключены присоединения 21, 22, 23 и 27, 28, 29 к первой секции 1 рабочей системы шин с помощью выключателей 33, 34, 35 и 39, 40, 41 и разъединителей 45, 46, 47 и 48, 49, 50, а также присоединения 24, 25, 26 и 30, 31, 32 ко второй секции 2 рабочей системы шин с помощью выключателей 36, 37, 38 и 42, 43, 44 и разъединителей 51, 52, 53 и 54, 55, 56. При этом разъединители 14, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80 и обходной выключатель 13 отключены. При необходимости аварийного или планового ремонта выключателя любой фазы любого присоединения он заменяется обходным выключателем 13. Например, при выводе в ремонт выключателя 33 фазы а линии 21 первой секции рабочей системы шин включаются разъединители 14, 15, 58 и обходной выключатель 13, при этом разъединители 16, 17, 18, 19, 20 и 60, 62, а также выключатель 33 фазы а линии 21 отключены. В результате три фазы линии 21, 22, 23 оказываются подключёнными к фазам а, б, с первой секции 1 рабочей системы шин, а именно, фаза б через разъединитель 59, выключатель 34 и разъединитель 46, фаза с через разъединитель 61, выключатель 35 и разъединитель 47, а фаза а через разъединитель 58, через фазу обходной системы 12 шин, разъединитель 14, обходной выключатель 13 и разъединитель 15. Аналогичным образом обходным выключателем 13 поочерёдно могут быть заменены выключатели 34-44 любой фазы любого присоединения.

Таким образом, подстанция позволяет с помощью только одной фазы обходной системы шин и одной фазы обходного выключателя осуществить при необходимости поочерёдное замещение выключателя любой фазы любого присоединения.

Такая подстанция позволяет повысить эффективность использования устанавливаемого на ней оборудования и улучшить экологические характеристики за счёт уменьшения требуемой площади под

шины, выключатели и разъединители. В тоже время обеспечивается необходимая гибкость схемы и живучесть системы электроснабжения.

Наиболее эффективно подстанция может быть использована в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

Живучесть электрической сети может быть повышена за счет применения резервной фазы на шинах подстанций. В [62п] предложена соответствующая схема электрической сети (рис. 2.12).

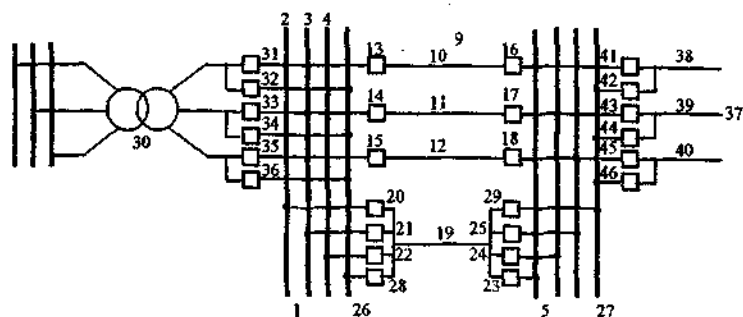


Рис. 2.12. Схема сети с резервной фазой на системах шин и резервным проводом линии, подключенном через выключатели

Сеть содержит трехфазные шины 1 с фазами 2-4 передающей подстанции и трехфазные шины 5 с фазами 6-8 приемной подстанции, которые соединены линией 9 электропередачи с фазами 10-12 посредством выключателей 13-18 и резервным проводом 19, который подключен через выключатели 20-25 к трем фазам шин 1 и 5 подстанций, однофазные резервные шины 26-27 на передающей и приемной подстанции. Резервные шины 26-27 соединены на обеих подстанциях с резервным проводом 19 с помощью выключателей 28 и 29. Передающая подстанция содержит трехфазный источник питания 30, каждая фаза которого подключена к одноименной фазе шин 1 и к резервной однофазной шине 26 посредством выключателей 31-36, а приемная подстанция содержит трехфазные линии 37 питания потребителей с фазами 38-40, каждая фаза которых также через выключатели 41-46 подключена к одноименной фазе шин 5 и к резервной однофазной шине 27.

На рис.2.13 изображена электрическая сеть, в которой резервный провод 19 трехфазной линии электропередачи 9 подключен к трехфазным шинам 1 и 5 передающей и приемной подстанций и к резервным однофазным шинам 26 и 27 посредством выключателей 47-48 и разъединителей 49-56. На передающей подстанции источник 30 и на приемной подстанции трехфазные линии 37 питания потребителей каждой из фаз присоединены посредством выключателей 57-62 и разъединителей 63-74 к трехфазным шинам 1, 5 передающей и приемной подстанций и к резервным однофазным шинам 26 и 27.

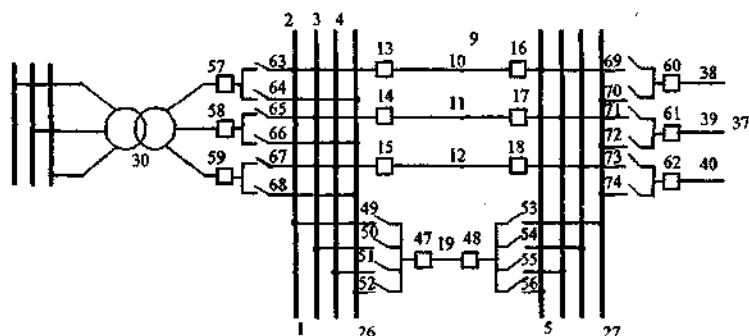


Рис. 2.13. Схема сети с резервной фазой на системах шин и резервным проводом линии, подключенном через разъединители

Электрическая сеть работает следующим образом. В нормальном рабочем режиме под напряжением находятся трехфазные шины 1 передающей подстанции, которые запитываются от трехфазного источника питания 30, подключенного через выключатели 31, 33, 35. Трехфазные линии электропередачи 9 через выключатели 13-15 присоединяются к трехфазным шинам 1 передающей подстанции, а через выключатели 16-18 присоединяются к трехфазным шинам 5 приемной подстанции. К трехфазным шинам 5 приемной подстанции с помощью выключателей 41, 43, 45 подключена трехфазная линия 37 питания потребителей.

При однофазном коротком замыкании на шине 2 передающей подстанции отключаются выключатели 13, 16, 31 и включаются выключатели 23, 28, 32.

При однофазном коротком замыкании на шине 6 приемной подстанции отключаются выключатели 13, 16, 41 и включаются выключатели 20, 29, 42.

При однофазном коротком замыкании на фазе 10 трехфазной линии 9 электропередачи отключаются выключатели 13, 16 и включаются выключатели 20, 23.

Таким образом, электрическая сеть позволяет с помощью однофазной резервной шины повысить надежность электроснабжения при однофазных повреждениях на шинах передающей и приемной подстанции.

В результате использования указанной электрической сети может быть достигнут значительный экономический эффект за счет сокращения аварийного недоотпуска электроэнергии потребителям.

В [55п] предложена схема одноцепной гибкой электропередачи (рис. 2.14), которая содержит на передающем и приемном конце трехфазные системы шин 1 и 2, коммутационные аппараты 3-22, первичные и вторичные обмотки 23-34 трансформаторов, а также вторичные аварийные обмотки 35-37 трансформатора приемного конца и провода 38-40 одноцепной трехфазной линии электропередачи.

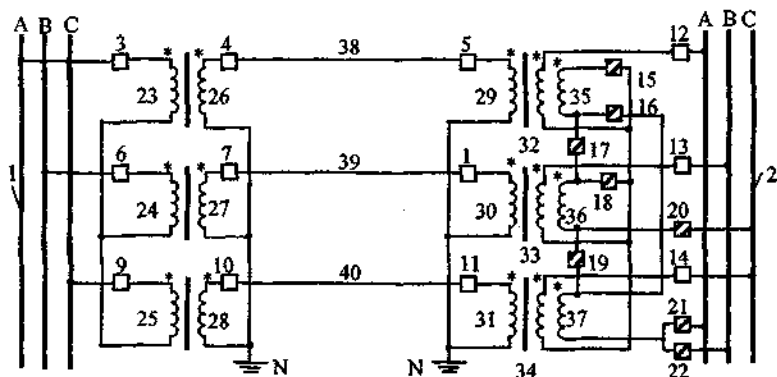


Рис. 2.14. Схема одноцепной гибкой электропередачи

Первичная обмотка 23 фазы А трансформатора передающей системы через коммутационный аппарат 3 соединена с фазой А системы шин 1. Вторичная обмотка трансформатора передающей системы через коммутационный аппарат 4 соединена с проводом 38 ли-

нии фазы А. Конец провода 38 линии электропередачи фазы А соединен через коммутационный аппарат 5 с первичной обмоткой 29 фазы А трансформатора приемного конца. Вторичная рабочая обмотка 32 фазы А трансформатора на приемном конце через коммутационный аппарат 12 соединена с фазой А системы шин 2. Начало аварийной обмотки 35 фазы А соединено с нулевой точкой трансформатора N через коммутационный аппарат 15. Конец аварийной обмотки 35 фазы А соединен через коммутационный аппарат 16 с началом аварийной обмотки 37 фазы С и через коммутационный аппарат 17 с началом аварийной обмотки 36 фазы В (начала обмоток обозначены звездочками).

Первичная обмотка 24 фазы В трансформатора передающей системы через коммутационный аппарат 6 соединена с фазой В системы шин 1. Вторичная обмотка 27 фазы В трансформатора передающей системы через коммутационный аппарат 7 соединена с проводом 39 линии фазы В. Конец провода 39 линии электропередачи фазы В соединен через коммутационный аппарат 8 с первичной обмоткой 30 фазы В трансформатора приемного конца. Вторичная рабочая обмотка 33 фазы В трансформатора на приемном конце через коммутационный аппарат 13 соединена с фазой В системы шин 2. Начало аварийной обмотки 36 фазы В соединено с нулевой точкой трансформатора N через коммутационный аппарат 18. Конец аварийной обмотки 36 фазы В соединен через коммутационный аппарат 19 с началом аварийной обмотки 37 фазы С и через коммутационный аппарат 20 с фазой С системы шин 2.

Первичная обмотка 25 фазы С трансформатора передающей системы через коммутационный аппарат 9 соединена с фазой С системы шин 1. Вторичная обмотка 28 трансформатора передающей системы через коммутационный аппарат 10 соединена с проводом 40 линии фазы С. Конец провода линии электропередачи фазы С соединен через коммутационный аппарат 11 с первичной обмоткой 31 фазы С трансформатора приемного конца. Вторичная рабочая обмотка 34 фазы С трансформатора на приемном конце через коммутационный аппарат 14 соединена с фазой С системы шин 2. Начало аварийной обмотки 37 фазы С соединено с концом аварийной обмотки фазы А через коммутационный аппарат 16 и с концом аварийной обмотки 36 фазы В через коммутационный аппарат 19. Ко-

нец аварийной обмотки 37 фазы С соединен с фазами А и В системы шин 2 через коммутационные аппараты 21 и 22 соответственно.

Электропередача работает следующим образом. В нормальном режиме, когда нет повреждений, включены коммутационные аппараты 3-14, в работе находятся обмотки 23-28 трансформатора передающего конца и обмотки 29-34 трансформатора приемного конца, при этом линия электропередачи работает в симметричном трехфазном режиме.

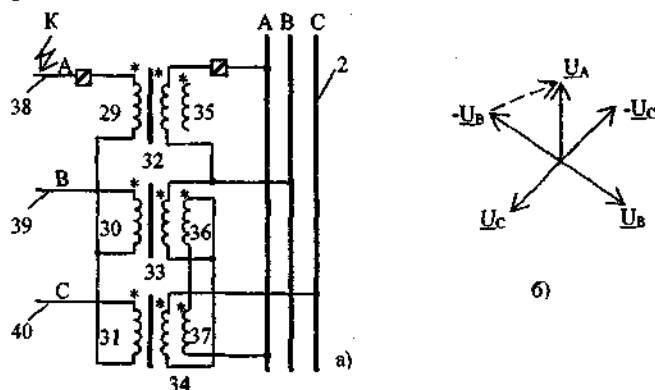


Рис. 2.15 Схема (а) и векторная диаграмма (б) электропередачи при коротком замыкании фазы А

При устойчивом однофазном коротком замыкании на проводе 38 линии фазы А (рис. 2.15, а) происходит отключение коммутационных аппаратов 3, 4, 5 и 12, затем включаются коммутационные аппараты 18, 19 и 21. После таких переключений в работе остаются обмотки 24, 25, 27, 28 трансформатора передающего конца и обмотки 30, 31, 33, 34, 36 и 37 трансформатора приемного конца. При этом на линии в работе остаются только две фазы и тем не менее, как видно из векторной диаграммы (рис. 2.15, б), на системе шин 2 будет симметричная трехфазная система напряжений благодаря тому, что аварийные обмотки намотаны согласно рабочим и при включении коммутационных аппаратов 18, 19 и 21 они оказываются включенными встречно, в результате чего геометрическая сумма векторов напряжений, индуцированных в аварийных обмотках 36 и 37 фаз В и С трансформатора приемного конца, будет равна вектору напряжения фазы А.



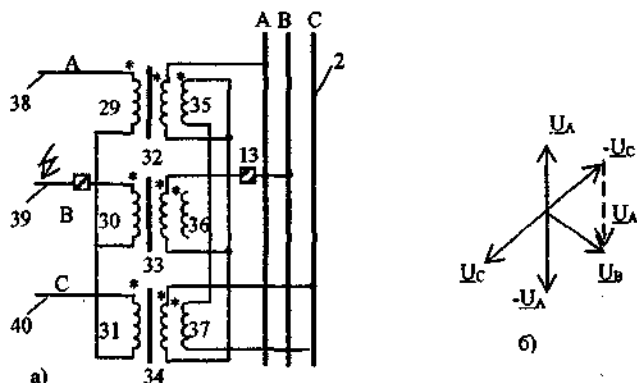


Рис. 2.16. Схема (а) и векторная диаграмма (б) электропередачи при коротком замыкании фазы В

При устойчивом однофазном коротком замыкании на проводе 39 линии фазы В (рис.2.16,а) происходит отключение коммутационных аппаратов 6, 7, 8 и 13. Затем включаются коммутационные аппараты 15, 16 и 22. После таких переключений в работе остаются обмотки 23, 25, 26, 28 трансформатора передающего конца и обмотки 29, 31, 32, 34, 35 и 37 трансформатора приемного конца. При этом на линии также в работе остаются только две фазы и, как видно из векторной диаграммы (рис.2.16,б), на системе шин 2 будет симметричная трехфазная система напряжений благодаря тому, что аварийные обмотки намотаны согласно рабочим и при включении коммутационных аппаратов 15, 16 и 22 они оказываются включенными встречно, в результате чего геометрическая сумма векторов напряжений, индуцированных в аварийных обмотках 35 и 37 фаз А и С трансформатора приемного конца, будет равна вектору напряжения фазы В.

При устойчивом однофазном коротком замыкании на проводе 40 линии фазы С (рис. 2.17, а) происходит отключение коммутационных аппаратов 9,10,11,14. Затем включаются коммутационные аппараты 15,17 и 20. После таких переключений в работе остаются обмотки 23, 24, 26, 27 трансформатора передающего конца и обмотки 29, 30, 32, 33, 35 и 36 трансформатора приемного конца. Из векторной диаграммы, изображенной на рис. 2.17,б, видно, что на системе шин 2 при этом будет симметричная трехфазная система

напряжений благодаря тому, что аварийные обмотки намотаны согласно рабочим и при включении коммутационных аппаратов 15, 17 и 20 они оказываются включенными встречно, в результате чего геометрическая сумма векторов напряжений, индуцированных в аварийных обмотках 35 и 36 фаз А и С трансформатора приемного конца, будет равна вектору напряжения фазы С.

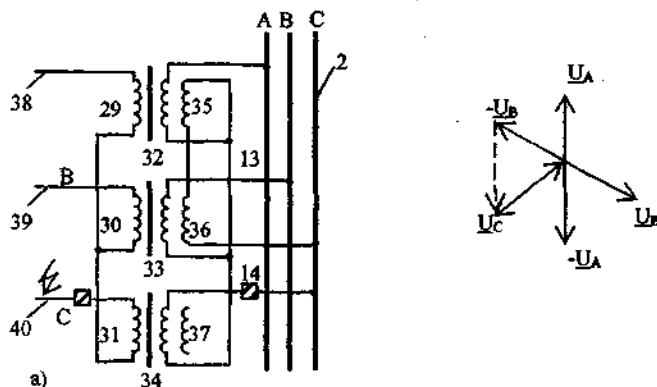


Рис. 2.17. Схема (а) и векторная диаграмма (б) электропередачи при коротком замыкании фазы С

Положение коммутационных аппаратов в различных режимах представлено в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Положение коммутационных аппаратов

Режим работы	Положение коммутационных аппаратов																	
	3	4, 5	6	7, 8	9	10, 11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Трехфазный	В	В	В	В	В	В	В	В	В	О	О	О	О	О	О	О	О	
$K^{(1)}_A$	О	О	В	В	В	В	О	В	В	О	О	О	В	В	О	В	О	
$K^{(1)}_B$	В	В	О	О	В	В	В	О	В	В	В	О	О	О	О	О	В	
$K^{(1)}_C$	В	В	В	В	О	О	В	В	О	В	О	В	О	О	В	О	О	

В табл. 2.2  $K^{(1)}_A$ ,  $K^{(1)}_B$ ,  $K^{(1)}_C$  - режим однофазного короткого замыкания соответственно фаз А, В и С.

Такое исполнение электропередачи позволяет при устойчивом однофазном коротком замыкании на одном из проводов линии электропередачи выводить из работы не всю линию, а только по-

врежденную фазу, и передавать до  $2/3$  мощности посредством оставшихся в работе двух фаз, при трехфазной симметричной системе напряжения на приемной системе шин.

Использование электропередачи по сравнению с известными позволяет отказаться от применения сложных фазопреобразующих трансформаторов и специальной линии электропередачи с четырьмя фазами за счет применения более простых трансформаторов. При этом повышается надежность трехфазных одноцепных линий электропередачи за счет возможности передачи электроэнергии при устойчивых однофазных повреждениях на них с сохранением симметричной трехфазной системы напряжения на приемном конце.

## 2.5. Гибкая система электропередачи на основе электромеханических преобразователей частоты

При объединении энергосистем линиями электропередачи переменного тока возникают трудности с регулированием перетока мощности между ними, особенно при возникновении аварийных режимов в энергообъединениях. Эти трудности могут быть преодолены объединением энергосистем гибкими связями, обеспечивающими возможность независимого регулирования потоков мощности и параллельной работы при различающихся частотах объединяемых энергосистем.

В [84п] предложено устройство для такой связи и регулирования двух энергосистем.

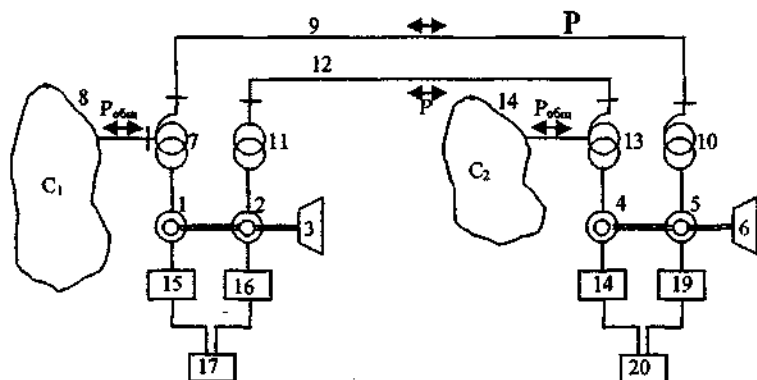


Рис. 2.18. Гибкая система электропередачи с двумя генераторами на одном валу

Устройство состоит из энергоблока, выполненного в виде двух асинхронизированных синхронных машин 1 и 2, установленных на общем валу с турбиной 3 и второго энергоблока с асинхронизированными синхронными машинами 4 и 5, установленных на общем валу с турбиной 6 (рис. 2.18). Электрическая машина 1 подключена через трансформатор 7 с глубоким регулированием напряжения к энергосистеме 8 и межсистемной линии 9 электропередачи, другой конец которой через силовой трансформатор 10 связи подключен к машине 5. Электрическая машина 8 подключена через силовой трансформатор 11 к межсистемной линии 12, другой конец которой подключен через трансформатор 13 с глубоким регулированием напряжения к энергосистеме 14 и электрической машине 4. Системы 15 и 16 возбуждения асинхронизированных машин 1 и 2 подключены к выходам блока 17 управления возбуждением машины. Системы 18 и 19 возбуждения асинхронизированных машин 4 и 5 подключены к выходам блока 20 управления возбуждением машин 4 и 5. На вход блоков 17 и 20 управления подаются сигналы, пропорциональные требуемым и действительным параметрам режимов (например, частоты энергосистем, перетоков мощности, напряжению и т.д.)

Электрические машины 1, 2, 4 и 5 рассчитаны на длительную работу в режиме как генератора, так и двигателя. Остальные генераторы энергоблоков данных электростанций энергосистем имеют обычную конструкцию и подключены к сборным шинам через трехобмоточные трансформаторы или автотрансформаторы (рис. 2.19). В устройстве электрическая связь энергосистем 8 и 14 отсутствует. Существует только энергетическая связь через валы электрических машин 1 и 2, 4 и 5.

Устройство работает следующим образом.

Механическая мощность турбины 3, преобразованная в электрическую генераторами, может передаваться от генератора 1 в энергосистему 8, от генератора 2 в энергосистему 14 или одновременно в обе энергосистемы. Аналогично механическая мощность турбины 6 может передаваться от генератора 5 в энергосистему 8, от генератора 4 в энергосистему 14 или одновременно в обе энергосистемы. Принципиально возможна передача мощности от генератора 1 в энергосистему 14, от генератора 4 в энергосистему 8. Режим работы

генераторов зависит от условий работы объединенных энергосистем.

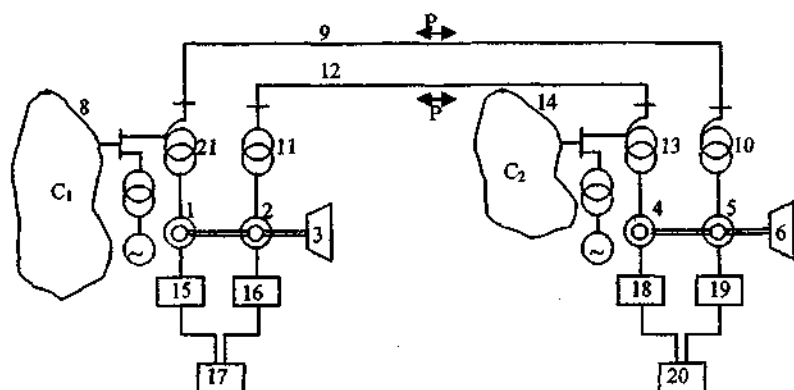


Рис. 2.19. Гибкая система электропередачи с дополнительными генераторами, подключенными непосредственно к энергосистемам

Если требуемая передаваемая в одну из энергосистем (пусть в 14) мощность превышает мощность турбин 3 и 6 (например,  $P_{\text{обм}} = P_T$ ), то электрические машины 1 и 5 блоками управления возбуждения переводятся в режим двигателя с механической мощностью каждый по  $0,5P_T$ . Тогда мощность от генераторов 2 и 4, передаваемая в энергосистему 14, будет равна сумме мощностей турбин 3 и 6 и двигателей 1 и 5. При обратном направлении передаваемой мощности электрические машины 2 и 4 работают в режиме двигателя, а электрические машины 1 и 5 в генераторном режиме передают мощность в энергосистему. Для осуществления такого режима передаваемой мощности в связываемых энергосистемах установленная мощность электрических машин должна составлять  $P'_{\text{ут}} = 4(P_T + 0,5P_T) = 6P_T$ . Для решения такой задачи обычными устройствами требуется номинальная мощность машин энергоблоков  $P_{\text{ут}} = 8P_T$ .

Если требуемая обменная мощность между энергосистемами составляет, например,  $P_{\text{обм}} = 2P_T$ , то для обеспечения полного регулирования и реверса перетоков мощности номинальная установленная мощность электрических машин должна составлять

$P_{y2}' = 4(P_T + P_T) = 8P_T$ . Для решения такой задачи обычными устройствами требуется номинальная мощность машин  $P_{y2} = 12P_T$ .

Таким образом, данное устройство для гибкой связи и регулирования двух энергосистем позволяет уменьшить номинальную установленную мощность электрических машин энергоблоков до 50%.

Устройство повышает и надежность межсистемной связи, так как отказ в работе какого-либо из энергоблоков не приводит к полному прекращению перетока мощности между энергосистемами.

### Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под надежностью электрической сети?
2. Что понимают под живучестью электрической сети?
3. Каковы преимущества линий с резервной фазой по сравнению с одноцепными и двухцепными линиями?
4. Как изображается схема линии с резервным проводом, используемым для передачи мощности в нормальном режиме?
5. Как изображается схема линии с резервным проводом, находящемся в резерве в нормальном режиме?
6. Как изображается схема линии, в которой резервным проводом служит грозозащитный трос?
7. Как изображается схема подстанции с двумя системами шин и обходной системой шин, к которой подключается резервная фаза линии?
8. Как изобразить схему подстанции с полуторным присоединением линий и резервной фазой линии?
9. Какие могут быть применены устройства для симметрирования параметров линий с резервной фазой?
10. Как подключаются устройства поперечной и продольной компенсации в линиях с резервной фазой?
11. Как может осуществляться транспозиция проводов в линиях с резервной фазой?
12. Каков принцип устройства четырехфазной линии?
13. Каковы особенности работы четырехфазной линии?
14. Как изображается схема четырехфазной линии?
15. Как изображаются векторные диаграммы напряжений четырехфазной линии в нормальном и аварийном режиме?

16. Как может осуществляться транспозиция проводов четырехфазной линии?

17. В чем суть гибкой коммутации двухцепной линии электропередачи?

18. Как изобразить схему двухцепной линии с гибкой коммутацией, представленной на рис. 2.6, при двухфазных междуцепных коротких замыканиях между фазами  $A_1$  и  $B_2$ ,  $B_1$  и  $C_2$ ,  $C_1$  и  $A_2$ ?

19. Как изобразить схему двухцепной линии, представленной на рис. 2.8, а при двухфазных коротких замыканиях между проводами 2 и 3 и 5 и 6, 6 и 1 для сохранения в работе всех проводов линии в аварийном режиме?

20. Каков принцип работы трансформаторов с четырьмя обмотками в схеме электропередачи, приведенной на рис. 2.8?

21. Как изобразить схему электропередачи, представленной на рис. 2.9 при повреждении второй цепи линии?

22. Как изобразить схему подстанции с двумя системами шин, однофазной обходной системой шин и однофазным обходным выключателем?

23. Как изобразить схему подстанции с двумя секциями шин, однофазной обходной системой шин и однофазным обходным выключателем?

24. Как можно повысить гибкость одноцепных электропередач с использованием аварийных обмоток трансформаторов?

25. Как изобразить схему электрической сети, содержащей передающую и приемную подстанции с резервной однофазной системой шин и линию электропередачи с резервной фазой?

26. В чем заключается основная идея создания гибких систем электропередач на основе электромеханических преобразователей частоты?

### 3. ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

#### 3.1. Принципы устройства и работы

Как известно, для линий электропередачи без компенсирующих устройств при неизменных напряжениях  $U$  по концам предельная мощность равна

$$P_{\text{пр}} = \frac{U^2}{z_b \sin \alpha \ell} = \frac{P_{\text{нат}}}{\sin \alpha \ell}, \quad (3.1)$$

где  $\ell$  — длина линии;  $\alpha$  — коэффициент изменения фазы волны;  $z_b$  — волновое сопротивление линии.

Отсюда следует, что повысить пропускную способность линии можно, повышая натуральную мощность  $P_{\text{нат}}$  линии. Из формулы (3.1) также следует, что один из путей повышения натуральной мощности заключается в снижении волнового сопротивления линии электропередачи. Для линии без потерь волновое сопротивление

$$z_b = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}},$$

где  $L_0$ ,  $C_0$  — индуктивность и емкость единицы длины линии.

Таким образом, для повышения пропускной способности линии необходимо рассматривать следующие задачи:

$$\min \text{Re} \underline{L} \text{ и } \max \text{Re} \underline{C}.$$

Из электротехники известно, что скорость распространения электромагнитной волны, зависящая от параметров среды, в которой функционирует линия электропередачи,

$$v_b = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}.$$

Отсюда следует, что при неизменных параметрах среды и отсутствии на линии каких-либо сосредоточенных устройств, влияющих на параметры линии,

$$L_0 C_0 = \text{const}. \quad (3.2)$$

Следовательно, при изменении конструкции линии, сопровождающемся, например, снижением индуктивности одновременно бу-



дет увеличиваться емкость так, чтобы сохранилось соотношение (3.2).

Задача минимизации индуктивности  $i$ -го провода, работающего в системе из  $n$  проводов, при равенстве модулей токов во всех проводах и неизменном радиусе (или эквивалентном радиусе) провода представляется в виде [1]:

$$\min \operatorname{Re} \underline{L}_i = \min (M_{ii} + 2 \cdot 10^{-4} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \ell_n \frac{1}{D_{ij}} \cos \Theta_{ij}), \quad (3.3)$$

где  $M_{ii}$  – собственная индуктивность  $i$ -го провода;  $D_{ij}$  – расстояние между проводами  $i$  и  $j$ ;  $\Theta_{ij}$  – угол между векторами токов  $j$ -м и  $i$ -м проводах.

Отсюда следует, что при фиксированных углах  $\Theta_{ij} > 90^\circ$  индуктивность провода будет снижаться при уменьшении расстояний  $D_{ij}$  между проводами. Этот эффект проявляется в обычных одноцепных трехфазных линиях при сближении проводов фаз, в которых векторы токов сдвинуты относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Этот же принцип улучшения параметров линии реализован в предложенных шестифазных линиях электропередачи [4, 1], в которых шесть фаз располагаются по замкнутому контуру на минимально допустимых расстояниях, причем, с обеих сторон каждого провода размещаются провода, токи в которых сдвинуты на угол  $120^\circ$ .

Дальнейшее развитие этот принцип получил в предложенных компактных воздушных линиях одноцепного исполнения. В простейших вариантах таких линий провода трех фаз сближаются только в пролете либо как в пролете, так и на опоре [1]. При нетрадиционных конструкциях провода расщепленных фаз сближаются на минимальное допустимое расстояние и располагаются коаксиально [35п], параболически [30п], эллиптически [32п], вертикально или горизонтально (плоские фазы) [16].

Реализация принципа компактности предложена в одноцепной трехкоаксиальной радиально-лучевой линии электропередачи [33п]. Здесь провода расщепленных фаз расположены по контуру каждой окружности равномерно в последовательности чередования фаз. При этом провода разноименных фаз  $a$ ,  $b$ ,  $c$  различных окружностей расположены по линиям соответствующих радиусов.

В одноцепных линиях с расщепленными фазами возможно двух-коаксиальное двухсегментовое расположение проводов либо двух-коаксиальное четырехсегментовое [40п, 4]. При двухсегментовом расположении провода трех расщепленных фаз размещены по поверхности двух контуров concentрических окружностей, причем провода одной из расщепленных фаз равномерно расположены по поверхности контура внутренней окружности. Провода двух других расщепленных фаз размещены по поверхности контура внешней окружности и образуют контуры дуг, при этом они расположены симметрично относительно вертикальной осевой линии concentрических окружностей. В варианте линии с четырехсегментовым расположением провода каждой из двух расщепленных фаз, расположенных по поверхности контура внешней concentрической окружности, разделены на две части, и каждая из частей, относящаяся к одной из фаз, расположена между частями проводов другой расщепленной фазы.

Возможно расположение проводов расщепленных фаз одноцепной линии по двум парам concentрических окружностей. При этом провода одной из фаз размещаются на двух внутренних окружностях, а провода каждой из двух других фаз на одной из двух внешних окружностях [36п].

В другом варианте линии с расположением проводов расщепленных фаз по двум парам concentрических окружностей провода одной из фаз расположены на двух внешних окружностях, а провода каждой из двух других фаз – на одной из двух внутренних окружностях [37п].

В сеточной линии провода закрепляют в вершинах смежных ромбов, причем на большей диагонали каждого из них расположены провода одной фазы, а на меньшей, равной стороне ромба – провода разноименных расщепленных фаз [34п, 1]. В зависимости от количества горизонтальных рядов проводов известны двухрядные, многорядные, треугольные и шестиугольные схемы размещения проводов в пространстве. Один из вариантов расположения проводов в сеточной линии показан на рис. 3.1 [38п].

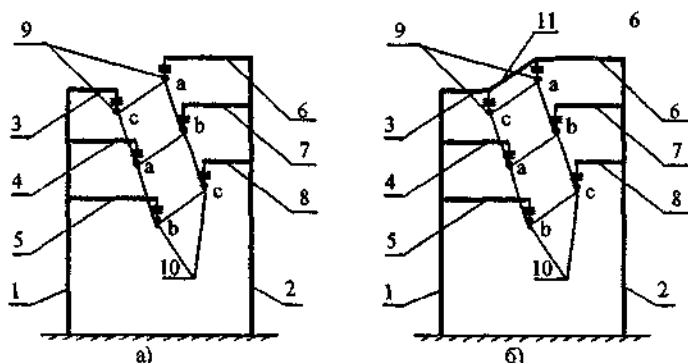


Рис. 3.1. Сеточное расположение проводов фаз на опоре:

а — с отдельно стоящими стойками;

б — с дополнительной траверсой

Линия содержит опору, состоящую из стоек 1 и 2 с закрепленными на них траверсами 3-8 с изоляционными элементами 9 и провода 10 (рис. 3.1, а). При этом провода 10 всех фаз расположены по вершинам смежных равных ромбов. Каждый ромб имеет две общие вершины с соседним ромбом. На большей диагонали каждого ромба расположены провода 10 одноименных фаз, а на меньшей диагонали — провода 10 разноименных фаз. Так, провода 10 фаз с, а, закрепленные на траверсах 3 и 4 стойки 1 и провода 10 фаз а, б, закрепленных на траверсах 6 и 7 стойки 2, расположены по вершинам ромба. При этом провода 10 одной и той же фазы а расположены на большей диагонали ромба, а провода 10 разноименных фаз б и с — на меньшей диагонали ромба.

К указанному ромбу примыкает смежный ромб, в вершинах которого расположены провода 10 фаз а, б, закрепленные на траверсах 4 и 5 стойки 1 и провода 10 фаз б, с, закрепленные на траверсах 7 и 8 стойки 2. При этом провода 10 одной и той же фазы б расположены на большей диагонали ромба, а провода 10 разноименных фаз а и с — на меньшей диагонали ромба.

Стойка 1 опоры выполнена короче стойки 2. Стойка 1 содержит три траверсы 3, 4, 5, а стойка 2 три траверсы 6, 7, 8 разной длины, расположенных в одной вертикальной плоскости и закрепленных на стойках 1, 2 с стороны оси линии электропередачи. На стойке 1

верхняя траверса 3 короче средней 4, а средняя 4 короче нижней 5. На стойке 2 нижняя траверса 8 короче средней 7, а средняя 7 короче верхней 6.

На рис. 3.1,б показана опора с дополнительной траверсой 11.

Во всех рассмотренных вариантах одноцепных линий эффект снижения индуктивности достигается как за счет сближения проводов расщепленных фаз, так и за счет увеличения количества проводов в расщепленных фазах и расположения каждого из них вблизи проводов другой фазы.

Из формулы (3.3) следует, что изменять индуктивность можно, воздействуя на угол  $\Theta_{ij}$  между векторами токов. Эта возможность реализована в электропередачах, получивших название управляемых самокомпенсирующихся [39п, 5]. Такие электропередачи содержат двухцепную линию, в которой попарно сближены провода фаз разных цепей. При этом в сближенных проводах фаз разноименных цепей токи сдвинуты на угол  $\Theta$  в пределах до  $180^\circ$  (рис. 3.2). Применение в электропередачах фазосдвигающих устройств ФУ позволяет изменять параметры линии в зависимости от значения передаваемой мощности и тем самым обеспечивать регулирование режима электропередачи.

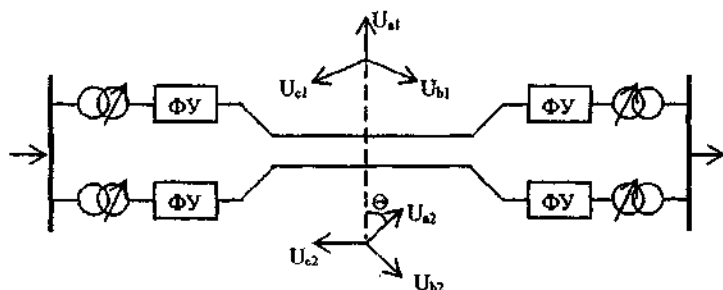


Рис. 3.2. Принципиальная схема управляемой самокомпенсирующейся электропередачи

Вместе с тем, в описанной электропередаче реализованы не все возможности снижения индуктивности. Действительно, из формулы (3.3) следует, что максимального уменьшения индуктивности можно добиться, воздействуя одновременно на три параметра: расстоя-

ние между проводами  $D_{ij}$ , угол  $\Theta_{ij}$  и число проводов  $n$ . При этом в сложной системе взаимного расположения проводов по отношению к данному проводу необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. При углах  $\Theta_{ij} > 90^\circ$ , чем больше угол  $\Theta_{ij}$  между векторами токов  $i$ -го и  $j$ -го проводов, тем ближе следует стремиться располагать эти провода. Наибольший эффект достигается при максимальном сближении и углах  $\Theta_{ij} = 180^\circ$ .

2. При углах  $\Theta_{ij} < 90^\circ$ , чем меньше угол  $\Theta_{ij}$ , тем дальше следует стремиться располагать провода друг от друга.

3. Следует стремиться сближать с данным проводом наибольшее количество проводов с углами  $\Theta_{ij} > 90^\circ$ . Наибольший эффект будет проявляться в том случае, если токи всех проводов, расположенных рядом с данным проводом, будут иметь угол  $\Theta_{ij} = 180^\circ$ .

Эти правила относятся к любой сложной системе проводов: к проводам одной и той же расщепленной фазы, к проводам разных фаз одной цепи линии, к проводам фаз разных цепей.

В общем можно утверждать, что изменение таких параметров, как расстояние между проводами, количество проводов в сложной системе проводов и угол между векторами напряжений (токов), относящихся к разным проводам, приводит к таким изменениям индуктивности и емкости, которые согласованно направлены на изменение волнового сопротивления. На основании этого можно сформулировать следующие общие правила формирования взаимного расположения проводов в сложной системе проводов, направленные на повышение пропускной способности электропередач.

1. Следует стремиться максимально сближать провода, к которым приложены напряжения с фазовым сдвигом  $\Theta > 90^\circ$ , причем чем больше угол, тем ближе эти провода необходимо располагать. Следует максимально удалять провода друг от друга, к которым приложены напряжения с фазовым сдвигом  $\Theta < 90^\circ$ , причем, чем меньше угол, тем дальше их необходимо располагать.

2. Увеличение пропускной способности, приходящееся на данный провод, зависит от количества проводов, сближенных с данным и имеющих фазовый сдвиг напряжений  $\Theta > 90^\circ$ . Поэтому для дос-

тижения большей пропускной способности необходимо по отношению к каждому проводу располагать большее количество проводов, имеющих напряжения с углом  $\Theta > 90^\circ$ . Причем, чем больше угол  $\Theta$ , тем заметнее будет эффект от повышения пропускной способности.

3. При переменных (регулируемых) углах  $\Theta$  происходит наибольшее изменение волнового сопротивления при переходе от  $\Theta = 180^\circ$  к  $\Theta = 0^\circ$ , если провода, которые соответствуют углам  $180^\circ$ , максимально сближены. Для достижения большего изменения волнового сопротивления следует большее количество проводов, которым соответствуют углы  $\Theta = 180^\circ$ , сближать с данным проводом.

Конечно, при формировании взаимного расположения проводов в соответствии с приведенными правилами должны выполняться соответствующие ограничения: расстояния между проводами при их сближении и приложении к ним соответствующих напряжений не должны быть менее допустимых по условиям перенапряжений, работы в пролете, короны и радиопомех.

Электропередачи с фазовым сдвигом позволяют расширить их функциональные возможности, а именно:

- повысить пропускную способность за счет увеличения абсолютных значений натуральной мощности;
- придать свойство управляемости и тем самым привлечь к регулированию режимов электроэнергетических систем;
- повысить надежность передачи мощности;
- повысить живучесть;
- уменьшить отрицательное экологическое влияние за счет снижения напряженности электрического поля по линиям.

### 3.2. Схемно-конструктивные решения разноцепных компактных управляемых электропередач

Наиболее полно обеспечить расширение функциональных возможностей удастся в электропередачах с фазовым сдвигом, получивших название разноцепных компактных управляемых электропередач (РКУЭ). Принципиальная особенность таких электропередач по сравнению с традиционными электропередачами заключает-

ся в том, что конструктивное исполнение линии в части взаимного расположения проводов расщепленных фаз неразрывно связано со схемами подключения этих проводов к подстанциям по концам линии. В традиционных же электропередачах конструкция линии и схема ее подключения к подстанциям могут выбираться независимо друг от друга.

РКУЭ представляют собой двух- или многоцепные электропередачи с расщепленными фазами. В них, также как и в управляемых самокомпенсирующихся электропередачах, предполагается попарное сближение проводов фаз различных цепей. Причем, к сближенным проводам фаз разноименных цепей подводятся напряжения в общем случае сдвинутые на некоторый угол. Однако в отличие от управляемых самокомпенсирующихся линий в РКУЭ обеспечиваются повышенные электромагнитные связи между сближенными проводами за счет их взаимного расположения в соответствии с правилами, приведенными в параграфе 3.1. Принципиальная схема РКУЭ соответствует схеме, показанной на рис. 3.2. Фазосдвигающие устройства ФУ могут обеспечивать фиксированный, либо регулируемый фазовый сдвиг между напряжениями цепей. Применение регулируемого фазового сдвига позволяет изменять параметры линии (индуктивность, емкость) в зависимости от значения передаваемой мощности и тем самым обеспечивать регулирование режима электропередачи.

В РКУЭ могут быть реализованы различные принципы взаимного расположения проводов и различные схемные решения. Так, в трехконтурной линии [41п, 42п, 51п, 1, 4, 17] провода по одной из расщепленных фаз двух разных цепей линии располагаются по поверхности замкнутого контура, причем провода фаз обеих цепей распределяются по поверхности замкнутого контура равномерно и поочередно. Количество проводов расщепленной фазы при этом может быть любым. Количество замкнутых контуров для двухцепной линии равно трем.

Некоторым недостатком расположения проводов расщепленных фаз двух цепей по поверхности замкнутого контура является то, что индуктивности и емкости каждого провода отличаются друг от друга. Выравнивания этих параметров можно добиться, применив транспозицию проводов, расположенных на одном контуре. Для такой транспозиции в [63п] разработана специальная транспозици-

онная опора (рис.3.3). Основная идея выполнения такой опоры заключается в том, что каждая траверса выполнена в виде двух парных полутраверс, жёстко связанных по концам между собой. При этом полутраверсы обеих траверс расположены по обе стороны от стоек. Между парами полутраверс, расположенных по одну сторону от стоек, установлены изоляционные элементы с проводами расщеплённых фаз, кроме того провода одной из пар полутраверс, расположенных по одну сторону от стоек, смещены на один шаг относительно проводов другой пары полутраверс, расположенной по другую сторону от стоек (рис.3.4).

Опора линии электропередачи (рис.3.3) содержит две стойки 1, две траверсы, состоящие из двух парных полутраверс 2, 3 и 4, 5, которые закреплены к стойкам опоры при помощи балок 6, жёсткие стяжки 7, соединяющие концы полутраверс, изоляционные элементы 8, 9, 10, закреплённые между парами полутраверс 3, 5, расположенные по одну сторону от стоек опоры, и изоляционные элементы 11, 12, 13, закреплённые между полутраверсами 2,4, расположенные по другую сторону от стоек опоры. В узлах между изоляционными элементами со стороны пары полутраверс 3, 5, расположенных по одну сторону от стоек опоры, при помощи глухих зажимов закреплены провода фаз, которые могут относиться к одной цепи или к двум цепям. На рис.3.3 показан вариант линии с двумя цепями, в которой провода расщеплённой фазы 14, 15, 16 относятся к фазе одной цепи, а провода 17, 18, 19 - к расщеплённой фазе другой цепи (обозначения, относящиеся к проводам и изоляционным элементам, приведены для одной фазы, для других фаз провода и изоляционные элементы располагаются аналогично).

В узлах между изоляционными элементами со стороны пары полутраверс 2, 4, расположенных по другую сторону от стоек опоры, при помощи глухих зажимов закреплены провода одной из расщеплённых фаз 14', 15', 16' и другой из расщеплённых фаз 17', 18', 19'. Причём, провода 14, 15, 16, закреплённые к изоляционным элементам 8, 9, 10, расположенным между парой полутраверс 3, 5 по одну сторону от стоек опоры, смещены на один шаг по отношению к местам их крепления к изоляционным элементам 11, 12, 13, расположенным между парой полутраверс 2, 4 по другую сторону от стоек опоры. Например, провод 14 по одну сторону от стоек опоры расположен снизу на левом изоляционном элементе 8, а по другую



сторону от стоек опоры он (обозначен 14') расположен вверху, на левом изоляционном элементе 11. Провод 17 по одну сторону от стоек опоры расположен вверху левого изоляционного элемента 8, а по другую сторону от стоек опоры (обозначен 17') - вверху на среднем изоляционном элементе 9 и т.д.

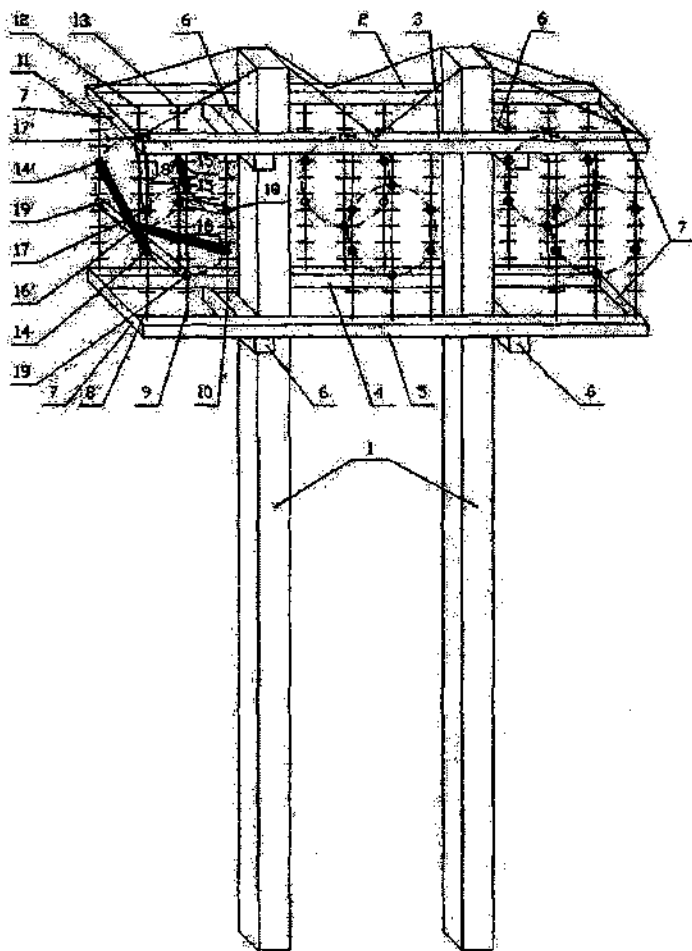


Рис. 3.3. Транспозиционная опора для трехконтурной линии электропередачи

Указанный принцип закрепления проводов показан на рис.3.4, где на рис. 3.4, а показано расположение проводов по одну сторону от стоек опоры, а на рис. 3.4, б – по другую сторону от стоек опоры. Например, провод 14 занял положение 14', провод 17 – положение 17' и т.д. Здесь провода 14, 15, 16 относятся к расщеплённой фазе одной цепи (и соответственно провода 14", 15", 16"), а провода 17, 18, 19 (и соответственно провода 17', 18', 19') – к расщеплённой фазе другой цепи. В результате такого перемещения на один шаг обеспечивается транспозиция сближенных проводов расщеплённых разноимённых фаз, в результате чего выравниваются параметры отдельных проводов и сближенных фаз разных цепей.

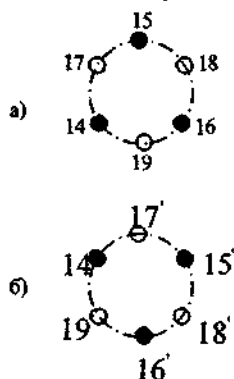


Рис. 3.4. Схема расположения проводов расщепленных фаз двух цепей на транспозиционной опоре:

а – исходное положение проводов;  
б – смещенное положение проводов

При работе линии провода расщеплённой фазы с одной стороны от стойки опоры находятся на контуре в определённом положении относительно друг друга. При этом с другой стороны стойки опоры они смещены относительно первоначального положения на один шаг. В результате этого на всей длине линии каждый провод поочередно находится в одном из возможных положений, поэтому первичные параметры (индуктивность, ёмкость) каждого провода оказываются одинаковыми. В результате такого оригинального перемещения проводов фазы вдоль линии (транспозиции проводов) результирующие параметры проводов (индуктивности, ёмкости) ока-

зываются одинаковыми, вследствие чего по ним протекают равные токи, создаются одинаковые падения напряжения и как следствие одинаковые напряжения по фазам в конце линии.

В двойной трехкоаксиальной линии [43п, 44п, 1, 4, 17] провода расщепленных фаз одной цепи линии расположены по внутренним контурам, а провода расщепленных фаз другой цепи — по внешним контурам. Каждые два контура, относящиеся к разным цепям, сближены. Сближение контуров может быть осуществлено с проводами как одноименных фаз разных цепей, так и разноименных фаз. Провода на сближенных контурах могут быть размещены радиально, напротив друг друга, либо смещены относительно друг друга. Количество проводов на внутреннем и внешнем контуре, относящихся к фазам разных цепей, может быть одинаковым, либо различным. К проводам, расположенным на внутреннем и внешнем контуре, подводятся напряжения, сдвинутые по фазе.

В трехсеточной двухцепной электропередаче [45п ], работающей со сдвигом векторов напряжений различных цепей, провода расщепленных фаз разных цепей сгруппированы попарно в три группы по числу фаз так, что каждая группа содержит провода одной из фаз каждой цепи, и в каждой группе провода, относящиеся к разным цепям, расположены на минимальном допустимом расстоянии друг от друга. Провода в каждой из групп расположены параллельными рядами. При этом важным является то, что провода расщепленных фаз обеих цепей в каждой группе расположены в шахматном порядке и образуют таким образом “сетку”. Простейший вариант “сетки” может быть выполнен в виде однорядного расположения проводов.

Все рассмотренные РКУЭ принципиально могут быть реализованы при выполнении обеих цепей как одного и того же номинального напряжения, так и с цепями, относящимися к разным номинальным напряжениям.

Изложенные принципы формирования расположения проводов РКУЭ позволили развить и расширить возможности электропередач с емкостной связью [46п, 4]. Идея таких электропередач, как известно, заключается в том, что каждая фаза линии состоит из двух подвешенных рядом проводов, один из которых присоединен к передающей подстанции, а другой — к приемной подстанции. В результате такого подключения проявляется эффект компенсации ин-

дуктивного сопротивления емкостной проводимостью между проводами фазы. При длине линии, равной или близкой к длине самокомпенсации, при которой в наибольшей степени компенсируется индуктивное сопротивление, такая линия обладает высокой пропускной способностью. Использование принципов формирования РКУЭ позволяет добиваться широкого диапазона длин самокомпенсации.

Как уже отмечалось, одна из отличительных особенностей РКУЭ заключается в том, что к сближенным проводам фаз линии подводятся напряжения, сдвинутые по фазе на некоторый угол. Этот угол может быть фиксированным, либо переменным (регулируемым). Известны различные принципы создания угла фазового сдвига между напряжением сближенных проводов линии [1, 4].

Фиксированный сдвиг векторов напряжений может быть получен с помощью различных вариантов применения трансформаторов. Одно из предложений заключается в соответствующем подборе групп соединений трансформаторов по концам линии [15]. С помощью такого подбора можно получать сдвиг фаз равным  $\Theta = 180^\circ$ , а также другие требуемые углы с шагом  $30^\circ$ . Угол  $\Theta = 180^\circ$  можно получить также с помощью специальных шестифазных трансформаторов [1] и шестифазных генераторов [47п, 4].

Известны варианты схем коммутации линии, в которых к сближенным проводам линии подведены на передающем конце напряжения, сдвинутые на угол  $180^\circ$ , а на приемном конце обмотки фаз трансформаторов своими концами подключаются к разноименным фазным проводам. При этом к обмоткам трансформаторов могут прикладываться фазные, линейные или двойные фазные напряжения [47п, 48п, 49п, 1, 4].

С помощью шестифазных синхронных генераторов на линии может быть создан только фиксированный фазовый сдвиг. Для обеспечения регулируемого фазового сдвига предложена система электропередачи, в которой синхронный генератор создает фиксированную систему напряжений, а асинхронизированный генератор — систему напряжений, положение фазных векторов которой может изменяться [50п, 1]. Такая система электропередачи позволяет осуществлять плавное регулирование фазового сдвига напряжений цепей от 0 до  $180^\circ$ .

### 3.3. Управляемость, ремонтпригодность и живучесть разноцепных компактных управляемых электропередач

Одна из особенностей разноцепных компактных управляемых электропередач состоит в том, что в линиях провода расщепленных фаз во многих случаях изолированы друг от друга. Это, конечно, усложняет и удорожает конструкцию линии. Но в тоже время придает свойства и возможности, которые не присущи конструкциям линий обычного исполнения. Здесь речь идет о многовариантности ремонтных и послеаварийных режимов из-за присущих им схемно-конструктивных особенностей. В таких электропередачах имеется возможность, при необходимости, соответствующей переконфигурации проводов фаз. В результате практически при любых повреждениях на линии из работы могут выводиться не все, а лишь определенная часть проводов одной или двух цепей. При ряде повреждений определенного вида вообще нет необходимости в отключении поврежденных проводов. Благодаря наличию изоляции между сближенными проводами расщепленных фаз двухцепные электропередачи при наличии соответствующих коммутационных аппаратов по концам фактически представляют собой многоцепные электропередачи, каждая цепь которых формируется из трех групп проводов, относящихся к одной или разным цепям. В пределе каждая группа проводов может состоять только из одного провода. При этом проявляется гибкость электропередачи, т.к. при переходе от одного режима к другому структура групп проводов может изменяться.

По одному из принципов формирования схемы многопроводной воздушной линии, позволяющей осуществлять регулирование угла сдвига фаз напряжений, приложенных к сближенным проводам, в пределах от 0 до  $120^\circ$  фазы расщепляют на три изолированных друг от друга провода [52п, 1]. Кроме того, между парами проводов каждой расщепленной фазы по концам устанавливают однопозиционные коммутационные аппараты (разъединители, отделители или выключатели нагрузки). Это позволяет при повреждении между любыми двумя проводами в группе сближенных проводов перевести их в режим с напряжениями, совпадающими по фазе, и не выводить из работы. Однопозиционные коммутационные аппараты по-

звоняют подключать при необходимости все три провода группы сближенных проводов лишь к одному из выключателей.

Регулирование векторов фаз напряжений на воздушной линии можно обеспечивать посредством управления схемой коммутации изолированных проводов расщепленных фаз. Так, в [53п] предложена одна из возможных схем применительно к трехконтурной разноцепной линии [41п]. При наличии по концам двух трехфазных систем шин, напряжения которых сдвинуты относительно друг друга на угол до  $180^\circ$  каждый изолированный провод каждой фазы первой цепи подключают через однопозиционный коммутационный аппарат к соответствующей фазе первой системы шин. Каждый провод каждой фазы второй цепи через четырехпозиционный коммутационный аппарат соединяют с двумя фазами второй системы шин, одна из которой является одноименной с соответствующей фазой линии, и с двумя фазами первой системы шин, одна из которых также одноименна с соответствующей фазой линии. Подключение к разноименным фазам осуществляют таким образом, чтобы к каждой фазе систем шин было подсоединено одинаковое количество четырехпозиционных аппаратов [1, 4]. Такая схема позволяет дискретно изменять угол сдвига векторов систем напряжений на линии с шагом  $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $0$ , воздействуя тем самым на режим реактивной мощности линии.

В [54п] предложена схема РКУЭ с расщепленными изолированными проводами с фазовым сдвигом. Провода фаз попарно от каждой цепи на линии сближены. На линии по концам установлены дополнительные трехпозиционные коммутационные аппараты, подсоединенные к каждому проводу одной цепи и трем разным проводам различных фаз другой цепи [1]. Это предоставляет широкие возможности для переключения проводов обеих цепей на ту или иную систему шин. При повреждении между двумя сближенными проводами, относящимися к разным цепям, линия переводится в режим, при котором напряжения поврежденных проводов оказываются с нулевым фазовым сдвигом, что соответствует отсутствию повреждения между этими проводами.

Рассмотрим теперь более подробно новые технические решения РКУЭ, не нашедшие отражение в литературе [1, 4], направленные на развитие средств обеспечения регулируемого фазового сдвига и

обеспечение живучести электропередач в ремонтных и аварийных режимах.

В электропередаче (рис. 3.5) с двумя трехфазными системами 1 и 2 шин передающего конца, напряжения которых сдвинуты относительно друг друга на угол  $180^\circ$ , содержатся выключатели 3-14, шесть двухпозиционных аппаратов с контактами 15 и 16, 17 и 18, 19 и 20, 21 и 22, 23 и 24, 25 и 26 (по числу фаз двух цепей линии), две группы однопозиционных коммутационных аппаратов с числом аппаратов двенадцать в каждой группе [56п]. Аппараты первой группы 27-38, (по удвоенному числу фаз двух цепей) установлены между двухпозиционными коммутационными аппаратами и шинами, аппараты второй группы 39-50 (по удвоенному числу фаз двух цепей) попарно установлены между фазами А-С, С-В, В-А каждой цепи линии. Линия электропередачи представляет собой трехконтурную разноцепную конструкцию (рис. 3.6,а). Для электропередачи со сдвигом систем напряжений на угол  $180^\circ$ ,  $190^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $0^\circ$  диаграммы показаны на рис. 3.6,б-д. В двухцепной линии электропередачи каждая фаза каждой цепи расщеплена на два изолированных друг от друга провода (рис. 3.6,а). Первая цепь содержит расщепленную фазу а, состоящую из проводов  $a_1', a_1''$ , расщепленную фазу b, состоящую из проводов  $b_1', b_1''$ , расщепленную фазу с, состоящую из проводов  $c_1', c_1''$ . Вторая цепь содержит расщепленную фазу а, состоящую из проводов  $a_2', a_2''$ , расщепленную фазу b, состоящую из проводов  $b_2', b_2''$ , расщепленную фазу с, состоящую из проводов  $c_2', c_2''$ . На линии сближены провода пар расщепленных фаз по одной от каждой цепи:  $a_1', a_1''$ ,  $a_2', a_2''$ ,  $b_1', b_1''$ ,  $b_2', b_2''$ ,  $c_1', c_1''$ ,  $c_2', c_2''$  (рис. 3.5, 3.6, а).

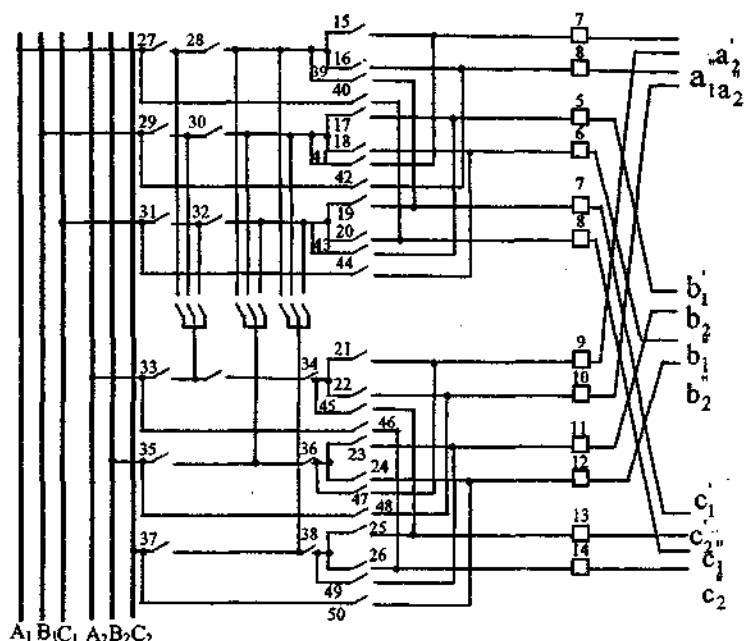


Рис. 3.5. Схема двухцепной электропередачи с фазовым сдвигом

Провода расщепленных фаз подключены к системам шин следующим образом (рис. 3.5): провод  $a_1$  фазы а первой цепи подсоединен через выключатель 3 и контакт 15 двухпозиционного коммутационного аппарата и контакты 28, 27 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы, а также через контакт 41 однопозиционного коммутационного аппарата второй группы и контакты 30, 29 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы к фазам  $B_1$ ,  $A_1$ . Аналогичным образом к этим фазам подключен провод  $a_2$ . Провод  $b_1$  подсоединен через выключатель 5 и контакт 17 двухпозиционного коммутационного аппарата и контакты 30, 29 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы, а также через контакт 43 однопозиционного коммутационного аппарата второй группы и контакты 32, 31 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы к фазам  $C_1$ ,  $B_1$ . Анало-



гичным образом к этим фазам подключен провод  $b_1''$ . Провод  $c_1'$  подсоединен через выключатель 7 и контакт 19 двухпозиционного коммутационного аппарата и контакты 32, 31 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы, а также через контакт 39 однопозиционного коммутационного аппарата второй группы и контакты 28, 27 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы к фазам  $A_1, C_1$ . Аналогичным образом к этим фазам подключен провод  $c_1''$ .

В качестве коммутационных аппаратов могут использоваться разъединители, выключатели нагрузки, выключатели и т. п. Их вид определяется на основании технико-экономических расчетов.

Провод  $a_2'$  фазы а второй цепи линии подсоединен через выключатель 9 и контакт 21 двухпозиционного коммутационного аппарата и контакты 34, 33 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы, а также через контакт 47 однопозиционного коммутационного аппарата второй группы и контакты 36, 35 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы к фазам  $B_2, A_2$ . Аналогичным образом к этим фазам подключен провод  $a_2''$ .

Провод  $b_2'$  подсоединен через выключатель 11 и контакт 23 двухпозиционного коммутационного аппарата и контакты 36, 35 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы, а также через контакт 49 однопозиционного коммутационного аппарата второй группы и контакты 38, 37 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы к фазам  $C_2, B_2$ . Аналогичным образом подключен к этим фазам провод  $b_2''$ . Провод  $c_2'$  подсоединен через выключатель 13 и контакт 25 двухпозиционного коммутационного аппарата и контакты 38, 37 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы, а также через контакт 45 однопозиционного коммутационного аппарата второй группы и контакты 34, 33 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы к фазам  $A_2, C_2$ . Аналогичным образом подключен к этим фазам провод  $c_2''$ .

Электропередача содержит трехпозиционные коммутационные аппараты с контактами 51-53, 54-56, 57-59 (по числу фаз одной це-

пи). Одни концы этих аппаратов подсоединены к проводам соответствующей фазы одной цепи между последовательно соединенными однопозиционными коммутационными аппаратами 33 и 34, 35 и 36, 37 и 38. Другие концы первого трехпозиционного аппарата первой группы с контактами 51-53 подключены к проводам каждой фазы другой цепи между последовательно соединенными однопозиционными коммутационными аппаратами первой группы 27 и 28, 29 и 30, 31 и 32, а аппараты с контактами 54-56, 57-59 подключены в точках между двухпозиционными коммутационными аппаратами 15,16; 17,18; 19,20 и контактами 28,30,32 однопозиционных коммутационных аппаратов первой группы.

Схема соединений на приемном конце электропередачи аналогична. Провода двухцепной линии закреплены на опоре 60 с траверсой 61 и изоляционными элементами 62 и 63 (рис. 3.6,а). Каждая расщепленная фаза каждой цепи состоит из двух проводов (например, фаза А<sub>1</sub> первой цепи из проводов  $a_1'$ ,  $a_1''$ ), и провода пар расщепленных фаз, по одной от каждой цепи, сближены (на рис. 3.6, а провода располагаются по одной окружности).

В результате в электропередаче имеется возможность изменения угла фазового сдвига между напряжениями сближенных проводов, а следовательно, и изменения баланса реактивной мощности линии.

Рассмотрим различные режимы электропередачи, режим реактивной мощности и режим напряжений линии электропередачи в зависимости от величины генерируемой линией реактивной мощности (зарядной мощности).

В режимах, когда требуется максимальная генерация реактивной мощности (например, в режимах наибольших нагрузок электропередачи или электрической системы), электропередача работает с углом сдвига систем напряжений, приложенных к разным цепям линии  $\Theta = 180^\circ$ , при этом емкость и зарядная мощность линии максимальные.

Для обеспечения такого режима создается следующая схема (рис. 3.5): включены аппараты 3,15,28,27,4,16; 5,17,30,29,6,18; 7,19,32,31,8,20 для подсоединения проводов  $a_1'$ ,  $a_1''$ ,  $b_1'$ ,  $b_1''$ ,  $c_1'$ ,  $c_1''$  к первой системе шин, и аппараты 9,21,34,33,10,22; 11,23,36,35,12,24; 13, 25,38,37,14,26 для подсоединения проводов  $a_2'$ ,  $a_2''$ ,  $b_2'$ ,  $b_2''$ ,  $c_2'$ ,  $c_2''$

к второй системе шин. Остальные аппараты отключены. В результате на каждую расщепленную фазу каждой цепи подается напряжение от одноименной системы шин в соответствии с векторной диаграммой. Например, на расщепленную фазу  $a_1, a_1'$  первой цепи подается напряжение с фазы  $A_1$  первой системы шин и т.д. Из векторной диаграммы напряжений на линии для данного режима видно, что между любой парой напряжений сближенных фаз разных цепей линии имеет место угол  $180^\circ$  (например между  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$ ).

Электропередача позволяет дискретно изменять угол сдвига векторов систем напряжений на линии с шагом  $60^\circ$ :  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $0^\circ$ . Если в каком-либо режиме требуется уменьшить генерацию реактивной мощности по сравнению с режимами при угле  $\Theta = 180^\circ$ , то переходят к схеме с меньшим углом. Для обеспечения угла  $\Theta = 120^\circ$  (рис. 3.6, в) необходимо отключить выключатели 9,10,11,12,13,14, отключить контакты 33,35,37 и включить контакты 52,56,57 (табл. 3.1), после чего включить выключатели 9,10,11,12,13,14.

Таблица 3.1 - Положение контактов коммутационных аппаратов

$\Theta$ , град	Положение контактов														
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$180^\circ$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$120^\circ$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$60^\circ$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$0^\circ$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы 3.1

$\Theta$ , град	Положение контактов										
	30	32	33	34	35	36	37	38	45	46	47
$180^\circ$	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
$120^\circ$	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-
$60^\circ$	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-
$0^\circ$	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-

Продолжение таблицы 3.1

$\Theta$ , град	Положение контактов											
	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
180°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120°	-	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-
60°	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0°	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+

Примечание “-” показывает отключенное положение контакта.

Аналогичные синхронные переключения производятся и на приемном конце линии. При этих переключениях кратковременно снимается напряжение со второй цепи линии, но это не приводит к погашению потребителей, так как в работе остается первая цепь, параллельная второй.

Из векторной диаграммы напряжений для данного режима (рис. 3.6, в) видно, что между любой парой напряжений сближенных фаз разных цепей линии имеет место угол 120° (например  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$ ).

Для остальных режимов напряжений при угле  $\Theta = 60^\circ$  и  $0^\circ$ , (рис. 3.6, г, д) положение контактов коммутационных аппаратов представлено в табл. 3.1.

Из табл. 3.1 видно, что при переходе от данного режима к другому число включений аппаратов равно трем, и число отключений аппаратов также равно трем, т.е. всего 6 операций. Например, при переходе от режима  $\Theta = 180^\circ$  к режиму  $\Theta = 120^\circ$  нужно отключить 33,35,37 и включить 52,56,57.

Частота переходов от одного режима к другому определяется требованиями электрической системы, в которой работает данная электропередача.

В зависимости от требований возможно сезонное изменение режима (т.е. несколько раз в год), недельное или суточное.

Рассмотрим также несколько возможных ситуаций аварийного режима работы линии электропередачи.

Первый режим - короткое замыкание между двумя сближенными проводами, которые относятся к разным цепям, например, между

$c'_1, c'_2$  (рис. 3.7, а). В этом случае электропередача переводится в режим работы с нулевым фазовым сдвигом путем подключения проводов обеих цепей к одной системе шин  $A_1, B_1, C_1$ . (см. табл. 3.1). Аналогичным образом, если это потребуется по режиму работы электрической сети, все провода цепей могут быть подключены к другой системе шин  $A_2, B_2, C_2$ .

Описанный режим может быть использован также при проведении ремонтных работ на проводах линии без снятия напряжения. При этом технология работ ничем не отличается от технологии на обычных линиях, так как все провода, расположенные на одном контуре, находятся под одним и тем же напряжением.

Второй режим - обрыв одного провода, например,  $c'_2$  (рис. 3.7, б). Посредством выключателя 14 этот провод отсоединяется от сети, при этом для сохранения симметрии выключателями 12, 10 отключаются от системы шин провода  $b'_2, a'_2$ . Из оставшихся проводов формируется три цепи, подключенные к одной системе шин, например к  $A_1, B_1, C_1$ , с расположением проводов всех фаз каждой цепи на отдельном контуре. Первая цепь образуется из проводов  $a'_1, a''_1, a'_2$  включением аппаратов 3,15,27,28; 4,42; 9,21,34,53. При этом провод  $a'_1$  оказывается подключенным к фазе  $A_1$  системы шин 1, провод  $a''_1$  к фазе  $B_1$  а провод  $a'_2$  к фазе  $C_1$  системы шин 1. Для образования второй цепи из проводов  $b'_1, b''_1, b'_2$  включены следующие аппараты 5,17,30,29; 6,44; 11,23,36,54. При этом провод  $b'_1$  оказывается подключенным к фазе  $B_1$  провод  $b''_1$  к фазе  $C_1$ , провод  $b'_2$  к фазе  $A_1$ . Третья цепь образуется из проводов  $c'_1, c''_1, c'_2$  включением следующих аппаратов 7,19,32,31; 8,40; 13,25,38,58. При этом провод  $c'_1$  оказывается подключенным к фазе  $C_1$ , провод  $c''_1$  к фазе  $A_1$ , провод  $c'_2$  к фазе  $B_1$ .

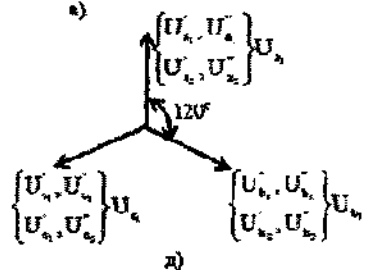
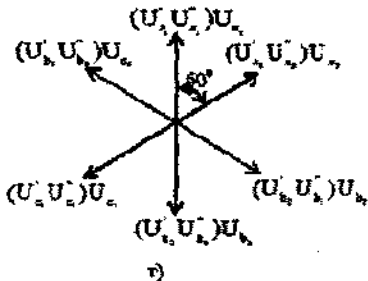
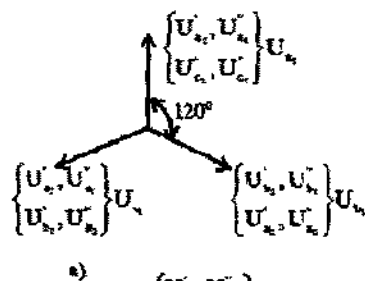
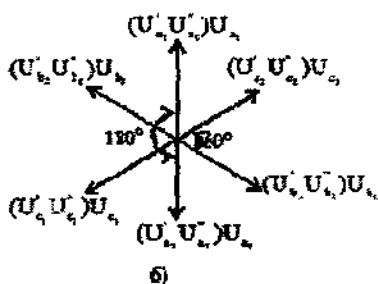
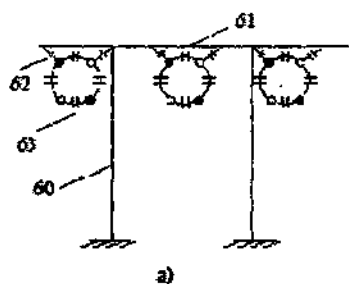


Рис. 3.6. Конструкция трехконтурной разноточной линии (а) и векторные диаграммы (б - д)

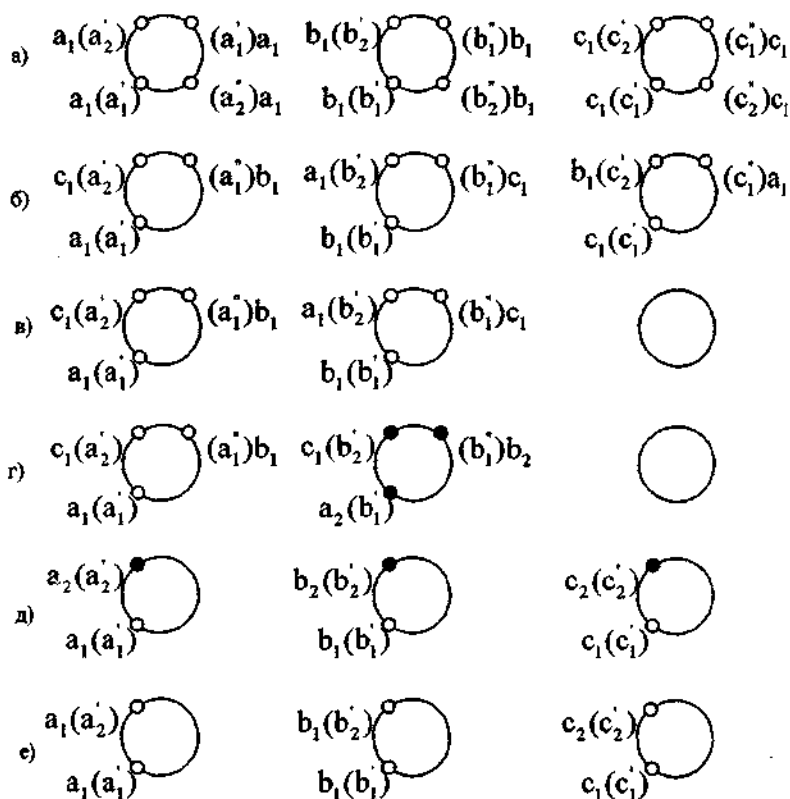


Рис. 3.7. Аварийные режимы электропередачи

Все контакты остальных одно- и двухпозиционных коммутационных аппаратов разомкнуты и выключатели 10,12,14 отключены. Таким образом, создаются три трехфазные линии электропередачи, обеспечивающие с момента аварии передачу электроэнергии потребителям.

Третий режим – выход из строя всех проводов, расположенных по одной окружности, например  $c_1, c_1', c_2, c_2'$  (рис. 3.7, в). В этом случае для симметрии, отсоединяются от системы шин также провода  $a_2, b_2'$ . Из оставшихся проводов для передачи энергии потребителям создаются две трехфазные цепи линии электропередачи, провода фаз каждой из которых подключаются к одной и той же системе шин. Схема подключения оставшихся в работе проводов не отличается от схемы во втором режиме, положение контактов коммутационных аппаратов при этом режиме представлено в табл. 3.2.

Таблица 3.2 - Положение контактов коммутационных аппаратов

Ре- жимы по рис. 3.7	Положение контактов										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
а	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
б	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
в	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-
г	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-
д	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
е	+	-	+	-	+	-	+	-	+		+

Продолжение таблицы 3.2

Ре- жимы по рис. 3.7	Положение контактов										
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
а	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
б	-	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
в	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+
г	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-
д								+	+	+	+
е								-	+	-	+



Ре- жимы по рис. 3.7	3 7	38	40	42	43	44	46	50	51	53	54	55	58	59
а	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+
б	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	-
в	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-
г	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+
д	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
е	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+

В третьем режиме каждая из созданных цепей также может быть подключена к отдельной системе шин (рис. 3.7,г). Положение всех аппаратов для этого режима и остальных режимов представлены в табл. 3.2.

Возможны и другие варианты, в которых при выходе из строя части проводов обеспечивается живучесть предлагаемой электропередачи. Некоторые из них показаны на рис. 3.7, д,е, где отключено по два провода, расположенных на каждой окружности.

Возможность дискретного изменения угла фазового сдвига между сближенными проводами фаз разных цепей линии с помощью коммутационных аппаратов без отключения цепей реализована в [57п].

Схема электропередачи (рис.3.8,а) содержит линию электропередачи, выполненную из двух трехфазных цепей 1 и 2 со сближенными попарно проводами фаз, трехфазные системы шин на передающем 3 и приемном 4 концах, фазосдвигающие трансформаторы по ее концам на каждой цепи. Они состоят из обмоток 5-8, соединённых с линией электропередачи посредством коммутационных аппаратов 9-12 и обмоток 13-28, соединённых посредством коммутационных аппаратов 29-44 и токоограничивающих реакторов 45-56 с шунтирующими их коммутационными аппаратами 57-68 с шинами. При этом, например, обмотка 13 соединена с шинами посредством коммутационного аппарата 29, токоограничивающего реактора 45 и шунтирующего коммутационного аппарата 57, а обмотка 14 посредством коммутационного аппарата 30. При этом обмотки со

стороны шин относительно обмоток со стороны линии имеют группы соединения, приведенные в табл. 3.3

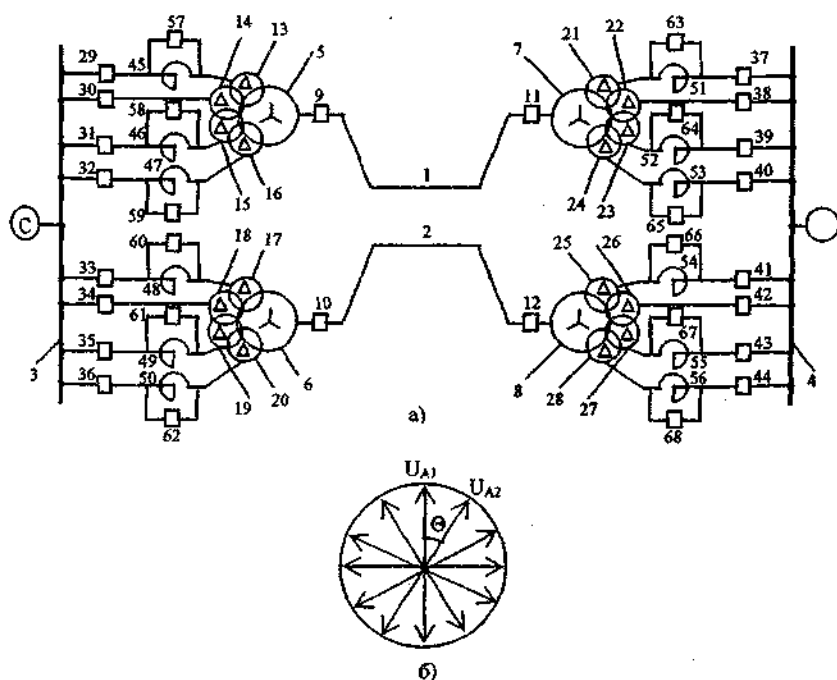










Рис. 3.8. Схема электропередачи с фазосдвигающими трансформаторами (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

Таблица 3.3 - Группы соединения обмоток фазосдвигающих трансформаторов

№ обмотки	13	14	15	16	17	18	19	20
Группа соединения	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -10	$\Delta/$  -11	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -10	$\Delta/$  -11

Продолжение таблицы 3.3






















№ обмотки	21	22	23	24	25	26	27	28
Группа соединения	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -10	$\Delta/$  -11	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -10	$\Delta/$  -11

Таблица 3.4 - Группы соединения обмоток трансформаторов

№ обмотки	13	14	16	17	18	19
Группа соединения	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -11	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -11	$\Delta/$  -5

Продолжение таблицы 3.4.

№ обмотки	20	21	22	24	25	26	28
Группа соединения	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -11	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -11	$\Delta/$  -5	$\Delta/$  -7	$\Delta/$  -11

На рис. 3.8,б показана векторная диаграмма векторов напряжений попарно сближенных одноименных фаз различных цепей электропередачи. При этом угол, равный минимальному значению угла фазового сдвига, равен  $30^\circ$ . Вектора напряжений  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$  - это соответственно напряжения фазы "а" первой и второй цепи. Величина угла фазового сдвига может быть  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ . Возможны режимы работы электропередачи с отстающим  $U_{a1}$  и опережающим напряжением  $U_{a2}$ , с отстающим напряжением  $U_{a2}$  и опережающим напряжением  $U_{a1}$ .

На рис. 3.9 показана электропередача, а также ее векторные диаграммы, выполненная из двух трехфазных цепей 1 и 2 со сближенными попарно проводами фаз, трехфазные системы шин на передающем 3 и приемном 4 концах. Фазосдвигающие трансформаторы по ее концам на каждой цепи состоят из обмоток 5-8, соединенных с линией электропередачи посредством коммутационных аппаратов 9-12 и обмоток 13-14, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28 соединенных посредством коммутационных аппаратов 29-30, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 44 и токоограничивающих реакторов 45, 47, 48, 50, 51, 53, 54, 56 с шунтирующими их коммутационными аппаратами 57, 59, 60, 62, 63, 65, 66, 68 с шинами. Таким образом, фазосдвигающие трансформаторы со стороны шин имеют по три обмотки, при этом минимальный шаг регулирования угла фазового сдвига  $60^\circ$ . Обмотки, установленные со стороны шин, относительно обмоток со стороны линии имеют группы соединения, приведенные в табл. 3.4.

Электропередача работает следующим образом. В режиме, когда угол фазового сдвига векторов напряжений различных цепей равен  $0^\circ$ , создается следующая схема (рис. 3.8, а): включены коммутационные аппараты 9, 10, 11, 12, 29, 57, 33, 60, 37, 63, 41, 66, остальные коммутационные аппараты отключены. Таким образом, подключены обмотки 13,17,21,25 фазосдвигающих трансформаторов. При этом работа электропередачи с углом фазового сдвига равным  $0^\circ$  может осуществляться путем подбора и другой комбинации включенных обмоток фазосдвигающего трансформатора, для названного угла количество таких комбинаций равно четырем. Количество комбинаций включения обмоток для других значений углов -  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ , будет отличным и равным двум. В случае необходимости перехода на угол, например,  $180^\circ$  производится следую-

шие действия: отключаются коммутационные аппараты 60 и 66, включаются коммутационные аппараты 36 и 44. При этом в контурах, образованных обмотками 17 и 20, а также обмотками 25 и 28, возникают уравнивающие перетоки мощности, которые ограничиваются токоограничивающими реакторами 50 и 48 в контуре, образованном обмотками 17 и 20, и реакторами 54 и 56 в контуре, образованном обмотками 25 и 28. Следующим действием является отключение коммутационных аппаратов 33 и 41 и включение коммутационных аппаратов 60, 62, 66, 68 для шунтирования реакторов 48, 50, 54, 56 соответственно.

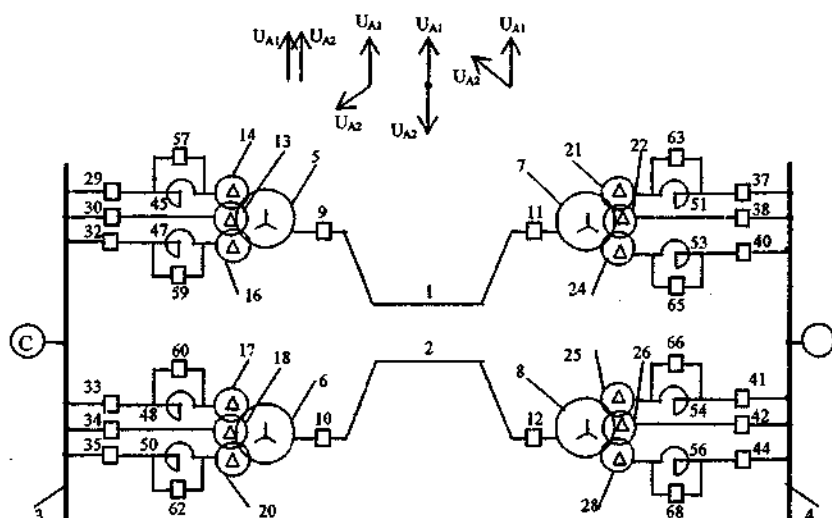


Рис. 3.9. Схема электропередачи с возможностью ступенчатого изменения угла фазового сдвига с шагом  $60^\circ$

В рассмотренном примере переключений уравнивающие перетоки мощности в контуре обмоток ограничиваются двумя реакторами, так как токоограничивающие реакторы установлены в присоединении к шинам каждой из двух обмоток на передающем и двух обмоток на приемном концах, участвующих в операции переключения. Однако в некоторых случаях уравнивающие перетоки мощности

будут ограничиваться только одним токоограничивающим реактором в каждом контуре, образованном обмотками фазосдвигающих трансформаторов на передающем и приемном концах.

Рассмотрим порядок переключений, например, при переходе со значения угла фазового сдвига  $0^\circ$  на угол  $60^\circ$ . Режим, который принимается за исходный, при котором угол фазового сдвига равен  $0^\circ$ , описан выше. Чтобы перейти к значению угла фазового сдвига  $60^\circ$ , необходимо отключить коммутационные аппараты 60 и 66 и включить коммутационные аппараты 34 и 42. При этом возникают перемотки уравнивающей мощности в контурах, образованных обмотками 17 и 18 на передающем конце и обмотками 25 и 26 на приемном конце. Они будут ограничиваться токоограничивающими реакторами 48 и 54 соответственно на передающем и приемном концах.

Положения коммутационных аппаратов в режимах с различными значениями углов фазового сдвига указаны в табл. 3.5.

Таблица 3.5 - Положение коммутационных аппаратов

θ, град	Положение коммутационных аппаратов													
	29	30	31	32	33	34	35	36	57	58	59	60	61	62
0	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-
30	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+
60	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
90	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
120	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
150	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-
180	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+

Использование рассмотренного технического решения позволяет избежать перерыва электроснабжения при переходе с одного значения угла фазового сдвига векторов напряжений различных цепей на другой, а также уменьшить шаг регулирования угла фазового сдвига.

Возможность плавного изменения угла фазового сдвига можно обеспечить, если фазосдвигающие трансформаторы снабдить устройствами переключения ответвлений под нагрузкой [58п]. Такой вариант электропередачи изображен на рис. 3.10,а.

В схеме электропередачи показаны первичные обмотки 1 фаз трансформаторов, основные вторичные обмотки 2, 3, 4 соответствующих фаз А, В, С трансформаторов, снабженные устройствами

переключения под нагрузкой, соединенными в звезду, две дополнительные вторичные обмотки 5, 6 фазы А, две дополнительные вторичные обмотки 7, 8 фазы В, две дополнительные вторичные обмотки 9, 10 фазы С. Причем первая дополнительная вторичная обмотка 5 фазы А соединена своим концом с началом основной вторичной обмотки 3 фазы В, а вторая дополнительная вторичная обмотка 6 фазы А соединена своим концом с началом основной вторичной обмотки 4 фазы С. Первая дополнительная вторичная обмотка 7 фазы В соединена своим концом с началом основной вторичной обмотки 4 фазы С, вторая дополнительная вторичная обмотка 8 фазы В соединена своим концом с началом основной вторичной обмотки 2 фазы А, первая дополнительная вторичная обмотка 9 фазы С соединена своим концом с началом основной вторичной обмотки 2 фазы А, вторая дополнительная вторичная обмотка 10 фазы С соединена своим концом с началом основной вторичной обмотки 3 фазы В. Все дополнительные вторичные обмотки имеют регулировочные ответвления по всей длине обмоток и снабжены устройствами переключения ответвлений под нагрузкой, действующие синхронно друг с другом и с устройствами переключения под нагрузкой основных вторичных обмоток 2, 3, 4. При этом количество витков каждой из дополнительных обмоток равно:

$$W_{\text{доп}}^{\text{РПН}} = \frac{W_{\text{осн}}}{\sqrt{3}},$$

где  $W_{\text{осн}}$  – количество витков основной обмотки.

Количество витков каждой из основных вторичных обмоток 2, 3, 4, задействованных под перемещение контактов ответвлений в нейтраль равно:

$$W_{\text{осн}}^{\text{РПН}} = W_{\text{осн}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right).$$

Первые дополнительные вторичные обмотки 5, 7, 9 фаз А, В, С трансформаторов посредством двухпозиционных коммутационных аппаратов с контактами 11 - 16 и вторые дополнительные вторичные обмотки 6, 8, 10 фаз А, В, С трансформаторов посредством трехпозиционных коммутационных аппаратов с контактами 17 – 25 присоединены к трехфазным системам шин 26 и 27. Причем первая дополнительная вторичная обмотка 5 фазы А посредством контактов 11 и 12 двухпозиционных коммутационных аппаратов присоеди-

на к фазам  $A_1$  и  $A_2$  трехфазных систем шин 26 и 27, первая дополнительная вторичная обмотка 7 фазы В посредством контактов 13 и 14 двухпозиционных коммутационных аппаратов присоединена к фазам  $B_1$  и  $B_2$  трехфазных систем шин 26 и 27.

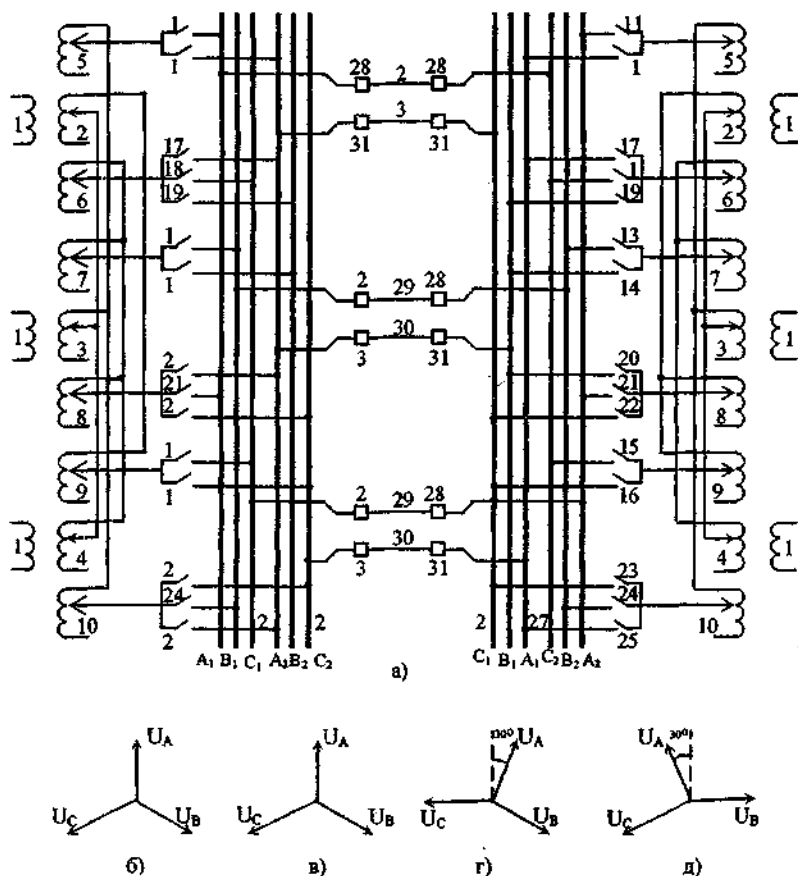


Рис. 3.10. Схема электропередачи, содержащей фазосдвигающие трансформаторы с устройствами переключения отводов под нагрузкой (а) и векторные диаграммы (б, в, г, д)



Первая дополнительная вторичная обмотка 9 фазы С посредством контактов 15 и 16 двухпозиционных коммутационных аппаратов присоединена к фазам  $C_1$  и  $C_2$  трехфазных систем шин 26 и 27, вторая дополнительная вторичная обмотка 6 фазы А посредством контактов 17 и 19 трехпозиционных коммутационных аппаратов присоединена к фазам  $A_2$  и  $B_2$  трехфазной системы шин 27 и посредством контакта 18 к фазе  $C_1$  трехфазной системы шин 26. Вторая дополнительная вторичная обмотка 8 фазы В посредством контактов 20 и 22 трехпозиционных коммутационных аппаратов присоединена к фазам  $B_2$  и  $C_2$  трехфазной системы шин 27 и посредством контакта 21 к фазе  $A_1$  трехфазной системы шин 26. Вторая дополнительная вторичная обмотка 10 фазы С посредством контактов 23 и 25 трехпозиционных коммутационных аппаратов присоединена к фазам  $A_2$  и  $C_2$  трехфазной системы шин 27 и посредством контакта 24 к фазе  $B_1$  трехфазной системы шин 26. К каждой из фаз  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  трехфазной системы шин 26 посредством линейных коммутационных аппаратов 28 присоединены провода 29 первой цепи линии электропередачи, попарно сближенные с проводами 30, второй цепи линии электропередачи, присоединенными к фазам  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  трехфазной системы шин 27 посредством линейных коммутационных аппаратов 31.

При полностью выведенных регулировочных ответвлениях дополнительных вторичных обмоток 5 – 10 и полностью введенных регулировочных ответвлениях основных вторичных обмоток 2, 3, 4 имеются две трехфазные системы напряжений, вектора одноименных фаз которых сонаправлены (рис.3.10,б,в). При перемещении контактов устройств переключения под нагрузкой вдоль регулировочных ответвлений вторичных обмоток угол между векторами одноименных фаз трехфазных систем напряжений изменяется и при полностью введенных регулировочных ответвлениях дополнительных вторичных обмоток 5 -10 и полностью выведенных регулировочных ответвлениях основных вторичных обмоток 2, 3, 4, угол между векторами одноименных фаз равен  $60^\circ$  (рис.3.10,г,д), что позволяет плавно изменять угол фазового сдвига между напряжениями, подводимыми к трехфазным системам шин 26 и 27 в диапазонах  $0 - 60^\circ$ ,  $60^\circ - 120^\circ$  и  $120^\circ - 180^\circ$ . При этом изменение количества витков основной обмотки рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{осн}} = \frac{2W_{\text{осн}} + \Delta_{\text{доп}} - \sqrt{4W_{\text{осн}}^2 - 3\Delta_{\text{доп}}^2}}{2},$$

где  $\Delta_{\text{доп}}$  - изменение количества витков дополнительных вторичных обмоток.

Так, при замкнутых контактах 11, 13, 15, 17, 20, 23 и разомкнутых контактах 12, 14, 16, 18, 19, 21, 22, 24, 25 угол между векторами напряжений, подводимых к шинам 26 и 27, изменяется в диапазоне  $0 - 60^\circ$ . При замкнутых контактах 12, 14, 16, 18, 21, 24 и разомкнутых контактах 11, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 23, 25 угол между векторами напряжений, подводимых к шинам 26, 27, изменяется в диапазоне  $60^\circ - 120^\circ$ . При замкнутых контактах 11, 13, 15, 19, 22, 25 и разомкнутых контактах 12, 14, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 24 угол между векторами напряжений, подводимых к шинам 26 и 27, изменяется в диапазоне  $120^\circ - 180^\circ$ .

Таким образом, благодаря изменению схемы коммутации вторичных обмоток трансформатора обеспечивается регулировочный диапазон угла фазового сдвига в пределах  $0^\circ - 180^\circ$ . При этом изменение угла фазового сдвига внутри диапазонов  $0^\circ - 60^\circ$ ,  $60^\circ - 120^\circ$ ,  $120^\circ - 180^\circ$  происходит плавно, переход от одного регулировочного диапазона к другому производится с отключением линии электропередачи.

Для обеспечения постоянного уровня напряжения на шинах вторичного напряжения приемного конца разноцепной компактной управляемой электропередачи в послеаварийных и ремонтных режимах предложена схема, изображенная на рис. 3.11, [59п].

В схеме показаны две трехфазные системы шин 1 и 2 передающего конца, с фазами  $A_1, B_1, C_1$  и  $A_2, B_2, C_2$  соответственно, напряжения которых сдвинуты относительно друг друга на угол  $180^\circ$ , коммутационные аппараты 3, 4 в первой цепи линии на передающем и приемном концах линии, коммутационные аппараты 5, 6 во второй цепи линии на передающем и приемном концах линии, провода 7 первой цепи линии, провода 8 второй цепи линии, фазы 9 первичной обмотки трансформатора, фазы 10 - 12 первых полуобмоток вторичной обмотки трансформатора, фазы 13 - 15 вторых полуобмоток вторичной обмотки трансформатора. Коммутационные аппараты 16 для соединения первичных обмоток трансформатора в звезду в случае присоединения его только к первой цепи линии,

коммутационные аппараты 17 для соединения первичных обмоток трансформатора в звезду в случае присоединения его только ко второй цепи линии, коммутационные аппараты 18 - 20 предназначены для соединения полуобмоток фаз вторичной обмотки, коммутационные аппараты 21, 22 для соединения первых полуобмоток вторичной обмотки трансформатора в звезду, коммутационные аппараты 23 - 25 для присоединения начал вторых полуобмоток каждой из фаз к соответствующим фазам А, В, или С системы шин вторичного напряжения 26.

Так, начало второй полуобмотки 13 фазы А, посредством коммутационного аппарата 18 соединено с концом первой полуобмотки 10 той же фазы и, посредством коммутационного аппарата 23, с фазой А системы шин вторичного напряжения 26. Начало второй полуобмотки 14 фазы В посредством коммутационного аппарата 19, соединено с концом первой полуобмотки 11 той же фазы и, посредством коммутационного аппарата 24, с фазой В системы шин вторичного напряжения 26. Начало второй полуобмотки 15 фазы С, посредством коммутационного аппарата 20, соединено с концом первой полуобмотки 12 той же фазы и, посредством коммутационного аппарата 25, с фазой С системы шин вторичного напряжения 26.

В качестве коммутационных аппаратов могут быть применены выключатели, выключатели нагрузки, разъединители.

На рис.3.11,б показана векторная диаграмма напряжений системы шин 1, а на рис.3.11,в - векторная диаграмма напряжений системы шин 2. Как следует из рис.3.11,б,в векторы напряжений одноименных фаз систем шин 1 и 2 сдвинуты на угол  $180^\circ$ .

На рис.3.11,г показана векторная диаграмма напряжений, прикладываемых к первичной обмотке трансформатора. Так, например, к фазе А первичной обмотки трансформатора приложено напряжение между концами векторов  $U_{A1}$  и  $U_{A2}$ , т.е. двойное фазное напряжение. Аналогичные напряжения приложены и к фазам В и С первичной обмотки трансформатора.

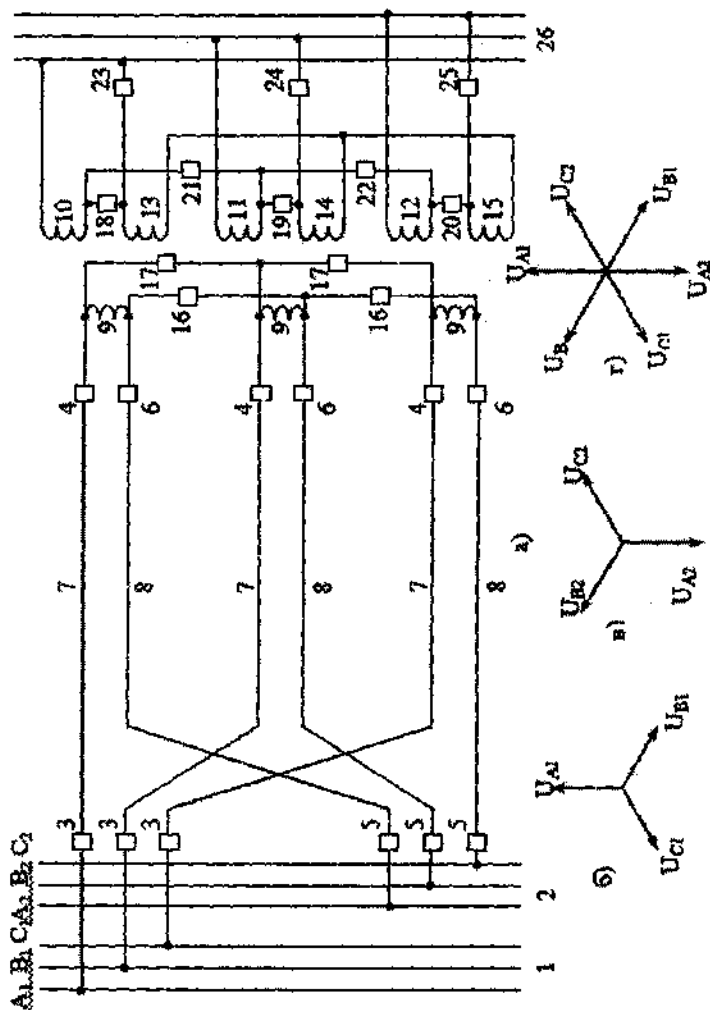


Рис. 3.11. Схема электропередачи, обеспечивающая качество послеварийных режимов (а), и векторные диаграммы (б, в, г)

При работе обеих цепей линии электропередачи (нормальный режим), отключены коммутационные аппараты 16 - 20 и включены коммутационные аппараты 3 - 6, 21 - 25. При этом в работе находятся обе полуобмотки вторичной обмотки трансформатора, каждая из которых подключена к системе шин 26. К первичным обмоткам 9 трансформатора приложено двойное фазное напряжение  $2U_\phi$  (рис.3.11,г). При этом коэффициент трансформации трансформатора для первой и второй полуобмоток соответственно будет равен:

$$\begin{aligned} k_{T1} &= \frac{\omega_0}{\omega_1}; \\ k_{T2} &= \frac{\omega_0}{\omega_2}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $\omega_0$  — количество витков первичной обмотки трансформатора;  $\omega_1, \omega_2$  — количество витков соответственно первой и второй полуобмоток вторичной обмотки трансформатора.

Так как  $\omega_1 = \omega_2$ , то  $k_{T1} = k_{T2} = k_T$ , и напряжение на шинах вторичного напряжения 26:

$$U_2 = \frac{2U_\phi}{k_T}. \quad (3.5)$$

При повреждении или выводе в ремонт одной из цепей электропередачи, например второй, состоящей из проводов 8 отключаются линейные коммутационные аппараты 5 и 6 и включаются коммутационные аппараты 16, в результате чего фазы 9 первичной обмотки трансформатора соединяются в звезду, и напряжение, приложенное к данным обмоткам становится равным фазному  $U_\phi$ .

При этом на вторичной обмотке трансформатора отключаются коммутационные аппараты 21 - 25 и включаются коммутационные аппараты 18 - 20. При этом коэффициент трансформации трансформатора будет равен:

$$k'_T = \frac{\omega_0}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{k_T}{2}; \quad (3.6)$$

Напряжение на шинах вторичного напряжения при отключении одной цепи линии

$$U'_2 = \frac{U_\phi}{k'_T} = \frac{2U_\phi}{k_T}. \quad (3.7)$$

Таким образом, напряжение на шинах вторичного напряжения при отключении одной цепи линии электропередачи будет равно напряжению нормального режима работы, в результате чего изменение режима работы электропередачи не повлияет на работу потребителей электроэнергии, питающихся с шин 26.

Аналогичным образом происходит работа схемы при повреждении первой цепи линии электропередачи, состоящей из проводов 7. При этом отключаются коммутационные аппараты 3, 4 и включаются коммутационные аппараты 17 со стороны первичной обмотки трансформатора. На вторичной обмотке трансформатора отключаются коммутационные аппараты 21 - 25 и включаются коммутационные аппараты 18 - 20. При этом на шинах 26 также будет обеспечено напряжение

$$U_2 = \frac{U_\phi}{k_{\Pi}} = \frac{2U_\phi}{k_T}, \quad (3.8)$$

соответствующее нормальному режиму работы электропередачи.

В другом варианте 2 электропередачи (рис.3.12) коммутационные аппараты, соединяющие концы первых полуобмоток второй обмотки трансформатора выполнены двухпозиционными с контактами 27 - 32.

При работе обеих цепей линии (нормальный режим работы), замкнуты контакты 27, 29, 31 двухпозиционных коммутационных аппаратов, включены коммутационные аппараты 3 - 6, 23 - 25 и отключены коммутационные аппараты 16 и 17. При этом в работе находятся обе полуобмотки вторичной обмотки трансформатора, каждая из которых подключена к системе шин вторичного напряжения 26. При этом коэффициент трансформации трансформатора будет

рассчитываться по формуле (3.4), а напряжение на шинах вторичного напряжения – по формуле (3.5).

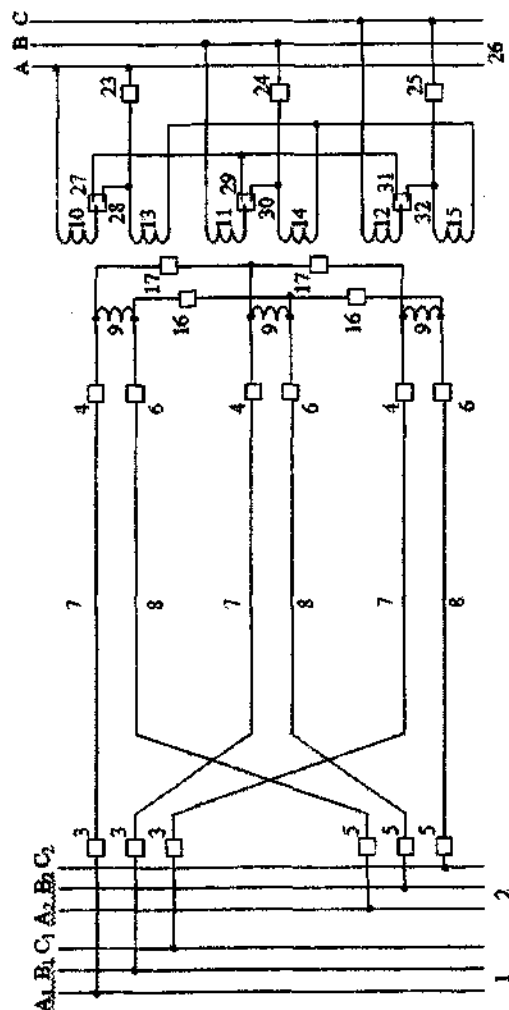


Рис. 3.12. Схема электропередачи с двухпозиционными коммутационными аппаратами на приемном конце

При повреждении или выводе в ремонт одной из цепей линии электропередачи размыкаются контакты 27, 29, 31 замыкаются кон-

такты 28, 30, 32 двухпозиционных коммутационных аппаратов, отключаются коммутационные аппараты 23-25 на вторичной обмотке трансформатора, при этом обе полуобмотки оказываются подключенными последовательно. На первичной обмотке трансформатора при повреждении или выводе в ремонт второй цепи электропередачи отключаются линейные коммутационные аппараты 5 и 6 и включаются коммутационные аппараты 16. При повреждении или выводе в ремонт первой цепи электропередачи отключаются линейные коммутационные аппараты 3 и 4 и включаются коммутационные аппараты 17. Коэффициент трансформации трансформатора будет рассчитываться по формуле (3.6), а напряжение на шинах вторичного напряжения – по формуле (3.7). В результате напряжение на шинах вторичного напряжения при отключении одной цепи линии электропередачи будет равно напряжению нормального режима работы, при меньшем количестве коммутационных аппаратов.

Таким образом, благодаря изменению схемы коммутации вторичных обмоток трансформатора, обеспечивается постоянство уровня напряжения на шинах вторичного напряжения приемного конца линии электропередачи в послеаварийных и ремонтных режимах.

### **3.4. Система электропередачи с плавным регулированием фазового сдвига**

Способы и средства дискретного (ступенчатого) регулирования фазового сдвига в электропередачах с фазовым сдвигом с помощью специальных трансформаторных устройств и специальных схем коммутации рассмотрены в [1], а некоторые из них в параграфе 3.3. Вместе с тем, имеются различные возможности обеспечения плавного регулирования фазового сдвига между напряжениями сближенных фаз разных цепей линии электропередачи, что позволяет создавать более эффективное управление режимом электропередачи. Рассмотрим одну из таких возможностей, предложенную в [85п]. Принципиальная схема системы электропередачи, позволяющая плавное регулирование угла фазового сдвига между напряжениями двух цепей линии изображена на рис. 3.13.



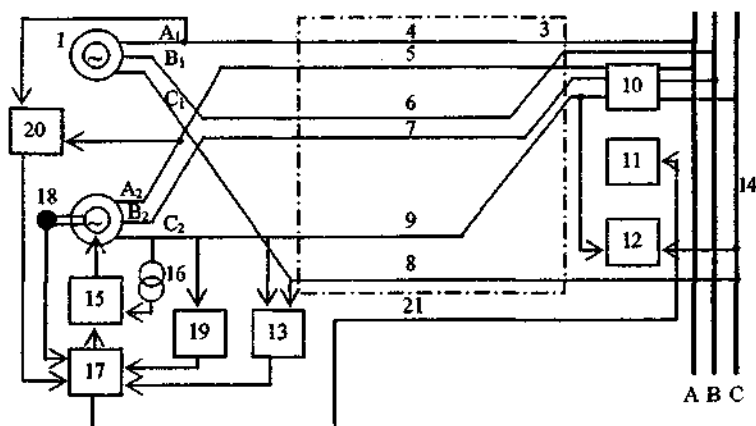


Рис. 3.13. Система электропередачи с плавным регулированием угла фазового сдвига напряжений

Система электропередачи содержит генератор 1 переменного тока с системой трехфазных обмоток  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$ , асинхронизированный синхронный генератор (АСГ) 2 с системой трехфазных обмоток  $A_2$ ,  $B_2$  и  $C_2$ , шестифазную линию 3 электропередачи со сближенными попарно проводами 4 и 5, 6 и 7, 8 и 9 фаз, фазосдвигающее устройство (ФУ) 10, регулятор 11 фазы угла, датчики 12 и 13 фазового угла, шины 14 потребителя, управляемый преобразователь 15 частоты системы возбуждения АСГ, трансформатор 16 питания преобразователя частоты, регулятор 17 АСГ, датчик 18 углового положения вала АСГ, датчик 19 вектора напряжения АСГ, датчики 20 активной мощности и телеканал 21.

Трехфазная система обмоток генератора 1 переменного тока  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$  подключена к разным проводам каждой пары сближенных проводов фаз линии электропередачи. Фаза  $A_1$  подключена к проводу 4 первой пары 4 и 5 сближенных проводов фаз линии; фаза  $B_1$  - к проводу 6 второй пары 6 и 7 сближенных проводов фаз линии; фаза  $C_1$  - к проводу 8 третьей пары 8 и 9 сближенных проводов фаз линии. Трехфазная система обмоток АСГ 2 подключена к разным проводам каждой пары сближенных проводов фаз линии 3 электропередачи: фаза  $A_2$  - к проводу 5 линии; фаза  $B_2$  - к проводу 7 линии; фаза  $C_2$  - к проводу 9 линии.

На приемном конце провода 4, 6 и 8 линии 3 электропередачи включены непосредственно, а провода 5, 7 и 9 - через фазосдвигающее устройство 10 к соответствующим шинам 14 потребителей. Управление работой ФУ 10 осуществляется с помощью регулятора 11, входы которого соединены с приемным концом телеканала 21 и выходом датчика 12 фазового угла напряжений шин 14 и входа ФУ 10. К обмоткам возбуждения АСГ 2 подводится напряжение возбуждения требуемой частоты и амплитуды от тиристорного преобразователя 15 частоты. Питание преобразователя 15 осуществляется через трансформатор 16. Выход датчика 18 углового положения вала АСГ и выход датчика 19 вектора напряжения АСГ 2 соединены с входами регулятора 17. Регулятор 17 служит общим устройством для управления работой преобразователя частоты с несколькими каналами регулирования, одним из которых является канал управления фазовым углом. Датчики 18 и 19 необходимы регулятору для обеспечения асинхронизированного режима АСГ 2.

При работе системы электропередачи на трехфазных обмотках генератора 1 переменного тока образуется симметричная система напряжений  $U_{A1}, U_{B1}$  и  $U_{C1}$ , а на трехфазных обмотках АСГ 2  $U_{A2}, U_{B2}$  и  $U_{C2}$ . Симметричные системы напряжений 2  $U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}$ , и  $U_{A2}, U_{B2}, U_{C2}$  прикладываются к проводам линии электропередачи. В зависимости от угла  $\Theta$  сдвига одноименных фаз генератора 1 и АСГ 2 к каждой паре сближенных проводов прикладывается напряжение с фазовым сдвигом  $\Theta$ .

Поэтому при передаче большой мощности, например, к каждой фазе сближенных проводов линии электропередачи прикладываются напряжения, находящиеся в противофазе. В результате линия электропередачи обладает высокой пропускной способностью и является источником зарядной реактивной мощности. На приемном конце фазосдвигающее устройство осуществляет сдвиг на угол  $\Theta$  системы трехфазных напряжений  $U_{A2}, U_{B2}$  и  $U_{C2}$ , для обеспечения параллельной работы с трехфазной системой потребителей. Фазосдвигающих устройств для системы напряжений  $U_{A1}, U_{B1}$  и  $U_{C1}$  не требуется, поскольку генератор 1 через линию электропередачи непосредственно работает на шины потребителей. Отсутствие каких-либо фазосдвигающих устройств в одной цепи линии повышает экономичность электропередачи.

При уменьшении передаваемой мощности по линии электропередачи режим противофазы напряжений становится экономически не оптимальным из-за протекания больших зарядных токов в линии. Поэтому с изменением передаваемой мощности по линии изменится величина выходного сигнала датчика 22 и появится сигнал, пропорциональный оптимальному значению фазового угла напряжений в паре сближенных проводов линии. Этот сигнал по телеканалу 23 поступает на вход регулятора 11, а также сравнивается с сигналом от датчика 13 действительного угла сдвига напряжений. Если сигнал оптимального значения угла не соответствует сигналу действительного угла  $\Theta_d$  сдвига напряжений в паре сближенных проводов линии, то сигнал рассогласования поступает в 17 АСГ 2, который, управляя преобразователем частоты, производит поворот вектора напряжения АСГ на соответствующий угол до исчезновения сигнала рассогласования. Управление углом фаз фазосдвигающего устройства 10 осуществляется регулятором 11. Угол сдвига напряжений устройства 10 соответствует фазовому сдвигу напряжений между двумя сближенными фазами в линии электропередачи. На входы регулятора 11 поступают сигналы от датчика 12 действительного фазового сдвига напряжений в паре сближенных проводов линии и сигнал, пропорциональный требуемому оптимальному значению фазового угла между сближенными фазами.

В качестве задающего сигнала оптимального фазового угла между двумя сближенными фазами может использоваться сигнал, передаваемый по телеканалу 23 от блока с функциональной зависимости фазового угла от активной мощности.

Если сигнал оптимального значения угла, поступающий в регулятор 11 по телеканалу 23, не соответствует сигналу действительного угла сдвига напряжений в паре сближенных проводов, поступающему в регулятор 11 от датчика 12, то на выходе регулятора 11 появляется сигнал, поступающий в фазосдвигающее устройство 10, на поворот вектора напряжения на угол до соответствия заданному к действительному углу сдвига напряжений. Поскольку в качестве задатчика угла регулятором 17 и 11 служит один и тот же блок функциональной зависимости фазового угла от активной мощности, а в качестве обратной связи регулирования используются сигналы от датчиков 12 и 13 фазового угла, то по всей линии электропередачи обеспечивается в зависимости от передаваемой мощности, тре-

буемый оптимальный сдвиг напряжения между сближенными фазами. Такое регулирование фазовым сдвигом напряжений цепей линии позволяет изменять величину зарядной мощности линии в пределах до 40-45% от величины, соответствующей максимальному углу сдвига напряжений цепей.

Таким образом, данная система электропередачи позволяет осуществить плавное регулирование фазового сдвига напряжений цепей от 0 до  $180^\circ$  и тем самым повысить функциональные возможности системы электропередачи, уменьшить стоимость передачи, поскольку не требует фазосдвигающих устройств для одной из цепей линии электропередачи и уменьшает количество и мощность компенсирующих устройств.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как связаны между собой предельная мощность линии и ее натуральная мощность?

2. На какие параметры следует воздействовать, чтобы уменьшить индуктивность линии?

3. Как можно уменьшить индуктивность одноцепной трехфазной линии?

4. Как связаны между собой индуктивность и емкость линии?

5. Какие известны принципы расположения проводов расщепленных фаз в одноцепных компактных линиях электропередачи?

6. Как влияет на индуктивность линии угол сдвига между векторами токов в ее проводах?

7. В чем заключается принцип построения управляемых самокомпенсирующихся электропередач?

8. Какими правилами следует руководствоваться для повышения натуральной мощности линии при формировании взаимного расположения проводов расщепленных фаз?

9. За счет чего электропередачи с фазовым сдвигом позволяют расширить их функциональные возможности?

10. В чем заключается принцип построения разноцепных компактных управляемых электропередач?

11. Как изобразить взаимное расположение проводов расщепленных фаз в трехконтурной разноцепной линии, в двойной трехкоаксиальной линии, в трехсеточной двухцепной линии?

12. Как можно осуществить транспозицию проводов в расщепленной фазе?

13. Как изобразить схему электропередачи с емкостной связью?

14. Какие известны принципы создания фазового сдвига векторов напряжений в разноцепных компактных управляемых электропередачах?

15. Какими путями можно добиться того, что при определенных видах повреждений на линии не потребуется отключения одновременно всех фаз?

16. Как можно повысить живучесть многопроводных компактных электропередач с помощью применения однопозиционных коммутационных аппаратов?

17. Как можно обеспечить регулирование угла фазового сдвига между сближенными проводами разных цепей линии без перерыва электроснабжения с помощью применения многообмоточных трансформаторов с различными группами соединения и токоограничивающими реакторами?

18. Какого эффекта можно добиться, если применить фазосдвигающие трансформаторы с устройствами переключения ответвлений на линии со сближенными проводами разных цепей?

19. Как можно обеспечить постоянство напряжения на шинах приемной системы в послеаварийных и ремонтных режимах разноцепных компактных управляемых электропередач?

20. Как можно обеспечить плавное регулирование угла фазового сдвига с использованием асинхронизированных синхронных генератора?

## **4. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С СОКРАЩЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ЛИНЕЙНЫХ ПРОВОДОВ И УМЕНЬШЕННЫМ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ НИМИ**

### **4.1. Постановка задачи**

Известно, что современные электроэнергетические системы общего назначения используют трехфазную систему напряжений переменного тока, в которой векторы напряжений различных фаз сдвинуты относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Ее широкое распространение обусловлено применением таких экономичных элементов как трехфазные генераторы, трансформаторы и электродвигатели. При этом приходится применять трехфазные воздушные и кабельные линии электропередачи, между проводами фаз которых приложено линейное напряжение. Расстояние между фазами оказывает разностороннее влияние на технические параметры линии, экономические и экологические характеристики. Так, при изменении расстояния между проводами изменяются индуктивность и емкость линии, что в свою очередь влияет на электрические режимы (падение напряжения, предел передаваемой мощности, баланс реактивной мощности). Изменение активной проводимости в воздушных линиях приводит к изменению потерь активной мощности. При уменьшении расстояния между проводами фаз снижается площадь поперечного сечения, занимаемая линией, уменьшаются механические нагрузки на опоры.

Минимальные допустимые расстояния между фазами ограничиваются условиями [1, 4]:

- коронного разряда;
- грозовых и коммутационных перенапряжений с учетом принятой допустимой кратности перенапряжений;
- приближения проводов при их раскачивании к заземленным частям опор при рабочем напряжении линии и безопасного подъема на опору.

С учетом этих условий разработаны различные технические решения, позволяющие уменьшить расстояния между фазами. К ним относятся:

- различные варианты воздушных компактных линий электропередачи со сближением проводов только в пролете или как в пролете, так и на опорах [1, 4, 6, 16];

- воздушные линии с самонесущими (до 1 кВ) и покрытыми (при напряжении до 60 кВ) проводами [18];

- воздушные линии с опорами охватывающего типа, в которых провода трех фаз расположены по одну сторону от стоек опор;

- кабельные линии.

Разработка вариантов компактных линий электропередачи продолжается. Так, в [65п] для компактизации линия выполнена без традиционных опор с аэростатом, заполненным газом, легче воздуха (рис. 4.1).

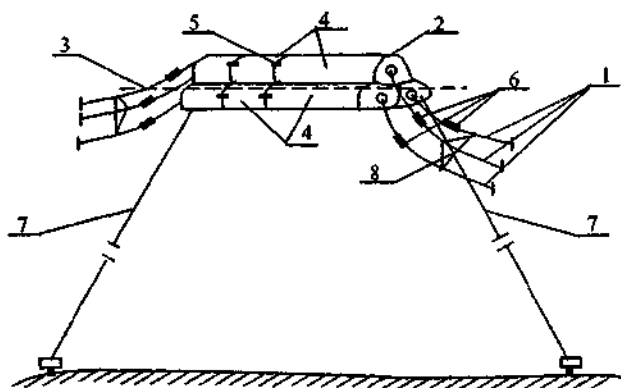


Рис. 4.1. Воздушная линия электропередачи без традиционных опор

В воздушной линии электропередачи неизолированные провода 1 подвешены на аэростате 2 продолговатой формы, который выполнен из изоляционного материала. Продольная ось аэростата 3 расположена параллельно оси линии. Внутри аэростата закреплены провода 1. Аэростат разделен на секции 4, которые сообщены между собой посредством клапанных запорных элементов 5. Между аэростатами провода по всей длине линии могут соединяться разборными элементами 6.

Фиксация аэростата относительно земли производится посредством заанкеренных растяжек 7, выполненных из изоляционного

материала, между приводами 1 вне аэростата установлены изоляционные распорки 8.

Монтируется и работает линия электропередачи следующим образом. Аэростаты 2 с проводами 1 и емкости сжатого газа (на рис. 4.1 не показаны), который легче воздуха, доставляют на место монтажа линии электропередачи, где и заполняют аэростаты до необходимого объема. При необходимости построения длинной линии электропередачи аэростаты 2 соединяют между собой с помощью разборных соединительных элементов 6 и закрепляют относительно земли заанкеренными растяжками 7 из изоляционного материала. В случае невозможности монтажа линии электропередачи непосредственно на трассе монтаж производят на удобной площадке и доставляют на трассу в уже собранном виде, при этом заполнение аэростатов до полного объема производят непосредственно на трассе.

Объем газа в аэростате для обеспечения требуемой подъемной силы определяется по формуле:

$$V = \frac{(M_1 + M_2) \cdot (2H + GT^2)}{GT^2 \cdot (P_1 - P_2) - 2HP_2},$$

где —  $M_1$  — масса провода трех фаз, кг/м;  $M_2$  — масса оболочки и крепежной арматуры, кг/м;  $H$  — высота подъема аэростата, м;  $T$  — время подъема, с;  $P_1$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $P_2$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $G = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

В нормальном режиме работы линии электропередачи клапанный запорный элемент 5 пропускает газ, которым заполнен аэростат 2, в обоих направлениях. За счет этого давление газа по всей длине аэростата одинаково.

В аварийных ситуациях при разрыве оболочки какой-либо секции 4 быстрое истечение газа закроет клапанное запорное устройство 5, в результате чего во всех секциях, кроме поврежденной, сохраняется давление, достаточное для поддержания проводов 1 в воздухе.

При подаче напряжения на провода 1 линии электропередачи электроизоляция между ними обеспечивается за счет оболочки аэростата 2 из изоляционного материала, газа внутри аэростата, воздуха снаружи аэростата, изоляционных распорок растяжек из изоляционного материала.



Тепло, выделяемое от проводов при прохождении тока по линии, будет подогревать газ внутри аэростата, создавая дополнительную подъемную силу.

Линия может быть использована для передачи и распределения электрической энергии в местах, труднодоступных для монтажных механизмов (болото, пески, горы), для перехода через водные преграды, дороги, для временного электроснабжения передвижных и стационарных потребителей при карьерных разработках, геологических изысканиях, нефтепромыслах и для быстрого восстановления электропитания потребителей после стихийных бедствий, при ремонтных работах с заменой опор на действующих линиях.

Компактность воздушных линий в местах их пересечения может быть достигнута с помощью технического решения, предложенного в [66п]. Пересечение линий осуществляется на опоре, которая устанавливается в плоскости, образованной биссектрисой большего угла пересечения осей линий и вертикалью проходящей через точку пересечения осей линий (рис. 4.2, а). При этом точки подвеса проводов, принадлежащих одной линии, расположены на одном уровне, а каждая линия расположена по своему ярусу (рис. 4.2, б). На принципиальной схеме (рис. 4.2, а) показана пересекаемая трехфазная линия 1 и пересекающая трехфазная линия 2. В месте их пересечения установлена опора 3, плоскость которой совпадает с биссектрисой большего угла пересечения 4 осей линии. На одном из вариантов опор показана опора 5 "охватывающего" типа (рис. 4.2, б), установленная в месте пересечения линий, содержащая изолирующие элементы 6, провода 7 пересекающей линии 2 и провода 8 пересекаемой линии 1. Конструкция опоры позволяет фиксировать габарит между пересекаемой и пересекающей линиями, а также необходимый габарит до земли. Жесткое фиксированное взаимное расположение проводов в месте пересечения не допускает перекрытия изоляции между проводами от изменения температурных режимов, обусловленное различной электрической нагрузкой пересекаемой и пересекающей линий, ветровыми и гололедными нагрузками, что повышает надежность работы линий.

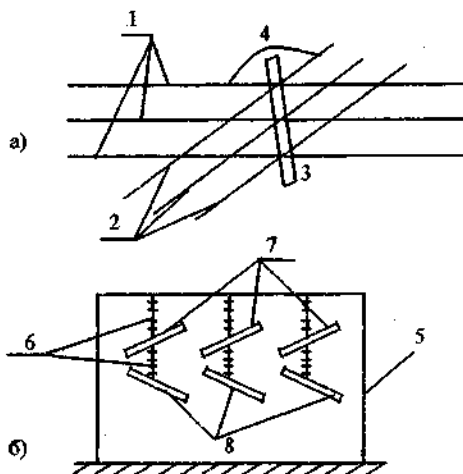


Рис. 4.2. Пересечение двух линий: а – трассы пересекающихся линий; б – опора с проводами пересекающихся линий

Одно из направлений, связанное с возможностью уменьшения расстояния между проводами фаз воздушных линий, заключается в уменьшении напряжений, приложенных к линейным проводам, по сравнению с линейными напряжениями. Эта возможность реализуется при симметричных фазных напряжениях по концам линии за счет перехода на линии к несимметричной системе напряжений, вплоть до системы напряжений на линейных проводах фаз с нулевым фазовым сдвигом. Такие предложенные технические решения рассматриваются в последующих параграфах.

#### 4.2. Двухцепные системы передачи электроэнергии

Рассмотрим принцип возможного уменьшения линейных проводов до четырех в трехфазной двухцепной системе передачи электроэнергии [67п]. Система содержит два трехфазных источника электрической энергии с синхронными равными ЭДС  $E_{a1}$ ,  $E_{b1}$ ,  $E_{c1}$  и  $E_{a2}$ ,  $E_{b2}$ ,  $E_{c2}$ , трехфазные нагрузки  $Z_{a1}$ ,  $Z_{b1}$ ,  $Z_{c1}$  и  $Z_{a2}$ ,  $Z_{b2}$ ,  $Z_{c2}$ , трехфазную двухцепную линию электропередачи (рис. 4.3).

Если источники напряжений синфазны, то токи в линейных одноименных проводах фаз двух цепей ( $I_{a1}$  и  $I_{a2}$ ,  $I_{b1}$  и  $I_{b2}$ ,  $I_{c1}$  и  $I_{c2}$ ), будут также синфазны и равны. В этих условиях любой из линейных проводов линии одной цепи может быть объединен с любым линейным проводом соответствующей фазы другой цепи. При этом в объединенном проводе ток будет вдвое больше каждого из равных друг другу синфазных линейных токов (на рис. 4.3,а показано объединение проводов фазы а с токами  $I_{a1}$  и  $I_{a2}$ ).

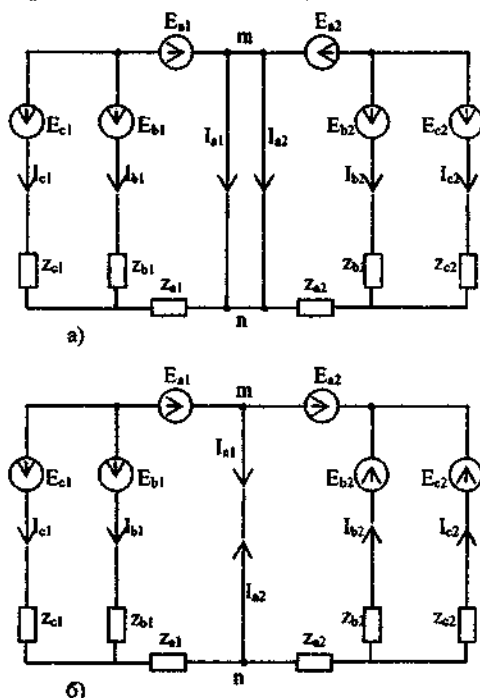


Рис. 4.3. Принципиальная схема двухцепной системы передачи электроэнергии: а – с синфазной системой напряжений источников; б – с противофазной системой напряжений источников

Если теперь источники напряжения выполнить противофазными, то линейные токи одноименных фаз двух цепей ( $I_{a1}$  и  $I_{a2}$ ,  $I_{b1}$  и  $I_{b2}$ ,  $I_{c1}$  и

$I_{\Sigma 2}$  будут также противофазны, а поскольку они равны по величине, то ток в общем проводе  $mn$  будет равен нулю.

При нулевом токе провод  $mn$  может быть удален (рис. 4.3,б).

В результате на двухцепной линии потребуется не шесть линейных проводов, а всего четыре провода.

Один из вариантов выполнения электропередачи, основанной на изложенном принципе, показан на рис. 4.4. Здесь противофазная система напряжений на передающем конце создается с помощью использования различных групп соединения трансформаторов. Обмотки трансформаторов фаз  $a_1$  и  $a_2$  соединены между собой. Обмотки трансформаторов других фаз соединены с четырьмя проводами линии.

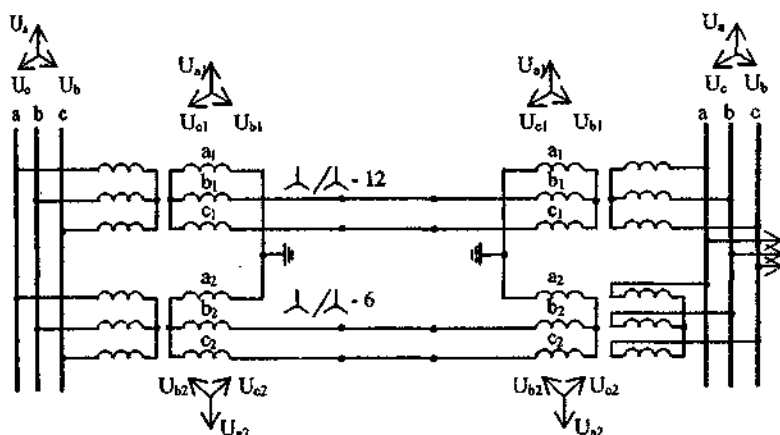


Рис. 4.4. Схема двухцепной электропередачи с сокращенным количеством проводов

На приемном конце первичные обмотки трансформаторов фаз  $a_1$  и  $a_2$  также соединены между собой, а других фаз подключены к линейным проводам. При этом первичные и вторичные обмотки трансформаторов включены между собой согласно, а второго трансформатора – встречно. В результате при параллельном включении трансформаторов на шинах приемной подстанции образуется единая трехфазная система напряжений.

На рис. 4.4 обмотки всех трансформаторов соединены в звезду. Аналогичные схемы могут быть реализованы при соединениях об-

моток трансформаторов звезда-треугольник, треугольник-треугольник, треугольник-звезда.

В [68п] для устранения несимметрии в двухцепной электропередаче с четырьмя линейными проводами предлагается ввести включаемые продольно в линию реактивные элементы.

Сокращенное количество линейных проводов позволяет уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на линию, а также, возможно, снизить потери электрической энергии.

Рассмотрим другие технические решения двухцепных трехфазных электропередач, в которых с помощью оригинальных устройств и схем обеспечивается уменьшение напряжений между линейными проводами фаз по сравнению с обычным междуфазным напряжением.

В [69п] предложена электропередача переменного тока, которая содержит источник симметричных трёхфазных напряжений, потребителя, двухцепную линию электропередачи, фазосдвигающие устройства в виде установленных на передающем и приёмном конце каждой цепи трёхфазных трансформаторов 1-4, обмотки которых, соединённые с линией электропередачи на передающем конце и с шинами потребителя на приёмном конце, выполнены в виде групп согласно намотанных полуобмоток (рис.4.5). Концы первой группы полуобмоток трансформаторов 1 и 2 обозначены через  $x, y, z$ , начала – соответственно через  $a', b', c'$ . Концы второй группы полуобмоток обозначены через  $x', y', z'$ , начала – соответственно через  $a'', b'', c''$ . Третья группа полуобмоток состоит из одной полуобмотки, в трансформаторе 1 конец её обозначен через  $y''$ , начало – через  $b'''$ , а в трансформаторе 2 – соответственно  $z''$  и  $c'''$ .

Обмотки, соединённые с источником, трансформаторов 1 и 2 обозначены:  $A, B, C$  – начала,  $X, Y, Z$  – соответственно концы. Провода фаз  $a, b$  и  $c$  первой цепи линии электропередачи соединены с выводами трансформатора 1  $x', b', z'$  соответственно, а провода фаз  $a, b$  и  $c$  второй цепи линии электропередачи – соответственно с выводами трансформатора 2  $x', y', c'$ .

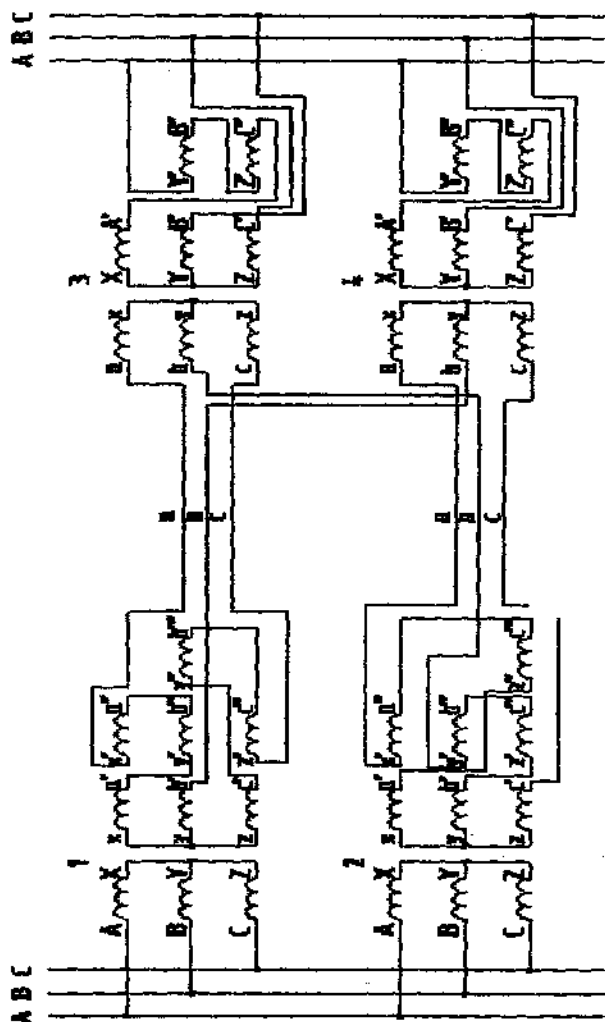


Рис. 4.5. Схема двухцепной электропередачи с нулевым фазовым сдвигом между линейными проводами каждой из цепей и углом  $120^\circ$  между проводами разных цепей

Таким образом, при передаче мощности от источника к приёмнику трансформаторы 1 и 2 с дополнительными группами вторичных полуобмоток преобразуют напряжения из симметричной трёхфазной системы в две системы сонаправленных и равных по модулю векторов, которые приложены к соответствующим цепям линии электропередачи, причём сдвиг по фазе напряжений проводников разных цепей равен  $120^\circ$ . Число витков групп полуобмоток выбирается таким образом, чтобы фазные напряжения на выводах трансформаторов были одинаковыми по модулю. Начала соединённых с линией электропередачи обмоток трансформаторов 3 и 4 приёмного конца обозначены через  $a$ ,  $b$  и  $c$ , а их концы – соответственно через  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Провода фаз  $a$  и  $c$  обеих цепей линии электропередачи соединены с соответствующими началами этих обмоток трансформаторов тех же цепей, а провода фаз  $b$  первой и второй цепи линии электропередачи соединены с началами  $b$  соответственно трансформаторов 4 и 3. Обмотки трансформаторов 3 и 4, соединённые с потребителем, выполнены в виде групп полуобмоток. Концы первой группы полуобмоток обозначены через  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , начала – соответственно через  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ . Концы второй группы полуобмоток обозначены через  $Y'$ ,  $Z'$ , начала – соответственно через  $B''$ ,  $C''$ . Полуобмотки  $C'' - Z'$  содержат в два раза больше витков, чем полуобмотки  $A' - X$ ,  $B' - Y$ ,  $C' - Z$ ,  $B'' - Y'$ . Подбором числа витков этих полуобмоток обеспечивается равенство по модулю напряжений на выводах трансформаторов 3 и 4. Таким образом, трансформаторы 3 и 4 на приёмном конце электропередачи восстанавливают трёхфазную симметричную систему напряжений. Разность потенциалов между проводами каждой из цепей линии электропередачи при этом равна нулю, расстояния между проводами воздушной линии значительно сокращены.

Работу трансформаторов 1-4 поясняют векторные диаграммы напряжений (рис.4.6). От источника на трансформатор 1 (рис.4.6,а) подаётся симметричная трёхфазная система напряжений  $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ . На полуобмотках трансформатора 1 в точках  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$  будет трансформированная симметричная система напряжений соответственно  $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$ . Полуобмотка  $y'-b''$  при соединении точек  $a'$  и  $y'$  создаёт добавку напряжения, равную  $\vec{U}_b$ , а полуобмотка  $a''-x'$  при соединении точек  $a''$  и  $b''$  создаёт добавку напряжения, рав-

ную  $-\bar{U}_a$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_{a1}$  на выводе х' трансформатора 1 и на фазе а первой цепи линии электропередачи будет равен:  $\bar{U}_{a1} = \bar{U}_a + \bar{U}_b - \bar{U}_c = \bar{U}_b$ . Полуобмотка у"-b'" при соединении точек с' и у" создаёт добавку напряжения, равную  $\bar{U}_b$ , а полуобмотка с"-z' при соединении точек b'" и с" создаёт добавку напряжения, равную  $-\bar{U}_c$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_{c1}$  на выводе z' трансформатора 1 и на фазе с первой цепи линии электропередачи будет равен:  $\bar{U}_{c1} = \bar{U}_c + \bar{U}_b - \bar{U}_a = \bar{U}_b$ . На фазе b линии электропередачи будет напряжение  $\bar{U}_{b1} = \bar{U}_b$ . Таким образом, напряжения на всех проводниках первой цепи линии совпадают по фазе, одинаковы и равны  $\bar{U}_b$ .

От источника на трансформатор 2 (рис.4.6,б) подаётся симметричная трёхфазная система напряжений  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ . Рассуждая аналогично, придём к выводу, что напряжения на всех проводах второй цепи линии одинаковы по модулю и по фазе:  $\bar{U}_{a2} = \bar{U}_{b2} = \bar{U}_{c2} = \bar{U}_c$ . Равенства напряжений по модулю на выводах трансформаторов 1 и 2 можно добиться корректировкой числа витков полуобмоток.

Угол между векторами напряжений трех фаз первой цепи и векторами напряжений трех фаз второй цепи составляет  $120^\circ$ , а модуль напряжения между группами векторов напряжений равен линейному напряжению.

На приёмном конце электропередачи на выводы а, b, с трансформатора 3 (рис.4.6,а) подаётся система напряжений соответственно  $\bar{U}_a = \bar{U}_{a1}, \bar{U}_b = \bar{U}_{b2}, \bar{U}_c = \bar{U}_{c1}$ . В точках А', В', С' трансформатора 3 будет трансформированная система напряжений соответственно  $n \cdot \bar{U}_a, n \cdot \bar{U}_b, n \cdot \bar{U}_c$  (n – коэффициент трансформации). Полуобмотка С"-Z' при соединении точек А' и С" создаёт добавку напряжения, равную  $-2 \cdot n \cdot \bar{U}_c$ , а полуобмотка В"-Y' при соединении точек Z' и В" создаёт добавку напряжения, равную  $-n \cdot \bar{U}_b$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_A$  на выводе Y' трансформатора 3 будет равен:



$\bar{U}_A = n \cdot \bar{U}_a - 2 \cdot n \cdot \bar{U}_c - n \cdot \bar{U}_b$ . На выводах В' и С' трансформатора 3 будут соответственно векторы напряжений  $\bar{U}_C = n \cdot \bar{U}_b$  и  $\bar{U}_B = n \cdot \bar{U}_c$ . Таким образом, векторы  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$  образуют симметричную систему напряжений.

На выводы а, b, с трансформатора 4 (рис.4.6,6) подаётся система напряжений соответственно  $\bar{U}_a = \bar{U}_{a2}$ ,  $\bar{U}_b = \bar{U}_{b1}$ ,  $\bar{U}_c = \bar{U}_{c2}$ . Рассуждая аналогично, придём к выводу, что на выводах Y', В' и С' трансформатора 4 будет симметричная система напряжений соответственно  $\bar{U}_A = n \cdot \bar{U}_a - 2 \cdot n \cdot \bar{U}_c - n \cdot \bar{U}_b$ ,  $\bar{U}_B = n \cdot \bar{U}_b$  и  $\bar{U}_C = n \cdot \bar{U}_c$ . Равенства напряжений по модулю на выводах трансформаторов 3 и 4 можно добиться корректировкой числа витков полуобмоток. Возможность осуществления данного технического решения связана с возможностью создания трансформаторов на передающем и приёмном конце, которые позволяют получить систему сонаправленных векторов напряжений в начале электропередачи и преобразовывать её в симметричную трёхфазную систему напряжений в конце электропередачи. Такие трансформаторы можно изготовить в заводских условиях путём намотки на магнитопровод дополнительных вторичных полуобмоток.

Таким образом, благодаря применению на передающем и приёмном концах двухцепной электропередачи фазосдвигающих устройств, выполненных на основе трёхфазных трансформаторов с дополнительными полуобмотками, а также благодаря оригинальному соединению начал и концов полуобмоток друг с другом и с фазами линии электропередачи удастся добиться нулевой разности потенциалов между проводами линии электропередачи, а на приёмном конце линии получить симметричную трёхфазную систему напряжений.

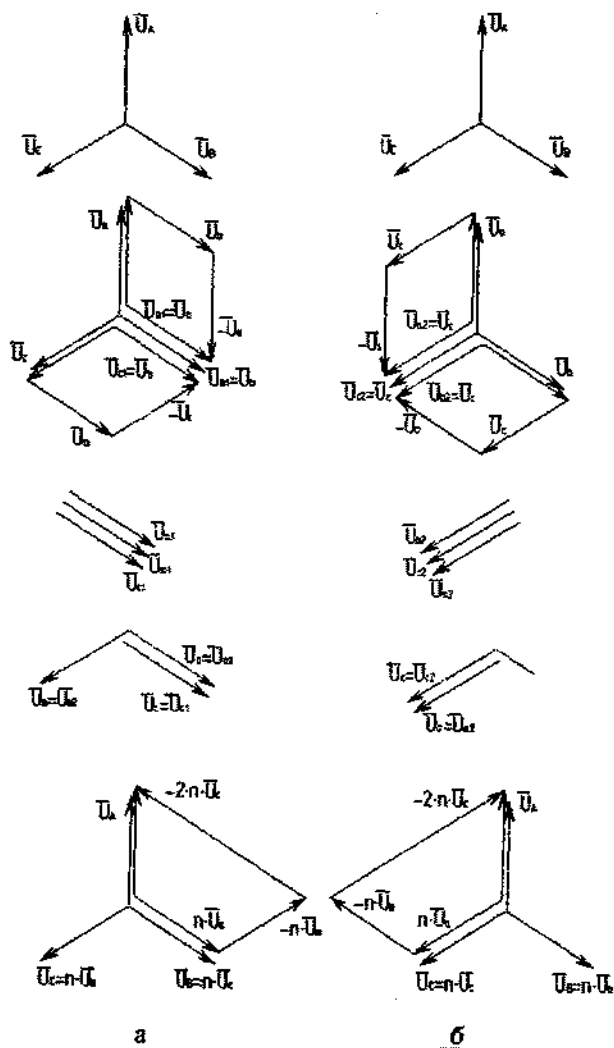


Рис. 4.6. Векторные диаграммы напряжений: а – первой цепи; б – второй цепи

Результатом является снижение материалоемкости сооружаемых двухцепных линий электропередачи за счёт меньшего расхода материала опор для воздушных линий и уменьшения прочности междофазной изоляции кабельных линий и, как следствие, снижение капиталовложений. Отрицательное воздействие воздушных линий на окружающую среду значительно снижается: уменьшается площадь отчуждаемых земель, а значит, и ширина просеки в лесных массивах. Кроме того, нулевое значение разности потенциалов между фазами линии электропередачи не зависит от изменяющейся величины тока линии. Поэтому отсутствует необходимость в установке сложных устройств поддержания нулевой разности напряжений между проводами линии, уменьшающих надёжность работы системы электропередачи и повышающих затраты на её строительство и эксплуатацию. Важным результатом является возможность использования электропередачи для питания как однофазных, так и трёхфазных потребителей.

Дальнейшее уменьшение напряжений между линейными проводами двухцепных электропередач обеспечивается при реализации технических решений, предложенных в [71п, 72п].

Электропередача переменного тока (рис.4.7) содержит источник 1 симметричных трёхфазных напряжений, потребителей 2, двухцепную линию электропередачи 3, фазосдвигающие устройства в виде установленных на передающем и приёмном конце каждой цепи трёхфазных трансформаторов 4-7, обмотки которых, соединённые с линией электропередачи на передающем конце и с шинами потребителя на приёмном конце, выполнены в виде групп согласно намотанных полуобмоток. Концы первой группы полуобмоток трансформаторов 4 и 5 обозначены через  $x, y, z$ , начала – соответственно через  $a', b', c'$ . Вторая группа полуобмоток трансформаторов 4 и 5 состоит из двух полуобмоток, концы которых обозначены через  $x', y'$ , начала – соответственно через  $a'', b''$ . Третья группа полуобмоток состоит из одной полуобмотки в трансформаторе 5, ее конец обозначен через  $x''$ , начало – через  $a'''$ . Обмотки, соединённые с источником 1, трансформаторов 4 и 5 обозначены:  $A, B, C$  – начала,  $X, Y, Z$  – соответственно концы.

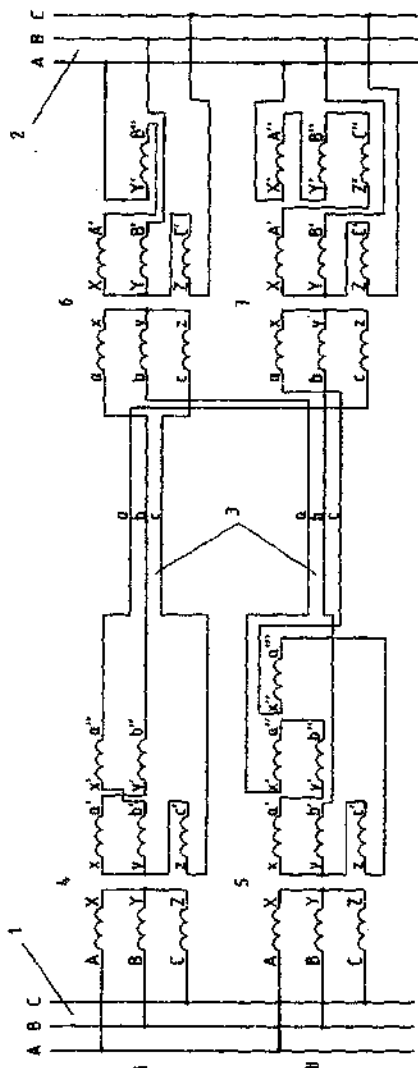


Рис. 4.7. Схема двухцепной электропередачи с сонаправленными векторами напряжений всех фаз каждой цепи и со сдвигом векторов напряжений фаз разных цепей, равном  $60^\circ$  (вариант 1)

Провода фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$  первой цепи I линии электропередачи соединены с выводами трансформатора 4  $a''$ ,  $b''$ ,  $z$  соответственно, а провода фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$  второй цепи II линии электропередачи — соответственно с выводами трансформатора 5  $x'$ ,  $b'$ ,  $x$ .

Таким образом, при передаче мощности от источника к потребителям трансформаторы 4 и 5 с дополнительными группами вторичных полуобмоток преобразуют напряжения из симметричной трёхфазной системы в две системы сонаправленных и равных по модулю векторов, которые приложены к соответствующим цепям линии электропередачи, причём сдвиг по фазе напряжений проводников разных цепей равен  $60^\circ$ . Число витков групп полуобмоток выбирается таким образом, чтобы фазные напряжения на выводах трансформаторов были одинаковыми по модулю.

Начала соединённых с линией электропередачи обмоток трансформаторов 6 и 7 приёмного конца обозначены через  $a$ ,  $b$  и  $c$ , а их концы — соответственно через  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Провод фазы  $a$  первой цепи линии электропередачи соединен с началом с обмотки трансформатора 7, провод фазы  $b$  первой цепи линии электропередачи соединен с началом  $a$  обмотки трансформатора 6, провод фазы  $c$  первой цепи линии электропередачи соединен с началом с обмотки трансформатора 6, провод фазы  $a$  второй цепи линии электропередачи соединен с началом  $b$  обмотки трансформатора 6, провод фазы  $b$  второй цепи линии электропередачи соединен с началом  $b$  обмотки трансформатора 7, провод фазы  $c$  второй цепи линии электропередачи соединен с началом  $a$  обмотки трансформатора 7.

Обмотки трансформаторов 6 и 7, соединённые с потребителем 2, выполнены в виде групп полуобмоток. Концы первой группы полуобмоток обозначены через  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , начала — соответственно через  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ . Вторая группа полуобмоток трансформатора 6 состоит из одной полуобмотки, конец которой обозначен через  $Y'$ , начало — через  $B''$ . Вторая группа полуобмоток трансформатора 7 состоит из трех полуобмоток, концы которых обозначены через  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ , начала — соответственно через  $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$ . Подбором числа витков этих полуобмоток обеспечивается равенство по модулю напряжений на выводах трансформаторов 6 и 7.

Таким образом, трансформаторы 6 и 7 на приёмном конце электропередачи восстанавливают трёхфазную симметричную систему напряжений. Разность потенциалов между проводами цепей линии электропередачи при этом равна нулю, расстояния между проводами воздушной линии значительно сокращены.

Работу трансформаторов 4-7 поясняют векторные диаграммы напряжений (рис.4.8 – 4.11). От источника 1 на трансформатор 4 подаётся симметричная трёхфазная система напряжений  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  (рис.4.8,а). На полуобмотках трансформатора 4 в точках  $a', b', z$  будет трансформированная система напряжений соответственно  $\bar{U}_a, \bar{U}_b, -\bar{U}_c$  (рис.4.8,б). Полуобмотка  $x'$  и  $a''$  при соединении точек  $b'$  и  $x'$  создаёт добавку напряжения, равную  $\bar{U}_a$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_{a1}$  на выводе  $a''$  трансформатора 4 и на фазе  $a$  первой цепи линии электропередачи будет равен:  $\bar{U}_{a1} = \bar{U}_b + \bar{U}_a = -\bar{U}_c$  (рис.4.8,в). Полуобмотка  $y'$  и  $b''$  при соединении точек  $a'$  и  $y'$  создаёт добавку напряжения, равную  $\bar{U}_b$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_{b1}$  на выводе  $b''$  трансформатора 4 и на фазе  $b$  первой цепи линии электропередачи будет равен:  $\bar{U}_{b1} = \bar{U}_a + \bar{U}_b = -\bar{U}_c$  (рис.4.8,г). На фазе  $c$  линии электропередачи будет напряжение  $\bar{U}_{c1} = -\bar{U}_c$  (рис.4.8,д). Таким образом, напряжения на всех проводниках первой цепи линии одинаковы и равны  $-\bar{U}_c$  (рис.4.8,е). От источника на трансформатор 5 подаётся симметричная трёхфазная система напряжений  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  (рис.4.9,а). Рассуждая аналогично (рис.4.9,б-д), придём к выводу, что напряжения на всех проводниках второй цепи линии одинаковы:  $\bar{U}_{a2} = \bar{U}_{b2} = \bar{U}_{c2} = \bar{U}_b$  (рис.4.9,е). Равенства напряжений по модулю на выводах трансформаторов 4 и 5 можно добиться корректировкой числа витков полуобмоток. На приёмном конце электропередачи на выводы  $a, b, c$  трансформатора 6 подаётся система напряжений соответственно  $\bar{U}_a = \bar{U}_{b1}, \bar{U}_b = \bar{U}_{a2}, \bar{U}_c = \bar{U}_{c1}$  (рис.4.10,а). В точках  $A', B', Z$  трансформатора 6 будет трансформированная система напряжений соответственно  $n \cdot \bar{U}_a, n \cdot \bar{U}_b, -n \cdot \bar{U}_c$  ( $n$  – коэффициент трансформации) (рис.4.10,б). Полуобмотка  $Y'$  и  $B''$  при соединении

точек А' и В'' создаёт добавку напряжения  $-n \cdot \bar{U}_b$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_A$  на выводе Y' трансформатора 6 будет равен:  $\bar{U}_A = n \cdot \bar{U}_a - n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.10,в). На выводах В' и Z трансформатора 6 будут соответственно векторы напряжений  $\bar{U}_B = -n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.10,г) и  $\bar{U}_C = n \cdot \bar{U}_c$  (рис.4.10,д). Таким образом, векторы  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$  (рис.4.10,е) образуют симметричную систему напряжений.

На выводы а, b, с трансформатора 7 подаётся система напряжений соответственно  $\bar{U}_a = \bar{U}_{c2}$ ,  $\bar{U}_b = \bar{U}_{b2}$ ,  $\bar{U}_c = \bar{U}_{a1}$  (рис.4.11,а). В точках А', В', Z трансформатора 7 будет трансформированная система напряжений соответственно  $n \cdot \bar{U}_a$ ,  $n \cdot \bar{U}_b$ ,  $-n \cdot \bar{U}_c$  (рис.4.11,б). Рассуждая аналогично, придём к выводу, что на выводах Х', В' и Z трансформатора 7 будет симметричная система напряжений соответственно  $\bar{U}_A = n \cdot \bar{U}_a + n \cdot \bar{U}_c - n \cdot \bar{U}_b - n \cdot \bar{U}_a$  (рис.4.11,в),  $\bar{U}_B = n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.11,г) и  $\bar{U}_C = -n \cdot \bar{U}_c$  (рис.4.11,д). Таким образом, векторы  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$  (рис.4.11,е) образуют симметричную систему напряжений. Равенства напряжений по модулю на выводах трансформаторов 6 и 7 можно добиться корректировкой числа витков полуобмоток.

Возможность осуществления данного технического решения связана с возможностью создания трансформаторов на передающем и приёмном конце, которые позволяют получить систему сонаправленных векторов напряжений в начале электропередачи и преобразовывать её в симметричную трёхфазную систему напряжений в конце электропередачи. Такие трансформаторы можно изготовить в заводских условиях путём намотки на магнитопровод дополнительных вторичных полуобмоток.

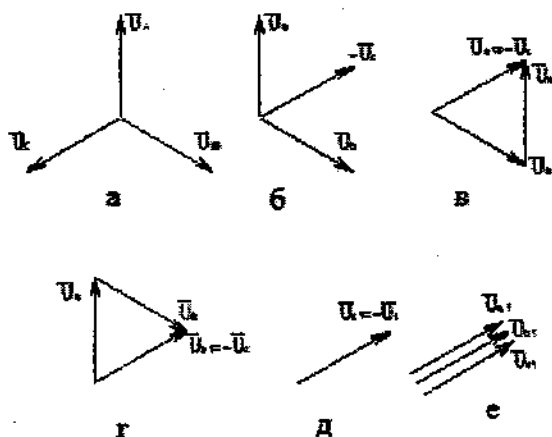


Рис. 4.8. Векторные диаграммы напряжений первой цепи на передающем конце линии: а — на шинах передающей подстанции; б — на полуобмотках трансформатора; в — на фазе а линии; г — на фазе б линии; д — на фазе с линии; е — на всех фазах

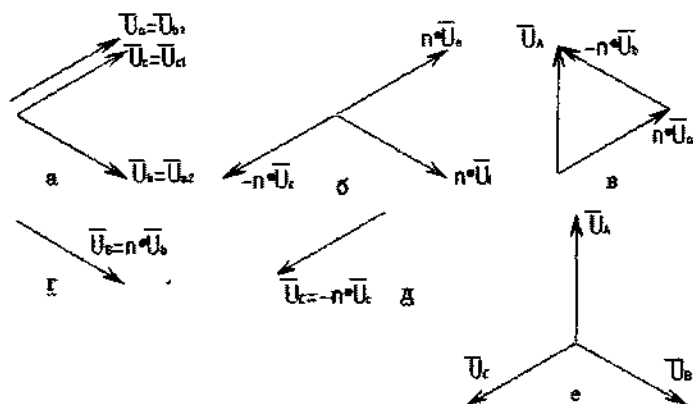


Рис. 4.9. Векторные диаграммы напряжений второй цепи на передающем конце линии: а — на шинах передающей подстанции; б — на полуобмотках трансформатора 5; в — на фазе а линии; г — на фазе б линии; д — на фазе с линии; е — на всех фазах



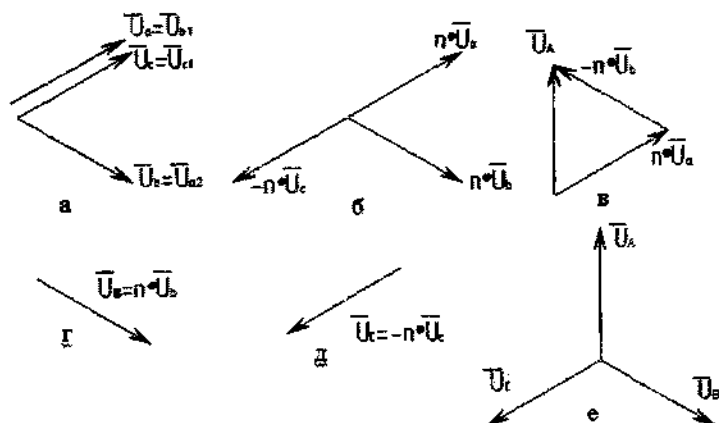


Рис. 4.10. Векторные диаграммы напряжений первой цепи на приемном конце линии: а – на шинах передающей подстанции; б – на полуобмотках трансформатора; в – на фазе а линии; г – на фазе b линии; д – на фазе с линии; е – на всех фазах

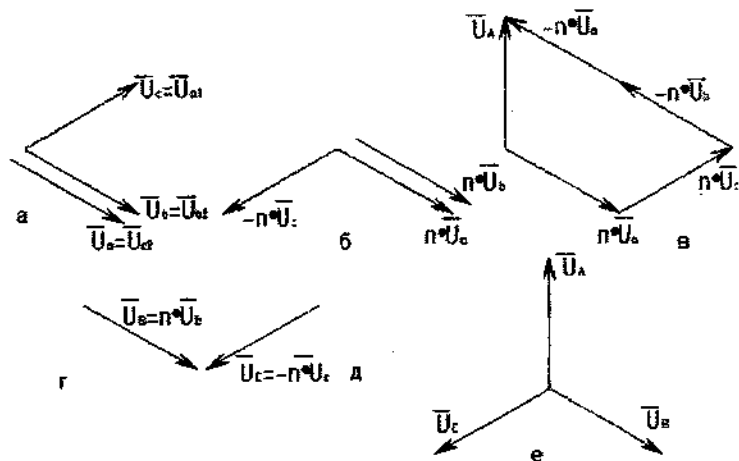


Рис. 4.11. Векторные диаграммы напряжений второй цепи на передающем конце линии: а – на шинах передающей подстанции; б – на полуобмотках трансформатора 5; в – на фазе а линии; г – на фазе b линии; д – на фазе с линии; е – на всех фазах

Таким образом, благодаря применению на передающем и приёмном концах двухцепной электропередачи фазосдвигающих устройств, выполненных на основе трёхфазных трансформаторов с дополнительными полуобмотками, а также благодаря оригинальному соединению начал и концов полуобмоток друг с другом и с фазами линии электропередачи удаётся добиться нулевой разности потенциалов между проводами линии электропередачи, а на приёмном конце линии получить симметричную трёхфазную систему напряжений. Результатом является снижение материалоёмкости сооружаемых двухцепных линий электропередачи за счёт меньшего расхода материала опор для воздушных линий и уменьшения прочности междупазной изоляции кабельных линий и, как следствие, снижение капиталовложений. Отрицательное воздействие воздушных линий на окружающую среду значительно снижается: уменьшается площадь отчуждаемых земель, а значит, и ширина просеки в лесных массивах. Кроме того, нулевое значение разности потенциалов между фазами линии электропередачи не зависит от изменяющейся величины тока линии. Поэтому отсутствует необходимость в установке сложных устройств поддержания нулевой разности напряжений между проводами линии, уменьшающих надёжность работы системы электропередачи и повышающих затраты на её строительство и эксплуатацию.

В другом варианте электропередача (рис.4.12) содержит источник 1 симметричных трёхфазных напряжений, потребителей 2, двухцепную линию электропередачи 3, фазосдвигающие устройства в виде установленных на передающем и приёмном конце каждой цепи трёхфазных трансформаторов 4-7, обмотки которых, соединённые с линией электропередачи на передающем конце и с шинами потребителя на приёмном конце, выполнены в виде групп согласно намотанных полуобмоток.

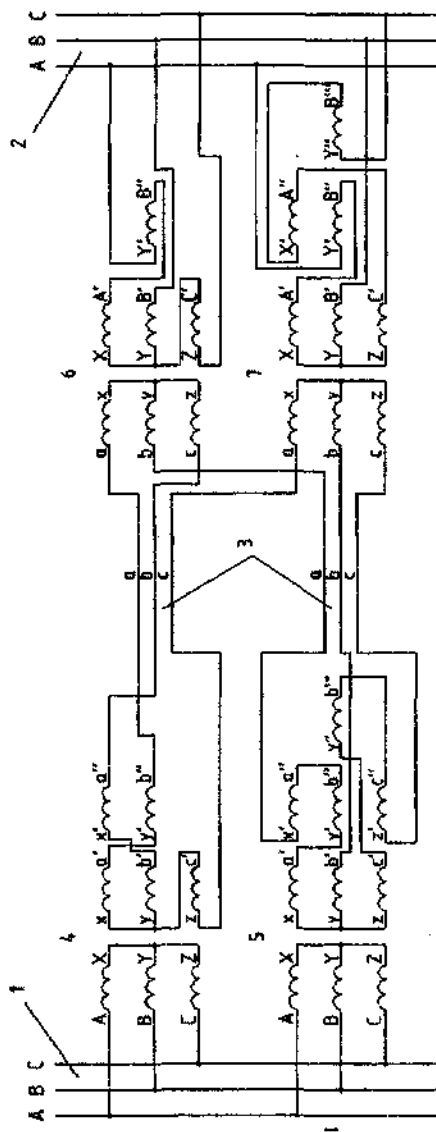


Рис. 4.12. Схема двухцепной электропередачи с сонаправленными векторами напряжений всех фаз каждой цепи и со сдвигом векторов напряжений фаз разных цепей, равном  $60^\circ$  (вариант 2)

Концы первой группы полуобмоток трансформаторов 4 и 5 обозначены через  $x, y, z$ , начала — соответственно через  $a', b', c'$ . Вторая группа полуобмоток трансформатора 4 состоит из двух полуобмоток, концы которых обозначены через  $x', y'$ , начала — соответственно через  $a'', b''$ . Вторая группа полуобмоток трансформатора 5 состоит из трех полуобмоток, концы которых обозначены через  $x', y', z'$ , начала — соответственно через  $a'', b'', c''$ . Третья группа полуобмоток состоит из одной полуобмотки в трансформаторе 5, ее конец обозначен через  $y''$ , начало — через  $b'''$ . Обмотки, соединённые с источником 1, трансформаторов 4 и 5 обозначены:  $A, B, C$  — начала,  $X, Y, Z$  — соответственно концы. Провода фаз  $a, b$  и  $c$  первой цепи I линии электропередачи соединены с выводами трансформатора 4  $b'', a'', z$  соответственно, а провода фаз  $a, b$  и  $c$  второй цепи II линии электропередачи — соответственно с выводами трансформатора 5  $x', b', z'$ .

Таким образом, при передаче мощности от источника к потребителям трансформаторы 4 и 5 с дополнительными группами вторичных полуобмоток преобразуют напряжения из симметричной трёхфазной системы в две системы сонаправленных и равных по модулю векторов, которые приложены к соответствующим цепям линии электропередачи, причём сдвиг по фазе напряжений проводников разных цепей равен  $60^\circ$ . Число витков групп полуобмоток выбирается таким образом, чтобы фазные напряжения на выводах трансформаторов были одинаковыми по модулю.

Начала соединённых с линией электропередачи обмоток трансформаторов 6 и 7 приёмного конца обозначены через  $a, b$  и  $c$ , а их концы — соответственно через  $x, y$  и  $z$ . Провод фазы  $a$  первой цепи линии электропередачи соединен с началом  $a$  обмотки трансформатора 6, провод фазы  $b$  первой цепи линии электропередачи соединен с началом  $c$  обмотки трансформатора 6, провод фазы  $c$  первой цепи линии электропередачи соединен с началом  $a$  обмотки трансформатора 7, провод фазы  $a$  второй цепи линии электропередачи соединен с началом  $b$  обмотки трансформатора 6, провод фазы  $b$  второй цепи линии электропередачи соединен с началом  $b$  обмотки трансформатора 7.

тора 7, провод фазы с второй цепи линии электропередачи соединен с началом с обмотки трансформатора 7.

Обмотки трансформаторов 6 и 7, соединённые с потребителем 2, выполнены в виде групп полуобмоток. Концы первой группы полуобмоток обозначены через X, Y, Z, начала – соответственно через A', B', C'. Вторая группа полуобмоток трансформатора 6 состоит из одной полуобмотки, конец которой обозначен через Y', начало – через B''. Вторая группа полуобмоток трансформатора 7 состоит из двух полуобмоток, концы которых обозначены через X', Y', начала – соответственно через A'', B''. Третья группа полуобмоток трансформатора 7 состоит из одной полуобмотки, конец которой обозначен Y'', начало – соответственно через B'''. Подбором числа витков этих полуобмоток обеспечивается равенство по модулю напряжений на выводах трансформаторов 6 и 7.

Таким образом, трансформаторы 6 и 7 на приёмном конце электропередачи восстанавливают трёхфазную симметричную систему напряжений. Разность потенциалов между проводами цепей линии электропередачи при этом равна нулю, расстояния между проводами воздушной линии значительно сокращены.

Работу трансформаторов 4-7 поясняют векторные диаграммы напряжений. От источника 1 на трансформатор 4 подаётся симметричная трёхфазная система напряжений  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  (рис.4.13,а). На полуобмотках трансформатора 4 в точках a', b', z будет трансформированная система напряжений соответственно  $\bar{U}_a, \bar{U}_b, -\bar{U}_c$  (рис.4.13, б). Полуобмотка y' и b'' при соединении точек a' и y' создаёт добавку напряжения, равную  $\bar{U}_b$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_{a1}$  на выводе b'' трансформатора 4 и на фазе a первой цепи линии электропередачи будет равен:  $\bar{U}_{a1} = \bar{U}_a + \bar{U}_b = -\bar{U}_c$  (рис.4.13,в). Полуобмотка x' и a'' при соединении точек b' и x' создаёт добавку напряжения, равную  $\bar{U}_a$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_{b1}$  на выводе a'' трансформатора 4 и на фазе b первой цепи линии электропередачи будет равен:  $\bar{U}_{b1} = \bar{U}_b + \bar{U}_a = -\bar{U}_c$  (рис.4.13,г). На фазе c линии электропередачи будет напряжение  $\bar{U}_{c1} = -\bar{U}_c$  (рис.4.13,д). Таким образом,

напряжения на всех проводниках первой цепи линии одинаковы и равны  $-\bar{U}_c$  (рис.4.13,е).

От источника на трансформатор 5 подаётся симметричная трёх-фазная система напряжений  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  (рис.4.14,а). Рассуждая аналогично (рис.4.14,б, рис.4.14,в, рис.4.14,г, рис.4.14,д), придём к выводу, что напряжения на всех проводниках второй цепи линии одинаковы:  $\bar{U}_{a2} = \bar{U}_{b2} = \bar{U}_{c2} = \bar{U}_b$  (рис.4.14,е). Равенства напряжений по модулю на выводах трансформаторов 4 и 5 можно добиться корректировкой числа витков полуобмоток.

На приёмном конце электропередачи на выводы а, б, с трансформатора 6 подаётся система напряжений соответственно  $\bar{U}_a = \bar{U}_{a1}, \bar{U}_b = \bar{U}_{a2}, \bar{U}_c = \bar{U}_{b1}$  (рис.4.15,а). В точках А', В', Z трансформатора 6 будет трансформированная система напряжений соответственно  $n \cdot \bar{U}_a, n \cdot \bar{U}_b, -n \cdot \bar{U}_c$  ( $n$  – коэффициент трансформации) (рис.4.15,б). Полуобмотка Y' и В'' при соединении точек А' и В'' создаёт добавку напряжения  $-n \cdot \bar{U}_b$ . Вектор напряжения  $\bar{U}_A$  на выводе Y' трансформатора 6 будет равен:  $\bar{U}_A = n \cdot \bar{U}_a - n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.15,в). На выводах В' и Z трансформатора 6 будут соответственно векторы напряжений  $\bar{U}_B = n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.15,г) и  $\bar{U}_C = -n \cdot \bar{U}_c$  (рис.4.15,е). Таким образом, векторы  $\bar{U}_A, \bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$  (рис.4.15,е) образуют симметричную систему напряжений.

На выводы а, б, с трансформатора 7 подаётся система напряжений соответственно  $\bar{U}_a = \bar{U}_{c1}, \bar{U}_b = \bar{U}_{b2}, \bar{U}_c = \bar{U}_{c2}$  (рис.4.16,а). В точках А', В', С' трансформатора 7 будет трансформированная система напряжений соответственно  $n \cdot \bar{U}_a, n \cdot \bar{U}_b, n \cdot \bar{U}_c$  (рис.4.16,б). Рассуждая аналогично, придём к выводу, что на выводах Y', В' и Y'' трансформатора 7 будет симметричная система напряжений соответственно  $\bar{U}_A = n \cdot \bar{U}_a - n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.16,в),  $\bar{U}_B = n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.16,г) и  $\bar{U}_C = n \cdot \bar{U}_c - n \cdot \bar{U}_a - n \cdot \bar{U}_b$  (рис.4.16,д). Таким образом, векторы  $\bar{U}_A, \bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$  (рис.4.16,е) образуют симметричную систему напряжений. Равенства напряжений по модулю на выводах трансформа-

торов 6 и 7 можно добиться корректировкой числа витков полуобмоток.

Возможность осуществления данного технического решения связана с возможностью создания трансформаторов на передающем и приёмном конце, которые позволяют получить систему сонаправленных векторов напряжений в начале электропередачи и преобразовывать её в симметричную трёхфазную систему напряжений в конце электропередачи. Такие трансформаторы можно изготовить в заводских условиях путём намотки на магнитопровод дополнительных вторичных полуобмоток.

Таким образом, и в этом варианте электропередачи удаётся добиться нулевой разности потенциалов между проводами линии электропередачи, а на приёмном конце линии получить симметричную трёхфазную систему напряжений. В результате появляется возможность значительного упрощения конструктивного исполнения линии электропередачи за счет существенного уменьшения расстояний между проводами фаз каждой цепи и уменьшения расстояния между проводами, относящимся к разным цепям.

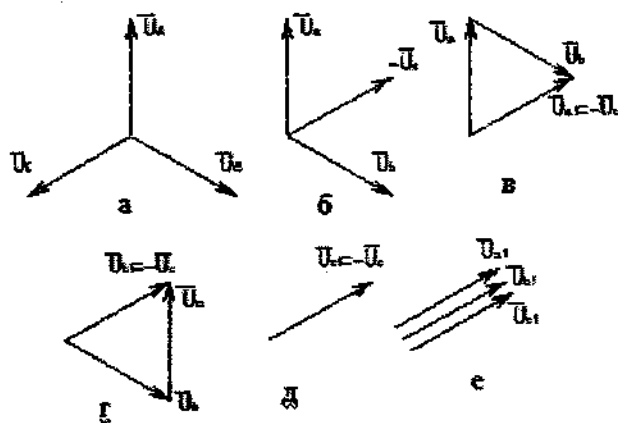


Рис. 4.13. Векторные диаграммы напряжений первой цепи на передающем конце линии: а — на шинах передающей подстанции; б — на полуобмотках трансформатора; в — на фазе а линии; г — на фазе в линии; д — на фазе с линии; е — на всех фазах

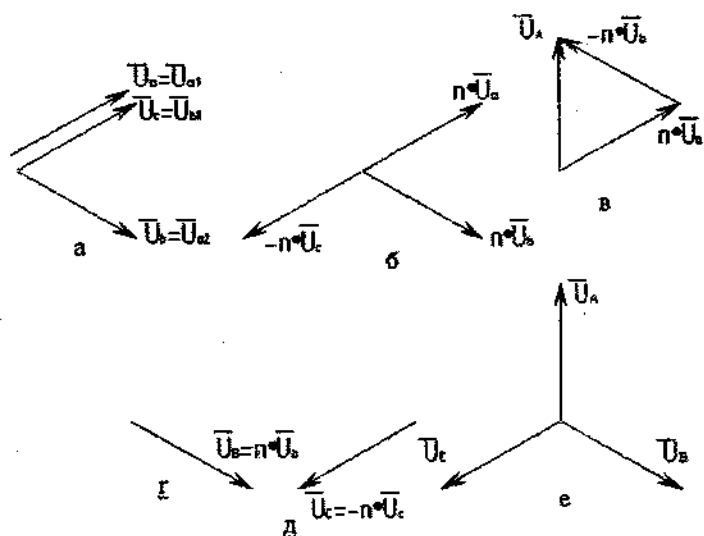


Рис. 4.14. Векторные диаграммы напряжений второй цепи на передающем конце линии: а – на шинах передающей подстанции; б – на полуобмотках трансформатора; в – на фазе а линии; г – на фазе б линии; д – на фазе с линии; е – на всех фазах

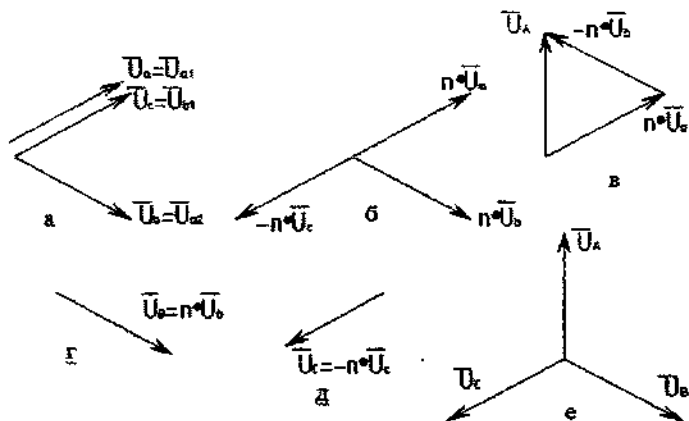


Рис. 4.15. Векторные диаграммы напряжений первой цепи на приемном конце линии: а – на входе трансформатора; б – на трансформаторе после трансформации; в – на выводе фазы а; г – на выводе фазы б; д – на выводе фазы с; е – на шинах подстанции



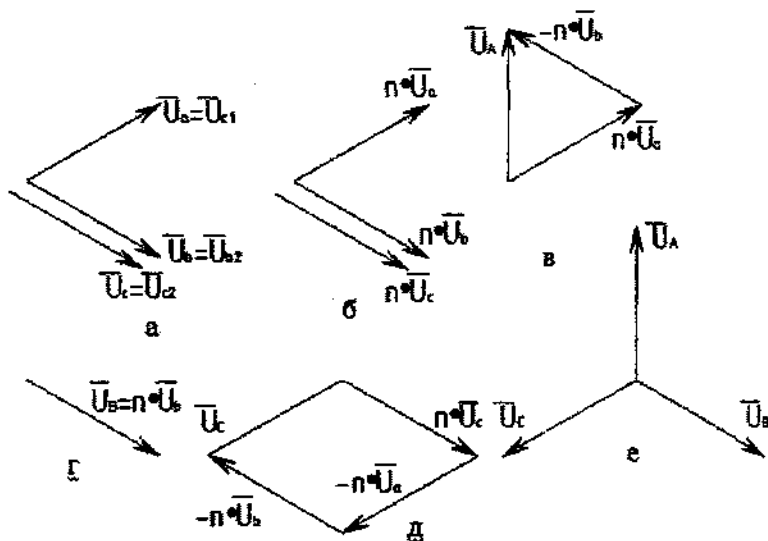


Рис. 4.16. Векторные диаграммы напряжений второй цепи на приемном конце линии: а – на входе трансформатора; б – на трансформаторе после трансформации; в – на выводе фазы а; г – на выводе фазы б; д – на выводе фазы с; е – на шинах подстанции

### 4.3. Одноцепные системы передачи электроэнергии

К одному из первых технических решений одноцепных электропередач с уменьшенным количеством линейных проводов следует отнести систему “два провода - земля” (ДПЗ). В этой системе провода одной из фаз по концам заземляются (рис. 4.17). В результате третьей фазой служит земля. В таких системах расход проводникового материала сокращается на 1/3. При этом уменьшается количество опор и линейных изоляторов. Поскольку одна из фаз соединена с землей, напряжения на других фазах относительно земли равны линейному. Следует также отметить, что влияние на линии связи в таких системах значительно выше, чем при использовании обычных трехфазных линий.

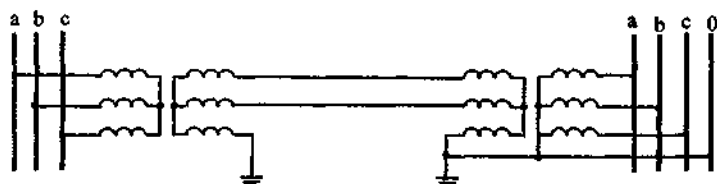


Рис. 4.17. Схема системы "два провода - земля"

Принципиально иной подход для уменьшения количества линейных проводов и уменьшения расстояний между ними реализуется в [73п, 74п]. Его суть заключается в том, что с помощью специальных устройств осуществляют фазовый сдвиг векторов напряжений каждой из двух фаз относительно вектора напряжения третьей фазы. В результате – напряжения между отдельными парами линейных проводов уменьшаются, что позволяет снизить расстояния между ними.

Принципиальная схема электропередачи, реализующая сдвиг векторов напряжений двух фаз относительно вектора напряжений третьей фазы, изображена на рис. 4.18.

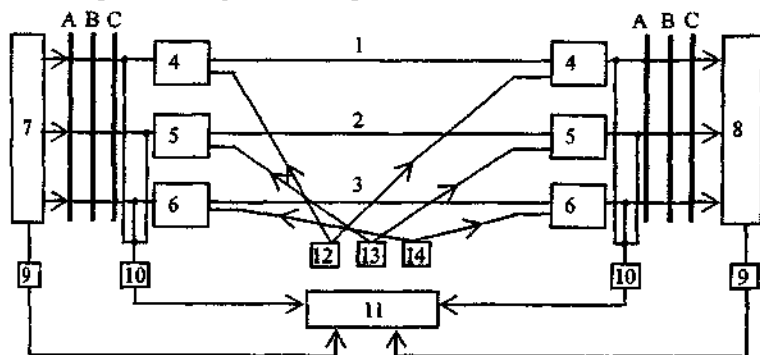


Рис. 4.18. Принципиальная электрическая схема одноцепной электропередачи переменного тока с независимым изменением фазового сдвига напряжений в каждой фазе

В ней провода 1 - 3 фаз трехфазной линии электропередачи в начале и конце присоединены к трехфазным шинам А, В и С с помощью независимых фазосдвигающих устройств 4 - 6 в каждой фазе,

осуществляющих фазовый сдвиг векторов напряжений соответствующих фаз. Со стороны передающей системы 7 устройства 4 - 6 обеспечивают на линии сдвиг векторов напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  различных фаз друг относительно друга. В зависимости от режима нагрузки линии электропередачи угол между любой парой векторов может быть в пределах 0-180°. При этом с помощью устройств 4-6 может одновременно изменяться также и величина векторов напряжений каждой из фаз линии.

С помощью фазосдвигающих устройств 4 - 6, установленных в конце линии электропередачи, обеспечивается сдвиг векторов напряжений в обратную сторону, в результате чего на шины приемной системы 8 подается симметричная или несимметричная система напряжений.

При таких независимых фазосдвигающих устройствах существенным является то, что они обеспечивают изменение положения вектора напряжений каждой фазы независимо от положения векторов напряжений других фаз.

Электропередача может быть выполнена с фиксированными фазовыми сдвигами напряжений двух фаз относительно напряжений третьей фазы. Наибольшая пропускная способность электропередачи обеспечивается в том случае, когда напряжения двух фаз сдвинуты относительно напряжения третьей фазы на 180°, т.е. по сравнению с симметричной трехфазной системой напряжений напряжение одной фазы сдвинуто на +60°, а другой - на -60°.

Электропередача может быть выполнена также с регулируемыми фазовыми сдвигами напряжений различных фаз.

Изменение фазового сдвига напряжений различных фаз линии электропередачи может быть непрерывным или дискретным.

Для независимого изменения фазового сдвига напряжений в каждой фазе линия снабжена системой автоматического управления режимом, в которую входят измерительно-информационные датчики 9 о параметрах передающей 7 и приемной 8 систем, датчики 10 о параметрах режима линии электропередачи, устройство 11 выработки управляющих воздействий и устройства 12-14 синхронного управления фазосдвигающими устройствами по концам линии электропередачи. Отличительным является то, что каждое из устройств 12-14 воздействует на фазосдвигающее устройство соответствующей одной фазы. Так, например, устройство 12 синхронного управления

воздействует на фазосдвигающие устройства 4, установленные по концам линии в фазе А.

На рис. 4.19 показан вариант электропередачи, в которой фазосдвигающие устройства 4 и 6 установлены только в двух фазах А и С линии электропередачи и которая может связывать между собой как две разные системы (например, передающую 7 и приемную 8), так и узлы нагрузок и источники питания одной системы. В систему автоматического управления режимом входят измерительно-информационные датчики 10 о параметрах режима линии электропередачи, устройства 15 и 16 выработки управляющих воздействий, установленные на каждом конце линии электропередачи, и устройства 17 и 18 индивидуального управления фазосдвигающими устройствами 4 и 6 на передающем конце и устройства 19 и 20 индивидуального управления фазосдвигающими устройствами 4 и 6 на приемном конце. Устройства 15 и 16 работают по единым алгоритмам.

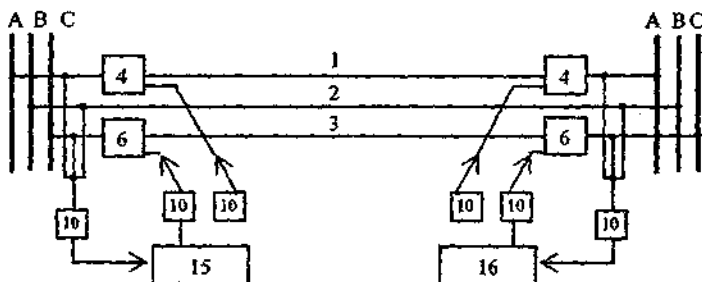


Рис. 4.19. Схема системы электропередачи с фазосдвигающими устройствами в двух фазах

На рис. 4.20 изображен вариант электропередачи, у которой выходы фазосдвигающих устройств 4 и 6 фаз А и С со стороны линии электропередачи объединены в общую точку и присоединены к проводам 1, 3, находящимся по одним напряжением. В этом случае изменение фазового сдвига между проводами 2 и 1, 3 сближенных фаз В и А, С обеспечивается с помощью фазосдвигающих устройств 5. При фиксированном угле фазового сдвига между векторами напряжений сближенных фаз В и А, С электропередача может быть вы-

полнена без фазосдвигающих устройств 5, установленных в фазе В, а провода 1 и 3 предельно сближены.

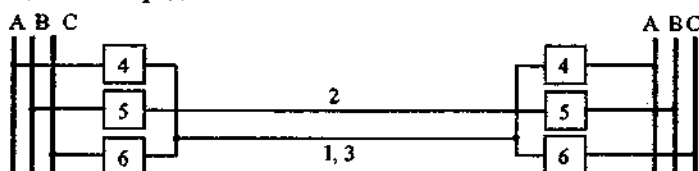


Рис. 4.20. Схема системы электропередачи двумя объединенными линейными проводами

Устройство для сдвига векторов напряжений различных фаз может быть создано с помощью специальных трансформаторов.

На рис. 4.21 показана схема электропередачи, в которой к шинам 1 передающей системы через фазосдвигающее устройство 2 подключены провода 3 линии электропередачи.

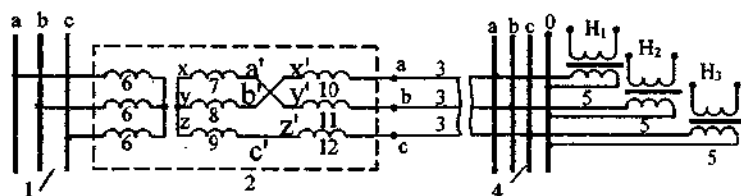


Рис. 4.21. Схема электропередачи переменного тока с фазосдвигающим устройством на передающем конце

На приемном конце линии провода соединяются с шинами 4 приемной системы, к которым подключены однофазные трансформаторы 5, питающие однофазную нагрузку  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ .

Фазосдвигающее устройство. 2, установленное в начале линии электропередачи, выполнено на основе магнитной системы обычного трехфазного трехстержневого трансформатора. Обмотки 6 на стороне одного из номинальных напряжений подключены к шинам 1 передающей системы. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из двух групп полуобмоток: 7 - 9 (полуобмотки первой группы) и 10 - 12 (полуобмотки второй группы). Полуобмотки 7 и 10 составляют фазу А трансформатора, полу-

обмотки 8 и 11 - фазу В, полуобмотки 9 и 12 - фазу С. Концы полуобмоток 7 - 9 обозначены через  $x, y, z$ , а начала этих полуобмоток - соответственно  $a', b', c'$ . Концы полуобмоток 10 - 12 обозначены через  $x', y', z'$ , а начала этих полуобмоток - соответственно  $a, b, c$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на рис. 4.21 изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Так, например, в фазе А начала  $a'$  и  $a$  полуобмоток 7 и 10 расположены по одну сторону от их концов  $x$  и  $x'$ . Концы  $x, y, z$  трех полуобмоток 7 и 9 разных фаз первой группы соединены в "звезду". Начало  $b'$  полуобмотки 8 фазы В с концом  $x'$  полуобмотки 10 фазы А трансформатора. Начало  $a$  полуобмотки 7 фазы А соединено с концом  $y'$  полуобмотки 11 фазы В трансформатора. И, наконец, начало  $c'$  полуобмотки 9 фазы С соединено с концом  $z'$  полуобмотки 12 фазы С. К началам  $a, b, c$  полуобмоток 10 - 12, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены провода 3 линии электропередачи.

Отличием схемы электропередачи, приведенной на рис. 4.22, является то, что линия электропередачи выполнена двухпроводной. Провод 3' - соединяется с выводом С фазосдвигающего устройства, провод 3'' - с выводами  $a$  и  $b$ , объединенными в общую точку.

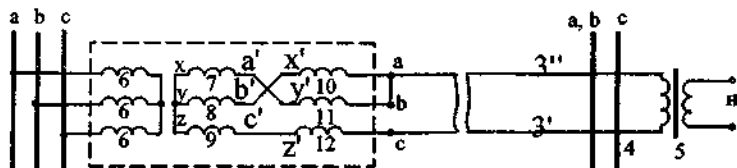


Рис. 4.22. Схема одноцепной трехфазной электропередачи с двумя линейными проводами

На питающую обмотку 6 фазосдвигающего устройства 2 подается симметричная система напряжений, изображенная на рис. 4.23,а. Векторы  $b$  и  $c$  напряжений фаз В и С сдвинуты соответственно на  $120^\circ$  и  $240^\circ$  относительно вектора  $a$  фазы А и равны с ним по модулю.

На рис. 4.23,б,в изображены векторные диаграммы напряжений на выводах  $a, b, c$  фазосдвигающего устройства 2.

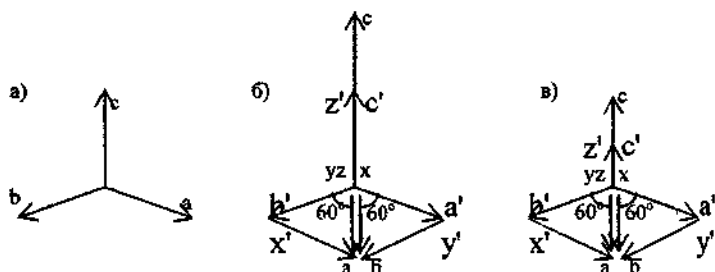


Рис. 4.23. Векторные диаграммы напряжений: а — на шинах передающей подстанции; б, в — на выводах фазосдвигающего устройства

Полуобмотки 7-9 фазосдвигающего устройства 2, соединенные в "звезду", дают симметричную систему напряжений с векторами  $xa'$ ,  $yb'$ ,  $zc'$ . Согласно рис. 4.21 и 4.22 начало  $a'$  полуобмотки 7 электрически соединено с концом  $y'$  полуобмотки 11. Поэтому вектор  $y'b'$  направлен из точки  $a'$  параллельно вектору  $yb'$ . Начало  $b'$  полуобмотки 8 соединено с концом  $x'$  полуобмотки 10. Поэтому вектор  $x'a'$  направлен из точки  $b'$  параллельно вектору  $xa'$ . Начало  $c'$  полуобмотки 9 соединено с концом  $z'$  полуобмотки 12. Поэтому вектор  $z'c'$  направлен из точки  $c'$  по направлению вектора  $zc'$ . Сдвиг векторов  $xa'$  и  $yb'$  равен  $120^\circ$ .

Угол между векторами  $yb'$  и  $x'a'$ ,  $xa'$  и  $y'b'$  равен  $60^\circ$ . Величины векторов напряжений  $xb'$ ,  $ya'$ ,  $zc'$  разных фаз на выводах фазосдвигающего устройства зависят от соотношения чисел витков в полуобмотках 7 - 12. На рис. 4.23, а изображен вариант диаграммы, в котором число витков во всех полуобмотках одинаково. Для диаграммы на рис. 4.23, б числа витков таковы, что величины векторов напряжений  $xb'$ ,  $ya'$  и  $zc'$  равны. В результате вектор напряжения  $zc'$  на выводах фазосдвигающего устройства 2 сдвинут относительно векторов напряжения  $xb'$  и  $ya'$  на  $180^\circ$  (рис. 4.23, а, б). При этом общая индуктивность линии электропередачи, подключенной к фазосдвигающему устройству, становится наименьшей, емкость наибольшей, волновое сопротивление наименьшим и пропускная способность

электропередачи достигает максимальной величины. Наибольший эффект имеет место в тех случаях, когда провода сближены на минимально допустимое расстояние по условиям диэлектрической прочности воздушного промежутка.

Как следует из диаграмм на рис. 4.23, а, б, потенциалы на выводах а и б фазосдвигающего устройства 2 относительно нулевой точки хуз одинаковы. Это дает возможность объединить выводы а и б и выполнить линию электропередачи двухпроводной (рис. 4.22).

Недостатком электропередачи является то, что она на приемном конце не позволяет подключать трехфазных потребителей.

Дальнейшее развитие одноцепных электропередач с изменением фазового сдвига получило в [70п, 75п, 76п].

На рис. 4.24 изображена схема электропередачи [70п], в которой к источнику 1 симметричных трехфазных напряжений передающей системы через фазосдвигающее устройство 2 подключены провода 3 линии электропередачи.

На приемном конце линии электропередачи провода 3 соединены с фазосдвигающим устройством 4, выводы которого питают фазы потребителей 5. Фазосдвигающее устройство 2, установленное в начале линии электропередачи, выполнено на основе магнитной системы обычного трехфазного трансформатора. Обмотки 6 на стороне одного из номинальных напряжений подключены к источнику 1 симметричных трехфазных напряжений передающей системы. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из трех групп полуобмоток: 7 – 9 (полуобмотки первой группы), 10 – 12 (полуобмотки второй группы) и 13 – 15 (полуобмотки третьей группы). Полуобмотки 7, 10 и 13 составляют фазу а трансформатора, полуобмотки 8, 11 и 14 – фазу б трансформатора, полуобмотки 9, 12 и 15 – фазу с трансформатора. Концы полуобмоток 7 – 9 обозначены через  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ , а начала этих полуобмоток – соответственно  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ . Концы полуобмоток 10 – 12 обозначены через  $x''$ ,  $y''$ ,  $z''$ , а начала этих полуобмоток – соответственно через  $a''$ ,  $b''$ ,  $c''$ . Концы полуобмоток 13 – 15 обозначены через  $x'''$ ,  $y'''$ ,  $z'''$ , а начала этих полуобмоток – соответственно через  $a'''$ ,  $b'''$ ,  $c'''$ . Полуобмотки 7 – 9, 10, 11, 13, 14 соединены согласно, а 12 и 15 – встречно. Концы  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  трех полуобмоток 7 – 9 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $a'$  полуобмотки 7 фазы а соединено с концом  $x''$  полуобмотки 10 фазы а. Начало  $b'$  полуобмотки 8 фазы б соединено с концом  $y''$



полуобмотки 11 фазы b. Начало с' полуобмотки 9 фазы с соединено с началом с''' полуобмотки 15 фазы с. Начало а" полуобмотки 10 фазы а соединено с концом у''' полуобмотки 14 фазы b. Начало b" полуобмотки 11 фазы b соединено с концом х''' полуобмотки 13 фазы а. Конец z''' полуобмотки 15 фазы с соединен с началом с" полуобмотки 12 фазы с. К началам а'', b''' и концу z" полуобмоток 13, 14 и 12, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены провода 3 линии электропередачи.

На приемном конце провода 3 линии электропередачи соединены с обмотками 16 одного из номинальных напряжений фазосдвигающего устройства 4, выполненного на основе магнитной системы трехфазного трансформатора, которые соединены в «звезду». Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из трех групп полуобмоток: 17 – 19 (полуобмотки первой группы), 20 – 22 (полуобмотки второй группы) и 23 – 25 (полуобмотки третьей группы). Полуобмотки 17, 20 и 23 составляют фазу А трансформатора, полуобмотки 18, 21 и 24 – фазу В трансформатора, полуобмотки 19, 22 и 25 – фазу С трансформатора. Концы полуобмоток 17 – 19 обозначены через X', Y', Z', а начала этих полуобмоток – соответственно А', В', С'. Концы полуобмоток 20 – 22 обозначены через X'', Y'', Z'', а начала этих полуобмоток – соответственно через А'', В'', С''. Концы полуобмоток 23 – 25 обозначены через X''', Y''', Z''', а начала этих полуобмоток – соответственно через А''', В''', С'''. Полуобмотки 17 - 21 соединены согласно, а 22 - 25 - встречно. Концы X', Y', Z' трех полуобмоток 17 – 19 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало А' полуобмотки 17 фазы А соединено с концом X" полуобмотки 20 фазы А. Начало В' полуобмотки 18 фазы В соединено с концом Y" полуобмотки 21 фазы В. Начало С' полуобмотки 19 фазы С соединено с началом С''' полуобмотки 25 фазы С. Начало А" полуобмотки 20 фазы А соединено с началом В''' полуобмотки 24 фазы В. Начало В" полуобмотки 21 фазы В соединено с началом А''' полуобмотки 23 фазы А. Конец Z''' полуобмотки 25 фазы С соединен с началом С" полуобмотки 22 фазы С. К концам X''', Y''' и Z''' полуобмоток 23, 24 и 22, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены фазы потребителей 5.

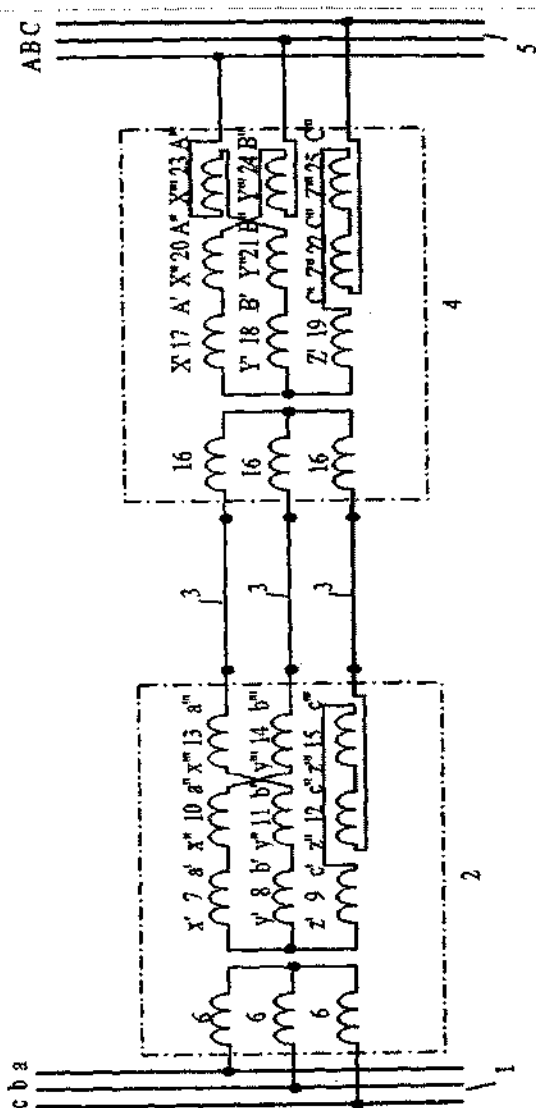


Рис. 4.24. Схема однофазной электропередачи со сдвигом векторов напряжений каждой из двух фаз относительно третьей фазы на угол  $30^\circ$ .

На питающую обмотку 6 фазосдвигающего устройства 2 подается симметричная система напряжений, изображенная на рис. 4.25, а. Векторы  $\vec{b}$  и  $\vec{c}$  напряжений фаз  $b$  и  $c$  сдвинуты соответственно на  $120^\circ$  и  $240^\circ$  относительно вектора  $\vec{a}$  фазы  $a$  и равны с ним по модулю.

На рис. 4.25, б изображена векторная диаграмма напряжений на выводах  $a''$ ,  $b''$ ,  $z''$  фазосдвигающего устройства 2.

Полуобмотки 7 – 9 фазосдвигающего устройства 2, соединенные в «звезду» дают симметричную систему напряжений с векторами  $x'a'$ ,  $y'b'$  и  $z'c'$ . Согласно рис. 4.24 начало  $a'$  полуобмотки 7 электрически соединено с концом  $x''$  полуобмотки 10, поэтому вектор  $x'a''$  направлен из точки  $a'$  параллельно вектору  $x'a'$ . Начало  $b'$  полуобмотки 8 соединено с концом  $y''$  полуобмотки 11, поэтому вектор  $y'b''$  направлен из точки  $b'$  параллельно вектору  $y'b'$ . Начало  $c'$  полуобмотки 9 соединено с началом  $c'''$  полуобмотки 15, поэтому вектор  $z''c'''$  противонаправлен из точки  $c'$  параллельно вектору  $z'c'$ . Начало  $a''$  полуобмотки 10 соединено с концом  $y'''$  полуобмотки 14, поэтому вектор  $y''b'''$  направлен из точки  $a''$  параллельно вектору  $y''b''$ . Начало  $b''$  полуобмотки 11 соединено с концом  $x'''$  полуобмотки 13, поэтому вектор  $x''a'''$  направлен из точки  $b''$  параллельно вектору  $x'a''$ . Конец  $z''$  полуобмотки 15 соединен с началом  $c''$  полуобмотки 12, поэтому вектор  $z'c''$  направлен из точки  $z''$  параллельно вектору  $z''c'''$ . Сдвиг векторов  $x'b'''$  и  $y'a'''$  относительно вектора  $z'z''$  составляет соответственно  $+30^\circ$  и  $-30^\circ$ .

Угол между векторами  $x'a''$  и  $x'b'''$ ,  $y'b''$  и  $y'a'''$  равен  $30^\circ$ . Величины векторов напряжений  $x'b'''$ ,  $y'a'''$ ,  $z'z''$  разных фаз на выводах фазосдвигающего устройства зависят от соотношения чисел витков в полуобмотках 7 – 15.

На рис. 4.25, в изображена векторная диаграмма векторов напряжений, приложенных к линии электропередачи.

На рис. 4.25, г изображена векторная диаграмма напряжений на выводах  $A''$ ,  $B''$ ,  $Z''$  фазосдвигающего устройства 4.

Полуобмотки 16 фазосдвигающего устройства 4 трансформируют систему подаваемых на нее напряжений с векторами  $x'b''$ ,  $y'a''$ ,  $z'z''$ , поэтому векторная диаграмма напряжений после трансформации в точках  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  будет аналогична векторной диаграмме на рис. 4.25, б. Вектора  $X'A'$ ,  $Y'B'$ ,  $Z'C'$  будут сонаправлены соответственно с векторами  $x'b''$ ,  $y'a''$ ,  $z'z''$ . Согласно рис. 4.24 начало  $A'$  полуобмотки 17 электрически соедине-

но с концом  $X''$  полуобмотки 20, поэтому вектор  $X''A''$  направлен из точки  $A''$  параллельно вектору  $X'A'$ . Начало  $B''$  полуобмотки 18 соединено с концом  $Y'$  полуобмотки 21, поэтому вектор  $Y''B''$  направлен из точки  $B''$  параллельно вектору  $Y'B'$ . Начало  $C''$  полуобмотки 19 соединено с началом  $C'''$  полуобмотки 25, поэтому вектор  $Z''C''$  противонаправлен из точки  $C''$  параллельно вектору  $Z'C'$ . Начало  $A''$  полуобмотки 20 соединено с началом  $B'''$  полуобмотки 24, поэтому вектор  $Y''B'''$  противонаправлен из точки  $A''$  параллельно вектору  $X''A''$ .

Начало  $B''$  полуобмотки 21 соединено с началом  $A'''$  полуобмотки 23, поэтому вектор  $X'''A'''$  противонаправлен из точки  $B''$  параллельно вектору  $Y''B''$ . Конец  $Z'''$  полуобмотки 25 соединен с началом  $C''$  полуобмотки 22, поэтому вектор  $Z''C'''$  направлен из точки  $Z'''$  параллельно вектору  $Z''C''$ .

Угол между векторами  $X'A''$  и  $X'Y'''$ ,  $Y'B''$  и  $Y'X'''$  равен  $30^\circ$ . Величины векторов напряжений  $X'Y'''$ ,  $Y'X'''$ ,  $Z'Z'''$  разных фаз на выводах фазосдвигающего устройства зависят от соотношения чисел витков в полуобмотках 17 – 25.

На рис.4.25,д изображена векторная диаграмма векторов напряжений соответствующих фаз потребителей 5.

Выполнение фазосдвигающего устройства на передающем конце линии электропередачи в виде рассмотренного трансформатора, который осуществляет сдвиг векторов напряжений двух фаз относительно третьей фазы на угол  $30^\circ$ , позволяет уменьшить расстояния между проводами фаз линии электропередачи. При этом угол между векторами напряжений первых двух фаз составляет  $60^\circ$ . Применение второго фазосдвигающего устройства на приемном конце линии электропередачи позволяет получить у потребителей симметричную трехфазную систему векторов напряжений.

Данное техническое решение может быть использовано при создании воздушных линий электропередачи 35 кВ и выше.

В [75п] предложено два варианта одноцепных электропередач, в которых векторы напряжений двух фаз на линии сонаправлены (угол между ними равен  $0^\circ$ ), а вектор напряжения третьей фазы сдвинут на угол  $120^\circ$ . Создание такой системы линейных напряжений на передающем конце линии и ее обратное преобразование в симметричную трехфазную систему напряжений на приемном конце

линий обеспечивается с помощью специальных фазосдвигающих устройств, выполненных на основе трансформаторов.

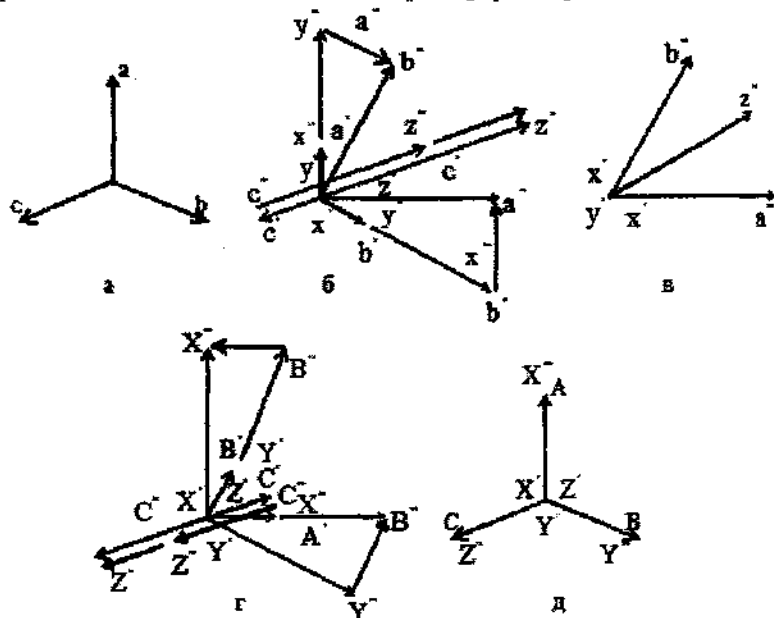


Рис. 4.25. Векторные диаграммы напряжений: а – на шинах передающей подстанции; б – на выводах фазосдвигающего устройства передающей подстанции; в – на линии; г – на выводах фазосдвигающего устройства приемной подстанции; д – на шинах приемной подстанции

На рис. 4.26,а показан первый вариант схемы электропередачи, в которой к шинам 1 передающей системы через фазосдвигающее устройство 2 подключены провода 3 линии электропередач. На приемном конце линии провода линии подключены к шинам 4 приемной системы через фазосдвигающее устройство 5.

Обмотки 6 фазосдвигающего устройства 2, установленного в начале линии электропередачи на стороне одного из номинальных напряжений, подключены к шинам 1 передающей системы. Концы и начала обмоток 6 обозначены соответственно через X, Y, Z и A, B,

С. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из двух групп полуобмоток: 7 – 9 (полуобмотки первой группы) и 10 – 11 (полуобмотки второй группы).

Полуобмотки 7 и 10 составляют фазу А трансформатора, полуобмотки 8 и 11 – фазу В, полуобмотка 9 – фазу С. Концы полуобмоток 7 – 9 обозначены через  $x, y, z$ , а начала этих полуобмоток обозначены через  $a', b', c'$ . Концы полуобмоток 10 и 11 обозначены через  $x'$  и  $y'$ , начала – соответственно  $a''$  и  $b''$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на рис.4.26,а изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Концы  $x, y, z$  трех полуобмоток 7 – 9 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $a'$  полуобмотки 7 фазы А соединено с концом  $y'$  полуобмотки 11 фазы В трансформатора. Начало  $b''$  полуобмотки 11 фазы В соединено с началом  $a''$  полуобмотки 10 фазы А трансформатора. К концу  $x'$  и началам  $b', c'$  полуобмоток 10, 8, 9 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены провода 3 линии электропередач.

Обмотки 12 фазосдвигающего устройства 5, установленного на приемном конце линии электропередачи на стороне одного из напряжений, подключены к проводам 3 линии электропередач. Концы и начало обмоток 12 обозначены через  $x, y, z$  и  $a, b, c$  соответственно. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из двух групп полуобмоток: 13 – 15 (полуобмотки первой группы) и 16 (полуобмотка второй группы). Полуобмотка 13 составляет фазу А трансформатора, полуобмотка 14 – фазу В, полуобмотки 15 и 16 – фазу С. Концы полуобмоток 13 – 15 обозначены через  $X, Y, Z$ , а начала этих полуобмоток – соответственно  $A', B', C'$ . Конец полуобмотки 16 обозначен через  $Z'$ , начало – через  $C''$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на фиг.1 изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Концы  $Y, Z$  полуобмоток 14 и 15 фаз В и С соединены с началом  $A'$  полуобмотки 13 фазы А трансформатора. Конец  $X$  полуобмотки 13 фазы А соединен с началом  $C''$  полуобмотки 16 фазы С трансформатора. К концу  $Z'$  фазы С, началам  $B'$  и  $C'$  полуобмоток 16, 14 и 15 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей.

На рис.4.26,б-е соответственно изображены диаграммы на шинах 1 передающей системы, на выводах фазосдвигающего устройства 2, на линии электропередач 3, на выводах фазосдвигающего устройства 5 и на шинах потребителя 4.

Полуобмотки 7-9 фазосдвигающего устройства 2, соединенные в «звезду», дают симметричную систему напряжений с векторами  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ . Согласно рис.4.26,а начало  $a'$  полуобмотки 7 соединено с концом  $y'$  полуобмотки 11, начало  $b''$  полуобмотки 11 соединено с началом  $a''$  полуобмотки 10, к концу  $x'$  и началам  $b'$ ,  $c'$  полуобмоток 10, 8, 9 соответственно подключены провода 3 линии электропередач. Поэтому от конца вектора  $U_a$  отложен вектор  $U_b$ , от конца полученного вектора  $U_b$  отложен вектор  $-U_a$ , в итоге получаем вектор  $U_a$ , совпадающий по направлению с вектором  $U_b$ . В результате на линии векторы напряжений  $U_a$  и  $U_b$  совпадают по фазе, а вектор  $U_c$  сдвинут относительно их на угол  $120^\circ$ , что приводит к повышению пропускной способности линии.

Концы Y, Z полуобмоток 14 и 15 соединены с началом  $A'$  полуобмотки 13, конец X полуобмотки 13 соединен с началом  $C''$  полуобмотки 16, к концу  $Z'$ , началам  $B'$  и  $C'$  полуобмоток 16, 14 и 15 соответственно, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей. Поэтому от начала вектора  $U_b$  отложен вектор  $-U_a$ , от конца полученного вектора  $-U_a$  отложен вектор  $-U_c$ , в итоге получаем вектор  $U_A$ , угол сдвига между векторами  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  составляет  $120^\circ$ . В результате получаем симметричную трехфазную систему напряжений.

Во втором варианте электропередачи (рис.4.27,а) ее схема и векторные диаграммы (рис.4.27.б-г) на передающем конце идентичны схеме и векторным диаграммам первого варианта электропередачи (рис.4.16,а-г). На приемном конце в фазосдвигающем устройстве 5 есть дополнительные полуобмотки 17 и 18 (полуобмотки второй группы). Полуобмотки 13 и 17 составляют фазу А трансформатора, полуобмотки 14 и 18 – фазу В. Концы полуобмоток 17 и 18 обозначены через  $X'$ ,  $Y'$ , начало -  $A''$  и  $B''$  соответственно. Концы X, Y, Z

трех полуобмоток 13, 14, 15 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $A'$  полуобмотки 13 фазы А соединено с началом  $C''$  полуобмотки 16 фазы С трансформатора. Конец  $Z'$  полуобмотки 16 фазы С соединен с началом  $B''$  полуобмотки 18 фазы В трансформатора. Конец  $Y'$  полуобмотки 18 фазы В соединен с началом  $A''$  полуобмотки 17 фазы А трансформатора. К концу  $X'$  фазы С, началам  $B'$  и  $C'$  полуобмоток 17, 14 и 15 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей.

Диаграмма на выводах фазосдвигающего устройства 5 (рис.4.27,д) отличается от диаграммы, приведенной на рис.4.26,д. Согласно рис.4.27,а концы X, Y, Z трех полуобмоток 13, 14, 15 соединены в «звезду», начало  $A'$  полуобмотки 13 соединено с началом  $C''$  полуобмотки 16, конец  $Z'$  полуобмотки 16 соединен с началом  $B''$  полуобмотки 18, конец  $Y'$  полуобмотки 18 соединен с началом  $A''$  полуобмотки 17. К концу  $X'$ , началам  $B'$  и  $C'$  полуобмоток 17, 14 и 15 соответственно подключены первая, вторая и третья фаза потребителей. Поэтому на рис.4.27,д от конца вектора  $U_b$  отложен вектор  $-U_c$ , от конца полученного вектора  $-U_c$  отложен вектор  $-U_b$ , от конца полученного вектора  $-U_b$  отложен вектор  $U_a$ , угол сдвига между векторами  $U_a, U_b, U_c$  составляет  $120^\circ$ . В результате получаем симметричную трехфазную систему напряжений.

Использование фазосдвигающего устройства электропередачи 5 в виде рассмотренного трансформатора, который осуществляет сдвиг векторов напряжений фазы относительно двух других, позволяет получать на шинах 4 приемной системы трехфазную симметричную систему переменного тока (рис.4.27,е).

Таким образом, благодаря тому, что сдвиг векторов напряжений двух фаз на линии составляет  $0^\circ$ , провода этих фаз могут быть предельно сближены, что существенно упростит конструкцию опор и линии в целом.



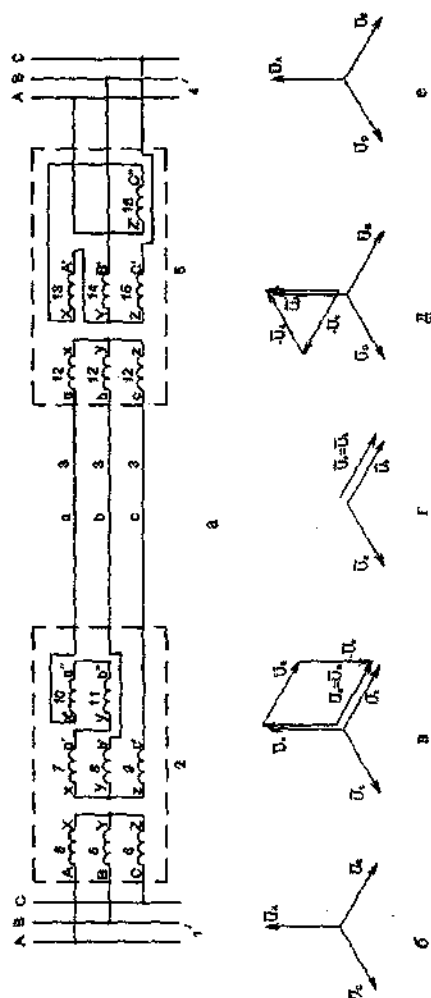


Рис. 4.26. Однофазная электропередача с сонаправленными векторами напряжений двух фаз на линии и со сдвигом напряжения третьей фазы на угол  $120^\circ$  (вариант 1): а – схема электропередачи; б – векторные диаграммы напряжений на шинах передающей системы (б), на выводах фазосдвигающего устройства начала линии (в), на линии (г), на выводах фазосдвигающего устройства конца линии (д), на шинах приемной системы (е)

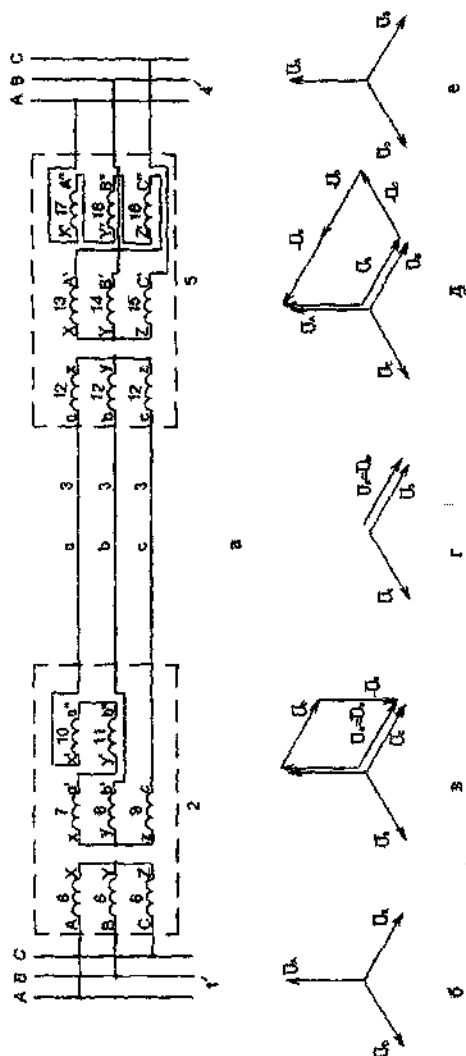


Рис. 4.27. Однофазная электропередача с сонаправленными векторами напряжений двух фаз на линии и со сдвигом напряжения третьей фазы на угол  $120^\circ$  (вариант 2): а — схема электропередачи; б — е векторные диаграммы напряжений на шинах передающей системы (б), на выводах фазосдвигающего устройства начала линии (в), на линии (г), на выводах фазосдвигающего устройства конца линии (д), на шинах приемной системы (е)

Дальнейшее развитие технических решений одноцепных электропередач с уменьшенным сдвигом напряжений на линии получило в [76п]. Предложено два варианта электропередач, в которых на линии векторы напряжений двух фаз сонаправлены (угол между ними равен  $0^\circ$ ), а вектор напряжений третьей фазы сдвинут относительно них всего лишь на угол  $60^\circ$ . В результате линейные напряжения между двумя фазами равны нулю, а между каждой из них и третьей фазой — равно фазному.

Первый вариант такой электропередачи показан на рис.4.28,а. В ней к шинам 1 передающей системы через фазосдвигающее устройство 2 подключены провода 3 линии электропередачи. На приемном конце линии провода линии подключены к шинам 4 приемной системы через фазосдвигающее устройство 5.

Обмотки 6 фазосдвигающего устройства 2, установленного в начале линии электропередачи на стороне одного из номинальных напряжений, подключены к шинам 1 передающей системы. Концы и начала обмоток 6 обозначены соответственно через X, Y, Z и A, B, C. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из трех групп полуобмоток: 7-9 (полуобмотки первой группы), 10 — 11 (полуобмотки второй группы), 12 (полуобмотка третьей группы). Полуобмотки 7, 10 и 12 составляет фазу А трансформатора, полуобмотка 8 — фазу В, полуобмотки 9 и 11 — фазу С. Концы полуобмоток 7 — 9 обозначены через x, y, z, а начала этих полуобмоток обозначены через  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ . Концы полуобмоток 10 и 11 обозначены через  $x'$  и  $z'$ , начала — соответственно  $a''$  и  $c''$ . Конец полуобмотки 12 обозначен через  $x''$ , начало —  $a'''$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на рис. 4.28,а изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Концы x, y, z трех полуобмоток 7 — 9 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $a'$  полуобмотки 7 фазы А соединено с началом  $a''$  полуобмотки 10 фазы А трансформатора. Начало  $b'$  полуобмотки 8 фазы В соединено с концом  $z'$  полуобмотки 11 фазы В трансформатора. Конец  $x'$  полуобмотки 10 фазы А соединено с началом  $a'''$  полуобмотки 12 фазы А трансформатора. К концу  $x''$ , началам  $c''$  и  $c'$  полуобмоток 12, 11 и 9 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены провода 3 линии электропередач.

Обмотки 13 фазосдвигающего устройства 5, установленного на приемном конце линии электропередачи на стороне одного из напряжений, подключены к проводам 3 линии электропередач. Концы и начало обмоток 13 обозначены через  $x, y, z$  и  $a, b, c$  соответственно. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из трех групп полуобмоток: 14 – 16 (полуобмотки первой группы), 17-18 (полуобмотки второй группы) и 19 (полуобмотка третьей группы). Полуобмотки 14, 17 и 19 составляет фазу А трансформатора, полуобмотка 15 – фазу В, полуобмотки 16 и 18 – фазу С. Концы полуобмоток 14 – 16 обозначены через  $X, Y, Z$ , а начала этих полуобмоток – соответственно  $A', B', C'$ . Концы полуобмоток 17 и 18 обозначены через  $X', Z'$ , а начала этих полуобмоток – соответственно  $A'', C''$ . Конец полуобмотки 19 обозначен через  $X''$ , а начало этой полуобмотки –  $A'''$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на рис.4.28,а изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Концы  $X, Y, Z$  трех полуобмоток 14 – 16 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $A'$  полуобмотки 14 фазы А соединено с началом  $A''$  полуобмотки 17 фазы А трансформатора. Конец  $X'$  полуобмотки 17 фазы А соединено с началом  $A'''$  полуобмотки 19 фазы А трансформатора. Начало  $B'$  полуобмотки 15 фазы В соединено с началом  $C''$  полуобмотки 18 фазы С трансформатора. К концам  $X''$  фазы А и  $Z'$  фазы С, началу  $C'$  фазы С полуобмоток 19, 18 и 16 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей.

На рис.4.28,б-е изображены соответственно диаграммы на шинах 1 передающей системы, на выводах фазосдвигающего устройства 2, на линии электропередач 3, на выводах фазосдвигающего устройства 5 и на шинах потребителя 4.

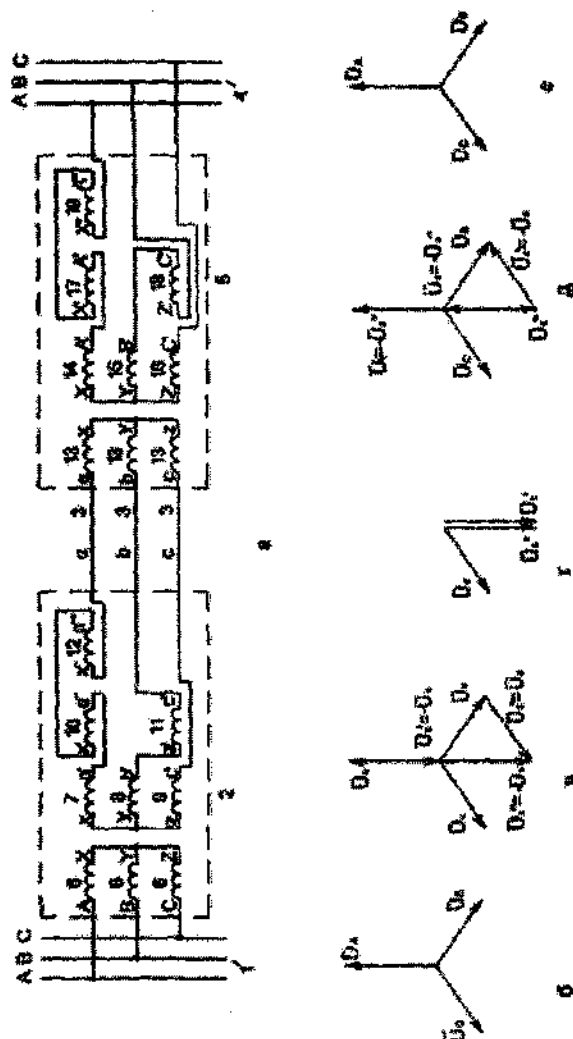


Рис. 4.28. Однофазная электропередача с сонаправленными векторами напряжений двух фаз на линии и со сдвигом напряжения третьей фазы на угол  $60^\circ$  (вариант I): а – схема электропередачи; б – е векторные диаграммы напряжений на шинах передающей системы (б), на выводах фазосдвигающего устройства начала линии (в), на линии (г), на выводах фазосдвигающего устройства конца линии (д), на шинах приемной системы (е)

Полуобмотки 7 – 9 фазосдвигающего устройства 2, соединенные в «звезду», дают симметричную систему напряжений с векторами  $U_a, U_b, U_c$ . Согласно рис.4.28,а начало  $a'$  полуобмотки 7 соединено с началом  $a''$  полуобмотки 10, начало  $b'$  полуобмотки 8 соединено с концом  $z'$  полуобмотки 11, конец  $x'$  полуобмотки 10 соединен с началом  $a'''$  полуобмотки 12, к концу  $x''$  и началам  $c''$  и  $c'$  полуобмоток 12, 11, 9 соответственно подключены провода 3 линии электропередач. Поэтому от конца вектора  $U_b$  отложен вектор  $U_c' = U_c$ , от конца вектора  $U_a$  отложен вектор  $U_a' = -U_a$ , от конца полученного вектора  $U_a'$  отложен вектор  $U_a'' = -U_a'$ , в итоге получаем вектор  $U_a'' = U_b'$ , совпадающий по направлению с вектором  $U_b'$ . Совпадение векторов напряжений  $U_a''$  и  $U_b'$  двух фаз на линии электропередачи позволяет практически отказаться от изоляции между ними и существенно сблизить эти фазы в пролете. Векторы напряжений  $U_a''$  и  $U_b'$  сдвинуты относительно вектора напряжений третьей фазы  $U_c$  лишь на  $60^\circ$ , т.е. между ними на линии прикладываются лишь фазное напряжение, что также позволяет сблизить третью фазу с двумя первыми. В итоге существенно сокращается ширина трассы линии и ее площадь поперечного сечения, уменьшаются механические нагрузки на опору, что приводит к повышению надежности линии и улучшению ее экологических характеристик.

Концы X, Y, Z трех полуобмоток 14 – 16 соединены в «звезду», начало  $A'$  полуобмотки 14 соединено с началом  $A''$  полуобмотки 17, конец  $X'$  полуобмотки 17 соединено с началом  $A'''$  полуобмотки 19, начало  $B'$  полуобмотки 15 соединено с началом  $C''$  полуобмотки 18, к концам  $X''$  и  $Z'$ , началу  $C'$  полуобмоток 19, 18 и 16 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей. Поэтому от конца вектора  $U_a''$  отложен вектор  $U_c' = -U_c$ , от конца вектора  $U_a''$  отложен вектор  $U_a = -U_a''$ , от конца полученного вектора  $U_a$  отложен вектор  $U_A = -U_a$ , в итоге получаем вектор  $U_A$ , угол сдвига

между векторами  $U_A, U_B, U_C$  составляет  $120^\circ$ . В результате получаем симметричную трехфазную систему напряжений.

На рис.4.29,а показан второй вариант схемы электропередачи, в которой к шинам 1 передающей системы через фазосдвигающее устройство 2 подключены провода 3 линии электропередач.

На приемном конце линии провода линии подключены к шинам 4 приемной системы через фазосдвигающее устройство 5.

Обмотки 6 фазосдвигающего устройства 2, установленного в начале линии электропередачи на стороне одного из номинальных напряжений, подключены к шинам 1 передающей системы. Концы и начала обмоток 6 обозначены соответственно через X, Y, Z и A, B, C. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из трех групп полуобмоток: 7 – 9 (полуобмотки первой группы), 10 – 11 (полуобмотки второй группы), 12 (полуобмотка третьей группы). Полуобмотка 7 составляет фазу А трансформатора, полуобмотки 8, 10 и 12 – фазу В, полуобмотки 9 и 11 – фазу С. Концы полуобмоток 7 – 9 обозначены через  $x, y, z$ , а начала этих полуобмоток обозначены через  $a', b', c'$ . Концы полуобмоток 10 и 11 обозначены через  $y'$  и  $z'$ , начала – соответственно  $b''$  и  $c''$ . Конец полуобмотки 12 обозначен через  $y''$ , начало –  $b'''$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на рис.4.29,а изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Концы  $x, y, z$  трех полуобмоток 7 – 9 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $a'$  полуобмотки 7 фазы А соединено с концом  $y'$  полуобмотки 10 фазы В трансформатора. Начало  $c'$  полуобмотки 9 фазы С соединено с концом  $y''$  полуобмотки 12 фазы В трансформатора. Начало  $b'''$  полуобмотки 12 фазы В соединено с концом  $z'$  полуобмотки 11 фазы С трансформатора. К началу  $b''$  и  $b'$ , концу  $z'$  полуобмоток 10, 8, 11 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены провода 3 линии электропередач.

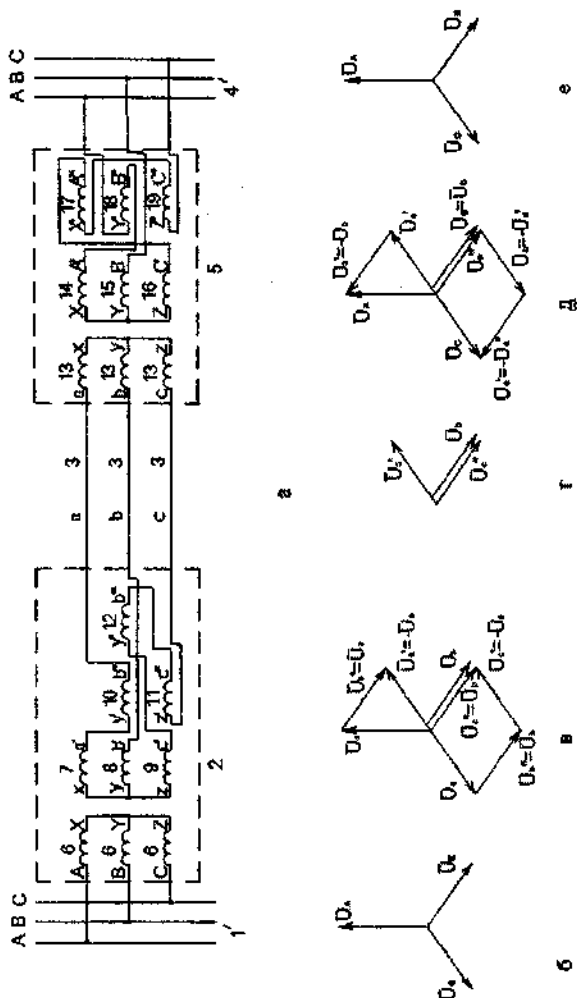


Рис. 4.29. Одноцепная электропередача с сонаправленными векторами напряжений двух фаз на линии и со сдвигом напряжения третьей фазы на угол  $60^\circ$  (вариант 2): а – схема электропередачи; б – е векторные диаграммы напряжений на шинах передающей системы (б), на выводах фазосдвигающего устройства начала линии (в), на линии (г), на выводах фазосдвигающего устройства конца линии (д), на шинах приемной системы (е)



Обмотки 13 фазосдвигающего устройства 5, установленного на приемном конце линии электропередачи на стороне одного из напряжений, подключены к проводам 3 линии электропередач. Концы и начало обмоток 13 обозначены через  $x, y, z$  и  $a, b, c$  соответственно. Обмотки на стороне другого номинального напряжения выполнены из двух групп полуобмоток: 14 – 16 (полуобмотки первой группы) и 17-19 (полуобмотки второй группы). Полуобмотки 14 и 17 составляет фазу А трансформатора, полуобмотки 15 и 18 – фазу В, полуобмотки 16 и 19 – фазу С. Концы полуобмоток 14 – 16 обозначены через  $X, Y, Z$ , а начала этих полуобмоток – соответственно  $A', B', C'$ . Концы полуобмоток 17 – 19 обозначены через  $X', Y', Z'$ , а начала этих полуобмоток – соответственно  $A'', B'', C''$ . Полуобмотки в каждой фазе трансформатора намотаны согласно, что на рис 4.29,а изображено взаимным расположением концов и начал полуобмоток. Концы  $X, Y, Z$  трех полуобмоток 14 – 16 разных фаз первой группы соединены в «звезду». Начало  $A'$  полуобмотки 14 фазы А соединено с началом  $B''$  полуобмотки 18 фазы В трансформатора. Начало  $C'$  полуобмотки 16 фазы С соединено с началом  $A''$  полуобмотки 17 фазы А трансформатора. Конец  $X'$  полуобмотки 17 фазы А соединен с началом  $C''$  полуобмотки 19 фазы С трансформатора. К концу  $Y'$  фазы В, началам  $B'$  фазы В и концу  $Z'$  фазы С полуобмоток 18, 15 и 19 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей.

Полуобмотки 7 – 9 фазосдвигающего устройства 2, соединенные в «звезду», дают симметричную систему напряжений с векторами  $U_a, U_b, U_c$ . Согласно рис.4.29 начало  $a'$  полуобмотки 7 соединено с концом  $y'$  полуобмотки 10, начало  $c'$  полуобмотки 9 соединено с концом  $y''$  полуобмотки 12, начало  $b'''$  полуобмотки 12 соединено с началом  $c''$  полуобмотки 11, к началам  $b'', b'''$  и  $c''$  полуобмоток 10, 12, 11 соответственно подключены провода 3 линии электропередач. Поэтому от конца вектора  $U_a$  отложен вектор  $U_b' = U_b$ , от конца вектора  $U_c$  отложен вектор  $U_b'' = U_b$ , от конца полученного вектора  $U_b''$  отложен вектор  $U_c' = -U_c$ , в итоге получаем вектор  $U_c'' = U_b$ , совпадающий по направлению с вектором  $U_b$  (рис. 4.29,

а-г). Совпадение векторов напряжений  $U_c''$  и  $U_b$  двух фаз на линии электропередачи позволяет практически отказаться от изоляции между ними и существенно сблизить эти фазы в пролете. Векторы напряжений  $U_c''$  и  $U_b$  сдвинуты относительно вектора напряжений третьей фазы  $U_a'$  лишь на  $60^\circ$ , т.е. между ними на линии прикладываются лишь фазное напряжение, что также позволяет сблизить третью фазу с двумя первыми. В итоге существенно сокращается ширина трассы линии и ее площадь поперечного сечения, уменьшаются механические нагрузки на опоры, что приводит к повышению надежности линии и улучшению ее экологических характеристик.

Концы X, Y, Z трех полуобмоток 14 – 16 соединены в «звезду». Начало A' полуобмотки 14 соединено с началом B'' полуобмотки 18. Начало C' полуобмотки 16 соединено с началом A'' полуобмотки 17. Конец X' полуобмотки 17 соединен с началом C'' полуобмотки 19. К концу Y', началу B' и концу Z' полуобмоток 18, 15 и 19 соответственно, являющихся одновременно выводами трансформатора, подключены первая, вторая и третья фаза потребителей. Поэтому от конца вектора  $U_a$  отложен вектор  $U_b' = -U_b$ , от конца вектора  $U_c$  отложен вектор  $U_a' = -U_a$ , от конца полученного вектора  $U_c$  отложен вектор  $U_c' = -U_c''$ , в итоге получаем вектор  $U_c$ , угол сдвига между векторами  $U_a, U_b, U_c$  составляет  $120^\circ$ . В результате получаем симметричную трехфазную систему напряжений (рис. 4.29, г-е).

Использование фазосдвигающего устройства электропередачи 5 в виде рассмотренного трансформатора, который осуществляет сдвиг векторов напряжений фазы относительно двух других, как и в первом варианте, позволяет получать на шинах 4 приемной системы трехфазную симметричную систему переменного тока.

Оригинальное решение одноцепных электропередач с сонаправленными на линии векторами напряжений всех трех фаз предложено в [77п]. Его основная идея заключается в создании линий задержки с обеих концов линии электропередачи. При этом в начале линии электропередачи линия задержки фазы А обеспечивает сдвиг сигнала во времени, равный  $2/3f$  ( $f$  – частота переменного тока), а линия задержки В – сдвиг сигнала во времени равный  $1/3f$  (рис. 4.30). В

результате на выходе линий задержки сдвиг по фазе между напряжениями проводников фаз А, В, и С оказывается равным нулю.

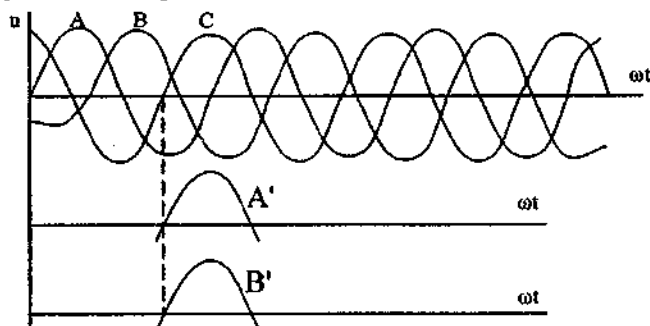


Рис. 4.30. Мгновенные значения синусоидальных напряжений в проводах на входе линии и на выходе линии задержки

В конце линии электропередачи с помощью соответствующих линий задержки восстанавливают первоначальный сдвиг между напряжениями проводников различных фаз. Для этого в фазе С формируют линию задержки со сдвигом сигнала во времени, равном  $2/3f$ , а в фазе В – линию задержки со сдвигом во времени, равном  $1/3f$ . Линия задержки сигнала во времени фазы А состоит из отрезка кабеля 1 (рис.4.31) с коаксиальным слоем, выполненным в виде металлической однослойной или многослойной оплётки. Кабель 1 помещают в трубу 2, состоящую из секций, разделённых воздушным промежутком 3. Труба выполняется из магнитно-мягкого материала. Аналогично выполняется линия задержки сигнала во времени в фазе В, но она должна быть в два раза короче. На выходе линий задержек сдвиг по фазе между напряжениями цепей фаз А', В' и С равен нулю.

При изменении тока в цепи из-за нелинейности вебер-амперной характеристики материала трубы 2 сдвиг по фазе между линиями А', В', С будет всё-таки происходить, что может привести к изменению сдвига фаз и появлению разности потенциалов между фазами на выходе линий задержки и пробоем изоляции между проводами.

Чтобы компенсировать нелинейный сдвиг напряжений, зависящий от тока нагрузки, длительность задержки сигнала, проходящего по кабелю с коаксиальным слоем, регулируют путём изменения магнитной проницаемости трубы, в которую помещён кабель [77п].. Эта регулировка производится по принципу магнитного усилителя

на основе измерения сдвига фаз между фазами А и С и между фазами В и С на выходе линии задержки. Разность сдвига фаз напряжений на выходе линий задержки измеряется дифференциальными трансформаторами 6, 7 (рис.4.31), сравнивающими разность сдвига фаз напряжений между С и А' или С и В'. Полученные сигналы усиливаются в блоках 8 и 9, выпрямляются в выпрямителях соответственно 10 и 11 и через блоки управления 12 и 13 подаются на подмагничивающие обмотки 14 и 15, регулирующие суммарную индуктивность отрезков труб.

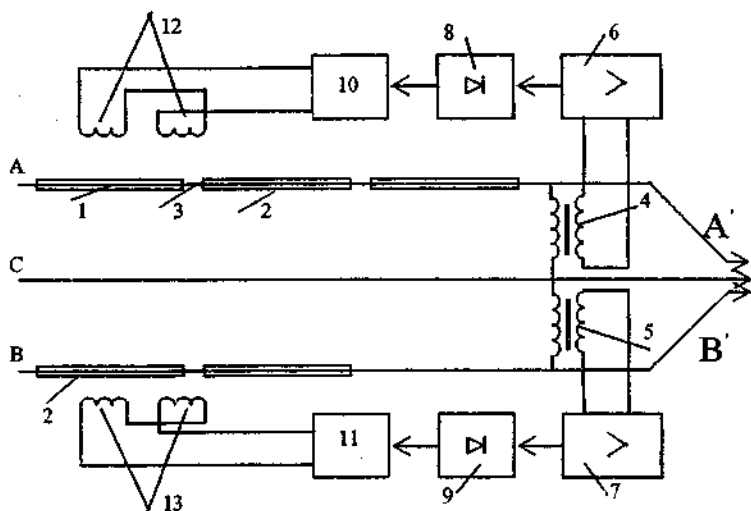


Рис. 4.31. Принципиальная электрическая схема устройства для создания нулевого сдвига

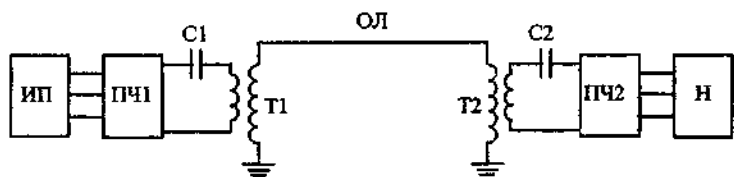


Рис. 4.32. Схема резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии

В конце линии передачи производят обратную операцию по восстановлению первоначального сдвига фаз. Соответствующая схема приведена в [77п].

В связи с тем, что между напряжениями проводов всех трех фаз сдвиг равен нулю, все три провода линии электропередачи можно располагать близко друг к другу. В результате уменьшается необходимая полоса отчуждения.

#### **4.4. Резонансные однопроводниковые системы передачи электроэнергии**

В традиционных системах передачи электроэнергии от генераторов к потребителям используются замкнутые цепи, по которым передача активной мощности осуществляется с помощью токов проводимости. К недостаткам таких систем относятся большой расход проводниковых и других материалов, относительно большие потери электроэнергии на нагревание проводников.

Вместе с тем, давно известна принципиальная возможность передачи активной мощности с использованием реактивного емкостного тока в режиме резонанса однопроводной линии [78п]. Ключевым элементов при такой передаче является трансформатор Тесла, в цепи питания которого формируют режим резонанса токов. В последние 20 лет активно развивается направление по разработке резонансных однопроводниковых систем передачи электроэнергии, в основе которого лежит идея применения трансформатора Тесла, в том числе с различными его модификациями. По данному направлению выданы десятки патентов, к которым относятся, в частности [79п – 83п]. Разработаны различные экспериментальные установки [7, 20, 21], испытания которых показали техническую возможность создания промышленных резонансных систем передачи электроэнергии.

Сделаем попытку кратко изложить суть предлагаемых систем, их возможности и ограничения по применению [7, 20, 21, 82п, 81п]. Один из вариантов принципиальной схемы резонансной системы передачи электроэнергии представлен на рис. 4.32. Система состоит из источника питания ИП, представляющего шины трехфазных напряжений энергосистемы, преобразователей частоты на передающем ПЧ1 и приемном ПЧ2 концах, конденсаторов С1 и С2 в цепях трансформаторов Тесла Т1 и Т2 и трехфазной нагрузки Н. Назначе-

ние преобразователей частоты – преобразовывать напряжение промышленной частоты в напряжение повышенной частоты 1 – 100 Гц (ПЧ1) и обратное преобразование напряжения повышенной частоты в напряжение промышленной частоты (ПЧ2). Считается, что при таких частотах излучение линии в окружающее пространство ничтожно мало, и не будет оказывать отрицательного влияния на животный мир и технические объекты.

Резонансный контур на передающем конце состоит из конденсатора С1 и обмотки высшего напряжения модифицированного трансформатора Тесла Т1, а на приемном конце – из конденсатора С2 и обмотки высшего напряжения трансформатора Т2. При расчетных соотношениях индуктивностей первичной и вторичной обмоток трансформатора при соответствующей частоте в контуре возникает резонанс напряжений с периодом собственных колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Обязательным условием при этом является равенство произведений в передающем и приемном контурах:

$$L_1C_1 = L_2C_2.$$

Ток в обмотке высшего напряжения трансформатора Т1 сдвинут относительно напряжения на 90°. Угол между векторами напряжений начала и конца линии равен нулю.

В длину линии ОЛ входит собственно длина одножильного кабеля, длины обмоток высшего напряжения передающего Т1 и приемного Т2 трансформаторов. При этом общая длина линии должно соответствовать целому числу полуволн  $\lambda/2$  либо четверти волны тока.

Длина линии  $\ell$ , резонансная частота  $f_0$ , длина волны  $\lambda$  и скорость ее распространения с связаны соотношениями:

$$\ell = n \lambda/2, f_0 = c/2\ell, \lambda = 2\ell/n,$$

где  $n$  – натуральное число 1, 2, 3,...

В зависимости от передаваемой мощности и частоты выходное напряжение на трансформаторе Т1 и на линии может быть до 100 кВ и выше.

Резонансная линия работает в разомкнутом режиме, поэтому по ней не проходит активный ток, и в ней нет потерь мощности на нагревание проводника. По сути в резонансном режиме она обладает квазисверхпроводящими свойствами при высоких температурах.

Ток в линии является реактивным током перезарядки собственной емкости линии, т.е. током смещения.

Из-за отсутствия потерь мощности на нагревание энергия может передаваться по достаточно тонкому проводнику. Авторы [82п] отмечают, что плотность тока в такой линии может достигать  $1000 \text{ А/мм}^2$ . Общий коэффициент полезного действия резонансной системы с учетом наличия потерь в преобразователях частоты и потерь на излучение может доходить до 96%.

По мнению авторов [20, 21, 7, 81п] резонансная линия может быть выполнена без металлических проводников. Для передачи электроэнергии могут быть использованы электроизолированные от земли пластиковые водоводы, ирригационные каналы, изолированные трубопроводы для транспортировки газа, нефти, горячей и холодной воды, электроизолированные участки земной и водной поверхности и др.

При очевидном упрощении собственно однопроводной линии появляется также очевидное усложнение за счет применения преобразователей частоты, параметры и режимы работы которых должны быть увязаны с передаваемой мощностью, напряжением линии и резонансной частотой. Как известно, линии электропередачи в энергосистеме работают с переменной активной нагрузкой в течение суток. Предстоит исследовать, как будут при этом изменяться режимные параметры резонансной линии, а также исследовать возможность работы линии в реверсивном режиме. К неудобствам резонансных линий следует также отнести обязательную настройку на режим полуволны или четверти волны, что не всегда будет совпадать с физической длиной данной конкретной линии. Следовательно, может потребоваться работа различных линий с различными резонансными частотами.

## Вопросы для самопроверки

1. Какими условиями ограничиваются минимальные допустимые расстояния между проводами различных фаз воздушных линий электропередачи?

2. Какие известны технические решения, позволяющие сблизить провода различных фаз линий электропередачи?

3. Каково конструктивное исполнение воздушной линии с аэростатами без традиционных опор?

4. Как можно осуществить пересечение двух линий электропередачи на опоре? Каковы преимущества такого пересечения?

5. Какой принцип заложен при реализации двухцепной трехфазной линии с четырьмя линейными проводами?

6. Как можно создать противофазную систему напряжений с двумя трехфазными системами напряжений?

7. Какие схемы фазосдвигающих устройств можно применить для обеспечения нулевого фазового сдвига между напряжениями двух линейных проводов двухцепной линии электропередачи?

8. В чем суть, преимущества и недостатки системы передачи электроэнергии "два провода - земля"?

9. Какие схемы фазосдвигающих устройств могут быть использованы для сдвига векторов напряжений двух фаз относительно вектора напряжения третьей фазы в одноцепной линии электропередачи?

10. Как изображается система передачи электроэнергии по одноцепной электропередаче, в которой векторы напряжения третьей фазы сдвинуты на угол  $120^\circ$ ?

11. Как изображается система передачи электроэнергии по одноцепной электропередаче, в которой векторы напряжения третьей фазы сдвинуты на угол  $60^\circ$ ?

12. В чем суть создания линии задержки сигнала, соответствующего мгновенным значениям напряжения фаз линии электропередачи?

13. Как изображается схема одноцепной линии электропередачи с линиями задержки?

14. В чем заключается идея и принцип работы резонансных однопроводниковых систем передачи электроэнергии?



## 5. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ И НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

### 5.1. Общие положения

В связи с ограниченными запасами традиционных видов топлива (уголь, газ) и удорожанием их добычи наряду с сооружением крупных электростанций получает широкое распространение реализация микро- и малых источников электроэнергии. К ним наряду с традиционными источниками (КЭС, ТЭЦ, крупные ГЭС) относят также возобновляемые источники энергии. Такие небольшие по мощности источники получили название распределенной (рассредоточенной, децентрализованной) генерацией электроэнергии. По технологии производства электроэнергии эти источники можно разделить на [22]:

- возобновляемые;
- блочные, состоящие из отдельных модулей;
- когенерационные, позволяющие использовать как электроэнергию, так и теплоту, вырабатываемые в процессе работы генераторной установки.

По технологии производства электроэнергии для распределенной генерации характерны [22, 24]:

- парогазовые ТЭЦ;
- мини ТЭЦ на местных видах топлива;
- поршневые двигатели;
- малые когенерационные электростанции на местных видах топлива;
- топливные элементы, основанные на химической реакции взаимодействия кислорода и водорода для выработки электроэнергии;
- солнечные батареи;
- ветрогенераторы;
- ГЭС небольшой мощности.

Мощность ветрогенератора пропорциональна скорости ветра в кубе. Турбина ветроэнергетической установки начинает выдавать мощность при скорости ветра  $\sim 5$  м/с, а ее номинальная мощность достигается при скоростях ветра 12 – 13 м/с. При дальнейшем увеличении скорости ветра соответствующим регулятором ограничива-

ется мощность, а при скорости ветра 22 м/с он останавливает турбину во избежание ее поломки [25].

При теоретическом КПД турбины 59% фактическая мощность составляет 10 – 40% от номинальной. Отдельные ветроэнергетические установки формируют в ветропарки, в которых эти установки располагают рядами. В ряду между опорами установок расстояние принимают 4Д, а между рядами – 10Д, где Д – диаметр ротора). В США стоимость выработки электроэнергии на ветроэнергетических установках сопоставима со стоимостью на тепловых электростанциях, работающих на угле, и составляет 3 – 5 цент/(кВт·ч).

В соответствии с международной терминологией ГЭС разделяются на [23]:

- крупные мощностью более 10 МВт;
- малые мощностью 1 – 10 МВт;
- мини ГЭС мощностью от 100 кВт до 1 МВт;
- микро ГЭС мощностью менее 100 кВт.

Наряду с традиционными конструкциями ГЭС, содержащими плотины и гидрогенераторы, для распределенной генерации разработаны новые технические решения бесплотинных (русловых) ГЭС, рукавных микро ГЭС, реализуемых на любых природных водотоках, гибридных ГЭС на базе гидроветроустановок и др. На базе гидроресурсов предложены накопители энергии малой мощности, которые будут способствовать выравниванию суточного графика нагрузки энергосистемы.

Распределенная генерация электроэнергии и накопители энергии местного значения позволяют снизить нагрузку электрической сети, снизить потери электроэнергии в сетях, улучшить экологию региона, повысить надежность электроснабжения, обеспечить развитие наукоемких производств.

## **5.2. Некоторые пути реализации малых гидроэнергоресурсов**

Идеи распределенной генерации электроэнергии не новы. Давно известны, например, гилянские ГЭС, не требующие каких-либо специальных гидросооружений в виде плотин. В них используются турбины малого диаметра, которые по несколько десятков штук закрепляются на одном тросе. Этот трос закрепляется по берегам водного потока. Трос одновременно является валом гидрогенератора.

Гирляндные ГЭС могут быть установлены на потоках воды шириной 0,5 м и более, глубиной 0,3 м и выше со скоростями течения 1 м/с и более. Турбины вращаются вместе с тросом. Увеличение мощности ГЭС достигается увеличением количества турбин на одном тросе и увеличением количества гирлянд, присоединенных к одному генератору. Конструкции турбин позволяют использовать их как у дна, так и у поверхности потока воды. При скоростях потока воды 1,2 – 3,0 м/с мощность ГЭС может составлять 1 – 5 кВт. В многогирляндных ГЭС мощность может достигать 5 – 5 кВт.

В условиях высокой стоимости органического топлива, когда актуальны вопросы энергосбережения, разработаны и выпускаются промышленные образцы рукавных микроГЭС мощностью 1 – 2 кВт, пригодные для работы на любых природных водотоках [27]. Разработаны различные варианты бесплотинных ГЭС для местного электроснабжения, работающих с малыми и средними объемами расхода и давления водного потока [98п, 99п].

К нетрадиционным ГЭС следует отнести установки, работающие на канализационных стоках [28, 100п]. Сооружена такая установка мощностью 1200 кВт. ГЭС содержит напорный трубопровод, по которому подводится вода, гидротурбину, соединенную с электрогенератором, трубопровод для отвода воды. Оба трубопровода врезаются в нижнюю часть трубопровода выпуска очищенных сточных вод. В результате – полезно используются канализационные стоки для выработки электроэнергии. ГЭС работает в автоматическом режиме, нагрузка гидрогенераторов автоматически регулируется в зависимости от количества поступающих стоков.

Известны также нетрадиционные гибридные гидроэнергоустановки, использующие для выработки электроэнергии одновременно энергию падающей воды и энергию ветра. На рис. 5.1 в качестве примера представлена энергетическая установка, использующая энергию ветра и энергию дождевой воды [101п]. Установка содержит крышу здания 1 со сливным отверстием 2, турбину 3 с лопастями. На валу 4 турбины размещен электрогенератор. Установка закреплена на стойках 5 и содержит поворотное основание 6, а также флюгер 7.

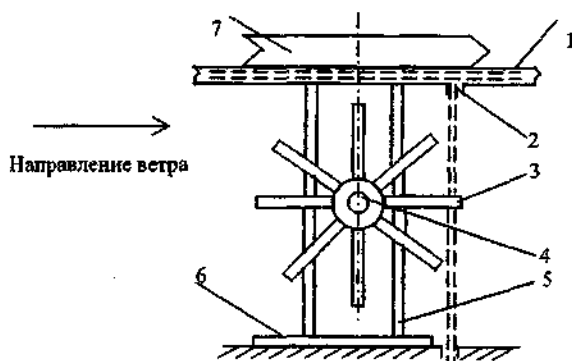


Рис. 5.1. Схематическое изображение гидроветроэнергетической установки

При наличии ветра ветровой поток воздействует на лопасти турбины 3 и вращает их. Вращение передается на генератор. Благодаря наличию флюгера 7 при изменении направления ветра установка ориентируется на ветер и разворачивается соответствующим образом на поворотном основании 6. При наличии дождя вода с крыши 1 сливается через сливное отверстие 2 и попадает на лопасти турбины 3, вращая ее.

К недостаткам этой установки относится ее малая эффективность при дожде слабой интенсивности. Этот недостаток устранен в энергетической установке, приведенной на рис. 5.2 [103п]. Она позволяет накапливать дождевую воду при любой интенсивности и в полной мере использовать ее для выработки электроэнергии.

Энергетическая установка содержит крышу 1 здания 2. Емкость для сбора дождевой воды выполнена в виде желоба 3 по периметру крыши 1. Энергетическая установка содержит турбину 4, выполненную в виде барабана с намотанным на него тросом 5, на свободном конце которого закреплена дополнительная емкость 6, расположенная ниже желоба 3. Турбина 4 установлена на горизонтальном валу 7. Обратимый генератор 8 кинематически связан с горизонтальным валом 7. Желоб 3 через сливные отверстия 9 связан с ливневыми стоками 10. Сливные отверстия 9 снабжены выпускными клапанами 11. В исходном положении трос 5 намотан на турбину 4, и дополнительная емкость 6 расположена в верхнем положении. В желобе 3 над дополнительной емкостью 6 установлено сливное отверстие 12, снабженное выпускным клапаном 13. В верхнем положении допол-

нительная емкость 6 удерживается при помощи устройства 14 фиксации верхнего и нижнего положений, которое закреплено на турбине 4. В донной части дополнительной емкости 6 с наружной стороны установлено сливное отверстие 15, снабженное выпускным клапаном 16. Обратимый генератор 8 связан с энергосистемой 17. У фундамента здания 2 расположены дренажные каналы 18 для отвода использованной дождевой воды. Блок 19 автоматики связан с узлом 14 фиксации верхнего и нижнего положений, обратимым генератором 8 и выпускными клапанами 11, 13 и 16 (на рис. 5.2 связи показаны пунктирными линиями).

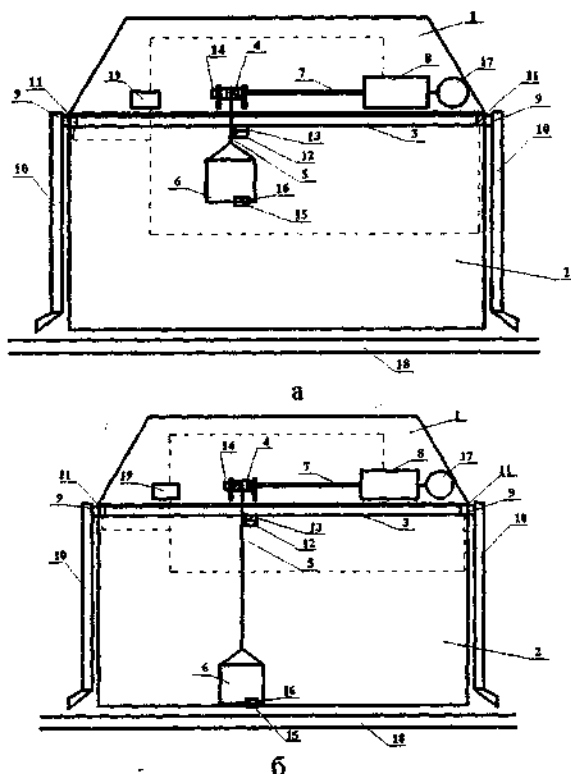
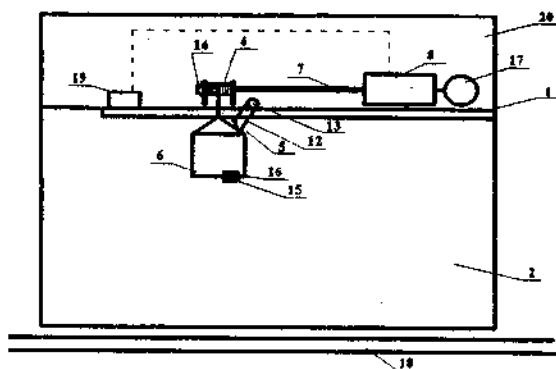
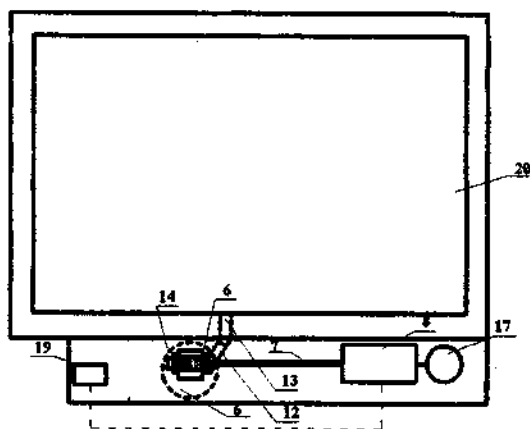


Рис. 5.2. Ливневая энергетическая установка при расположении емкости для дождевой воды в верхнем (а) и нижнем (б) положении

Емкость для сбора дождевой воды, может быть выполнена в виде бассейна 20 (рис. 5.3), установленного на крыше 1 здания 2. Отсутствуют желоб 3 по периметру крыши 1 (рис. 5.2), сливные отверстия 9, ливневые стоки 10, выпускные клапаны 11.



а



б

Рис. 5.3. Ливневая энергетическая установка при выполнении емкости в виде бассейна: а – вид спереди; б – вид сверху

Установка, представленная на рис. 5.2, работает следующим образом. При отсутствии дождя дополнительная емкость 6 находится в

верхнем положении, как показано на рис.5.2, а. Выпускные клапаны 11, 16 находятся в закрытом положении. Выпускной клапан 13 открыт. Во время выпадения осадков в виде дождя дождевая вода стекает по крыше 1 здания 2 в желоб 3. Затем вода через выпускной клапан 13 и сливное отверстие 12 попадает в дополнительную емкость 6. При наполнении дополнительной емкости 6 до предельного уровня срабатывает блок 19 автоматики, который перекрывает выпускной клапан 13, открывает выпускные клапаны 11, отключает устройство 14 фиксации и подключает обратимый генератор 8 к энергосистеме 17. В результате этого дополнительная емкость 6 под действием веса дождевой воды, находящейся в ней, начинает опускаться вниз, разматывая трос 5 и вращая турбину 4. Вращательные движения передаются от турбины 4 через горизонтальный вал 7 на обратимый генератор 8. Обратимый генератор 8, вращаясь, вырабатывает электрическую энергию, которая передается в энергосистему 17. Во время опускания дополнительной емкости 6 вниз дождевая вода по желобу 3 через открытые выпускные клапаны 11 и через сливные отверстия 9 попадает в ливневые стоки 10. Из ливневых стоков 11 дождевая вода попадает в дренажные каналы 18. Когда дополнительная емкость 6 опустится до своего нижнего положения (рис.5.2, б), то срабатывает блок 19 автоматики, который включает устройство 14 фиксации, открывает выпускной клапан 16 и отключает обратимый генератор 8 от энергосистемы 17. В результате дополнительная емкость 6 фиксируется в своем нижнем положении. Дождевая вода вытекает из дополнительной емкости 6 через выпускной клапан 16 и через сливное отверстие 15 в дренажные каналы 18. Когда вода полностью выльется из дополнительной емкости 6, срабатывает блок 19 автоматики, который отключает устройство 14 фиксации, подключает обратимый генератор 8 к энергосистеме 17, закрывает выпускной клапан 16. Обратимый генератор 8, работая в режиме двигателя, поднимает дополнительную емкость 6 в верхнее положение. Когда емкость 6 поднимается до крайнего верхнего положения, срабатывает блок 19 автоматики, который включает устройство 14 фиксации, фиксируя емкость в ее верхнем положении, открывает выпускной клапан 13 и закрывает выпускные клапаны 11. Далее процесс повторяется.

Работа энергетической установки по рис.5.3 отличается только тем, что во время опускания дополнительной емкости 6 вниз, дож-

девая вода не сливается в дренажные каналы 17, а накапливается в бассейне 20.

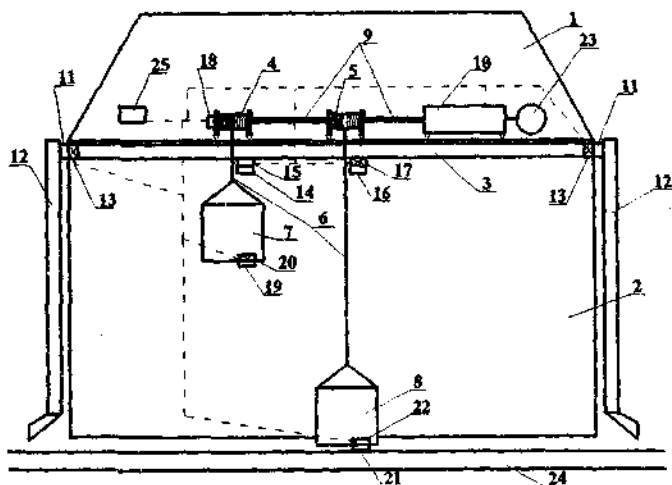
Благодаря тому, что энергетическая установка содержит дополнительную емкость, появляется возможность накопления и использования энергии дождевой воды при дожде любой интенсивности.

Энергетическая установка наиболее эффективно может быть использована в высотных зданиях с большой площадью крыши, в климатических районах с большим количеством осадков, выпадающих в виде дождя.

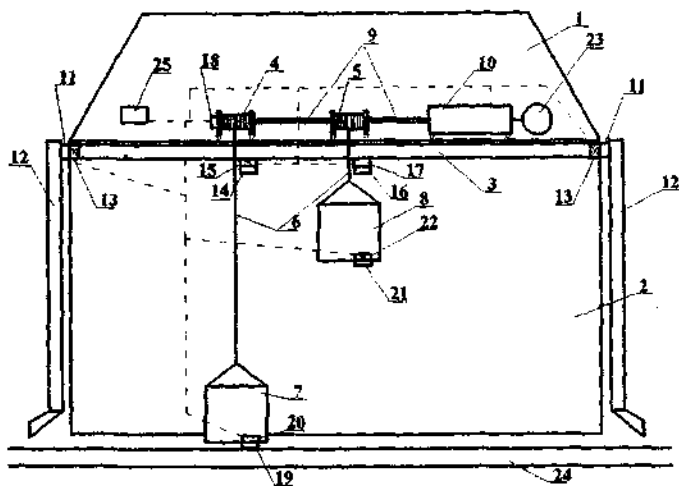
В варианте энергетической установки повышенной эффективности, представленной на рис. 5.4 [104п], дождевая вода накапливается в двух емкостях, которые поочередно опускаются вниз, приводя во вращение генератор, при этом для поочередного подъема опорожненной емкости используется не электроэнергия из энергосистемы, а первичная энергия дождевой воды, что повышает КПД установки.

Энергетическая установка содержит крышу 1 здания 2. Емкость для сбора дождевой воды выполнена в данном случае в виде желоба 3 по периметру крыши 1. Энергетическая установка содержит первую турбину 4 и вторую турбину 5, каждая из них выполнена в виде барабана с намотанным на него тросом 6. Трос 6 первой турбины 4 намотан в противоположном направлении в сравнении с тросом 6 второй турбины 5. На свободном конце троса первой турбины 4 закреплена первая дополнительная емкость 7. На свободном конце троса второй турбины 5 закреплена вторая дополнительная емкость 8. Первая дополнительная емкость 7 и вторая дополнительная емкость 8 расположены ниже емкости (в данном случае в виде желоба) 3.





а



б

Рис. 5.4. Ливневая энергетическая установка с двумя дополнительными емкостями при расположении первой емкости в верхнем положении (а) и расположении второй емкости в верхнем положении (б)

Турбины 4 и 5 установлены на горизонтальном валу 9. Обратимый генератор 10 кинематически связан с горизонтальным валом 9. Же-

лоб 3 через сливные отверстия 11 связан с ливневыми стоками 12. Сливные отверстия 11 снабжены выпускными клапанами 13. В исходном положении трос 6 первой турбины 4 намотан на нее, и первая дополнительная емкость 7 расположена в верхнем положении. Трос 6 второй турбины 5 размотан, и вторая дополнительная емкость 8 находится в нижнем положении. В желобе 3 над первой дополнительной емкостью 7 установлено сливное отверстие 14, снабженное выпускным клапаном 15, а над второй дополнительной емкостью 8 установлено сливное отверстие 16, снабженное выпускным клапаном 17. В верхнем и нижнем положениях первая дополнительная емкость 7 и вторая дополнительная емкость 8 удерживаются при помощи устройства 18 фиксации верхнего и нижнего положений, которое закреплено на первой турбине 4. В донной части первой дополнительной емкости 7 с наружной стороны установлено сливное отверстие 19, снабженное выпускным клапаном 20. В донной части второй дополнительной емкости 8 с наружной стороны установлено сливное отверстие 21, снабженное выпускным клапаном 22. Обратимый генератор 10 связан с энергосистемой 23. У фундамента здания 2 расположены дренажные каналы 24 для отвода использованной дождевой воды. Блок 25 автоматики связан с узлом 18 фиксации верхнего и нижнего положений турбин 4 и 5, обратимым генератором 10 и выпускными клапанами 13, 15, 17, 20 и 22 (на рис.5.4 связи показаны пунктирными линиями).

Установка работает следующим образом. При отсутствии дождя первая дополнительная емкость 7 находится в верхнем положении, а вторая дополнительная емкость 8 внизу, как показано на рис.5.4,а. Первая дополнительная емкость 7 и вторая дополнительная емкость 8, находятся в опорожненном состоянии. Выпускные клапаны 13, 17 и 20 находятся в закрытом положении. Выпускные клапаны 15 и 22 открыты. Во время выпадения осадков в виде дождя дождевая вода стекает по крыше 1 здания 2 в желоб 3. Затем вода через выпускной клапан 15 и сливное отверстие 14 попадает в первую дополнительную емкость 7. При наполнении первой дополнительной емкости 7 до предельного уровня срабатывает блок 25 автоматики, который перекрывает выпускные клапана 15 и 22, открывает выпускные клапаны 13, отключает устройство 18 фиксации и подключает обратимый генератор 10 к энергосистеме 23. В результате этого первая дополнительная емкость 7 под действием веса дождевой воды, нахо-

дящейся в ней, начинает опускаться вниз, разматывая трос 6 и вращая первую турбину 4. Вращательные движения передаются от первой турбины 4 через горизонтальный вал 9 на обратимый генератор 10. Обратимый генератор 10, вращаясь, вырабатывает электрическую энергию, которая передается в энергосистему 23. Вращательные движения от горизонтального вала 9 также передаются на вторую турбину 5, которая, вращаясь, наматывает трос 6 с закрепленной на ней второй дополнительной емкостью 8. Во время опускания первой дополнительной емкости 7 вниз и одновременном поднятии второй дополнительной емкости 8 вверх дождевая вода по желобу 3 через открытые выпускные клапаны 13 и через сливные отверстия 11 попадает в ливневые стоки 12. Из ливневых стоков 12 дождевая вода попадает в дренажные каналы 24. В момент, когда первая дополнительная емкость 7 опустится до своего нижнего положения (рис.5.4,б) и одновременно с этим вторая дополнительная емкость 8 достигнет своего верхнего положения, срабатывает блок 25 автоматики, который включает устройство 18 фиксации, открывает выпускные клапаны 17 и 20, закрывает выпускные клапаны 13 и отключает обратимый генератор 10 от энергосистемы 23. В результате первая дополнительная емкость 7 фиксируется в своем нижнем положении, а вторая дополнительная емкость 8 фиксируется в своем верхнем положении. Дождевая вода вытекает из первой дополнительной емкости 7 через выпускной клапан 20 и через сливное отверстие 19 в дренажные каналы 24. Одновременно с этим дождевая вода, стекающая с крыши 1 в желоб 3, через выпускной клапан 17 и сливное отверстие 16 наполняет вторую дополнительную емкость 8. При наполнении второй дополнительной емкости 8 до предельного уровня и полном опорожнении первой дополнительной емкости 7 срабатывает блок 25 автоматики, который отключает устройство 18 фиксации, подключает обратимый генератор 10 к энергосистеме 23, закрывает выпускные клапаны 17 и 20 и открывает выпускные клапаны 13. В результате этого вторая дополнительная емкость 8 под действием веса дождевой воды, находящейся в ней, начинает опускаться вниз, разматывая трос 6 и вращая вторую турбину 5. Вращательные движения передаются от второй турбины 5 через горизонтальный вал 9 на обратимый генератор 10. Обратимый генератор 10, вращаясь, вырабатывает электрическую энергию, которая передается в энергосистему 23. Вращательные движения от горизонтального

вала 9 также передаются на первую турбину 5, которая, вращаясь, наматывает трос 6 с закрепленной на нем первой дополнительной емкостью 7. Во время опускания второй дополнительной емкости 8 вниз и одновременном поднятии первой дополнительной емкости 7 вверх дождевая вода по желобу 3 через открытые выпускные клапаны 13 и через сливные отверстия 11 попадает в ливневые стоки 12. Из ливневых стоков 12 дождевая вода попадает в дренажные каналы 24. В момент, когда вторая дополнительная емкость 8 опустится до своего нижнего положения (рис.5.4,а) и одновременно с этим первая дополнительная емкость 7 достигнет своего верхнего положения, срабатывает блок 25 автоматики, который включает устройство 18 фиксации, закрывает выпускные клапаны 13, открывает выпускные клапаны 15 и 22 и отключает обратимый генератор 10 от энергосистемы 23. В результате первая дополнительная емкость 7 фиксируется в своем верхнем положении, а вторая дополнительная емкость 8 фиксируется в своем нижнем положении. Дождевая вода вытекает из второй дополнительной емкости 7 через выпускной клапан 22 и через сливное отверстие 21 в дренажные каналы 24. Одновременно с этим дождевая вода, стекающая с крыши 1 в желоб 3, через выпускной клапан 15 и сливное отверстие 14 наполняет первую дополнительную емкость 7. Далее процесс повторяется.

Благодаря тому, что энергетическая установка содержит дополнительные емкости, появляется возможность накопления и использования энергии дождевой воды при дожде любой интенсивности. Использование двух дополнительных емкостей повышает кпд установки, т.к. для подъема опорожненной дополнительной емкости вверх для наполнения используется не электроэнергия из энергосистемы, а первичная энергия дождевой воды, под весом которой наполненная дополнительная емкость опускается вниз.

### **5.3. Некоторые направления создания локальных накопителей энергии**

Известно, что электрическая нагрузка энергосистем в течение суток достаточно сильно изменяется. Отношение наименьшей нагрузки в суточном графике к наибольшей в зависимости от состава потребителей энергосистемы может составлять 0,8 – 0,6 и менее. Это означает, что для покрытия нагрузки в часы максимума система

должна располагать соответствующей генерирующей мощностью, которая в часы минимума не используется. В результате ухудшаются экономические показатели выработки электроэнергии из-за неэффективного использования установленной мощности электростанций. Кроме того, усложняется проблема прохождения ночного минимума нагрузки, которая может оказаться меньше технического минимума электростанций, работавших в часы максимума нагрузки. При этом кратковременный останов оборудования электростанций может оказаться невозможным, либо связан с дополнительными экономическими потерями и преждевременным износом оборудования. Особенно остро возникает проблема покрытия максимальных суточных нагрузок и соответствующего прохождения ночных провалов нагрузки в системах, в которых сооружаются мощные атомные электростанции, не приспособленные к работе в переменных режимах.

Известно, что эта проблема решается с помощью гидроаккумулирующих электростанций, которые содержат два водоема, расположенные на различных высотах, и реверсивные генераторы. Аккумуляирование энергии происходит в верхнем водоеме. В этом случае в часы наибольших нагрузок системы такая установка работает как обычная гидроэлектростанция, вырабатывая электрическую мощность и отдавая ее в систему. При этом потребности в мощности других электростанций уменьшаются. В часы наименьших нагрузок установка работает в насосном режиме, перекачивая воду из нижнего водоема в верхний и создавая дополнительную электрическую нагрузку в системе. В результате минимальная нагрузка системы увеличивается, а условия прохождения ночного минимума улучшаются.

Однако гидроаккумулирующие электростанции могут сооружаться лишь при определенных топогеологических условиях, которые позволяют обеспечить создание двух водоемов с перепадом уровней между ними в десятки метров. Такие условия далеко не всегда имеют место. В связи с этим представляется важным разработка нетрадиционных направлений создания накопителей энергии, работающих на принципах гидроаккумулирующих электростанций. Рассмотрим некоторые из них.

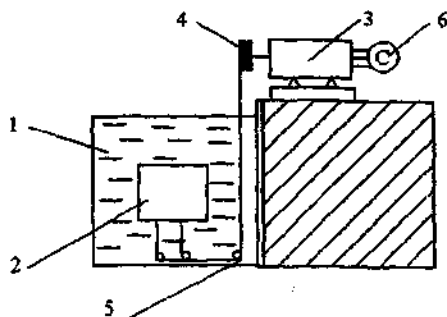


Рис. 5.5. Гидроаккумулирующая установка

В [90п] предложена гидроаккумулирующая установка, содержащая водоем 1, накопитель энергии 2 в виде полой емкости, расположенной в водоеме, реверсивный генератор 3, расположенный на валу 4, соединенном с полой емкостью кинематической связью 5. Генератор подключен к энергосистеме 6 (рис. 5.5). В часы ночного минимума нагрузки, когда в энергосистеме имеется избыток генерирующей мощности, реверсивный генератор 3 работает в двигательном режиме и создает дополнительную нагрузку. При этом полая емкость 2 втягивается в водоем 1, запасая энергию, определяемую выражением

$$W = (\rho g V - Mg)h, \quad (5.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $V$  – объем погруженной в воду полой емкости;  $M$  – масса полой емкости;  $h$  – глубина погружения в воду полой емкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Хранение запасенной энергии осуществляется за счет фиксации стопором положения полой емкости 2. В период максимальных суточных нагрузок, когда в системе возможен дефицит генерирующей мощности, накопитель энергии работает в режиме выдачи мощности. При этом после отпускания стопора полая емкость 2 под действием выталкивающей силы всплывает. Генератор 4, кинематически связанный с полой емкостью, начинает работать в генераторном режиме, отдавая накопленную энергию в энергосистему 6.

Из формулы (5.1) следует, что чем больше плотность воды  $\rho$ , тем больше накопленная энергия. Плотность воды увеличивается, если она содержит растворимую соль, например, хлористый натрий. Ко-

личество соли должно быть таково, что оно достаточно для получения в водоеме ее насыщенного раствора или близкого к нему. В этом случае при нахождении полой емкости в нижнем положении запа-саемая в накопителе энергия определяется выражением:

$$W = (kpV - M)gh. \quad (5.2)$$

Здесь коэффициент  $k$  характеризует увеличение плотности раствора соли  $\rho_p$ , находящегося в водоеме, по сравнению с плотностью воды  $\rho$ :

$$k = \rho_p / \rho.$$

Так, например, насыщенный раствор хлористого натрия содержит 28,75% соли. При 26% соли и температуре 15°C плотность раствора  $\rho_p$  составляет 1200 кг/м<sup>3</sup>. Плотность воды  $\rho = 998,3$  кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, коэффициент  $k = 1,2$ . Благодаря этому увеличивается запа-саемая энергия, а изменение плотности раствора увеличивает выталкивающую силу, действующую на полую емкость.

Недостатком описанной гидроаккумулирующей установки является то, что для втягивания полой емкости в водоем требуется достаточно большое количество электроэнергии, потребляемой установкой из энергосистемы. Для устранения этого недостатка предложена гидроаккумулирующая установка, в которой полая емкость выполнена из эластичного материала (рис. 5.6) [91п, 95п].

Гидроаккумулирующая установка, содержит водоем 1, аккумулятор энергии в виде полой емкости 2 из эластичного материала, реверсивный генератор 3, ресивер 4, компрессор 5, газопровод 6 из упругого материала, запорное устройство 7 на газопроводе 6, отверстие 8 в верхней части полой емкости 2, кинематическую связь между реверсивным генератором 3 и полой емкостью в виде троса 9 и системы блоков 10, 11, 12. Полая емкость 2 посредством газопровода 6 через запорное устройство 7, соединена с ресивером 4, который соединен с компрессором 5. На рис. 5.6 полая емкость 2 находится в нижней части водоема 1 и удерживается стопорами, расположенными в нижней части водоема 1. При этом отверстие 8 закрыто.

На рис. 5.6 полая емкость 2 находится в верхней части водоема 1, при этом отверстие 8 открыто и частично или полностью, как и газопровод 6, находятся вне водоема.

Установка работает следующим образом. При нахождении полой емкости 2 из упругого материала в нижней части водоема 1 она

удерживается стопором и находится под давлением воздуха (рис.5.6). Запорное устройство 7 и отверстие 8 закрыто. При этом полая емкость 2 из гибкого материала находится в полностью распрямленном состоянии и занимает наибольший объем. В результате по закону Архимеда на нее действует наибольшая выталкивающая сила. Установка находится в режиме хранения энергии.

В часы максимума нагрузки в энергосистеме стопор отпускает емкость 2, и она, под действием силы Архимеда, начинает движение вверх до положения, указанного на рис.5.6, увлекая за собой трос 9, который вращает вал реверсивного генератора 3, в результате чего вырабатывается электрическая энергия, которая отдается в энергосистему. Благодаря тому, что газопровод 6 выполнен из упругого материала, полая емкость 2 перемещается в водоеме 1 свободно.

После того как полая емкость 2 всплыла, она фиксируется стопором в статичном положении. При прохождении "ночного провала" нагрузки в энергосистеме, когда наблюдается избыток генерируемой мощности, полая емкость запасает энергию. При этом открывается отверстие 8 (рис.5.6), и воздух выпускается из полой емкости 2, благодаря избыточному давлению и давлению на полую емкость со стороны воды водоема 2. В результате полая емкость 2 займет плоское положение (на рис.5.6 – сплошные линии) с минимальным объемом газа  $V_2$ . При этом уменьшается сила Архимеда и силы сопротивлений, которые нужно преодолеть при работе генератора 3 в двигательном режиме при движении полой емкости 2 с поверхности вниз, что в свою очередь снизит количество потребляемой энергии.

После того как объем полой емкости 2 уменьшится до некоторого значения  $V_2$ , отверстие 8 закрывается, реверсивный генератор 3 начинает работать в двигательном режиме и опускать полую емкость 2 в нижнюю часть водоема 1, установка начинает запасать энергию.



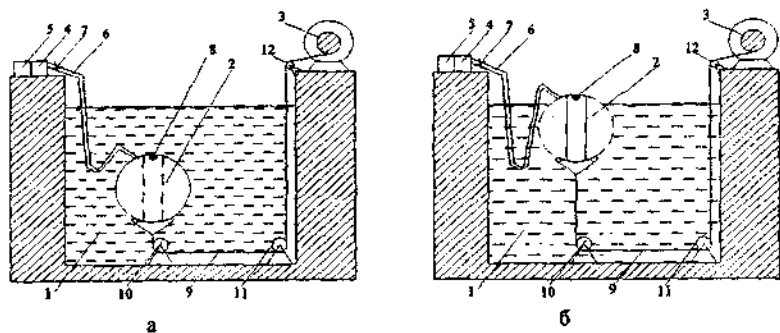


Рис. 5.6. Гидроаккумулирующая установка при нахождении полой емкости в нижнем (а) и верхнем (б) положении

После того как полая емкость 2 погрузилась на некоторую глубину  $h$  (рис.5.6), стопор фиксирует положение полой емкости 2. Открывается запорное устройство 7, и из ресивера 4 воздух по газопроводу 6 поступает в полую емкость 2. Происходит “надувание” полой емкости до некоторого объема  $V_1$  (на рис.5.6 сплошные линии), а давление воздуха в ресивере 4 несколько снижается. Далее закрывается запорное устройство 7, и ресивер 4 отключается. Компрессор 5 закачивает воздух в ресивер 4 до восстановления в нем рабочего давления. В результате “надувания” полой емкости 2 она обладает запасенной энергией. Затем описанная процедура движения полой емкости и выработки электроэнергии повторяется.

В связи с тем, что полая емкость 2 перемещается вниз в водоеме 1 в свернутом состоянии с малым объемом, затраты электроэнергии на работу в режиме двигателя существенно уменьшаются.

Таким образом, благодаря изменению формы полой емкости, выполненной из гибкого материала, от “надутой” до плоской, уменьшается необходимое количество электроэнергии для перевода полой емкости в режим хранения энергии.

В [92п] предложена гидроаккумулирующая установка, предназначенная для реализации на речном стоке воды и вообще не требующая затрат электроэнергии для перемещения полой емкости из

верхнего положения в нижнее. Напротив, конструкция выполнена таким образом, что при перемещении емкости из верхнего положения в нижнее вырабатывается дополнительное количество энергии.

Гидроэнергоаккумулирующая установка содержит заполненный водой водоем 1, разделенный на две части шлюзом 2, аккумулятор энергии в виде полой емкости 3, расположенной внутри шлюза 2, реверсивный генератор 4, соединенный с полой емкостью 3 кинематической связью 5 и присоединенный к энергосистеме 6 (рис.5.7). Шлюз 2 в верхней части содержит фиксаторы 7 полой емкости 3. Шлюз 2 в нижней части также содержит фиксаторы 8 полой емкости 3. Полая емкость 3 снабжена отверстиями 9 в верхней части и отверстиями 10 в нижней части. На рис.5,г показано нахождение полой емкости 3 в верхней части шлюза 2. Фиксаторы 7 в верхней части шлюза расположены на уровне, обеспечивающем полное всплытие полой емкости 3 под действием выталкивающей силы.

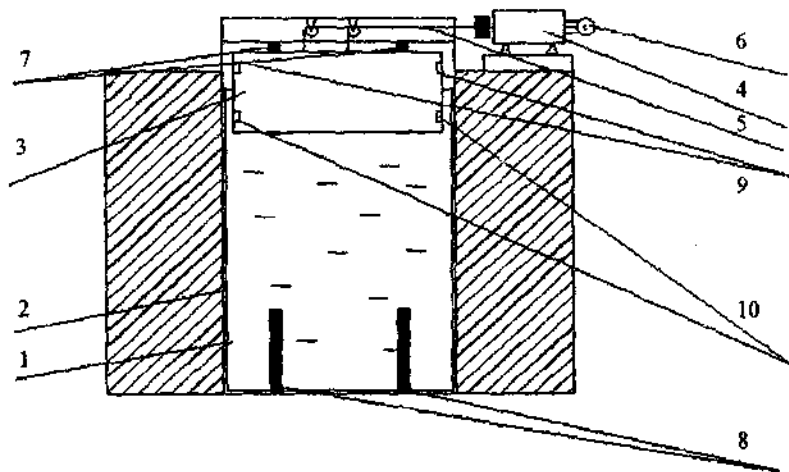


Рис.5.7. Гидроэнергоаккумулирующая установка

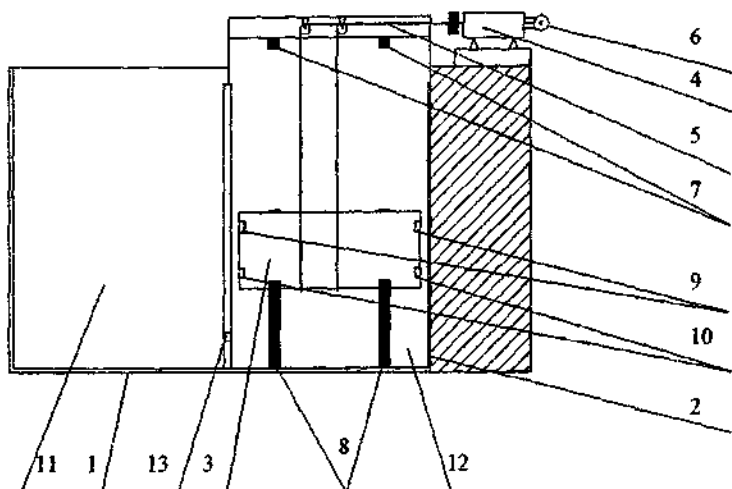


Рис. 5.8. Гидроэнергоаккумулирующая установка со шлюзом в виде двух камер

На рис. 5.8 изображена гидроэнергоаккумулирующая установка, в которой шлюз 2 выполнен в виде двух камер 11 и 12, которые в нижней части соединены между собой отверстиями 13. При этом полая емкость 3 размещена в одной из камер, например, в камере 12.

На рис. 5.9 показан общий вид сверху гидроэнергоаккумулирующей установки с одной камерой, а на рис. 5.10 — общий вид гидроэнергоаккумулирующей установки, где шлюз 2 выполнен в виде двух камер 11 и 12, в одной из которых, например, в камере, расположена полая емкость 3. Камеры соединены между собой отверстиями 13.

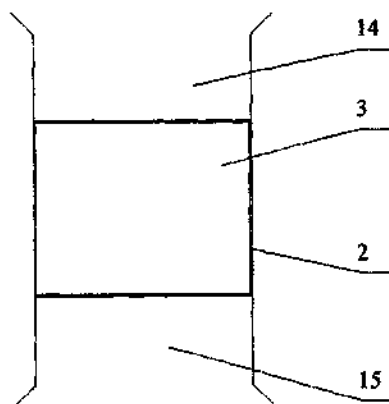


Рис. 5.9. Вид сверху гидроэнергoакумулирующей установки

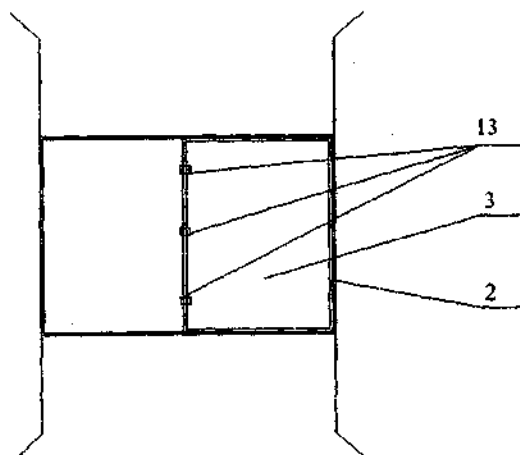


Рис. 5.10. Вид сверху гидроэнергoакумулирующей установки со шлюзом в виде двух камер

Установка работает следующим образом. При нахождении полой емкости 3 в верхнем положении шлюза 2 (рис.5.7), она удерживается фиксаторами 7, а вода из шлюза 2 выпускается в нижнюю часть водоема 15 (рис.5.9) через специальные отверстия. После этого открываются отверстия 9 в верхней части полой емкости 3, и она заполня-

ется водой из верхней части водоема 14 (рис.5.9). В заполненном состоянии емкости 3 освобождаются фиксаторы 7, и под действием силы тяжести емкость 3 опускается вниз, вплоть до крайнего нижнего положения, где затем она блокируется фиксаторами 8 в нижней части шлюза (рис.5.7). При этом благодаря кинематической связи 5 полый емкости 3 с электрическим генератором 4 вырабатывается энергия, которая выдается в систему 6.

При фиксированном положении полый емкости 3 с помощью фиксаторов 8 открываются отверстия 10 в нижней части, и вода из емкости 3 выливается в шлюз 2.

Затем шлюз 2 дополнительно заполняется водой из верхней части водоема 14 (рис.5.9) с помощью специальных отверстий. При заполненном шлюзе фиксаторы 8 отпускаются, и полая емкость 3 под действием выталкивающей силы поднимается вверх, вплоть до крайнего верхнего положения. При этом благодаря кинематической связи 5, приводится во вращение электрический генератор 4, который вырабатывается электроэнергию и выдает ее в систему 6. В крайнем верхнем положении емкость 3 блокируется фиксаторами 7, после чего вода из шлюза 2 выпускается в нижнюю часть водоема 15 (рис.5.9). Затем описанная процедура движения полый емкости и выработки электроэнергии повторяется.

При выполнении гидроэнергоаккумулирующей установки со шлюзом в виде двух камер 11 и 12 (рис.5.10) имеется возможность использовать ее для пропуска судов через шлюз. При нахождении заполненной емкости 3 в крайнем нижнем положении вода выливается в камеру 12, откуда перетекает в камеру 11, путем открытия отверстий 13. После чего эти отверстия закрываются. Благодаря этому экономится вода из верхней части водоема для дальнейшего заполнения камеры 11 для пропуска судов через нее.

Таким образом, выработка электроэнергии при опускании вниз заполненной водой емкости и при ее всплытии в опорожненном виде позволяет повысить эффективность использования водной энергии.

Оригинальное решение гидроаккумулирующей электростанции, не требующее специального рельефа местности с двумя водоемами, находящимися на различных уровнях земной поверхности, предложено в [93п]. Гидроаккумулирующая электростанция состоит из нижнего бассейна 1, здания станции 2 с обратимыми агрегатами тур-

бина-насос и генератор-двигатель, агрегатного затвора 3, напорного водовода 4, компрессорной станции 5, газопровода 6, верхнего резервуара с водой 7, летательного аппарата легче воздуха 8, который жестко удерживается растяжками 9 (рис. 5.11).

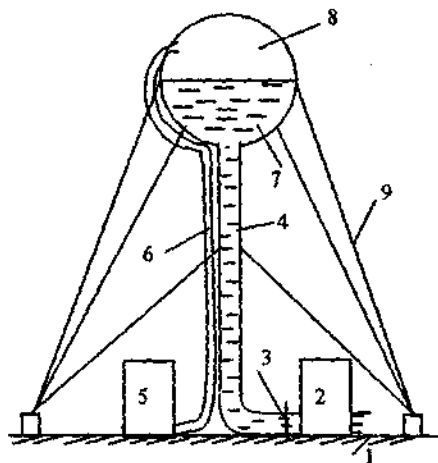


Рис. 5.11. Гидроаккумулирующая электростанция с резервуаром, прикрепленным к летательному аппарату легче воздуха

До начала эксплуатации летательный аппарат 8 с помощью компрессорной станции 5 и газопровода 6 заполняют газом легче воздуха. При этом он поднимается на высоту, ограничиваемую длиной растяжек 9. Во время эксплуатации необходимое давление газа в летательном аппарате 8 поддерживается с помощью автоматического включения компрессорной станции 5.

В насосном режиме обратимый агрегат работает как двигатель-насос, потребляя электроэнергию из энергосистемы. Вода из нижнего бассейна 1 по напорному водоводу 4 при открытом агрегатном затворе 3 закачивается в верхний резервуар 7.

После завершения работы станции в насосном режиме агрегатный затвор 3 закрывается.

Для работы станции в генераторном режиме агрегатный затвор 3 открывают, вода из верхнего резервуара 7 через водовод 4 поступает

в обратимый агрегат, который начинает работать в режиме турбина-генератор и отдавать электроэнергию в энергосистему.

В рассмотренных накопителях энергии целесообразно использовать обратимые агрегаты с обратимыми электрическими генераторами, валы которых в генераторном и двигательном режимах должны вращаться в противоположные стороны. Наиболее просто реализация этого требования осуществляется путем изменения порядка чередования фаз напряжений, подводимых к обмотке статора генератора. Для этого используются реверсирующие выключатели [26]. Для маломощных накопителей, использующих гидроресурсы, может быть использована простейшая схема подключения обратимых генераторов, приведенная на рис. 5.12,а. Здесь обратимый генератор ОГ подключен к системе С с помощью реверсирующих выключателей  $B_r$  для работы в генераторном режиме и  $B_d$  для работы в двигательном режиме. При включенном выключателе  $B_r$  на зажимах обратимого генератора обеспечивается прямое чередование фаз  $a - b - c$ , а при включенном выключателе  $B_d$  — обратное чередование фаз  $a - c - b$ .

Для быстрого торможения и остановки обратимого агрегата, работавшего в турбинном режиме, к выводам генератора могут быть подключены через выключатели омические или жидкостные сопротивления. На них включается обмотка статора генератора, отключенного от сети и частично возбужденного.

На крупных обратимых генераторах для пуска их в двигательном режиме может использоваться схема со статическим преобразователем частоты СПЧ и пусковой системой шин ПСИ (рис. 5.12,б) либо с вспомогательным разворотным асинхронным двигателем [26]. При наличии на объекте нескольких обратимых агрегатов для пуска одного из них в насосном режиме предложено также использование другого агрегата, работающего в турбинном режиме, и специальных схем коммутации [94п].

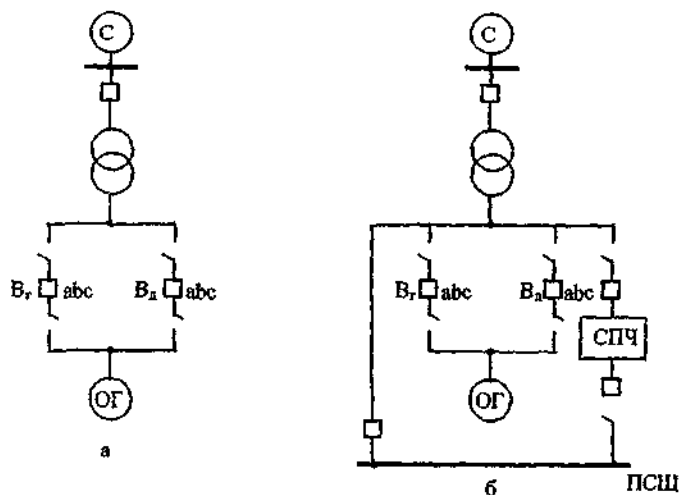


Рис. 5.12. Схема обратимого генератора в режиме двигателя с реверсирующими выключателями (а) и дополнительным статическим преобразователем частоты (б)

Имеются предложения по созданию гибридных накопителей энергии, использующих одновременно энергию ветра и гидроресурсы [96п, 97п]. Основная идея заключается в том, что энергия ветра используется для подъема воды на определенную высоту, которая затем пропускается через гидроагрегаты, вырабатывая электроэнергию. Принципиальная упрощенная схема такой электростанции изображена на рис. 5.13, где 1 и 2 соответственно верхний и нижний резервуар, 3 – демпферный резервуар, 4 – здание ГЭС с гидроагрегатами, 5 – водоподъемный ветроагрегат, 6 – трубопровод, 7 – водоподъемное устройство.



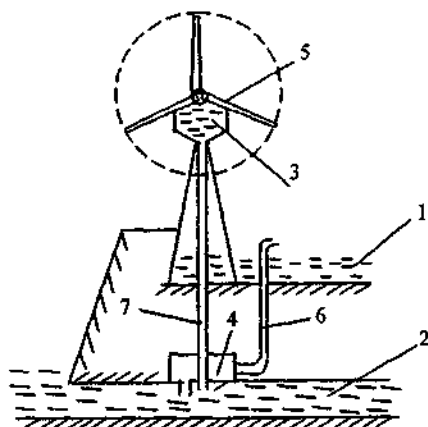


Рис. 5.13. Схематичное изображение ветрогидроаккумулирующей электростанции

При отсутствии ветра и накопленной воды в демпферном резервуаре 3 станция работает как обычная ГЭС, срабатывая воду из верхнего резервуара 1 через трубопровод 6 и спуская ее в нижний резервуар 2. При наличии ветра достаточной силы с помощью водоподъемного ветроагрегата 5 через водоподъемное устройство 7, снабженное специальными ковшевыми элеваторами, вода поступает из нижнего резервуара 2 в демпферный резервуар 3. Затем накопленная в резервуаре 3 вода может использоваться в нужные моменты времени для выработки дополнительной электроэнергии с помощью устройства 7 и специальных гидроагрегатов, установленных в здании 4 ГЭС.

#### 5.4. Трансформаторы с расширенными функциональными возможностями для распределительных систем передачи электроэнергии

Как известно, в распределительных электрических сетях общего назначения трансформаторы 6-20/0,38 кВ выполняют без регулирования напряжения под нагрузкой. При этом диапазон регулирования со снятием напряжения составляет  $\pm 5\%$ , т.е. 10% (рис. 5.14,а). При этом требуемое качество напряжения у электроприемников обеспе-

чивается за счет соответствующего выбора площади сечения проводников на линии по допустимой потере напряжения, которая для сетей 6-20 кВ принимается равной 6-10% от номинального напряжения сети. Для реализации такого подхода требуются значительные расходы проводникового материала.

Существенной экономии проводникового материала можно достичь, если в распределительных сетях применить трансформаторы с расширенным диапазоном регулирования напряжения. Принципиально реализация такого подхода осуществляется путем выполнения распределительных трансформаторов с двумя переключателями ответвлений со снятием напряжения. На рис. 5.14, а показана схема выполнения основной обмотки ОО обычного трансформатора и регулировочной обмотки РО. Основная обмотка здесь подключена непосредственно к ответвлению, соответствующему -5%. Если принять это положение применительно к трансформатору с расширенным диапазоном регулирования, то схемы соединения основной и регулировочных обмоток принимают вид, показанный на рис. 5.14,б-ж. В зависимости от взаимного положения переключателей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  могут быть обеспечены ответвления +5%, 0% и -5% как в обычном трансформаторе (рис. 5.14,б-д), так и в дополнительно ответвления -10% и -15% (рис. 5.14,е,ж).

В результате диапазон регулирования трансформатора составит от +5% до -15%, т.е. 20%.

Если основную обмотку трансформатора выполнить на напряжение, соответствующее ответвлению 0%, то при этом же числе витков дополнительной обмотки можно обеспечить диапазон регулирования  $\pm 10\%$ , т.е. те же 20%. Схемы такого трансформатора приведены на рис. 5.15.

Увеличение диапазонов регулирования распределительных трансформаторов позволяет повысить расчетную допустимую потерю напряжения на 10%, доведя ее до 16-20% от номинального напряжения, и за счет этого уменьшить требуемые площади сечения проводников для обеспечения нужного качества напряжения. При этом каждому ответвлению трансформатора из расширенного диапазона регулирования в сети будет иметь место соответствующая зона (рис. 5.16). При выполнении трансформаторов по схемам, приведенным на рис. 5.15, появляется дополнительное преимущество в том, что ответвления +10%, установленные в ближней зоне, позво-

лят в центре питания ЦП (см. рис. 5.16) поддерживать повышенные режимные напряжения. Это в свою очередь будет приводить к уменьшению потерь мощности.

Практическая реализация трансформатора с расширенным диапазоном регулирования приведена на рис. 5.17, 5.18 [86п].

На рис.5.17 показан вид сверху трансформатора высокого напряжения со снятой крышкой, где в баке 1 трансформатора расположены основные обмотки 2 фаз А,В,С, ответвления 3 регулировочных обмоток (на рис. не показаны) фаз А,В,С, переключатель ответвлений с валом 4, планка 5 с изолированными контактами 6 в фазах А,В,С, тяга, состоящая из токопроводящей части 7 и изолированной части 8, подвижные контакты 9. Основные обмотки 2 фаз и регулировочные обмотки с ответвлениями 3 фаз А, В, С расположены внутри бака 1. Ответвления 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с изолированными контактами 6 в каждой фазе на планке 5. Тяга состоит из токопроводящей части 7, расположенной внутри бака 1, и изолированной части 8, соединена с переключателем ответвлений с валом 4. Подвижные контакты 9 закреплены на токопроводящей части 7 тяги в диапазоне ответвлений 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С. Благодаря тому, что концы регулировочных обмоток фаз А,В,С непосредственно соединены с соответствующими подвижными контактами 9, расположенными на токопроводящей части 7 тяги, на ней обеспечивается соединение фаз в звезду. Трансформатор содержит дополнительный переключатель 10 ответвлений, дополнительную планку 11 с изолированными контактами 12 в каждой фазе, дополнительную тягу 13 из изолированного материала с дополнительными подвижными контактами 14, изолированными от дополнительной тяги 13, выводы 15 основных обмоток фаз А,В,С, дополнительные ответвления 16 регулировочных обмоток. Концы выводов 15 основных обмоток фаз А,В,С посредством гибкого токопровода присоединены к дополнительным подвижным контактам 14, которые закреплены на дополнительной тяге 13. Дополнительные ответвления 16 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с соответствующими контактами на дополнительной планке 11.

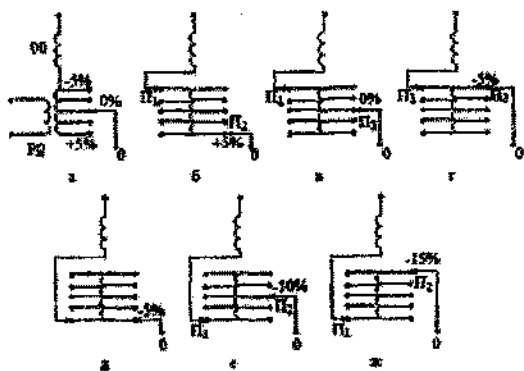


Рис. 5.14. Трансформатор с расширенным диапазоном регулирования +5 - -15%

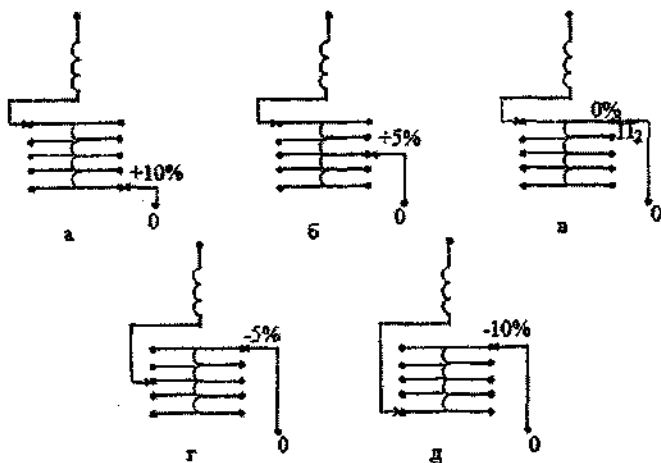


Рис. 5.15. Трансформатор с расширенным диапазоном регулирования  $\pm 10\%$

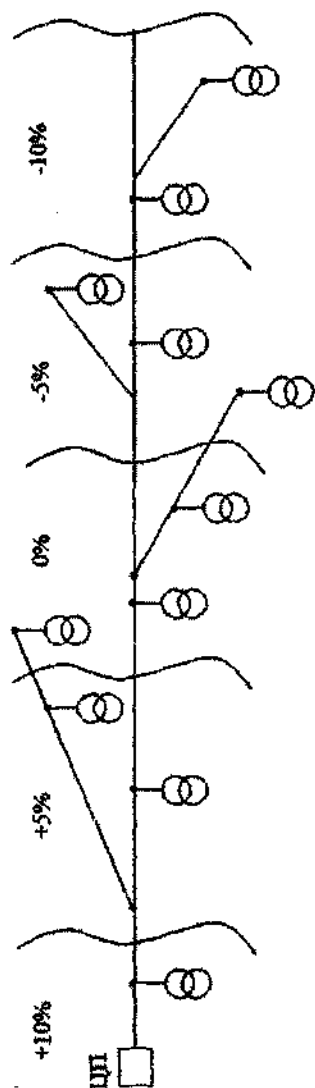


Рис. 5.16. Зоны расстановки различных ответвлений трансформаторов в распределительной сети

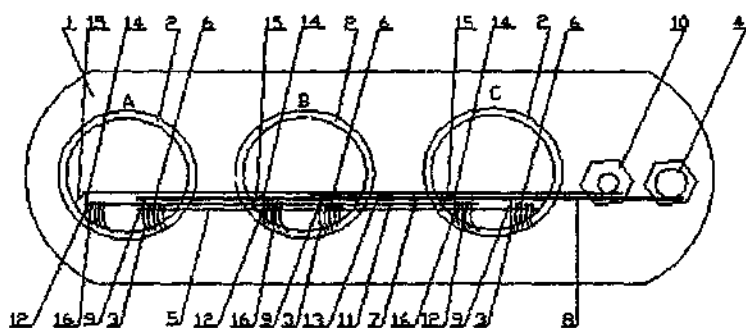


Рис. 5.17. Вид сверху трансформатора с расширенным диапазоном регулирования

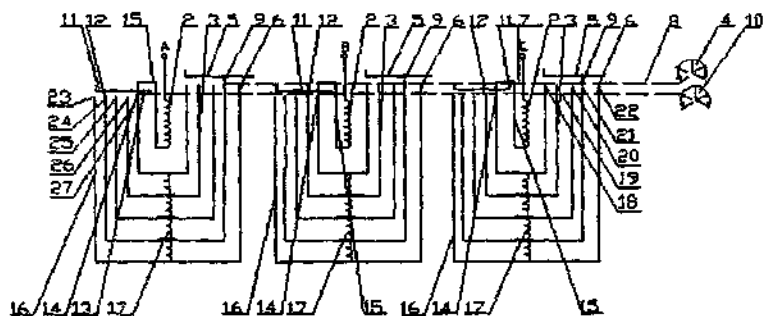


Рис. 5.18. Схема обмоток трансформатора

На рис.5.18 показана схема соединения обмоток, где расположены основные обмотки 2 фаз А,В,С, регулировочные обмотки 17 с ответвлениями 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С, которые обозначены 18, 19, 20, 21, 22 фаз А,В,С, переключатель ответвлений с валом 4, планка 5 с изолированными контактами 6 в каждой фазе, тяга, состоящая из токопроводящей части 7 и изоляционной части 8, подвижные контакты 9. Основные обмотки фаз и ответвления 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С расположены внутри бака 1. Ответвления 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с изолированными контактами 6 в каждой фазе на планке 5. Тяга состоит из токопроводящей части 7, расположенной внутри бака 1, и изолированной части 8, закрепленной к переключателю ответвлений с валом 4. Подвижные контакты 9 закреплены на токопроводящей части 7 тяги в диапазоне ответвлений 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С. Благодаря тому, что концы регулировочных обмоток каждой из фаз А,В,С непосредственно соединены с соответствующими подвижными контактами, расположенными на токопроводящей части 7 тяги, на ней обеспечивается соединение фаз в звезду. Трансформатор содержит дополнительный переключатель 10 ответвлений, дополнительную планку 11 с изолированными контактами 12 в каждой фазе, дополнительную тягу из изолированного материала 13 с дополнительными подвижными контактами 14, изолированными от дополнительной тяги 13, выводы 15 основных обмоток фаз А,В,С, дополнительные ответвления 16 регулировочных обмоток фаз А,В,С, которые обозначены 23,24,25,26,27. Концы выводов 15 основных обмоток фаз А,В,С посредством гибкого токопровода присоединены к дополнительным подвижным контактам 14, которые закреплены на дополнительной тяге 13. Дополнительные ответвления 16 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с соответствующими контактами на дополнительной планке 11.

Трансформатор работает следующим образом. При установке дополнительным переключателем 10 ответвлений дополнительного подвижного контакта 14 в положение 23, а подвижного контакта 9 переключателем ответвлений с валом 4 в положение 18 коэффициент трансформации будет зависеть только от количества витков основной обмотки. В этом случае он будет наименьшим, и напряжение на вторичной стороне трансформатора будет наибольшее. При установке подвижного контакта 9 переключателем ответвлений с валом 4

в положение 5, а дополнительного переключателя 10 – в предыдущее положение, вся регулировочная обмотка 17 будет соединена согласно с основной обмоткой 2. При этом коэффициент трансформации будет наибольшим, а напряжение на вторичной стороне наименьшим. При установке дополнительного подвижного контакта 14 в положение 27 с помощью дополнительного переключателя 10, а подвижного контакта 9 в положение 18 с помощью переключателя ответвлений с валом 4, вся регулировочная обмотка 17 включена встречно с основной обмоткой 2, и этим обеспечивается минимальное значение коэффициента трансформации для данного устройства регулирования трансформации. При этом на вторичной стороне трансформатора будет обеспечиваться максимальное напряжение. Таким образом, с помощью данного устройства регулирования расширяется диапазон регулирования напряжения.

Так, например, при установке дополнительным переключателем 10 дополнительного подвижного контакта 14 в положение 23, а подвижного контакта 9 переключателем ответвлений с валом 4 в положение 18 коэффициент трансформации будет зависеть только от количества витков основной обмотки 2. В этом случае он будет наименьшим, и напряжение на вторичной стороне трансформатора будет +5% от номинального. При установке подвижного контакта 9 переключателем ответвлений с валом 4 в положение 22, а дополнительного переключателя 10 – в предыдущее положение, вся регулировочная обмотка будет соединена согласно с основной обмоткой. При этом коэффициент трансформации будет наибольшим, а напряжение на вторичной стороне -5% от номинального. При установке подвижного контакта 14 в положение 27 с помощью дополнительного переключателя 10, а подвижного контакта 9 в положение 18 с помощью переключателя ответвлений с валом 4, вся регулировочная обмотка 17 включена встречно с основной обмоткой 2, и этим обеспечивается минимальное значение коэффициента трансформации для данного устройства регулирования трансформации. При этом на вторичной стороне трансформатора будет обеспечиваться напряжение на вторичной стороне равное +15%.

Другой вариант трансформатора с расширенным диапазоном регулирования предложен в [87п].

На рис.5.19 показан вид сверху трансформатора со снятой крышкой, где в баке 1 трансформатора расположены основные обмотки 2



фаз А,В,С, ответвления 3 регулировочных обмоток (на рис. не показаны) фаз А,В,С, переключатель ответвлений с валом 4, планка 5 с изолированными контактами 6 в фазах А,В,С, тяга, состоящая из токопроводящей части 7 и изолированной части 8, подвижные контакты 9. Основные обмотки 2 фаз и регулировочные обмотки с ответвлениями 3 фаз А, В, С расположены внутри бака 1. Ответвления 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с изолированными контактами 6 в каждой фазе на планке 5. Тяга состоит из токопроводящей части 7, расположенной внутри бака 1, и изолированной части 8, соединена с переключателем ответвлений с валом 4. Подвижные контакты 9 закреплены на токопроводящей части 7 тяги в диапазоне ответвлений 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С. Благодаря тому, что концы регулировочных обмоток фаз А,В,С непосредственно соединены с соответствующими подвижными контактами 9, расположенными на токопроводящей части 7 тяги, на ней обеспечивается соединение фаз в звезду. Трансформатор содержит дополнительную планку 10 с изолированными контактами 11 в каждой фазе, дополнительную тягу 12 из изолированного материала с дополнительными подвижными контактами 13, изолированными от дополнительной тяги 12, выводы 14 основных обмоток фаз А,В,С, дополнительные ответвления 15 регулировочных обмоток. Концы выводов 14 основных обмоток фаз А,В,С посредством гибкого токопровода присоединены к дополнительным подвижным контактам 13, которые закреплены на дополнительной тяге 12. Дополнительные ответвления 15 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с соответствующими контактами на дополнительной планке 11. Переключатель ответвлений с валом 4 содержит вал с двумя шестернями разных диаметров и высот ( на рис. не показаны), одна из которых соединена с тягой 7 – 8, а другая – с дополнительной тягой 12. В валу выполнены проемы для шпонок, шпонки выведены наружу рукоятки переключателя ( на фиг. не показаны).

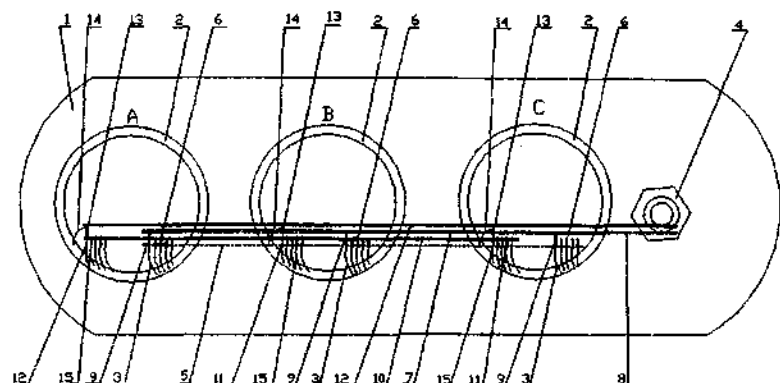


Рис. 5.19. Трансформатор с расширенным диапазоном регулирования с переключателями на общем валу

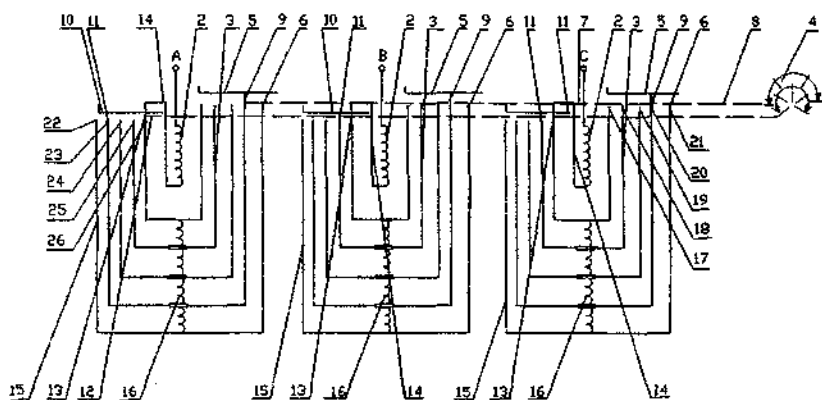


Рис. 5.20. Схема регулировочных обмоток трансформатора с переключателями на общем валу

На рис.5.20 показана схема соединения обмоток, где расположены основные обмотки 2 фаз А,В,С, регулировочные обмотки 16 с ответвлениями 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С, которые обозначены 17, 18, 19, 20, 21 фаз А,В,С, переключатель ответвлений с

валом 4, планка 5 с изолированными контактами 6 в каждой фазе, тяга, состоящая из токопроводящей части 7 и изоляционной части 8, подвижные контакты 9. Основные обмотки фаз и ответвления 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С расположены внутри бака 1. Ответвления 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с изолированными контактами 6 в каждой фазе на планке 5. Тяга состоит из токопроводящей части 7, расположенной внутри бака 1, и изолированной части 8, закрепленной к переключателю ответвлений с валом 4. Подвижные контакты 9 закреплены на токопроводящей части 7 тяги в диапазоне ответвлений 3 регулировочных обмоток фаз А,В,С. Благодаря тому, что концы регулировочных обмоток каждой из фаз А,В,С непосредственно соединены с соответствующими подвижными контактами, расположенными на токопроводящей части 7 тяги, на ней обеспечивается соединение фаз в звезду. Трансформатор содержит переключатель ответвлений с валом 4, дополнительную планку 10 с изолированными контактами 11 в каждой фазе, дополнительную тягу из изолированного материала 12 с дополнительными подвижными контактами 13, изолированными от дополнительной тяги 12, выводы 14 основных обмоток фаз А,В,С, дополнительные ответвления 15 регулировочных обмоток фаз А,В,С, которые обозначены 22,23,24,25,26. Концы выводов 14 основных обмоток фаз А,В,С посредством гибкого токопровода присоединены к дополнительным подвижным контактам 13, которые закреплены на дополнительной тяге 12. Дополнительные ответвления 15 регулировочных обмоток фаз А,В,С соединены с соответствующими контактами на дополнительной планке 10.

Трансформатор работает следующим образом. Благодаря наличию проемов для шпонок в валу переключателя ответвлений с валом 4 и шпонок, выведенных наружу рукоятки переключателя, вал переключателя с помощью соответствующей шестерни на валу соединяется с тягой 7 — 8 или с дополнительной тягой 12. В результате появляется возможность переключения ответвлений регулировочных обмоток 16 в одно из положений 17 — 21 и в одно из положений 22 — 26. При установке переключателем ответвлений с валом 4 дополнительного подвижного контакта 13 в положение 22, а подвижного контакта 9 в положение 17 коэффициент трансформации будет зависеть только от количества витков основной обмотки. В этом случае он будет наименьшим, и напряжение на вторичной стороне транс-

форматора будет наибольшее. При установке подвижного контакта 9 переключателем ответвлений с валом 4 в положение 5 вся регулировочная обмотка 16 будет соединена согласно с основной обмоткой 2. При этом коэффициент трансформации будет наибольшим, а напряжение на вторичной стороне наименьшим. При установке дополнительного подвижного контакта 13 в положение 26 с помощью переключателя ответвлений с валом 4, а подвижного контакта 9 в положение 17, вся регулировочная обмотка 16 включена встречно с основной обмоткой 2, и этим обеспечивается минимальное значение коэффициента трансформации для данного устройства регулирования трансформации. При этом на вторичной стороне трансформатора будет обеспечиваться максимальное напряжение. Таким образом, с помощью данного устройства регулирования расширяется диапазон регулирования напряжения.

Так, например, при установке переключателем ответвлений с валом 4 дополнительного подвижного контакта 13 в положение 22, а подвижного контакта 9 в положение 17 коэффициент трансформации будет зависеть только от количества витков основной обмотки 2. В этом случае он будет наименьшим, и напряжение на вторичной стороне трансформатора будет +5% от номинального. При установке подвижного контакта 9 переключателем ответвлений с валом 4 в положение 22 — вся регулировочная обмотка будет соединена согласно с основной обмоткой. При этом коэффициент трансформации будет наибольшим, а напряжение на вторичной стороне -5% от номинального. При установке подвижного контакта 13 в положение 26 с помощью переключателя ответвлений с валом 4, а подвижного контакта 9 в положение 17, вся регулировочная обмотка 16 включена встречно с основной обмоткой 2, и этим обеспечивается минимальное значение коэффициента трансформации для данного устройства регулирования трансформации. При этом на вторичной стороне трансформатора будет обеспечиваться напряжение на вторичной стороне равное +15%.

Выполнение трансформатора с двумя переключателями в регулировочной обмотке может оказаться целесообразным также в электрических сетях напряжением 35 кВ и выше, когда в нем предусматривается устройство регулирования напряжения под нагрузкой. Предложенный в [88п] трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой имеет первичную обмотку, состоящую из основ-

ной обмотки 1 и регулировочной обмотки 2, содержащей отводы, контакторы 3-8, первый переключатель 9 напряжения с подвижными контактами 10 и 11, токоограничивающий реактор 12, вторичную обмотку 13, второй переключатель 14 напряжения с подвижными контактами 15 и 16, нейтраль 17 (рис. 5.21).

Трансформатор работает следующим образом. В нормальном режиме контакторы 4, 5, 7, 8 разомкнуты, а контакторы 3 и 6 замкнуты. Ток проходит по цепи: основная обмотка 1, контактор 3, подвижный контакт 10 переключателя 9, витки регулировочной обмотки 2, находящиеся между переключателями 9 и 14, подвижный контакт 16 переключателя 14, контактор 6, нейтраль 17. При необходимости перевода переключателя 9 на другой отвод выполняется следующая последовательность действий: подвижный контакт 11 переключателя 9 переводится в нужное положение, включается контактор 7, включается контактор 4, отключается контактор 3, подвижный контакт 10 переключателя 9 переводится в нужное положение, включается контактор 3, отключаются последовательно контакторы 4 и 7. При необходимости перевода переключателя 14 на другой отвод выполняется следующая последовательность действий: подвижный контакт 15 переключателя 14 переводится в нужное положение, включается контактор 8, включается контактор 5, отключается контактор 6, подвижный контакт 16 переключателя 14 переводится в нужное положение, включается контактор 6, последовательно отключаются контакторы 5 и 8.

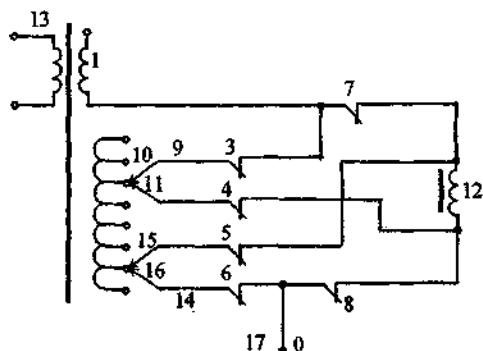


Рис. 5.21. Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой и расширенным диапазоном регулирования

Таким образом, трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой позволяет существенно расширить диапазон регулирования напряжения при сохранении прежнего числа отводов первичной обмотки. При этом существенно удешевляется конструкция трансформатора, т.к. один и тот же токоограничивающий реактор используется при переключении ответвлений с помощью как одного, так и другого переключателя.

Аналогичный трансформатор может быть реализован в случае, если в устройстве переключения ответвлений под нагрузкой вместо токоограничивающего реактора использовать токоограничивающее активное сопротивление [102п]. Один из вариантов выполнения такого трансформатора изображен на рис. 5.22, где показаны основная обмотка 1, регулировочная обмотка 2 трансформатора с ответвлениями, устройство переключения ответвлений трансформатора под нагрузкой, содержащее четыре подвижных контакта 3-6, пять пар дугогасительных контактов 7-11, токоограничивающий резистор 12, двухпозиционные переключатели 13,14.

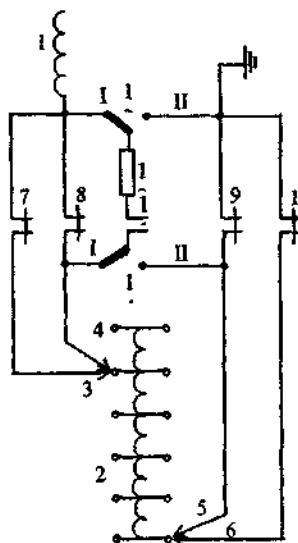


Рис. 5.22. Схема устройства переключения ответвлений трансформатора под нагрузкой с одним токоограничивающим резистором

Устройство работает следующим образом. В нормальном режиме подвижные контакты 3, 4 установлены на одном и том же ответвлении регулировочной обмотки 2, соответствующем месту соединения основной 1 и регулировочной 2 обмоток. Подвижные контакты 5, 6 установлены на одном и том же ответвлении регулировочной обмотки 2, соответствующем месту соединения регулировочной обмотки 2 с нейтральной точкой трансформатора. Пары дугогасительных контактов 7-10 замкнуты, пара 11 – разомкнута, двухпозиционные переключатели 13, 14 установлены в произвольное положение. Для уменьшения коэффициента трансформации размыкается пара дугогасительных контактов 8, подвижный контакт 4 передвигается на одно ответвление в направлении нейтральной точки (на рис.5. – вниз), двухпозиционные переключатели 13, 14 устанавливаются в положение I, замыкается пара дугогасительных контактов 11. В этот момент в контуре, замкнутом через токоограничивающий резистор (подвижный контакт 3, пара дугогасительных контактов 7, положение I двухпозиционного переключателя 13, токоограничивающий резистор 12, дугогасительные контакты 11, положение I двухпозиционного переключателя 14, подвижный контакт 4, часть регулировочной обмотки между ответвлениями, на которых установлены подвижные контакты 3 и 4), протекает уравнивающий ток. Для завершения операции размыкается пара контактов 7, подвижный контакт 3 перемещается на ответвление, на котором установлен контакт 4, замыкаются пары дугогасительных контактов 7 и 8, размыкается пара 11. Когда контакты 3 и 4 примут положение, соответствующее ответвлению, на котором установлены контакты 5, 6, для дальнейшего уменьшения коэффициента трансформации необходимо перемещать контакты 5 и 6 в направлении удаления от контактов 3, 4 (на рис.5. – вверх). Для этого размыкается пара дугогасительных контактов 9, подвижный контакт 5 перемещается на одно ответвление в направление удаления от контактов 3,4, двухпозиционные переключатели 13, 14 устанавливаются во второе положение, замыкается пара дугогасительных контактов 11, размыкается пара 10, подвижный контакт 6 перемещается на ответвление, соответствующее положению контакта 5, замыкаются пары дугогасительных контактов 9,10, размыкается пара 11.

Таким образом, конструкция устройства переключения ответвлений трансформатора под нагрузкой позволяет увеличить диапазон

регулирования напряжения при неизменном количестве ответвлений регулировочной обмотки и одним токоограничивающем резисторе.

### 5.5. Система контроля электропотребления в электрической сети

В распределительных сетях актуальной является проблема эффективного наблюдения за электропотреблением и обнаружения возможного хищения электроэнергии. Рассмотрим один из принципов такого наблюдения, предложенного в [89п] и основанного на использовании первого закона Кирхгофа в части контроля суммы фазных токов на участках сети, примыкающих к точке разветвления магистральной линии электропередачи.

Схема электрической сети с контролем электропотребления, представленная на рис.5.23, состоит из опор – 1,2,3,4,5, проводов – 6 магистральной линии электропередачи, измерительных трансформаторов – 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, сравнивающих трансформаторов – 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, измерительных трансформаторов – 9 с одной вторичной обмоткой, указательных реле – 10, потребителей – 11, нулевого провода – 12, соединительных проводов – 13, 14, 15, ответвлений 16.

Сравнивающие трансформаторы 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками установлены на опорах 1, 2, 3, 4, 5 магистральной линии электропередачи, ответвления 16 от которых подходят к потребителям. Измерительные трансформаторы 9 с одной вторичной обмоткой установлены на ответвлениях 16 в каждой фазе непосредственно перед потребителями 11 и на концевых опорах 1 и 5 магистральной линии электропередачи. Измерительные трансформаторы 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками установлены в каждой фазе на опорах 2, 3, 4 магистральной линии электропередачи, ответвления 16 от которых подходят к потребителям 11.

На рис.5.24,а показаны выводы 17 и 18 вторичной обмотки 19 измерительного трансформатора 9 с одной вторичной обмоткой, а на рис.5.24,б показаны выводы 20 и 21, 22 и 23 соответственно вторичных обмоток 24 и 25 измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками.

На рис.5.25 показаны выводы 26 и 27, 28 и 29, 30 и 31 одинаковых первичных обмоток 32, 33 и 34 соответственно и выводы 36 и



37 вторичной обмотки 35 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками.

На рис.5.26 показана схема сигнализации, подключаемая к выводам 36 и 37 вторичной обмотки 35 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками и содержащая источник постоянного оперативного тока 38, установленного на подстанции, от которой отходит магистральная линия электропередачи, обмотку реле тока 39, контакты реле тока 40, указательное реле 10.

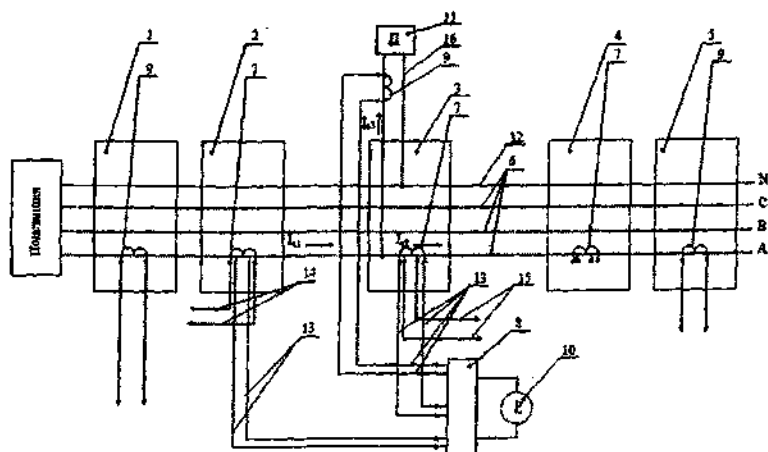


Рис. 5.23. Схема контроля электропотребления в электрической сети

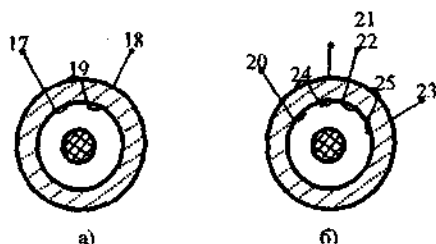


Рис. 5.24. Измерительный трансформатор с одной (а) и двумя (б) вторичной обмоткой

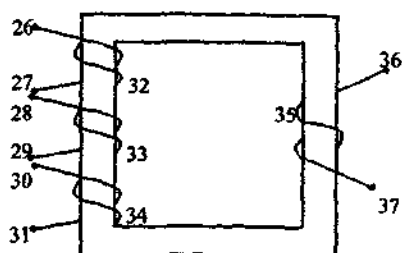


Рис. 5.25. Сравнивающий трансформатор

На рис.5.27 показана вторичная обмотка 35 с выводами 36 и 37 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками и указательное реле 10.

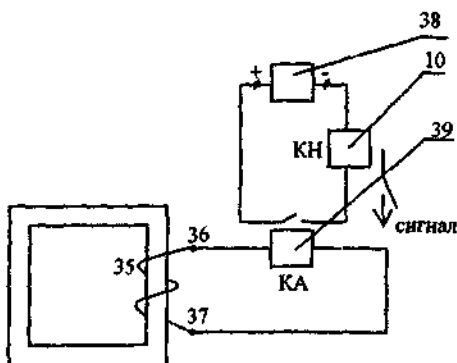


Рис. 5.26. Схема сигнализации

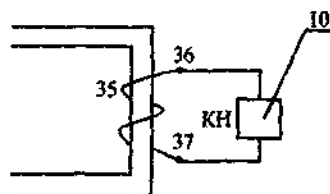


Рис. 5.27. Схема подключения указательного реле

Выводы 17 и 18 (рис. 5.24, а) измерительного трансформатора 9 (рис. 5.23) с одной вторичной обмоткой соединены посредством соединительных проводов 13 с выводами 26 и 27 (рис. 5.25) соот-

ответственно первой первичной обмотки 32 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, расположенного на той же опоре 3, на ответвлениях 16 от которой располагается измерительный трансформатор 9 с одной вторичной обмоткой, выводы 20 и 21 (рис. 5.24, б) обмотки 24 измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, расположенного на той же опоре 3, соединены соответственно с выводами 28 и 29 (рис. 5.25) второй первичной обмотки 33 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, расположенного всё на той же опоре 3, а выводы 22 и 23 обмотки 25 (рис. 5.24, б) измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, посредством соединительных проводов 15 соединены с выводами 31 и 30 соответственно третьей первичной обмотки 34 (рис. 5.25) сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, расположенного на следующей опоре 4. К выводам 36 и 37 (рис. 5.26) вторичной обмотки 35 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками подключено реле тока 39 (рис. 5.26), контакты 40 которого включены в цепь источника постоянного оперативного тока 38 и указательного реле 10. Выводы 31 и 30 (рис. 5.25) третьей первичной обмотки 34 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, расположенного всё на той же опоре 3, при помощи соединительных проводов 13 (рис. 5.23) соединяются соответственно с выводами 22 и 23 (рис. 5.24, б) второй вторичной обмотки 25 измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, расположенного на опоре 2, предшествующей опоре 3, а выводы 20 и 21 первой вторичной обмотки 24 этого измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками при помощи соединительных проводов 14 соединены с выводами 28 и 29 второй первичной обмотки 33 (рис. 5.25) сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, расположенного на опоре 2; или с выводами 18 и 17 (рис. 5.24, а) вторичной обмотки 19 измерительного трансформатора 9 с одной вторичной обмоткой, если данный сравнивающий трансформатор 8 расположен на второй по счёту опоре 2 магистральной линии электропередачи, ответвление 16 от которой подходит к потребителю 11 (рис. 5.23).

Поясним работу устройства на примере подключения ответвления от линии потребителя к фазе А (рис.5.23). В нормальном режиме работы, т.е. без несанкционированных включений потребителей, на любом участке линии алгебраическая сумма токов практически равна нулю, т.е.  $I_{a3} + I_{a2} = I_{a1}$ . При протекании тока  $I_{a2}$  по проводу фазы магистральной линии электропередачи создается магнитная индукция, порождающая переменный магнитный поток, при этом возникает ЭДС самоиндукции, под действием которой по вторичным обмоткам 24 и 25 (рис.5.24,б) измерительного трансформатора 7 (рис.5.23) с двумя одинаковыми вторичными обмотками начинают протекать равные токи, т.к. обмотки 24 и 25 (одинаковые) содержат одинаковое число витков, пропорциональные току  $I_{a2}$ . Во вторичных обмотках 19 измерительного трансформатора 9 с одной вторичной обмоткой и 24 (рис.5.24,б) измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, расположенного на предыдущей опоре 2, возникают токи, пропорциональные токам  $I_{a3}$  и  $I_{a1}$  соответственно. Все вышеуказанные индуцируемые токи подаются на первичные обмотки 32, 33 и 34 (рис.5.25) сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, причём, на обмотку 32 подаётся ток с обмотки 19 (рис.5.24,а) измерительного трансформатора 9 (рис.5.23) с одной вторичной обмоткой, на обмотку 33 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками подаётся ток с обмотки 24 измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, а на обмотку 34 подаётся ток в обратном направлении с обмотки 25 (рис.5.24,б) измерительного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками, расположенного на предыдущей опоре 2 (рис.5.23), или с обмотки 19 (рис.5.24,а) измерительного трансформатора 9 с одной вторичной обмоткой, если данный сравнивающий трансформатор 8 расположен на второй по счёту опоре 2 магистральной линии электропередачи, ответвление 16 от которой подходит к потребителю 11.

Так как изначально выполняется равенство  $I_{a3} + I_{a2} = I_{a1}$  и количество витков во вторичных обмотках 19, 24 и 25 (рис.5.24) измерительного трансформатора 9 с одной вторичной обмоткой и измери-

тельного трансформатора 7 с двумя одинаковыми вторичными обмотками одинаково, а так же одинаково количество витков в обмотках 32, 33 и 34 (рис.5.25) сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, то суммарный магнитный поток, наводимый в сердечнике сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками равен или очень близок к нулю. В этом случае ток во вторичной обмотке 35 (рис.5.26) сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками не будет протекать или будет очень мал, поэтому контакты 40 (рис.5.26) реле тока 39 останутся разомкнутыми, т.е. цепь указательного реле 10 останется тоже разомкнутой, и реле 10 не сработает.

При несанкционированном подключении потребителя на ответвлении 16 между опорой и потребителем равенство  $I_{a3} + I_{a2} = I_{a1}$  нарушается, что приводит к возникновению магнитного потока в сердечнике сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, который, в свою очередь, порождает ЭДС самоиндукции, под действием которой по вторичной обмотке 35 (рис.5.26) сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками начинает протекать ток. При протекании тока по обмотке токового реле 39, подсоединённого к зажимам 36 и 37 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, контакты 40 замыкаются, тем самым, подавая "плюс" оперативного тока на обмотку указательного реле 10, в результате чего выпадает блинкер этого реле, и, возможно, по каналу связи подаётся сигнал на фиксирующее устройство, находящееся на диспетчерском пункте.

Аналогичным образом устройство работает в случае подключения ответвления от магистральной линии к фазам В и С, а также на всех других участках данной сети, как с однофазными, так и с трёхфазными потребителями. На участок с хищениями электроэнергии указывает выпавший блинкер указательного реле 10 (рис.5.26), подключённого к выводам 36 и 37 вторичной обмотки 35 сравнивающего трансформатора 8 с тремя одинаковыми первичными обмотками, отвечающего за данный участок электрической сети, и переданный по каналам связи сигнал на фиксирующее устройство, находящееся на диспетчерском пункте.

Повышение эффективности борьбы с хищениями электроэнергии обеспечивается за счёт того, что место хищения обнаруживается путём постоянного контроля суммы фазных токов на участках, примыкающих к точке разветвления магистральной линии электропередачи.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Каков принцип работы гирляндных ГЭС?
2. Как конструктивно выполнена ГЭС, работающая на канализационных стоках?
3. Каковы принципы устройства гидроэнергоустановки, использующей одновременно энергию ветра и падающей воды?
4. Каковы принципы работы ливневых гидроэнергетических установок с дополнительными емкостями для накопления дождевой воды?
5. Каково устройство гидроаккумулирующей установки с накопителем энергии в виде полой емкости, расположенной в водоеме?
6. Каков принцип работы гидроаккумулирующей установки с накопителем энергии в виде полой емкости из эластичного материала?
7. Как определяется накопленная энергия гидроаккумулирующей установки с накопителем в виде полой емкости?
8. Каков принцип работы гидроаккумулирующей установки, использующей для выработки электроэнергии перемещение емкости из верхнего положения в нижнее и обратно?
9. Какова схема подключения к сети обратимого генератора?
10. Каков принцип работы гибридной ветрогидроаккумулирующей установки?
11. Каковы принципы выполнения трансформаторов с расширенным диапазоном регулирования напряжения без увеличения количества витков регулировочной обмотки?
12. Каковы схемы трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой с расширенным диапазоном регулирования и одним токоограничивающим реактором или одним токоограничивающим активным сопротивлением?
13. Каков принцип обнаружения возможного хищения электроэнергии, использующей первый закон Кирхгофа?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федин, В.Т. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В.Т. Федин [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1993.
2. Вакуленко, С.Е. Работы по компенсации температурных стрел провеса проводов, проводимых в Украине, Японии и США / С.Е. Вакуленко // Энергетика и электрификация. – 2004. – № 9.
3. Орлов, Н.Н. Термокомпенсация стрел провеса проводов / Н.Н. Орлов [и др.] // Энергетика и электрификация. – 1983. – № 1.
4. Поспелов, Г.Е. Передача энергии и электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003.
5. Астахов, Ю.Н. Управляемые линии электропередачи / Ю.Н. Астахов [и др.]. – Кишинев: Штиинца, 1984.
6. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1987.
7. Стребков, Д.Н. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д.Н. Стребков, А.И. Некрасов. – 2-е изд. – М.: ВИЭСХ, 2006.
8. Калентионюк, Е.В. Оперативное управление в энергосистемах / Е.В. Калентионюк, В.Г. Прокопенко, В.Т. Федин. – Минск: Вышэйшая школа, 2007.
9. Жанаев, Д.Т. Линии электропередач с резервной фазой / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская. – Саратов: Саратовский ун-т, 1990.
10. Мозирський, В.І. Повітряні лінії електропередачі з резервною фазою / В.І. Мозирський, С.Е. Вакуленко. – Київ, 1997.
11. Электроэнергетические системы и сети: терминологический словарь / под ред. В.Т. Федина. – Минск: БНТУ, 2007.
12. Самородов, Г.И. Четырехфазные электропередачи / Г.И. Самородов // Известия РАН. Энергетика. – 1995. – № 6.
13. Варфоломеев, Г.Н. Схема Скотта: история и перспективы совершенствования (к 100-летию создания) / Г.Н. Варфоломеев // Электричество. – 1994. – № 10.
14. Мисриханов, М.Ш. Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режим электрической системы / М.Ш. Мисриханов // Электрические станции. – 2001. – № 2.
15. Астахов, Ю.Н. Увеличение пропускной способности двухцепных линий электропередачи / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, Э.Н. Зуев // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1965. – № 5.

16. Александров, Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.

17. Поспелов, Г.Е. Электрические системы и сети. Проектирование / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: Вышэйшая школа, 1988.

18. Фадеева, Г.А. Проектирование распределительных электрических сетей / Г.А. Фадеева, В.Т. Федин. – Минск: Вышэйшая школа, 2009.

19. Электроустановки на напряжение до 750 кВ: ТКП 339-2011. – Минск, 2011.

20. Алиев, И.И. Резонансная однопроводная линия электропередачи / И.И. Алиев, Д.С. Стребков // Электричество. – 2011. – № 10.

21. Стребков, Д.С. Возможность передачи электрической энергии без металлических проводов / Д.С. Стребков // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2002. – № 1.

22. Ерошенко, С.А. Научные проблемы распределенной генерации / С.А. Ерошенко [и др.] // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11–12.

23. Государственная программа строительства в 2011–2015 годах гидроэлектростанций в Республике Беларусь // Энергетика и ТЭК. – 2011. – № 1.

24. Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь // Энергетика и ТЭК. – 2010. – № 9/10.

25. Худяков, В.В. Возобновляемые источники энергии / В.В. Худяков // Электричество. – 2011. – № 10.

26. Держко, М.В. Некоторые особенности электротехнических устройств современных мощных ГАЭС / М.В. Держко, П.В. Каминский // Известия вузов. Энергетика. – 1985. – № 12.

27. Мавлянбеков, Ю.У. Анализ и перспективы развития возобновляемых источников энергии в Российской Федерации / Ю.У. Мавлянбеков // Сб. науч. тр. ВЭИ. – М., 2006.

28. Свиридов, Ю.П. Нетрадиционный источник электроэнергии на городских канализационных стоках / Ю.П. Свиридов, А.А. Царев // Электрика. – 2011. – № 4.



## ПАТЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1п. Полезная модель РФ № 2011. Линия электропередачи / В.В. Михайлов, И.В. Михайлова, Ю.Н. Антонов и др.

2п. А.с. СССР № 865093. Воздушная линия электропередачи / Н.Н. Орлов, М.Т. Романенко, С.Е. Вакуленко и др.

3п. А.с. СССР № 868905. Термокомпенсатор / Н.Н. Орлов, М.Т. Романенко, С.Е. Вакуленко и др.

4п. А.с. СССР № 931072. Воздушная линия электропередачи с термокомпенсаторами / Н.Н. Орлов, М.Т. Романенко, С.Е. Вакуленко и др.

5п. А.с. СССР № 1061673. Способ установки термокомпенсаторов, выполненных из элементов с эффектом памяти формы на проводах воздушных линий электропередачи / В.Д. Абрамов, Ю.С. Бутко, С.Е. Вакуленко и др.

6п. А.с. СССР № 1156548. Воздушная линия электропередачи / Н.Н. Орлов, М.Т. С.Е. Вакуленко, Л.П. Фаткуллина и др.

7п. А.с. СССР № 1280662. Воздушная линия электропередачи с термокомпенсаторами / Н.Н. Орлов, С.Е. Вакуленко, М.Т. Романенко, и др.

8п. А.с. СССР № 1415309. Воздушная линия электропередачи с приспособлением для сбрасывания гололеда / В.Д. Абрамов, Ю.С. Бутко, С.Е. Вакуленко и др.

9п. Патент РФ № 2072601. Воздушная линия электропередачи / С.Е. Вакуленко, М.Т. Романенко.

10п. Патент Японии № 2-54008. Система для растапливания снега на воздушном проводе.

11п. А.с. СССР № 754541. Воздушная линия электропередачи / М.Т. Романенко.

12п. А.с. СССР № 1617514. Воздушная электрическая сеть высокого напряжения.

13п. А.с. СССР № 811382. Устройство для сброса гололедных отложений с проводов и тросов линии электропередачи / М.Т. Романенко, С.Е. Вакуленко.

14п. Патент Японии № 59-2521 (1984).

15п. Патент США № 5792983. Sag compensator for suspended lines using rotary motion (1998).

- 16п. Патент РБ № 16087. Воздушная линия электропередачи / В.Т. Федин, В.А. Решетник.
- 17п. А.с. СССР № 1429218. Высоковольтная электрическая сеть / В.И. Мозырский.
- 18п. А.с. СССР 1353274. Четырехфазная линия электропередачи / В.И. Мозырский, С.Е. Вакуленко, Н.Н. Орлов.
- 19п. А.с. СССР № 1415908. Четырехфазная воздушная линия электропередачи / В.И. Мозырский, А.П. Берман, С.Е. Вакуленко.
- 20п. А.с. СССР № 1607650. Высоковольтная электрическая сеть / В.И. Мозырский.
- 21п. А.с. СССР № 1679931. Воздушная линия электропередачи / В.И. Мозырский, Ю.Д. Шамес.
- 22п. А.с. СССР № 1679932. Способ замены фазы при однофазном повреждении на четырехпроводной линии электропередачи / В.И. Мозырский, Ю.Д. Шамес.
- 23п. А.с. СССР № 1203623. Устройство для выбора поврежденного провода линии электропередачи / Т.Б. Заславская, Ц.Т. Жанаев.
- 24п. А.с. СССР № 1206872. Устройство для выбора поврежденного провода на линии электропередачи с дополнительным проводом / Т.Б. Заславская, Ц.Т. Жанаев.
- 25п. А.с. СССР № 1700682. Электропередачи переменного тока / Г.М. Самородов.
- 26п. А.с. СССР № 1797154. Способ восстановления электроснабжения на двухцепных линиях электропередачи / Р.Ш. Сагутдинов.
- 27п. Патент РБ № 5963. Электропередачи переменного тока / В.Т. Федин, А.М. Зорич.
- 28п. Патент РБ на полезную модель № 5339. Электрическая подстанция / В.Т. Федин, С.В. Угорич, О.В. Козлова.
- 29п. Патент РБ № 14124 Электрическая подстанция / В.Т. Федин, С.В. Угорич, О.В. Козлова.
- 30п. А.с. СССР № 974480. Воздушная линия электропередачи / Г.Н. Александров, К.М. Антипов, Б.Ф. Лазарев и др.
- 31п. А.с. СССР № 964829. Трехфазная воздушная линия электропередачи высокого напряжения / Г.Н. Александров, И.М. Носов Г.В. Подпоркин и др.
- 32п. А.с. СССР № 964830. Трехфазная воздушная линия электропередачи / Г.Н. Александров, К.М. Антипов, Б.Ф. Лазарев и др.

33п. А.с. СССР № 1075896. Линия электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, Г.И. Селиверстов.

34п. А.с. СССР № 1343485. Линия электропередачи трехфазного тока с расщепленными фазами / В.Т. Федин, Г.И. Селиверстов.

35п. А.с. СССР № 778637. Воздушная линия электропередачи / Г.Н. Александров, И.М. Носов, А.Н. Филимонов.

36п. А.с. СССР № 964829. Трехфазная воздушная линия электропередачи высокого напряжения / Г.Н. Александров, И.М. Носов Г.В. Подпоркин и др.

37п. А.с. СССР № 974481. Воздушная линия электропередачи переменного тока / В.Х. Ишкин.

38п. Патент РБ № 10271. Воздушная линия электропередачи высокого напряжения / В.Т. Федин, О.П. Русак.

39п. А.с. СССР № 566288. Электропередача переменного тока / В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов и др.

40п. А.с. СССР № 1539891. Трехфазная воздушная электропередачи переменного тока / В.Т. Федин, Г.Ф. Куценко, Г.И. Селиверстов.

41п. А.с. СССР № 945933. Электропередача переменного тока / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, М.С. Чернецкий.

42п. А.с. СССР № 1098486. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, М.С. Чернецкий, Г.И. Селиверстов.

43п. А.с. СССР № 847420. Двухцепная линия электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, М.С. Чернецкий.

44п. А.с. СССР № 962561. Опора линии электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, М.С. Чернецкий.

45п. А.с. СССР № 972986. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин.

46п. А.с. СССР № 849362. Разомкнутая электропередача / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин.

47п. А.с. СССР № 993383. Система передачи переменного тока / В.Т. Федин.

48п. А.с. СССР № 978271. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин.

49п. А.с. СССР № 926743. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин.

50п. А.с. СССР № 1257742. Система электропередачи переменного тока / Е.В. Калентионюк, Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин.

51п. А.с. СССР № 1454204. Линия электропередачи / В.Т. Федин, С.П. Ефремов, И.С. Козыревич.

52п. А.с. СССР № 961038. Трехфазная линия электропередачи переменного тока / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, М.С. Чернецкий.

53п. А.с. СССР № 1739435. Электропередача / В.Т. Федин.

54п. А.с. СССР № 1598039. Электропередача / В.Т. Федин.

55п. Патент РБ № 4547. Электропередача переменного тока / Ю.В. Сотников, В.Т. Федин.

56п. Патент РБ № 1571. Электропередача / В.Т. Федин, Шаабан Файсал.

57п. Патент РБ № 4491. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, Д.В. Ковалев, А.М. Чернецкий.

58п. Патент РБ № 5260. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, А.М. Зорич, А.М. Чернецкий.

59п. Патент РБ № 5266. Электропередача переменного тока (варианты) / В.Т. Федин, А.М. Зорич.

60п. Патент РБ № 16146. Воздушная линия электропередачи / В.Т. Федин, В.А. Решетник.

61п. Патент РБ № 16147. Воздушная линия электропередачи / В.Т. Федин, В.А. Решетник.

62п. Патент РБ № 14478. Электрическая сеть / В.Т. Федин, Е.В. Питаленко.

63п. Патент РБ № 9470. Опора линии электропередачи / В.Т. Федин, А.А. Муравьев, А.Г. Лежневич.

64п. Патент РФ № 2256373. Электрическая система / Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк, В.Л. Олесова, Л.А. Олесов.

65п. Патент РБ № 2300. Воздушная электрическая сеть высокого напряжения / В.Т. Федин, В.Н. Левчик.

66п. Патент РБ № 2124. Воздушная линия электропередачи / В.Т. Федин, В.П. Козлович.

67п. Патент РФ № 2256273. Электрическая система / Е.В. Бурянина, Н.С. Бурянин, Ю.Ф. Королюк и др.

68п. Патент РФ № 2295816. Электрическая система / В.Л. Аграшкина, Л.А. Олесов.

69п. Патент РБ № 14597. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, А.И. Кудлай, И.С. Денисов.

70п. Заявка на изобретение РБ № № а20110114. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, В.В. Потапков.

- 71п. Патент РБ № 15708. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, Д.Н. Становский.
- 72п. Патент РБ № 15756. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, Д.Н. Становский.
- 73п. А.С. СССР № 1138881. Способ передачи электроэнергии / В.Т. Федин, Г.И. Селиверстов.
- 74п. А.с. СССР № 1350747. Электропередача переменного тока / В.Т. Федин, П.В. Лычев, Г.И. Селиверстов, Ю.Д. Головач.
- 75п. Патент РБ № 16143. Электропередача переменного тока (варианты) / В.Т. Федин, Е.Н. Новиков.
- 76п. Патент РБ № 15709. Электропередача переменного тока (варианты) / В.Т. Федин, Е.Н. Новиков.
- 77п. Патент РФ № 2307438. Способ передачи электрической энергии в трехфазной системе на расстояние / Ф.Ф. Пашенко, Л.Е. Круковский.
- 78п. Патент США № 349621 (1900 г.). Аппарат для передачи электрической энергии / Н. Тесла.
- 79п. Патент РФ № 2108649. Способ питания электротехнических устройств и устройство для его осуществления / С.В. Авраменко.
- 80п. Патент РФ № 2143775. Способ и устройство для передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, С.В. Авременко.
- 81п. Патент РФ № 2172546. Способ и устройство для передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, С.В. Авременко, А.И. Некрасов.
- 82п. Патент РФ № 2255406. Способ и устройство для передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, С.В. Авременко, А.И. Некрасов.
- 83п. Патент РФ № 2273939. Способ и устройство для передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, А.И. Некрасов.
- 84п. А.с. СССР № 907690. Устройство для гибкой связи и регулирования двух энергосистем / Е.В. Калентионюк, Г.Е. Пospelов, В.Т. Федин.
- 85п. А.с. СССР № 1257742. Система электропередачи переменного тока / Е.В. Калентионюк, Г.Е. Пospelов, В.Т. Федин.
- 86п. Патент РБ № 13996. Трансформатор высокого напряжения / Е.П. Бахар, С.Н. Хвисячюк, А.П. Шумра.
- 87п. Патент РБ № 14041. Трансформатор высокого напряжения / Е.П. Бахар.

88п. Патент РБ № 14481. Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой / В.Т. Федин, С.В. Фабиянский.

89п. Патент РБ № 11468. Способ обнаружения участков сети с хищением электроэнергии / А.П. Ровин, В.Т. Федин.

90п. А.с. СССР № 810884. Гидроаккумулирующая установка / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, П.С. Непорожний и др.

91п. Полезная модель РБ № 8546. Гидроэнергоаккумулирующая установка / А.В. Трубников, В.Т. Федин.

92п. Патент РБ № 14441. Гидроэнергоаккумулирующая установка / А.В. Кулаковская, В.Т. Федин.

93п. Патент РФ № 2106453. Гидроаккумулирующая электростанция / В.П. Дружкин, В.В. Волшаник.

94п. Заявка на изобретение РФ № 94034030. Схема подключения обратимых генераторов через коммутационные аппараты с прямым и обратным чередованием фаз / А.И. Конюхов, В.Э. Хазин.

95п. Полезная модель РБ № 8452. Гидроаккумулирующая установка / А.В. Трубников, В.Т. Федин.

96п. Заявка на изобретение РФ № 95103863. Гидроветрозлектростанция / К.А. Смагин.

97п. Патент РФ № 2114319. Ветрогидроаккумулирующая электростанция / К.А. Смагин.

98п. Патент РФ № 2405883. Бесплотинная гидроэлектростанция для местного электроснабжения / С.М. Мосалев, В.П. Сыса.

99п. Патент РФ № 2382232. Бесплотинная гидроэлектростанция Белашова / А.Н. Белашов.

100п. Патент на полезную модель РФ № 69089. Утилизационная ГЭС / Ю.П. Свиридов, В.А. Мишин, Н.Н. Макаров и др.

101п. Патент РФ № 2027066. Энергетическая установка / В.Г. Керов.

102п. Заявка на изобретение РБ № а201201425. Устройство переключения ответвлений регулировочной обмотки трансформатора под нагрузкой / В.Т. Федин, П.С. Плескаевич.

103п. Патент на полезную модель РБ № 8717. Энергетическая установка / В.Т. Федин, С.Г. Барков.

104п. Заявка на полезную модель РБ № и20120440. Энергетическая установка / В.Т. Федин, С.Г. Барков.

Научное издание

**ФЕДИН Виктор Тимофеевич**

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ  
РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Подписано в печать 02.11.2012. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 12,90. Уч.-изд. л. 10,09. Тираж 100. Заказ 1414.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.