

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	5
Введение .....	6
1. Основные положения моделирования СЭЖД постоянного тока с неуправляемыми выпрямителями .....	9
1.1. Исходные положения моделирования.....	9
1.2. Основные соотношения для выпрямителя при симметричной системе напряжений .....	11
1.3. Углы коммутации при несимметричной системе синусоидальных питающих напряжений .....	15
1.4. Входные токи выпрямителя при несимметричной системе напряжений.....	22
1.5. Гармонический состав входного тока выпрямителя.....	23
1.6. Гармонический состав выходного напряжения выпрямителя .....	29
1.7. Сопротивление рельсов на постоянном токе .....	35
Выводы.....	38
2. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель .....	40
2.1. Основные положения моделирования.....	40
2.2. Характерные моменты времени и входные токи управляемого выпрямителя.....	42
2.3. Гармоники входных токов управляемого выпрямителя.....	45
2.4. Гармоники выходного напряжения управляемого выпрямителя.....	49
Выводы.....	54
3. Инверторный режим шестипульсовой трехфазной мостовой схемы .....	56
3.1. Основные положения моделирования.....	56
3.2. Углы начала импульсов тока, углы коммутации и входные токи инвертора.....	58
3.3. Гармоники входных токов инвертора .....	63
3.4. Гармоники выходного напряжения инвертора .....	67
Выводы.....	72
4. Алгоритм расчета режима с применением метода варьирования ЭДС постоянного тока.....	74
4.1. Замечания по модели преобразователя .....	74
4.2. Входная информация для моделирования .....	75
4.3. Алгоритм расчета режима мгновенной схемы СЭЖД с тяговой нагрузкой.....	75
4.4. Алгоритм расчета режима СЭЖД на высших гармониках .....	76
Выводы.....	78
5. Метод расчета режима СЭЖД постоянного тока с фиксированными ЭДС .....	80
5.1. Основные положения метода.....	80
5.2. Сопоставление методов расчетов режимов тяги постоянного тока варьированием эквивалентных ЭДС и фиксированных ЭДС .....	83
Выводы.....	86
6. Примеры моделирования работы СЭЖД постоянного тока .....	87
6.1. Описание модели .....	87
6.2. Результаты моделирования работы выпрямителя на основной частоте.....	88

6.3. Моделирование двенадцатипульсового преобразователя .....	96
6.4. Результаты моделирования выпрямителя на гармониках .....	98
6.5. Моделирование работы системы электроснабжения железной дороги с двенадцатипульсовыми выпрямителями.....	102
6.6. Моделирование работы СТЭ реального участка железной дороги постоянного тока.....	107
6.7. Сопоставление моделирования тяги постоянного тока ПК Fazonord и ПК Кортэс.....	114
Выводы.....	127
7. Электромагнитное поле тяговой сети постоянного тока.....	128
7.1. Особенности ЭМП тяговой сети постоянного тока.....	128
7.2. Алгоритм расчета напряженностей ЭМП тяговой сети .....	128
7.3. Пример расчета параметров ЭМП тяговой сети .....	130
Выводы.....	134
8. Расчеты плавки гололеда на проводах контактной сети постоянного тока.....	135
8.1. Вводные замечания .....	135
8.2. Основные допущения расчета процесса плавки .....	135
8.3. Алгоритм расчета процесса плавки гололеда .....	136
8.4. Пример расчета процесса плавки гололеда.....	140
Выводы.....	142
Заключение.....	143
Список использованных источников .....	145
<i>Приложение А. Методика моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог .....</i>	<i>147</i>
А.1. Общие принципы моделирования .....	147
А.2. Моделирование в фазных координатах.....	148
А.3. Программный комплекс моделирования Fazonord .....	151

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АС — alternating current (переменный ток)
- DC — direct current (постоянный ток)
- ВИП — выпрямительно-инверторный преобразователь
- ВГ — высшие гармоники
- ВЛ — воздушная линия
- ЛЭП — линия электропередачи
- КЗ — короткое замыкание
- КС — контактная сеть
- МПЗ — межподстанционная зона
- ПК — программный комплекс
- ППС — пункт параллельного соединения
- ПС — пост секционирования
- РСЗ — решетчатая схема замещения
- СВЭ — система внешнего электроснабжения
- СТЭ — система тягового электроснабжения
- СЭЖД — система электроснабжения железной дороги
- ТП — тяговая подстанция
- ЭДС — электродвижущая сила
- ЭПС — электроподвижной состав
- ЭЧЭ — тяговая подстанция
- ЭЭС — электроэнергетическая система

## ВВЕДЕНИЕ

Определение режима сложной электроэнергетической системы, включающей сегменты переменного тока и постоянного тока, является актуальной задачей электроэнергетики. Традиционно она решается в предположении симметричного режима подсистем переменного тока методами декомпозиции с раздельными расчетами их режимов или путем функционального моделирования [8, 36]. Такой подход неприменим в ситуации значительной несимметрии напряжений трехфазной сети переменного тока, что часто имеет место в системах электроснабжения железных дорог постоянного тока. Особое значение фактор несимметрии приобретает в частях ЭЭС, примыкающих к станциям стыкования тяги постоянного и переменного токов. Расчеты режимов совместных подсистем переменного и постоянного токов может проводиться с применением дифференциальных уравнений, например, в среде MatLab, однако размерность анализируемой системы в этом случае едва ли может превышать несколько десятков узлов.

В статье [36] намечена методика составления совместной системы уравнений для подсистем переменного и постоянного токов. Однако эта методика требует перевода в состав определяемых переменных величин (модулей и углов) токов и напряжений источников тока и ЭДС с дополнительным возникновением ряда сложных моментов.

Возможности методологии расчетов режимов в фазных координатах, реализованной в программном комплексе Fazonord [28], позволяют при некоторой доработке рассчитывать режимы объединенных систем постоянного и переменного токов в фазных координатах с определением несимметричных режимов подсистемы переменного тока. Такая доработка к настоящему времени проведена в двух направлениях, которые предполагают декомпозицию расчетной схемы на подсистемы постоянного тока и переменного тока. Оба направления используют эквивалентные ЭДС и внутреннее сопротивление для части постоянного тока тяговых подстанций и эквивалентные источники тока, представляющие подстанцию со стороны переменного тока, по три источника на подстанцию для шестипульсового преобразователя, соединенные звездой. Основанием для такого подхода является активное применение метода расчета режимов по напряжению холостого хода и эквивалентному сопротивлению тяговых подстанций постоянного тока в практике отечественных железных дорог.

Первое из намечаемых направлений, которое условно можно назвать методом варьирования эквивалентных ЭДС, предполагает последовательный пересчет режимов подсистем в итерационном цикле. Начиная с исходных приближений потенциалов узлов производится расчет режима подсистемы постоянного тока, а по полученным значениям выпрямленного тока рассчитывается режим подсистемы переменного тока, по результатам которого уточняются значения эквивалентных ЭДС. Такой расчет повторяется до достижения заданного различия суммы напряжений узлов на очередном и предыдущем шагах итерационного процесса. Однако, как показали предварительные результаты, сходимость итерационного цикла оказывается не достаточно надежной и ухудшается по мере роста размерности анализируемой системы.

Второе направление, условно названное методом фиксированных ЭДС, основано на более кардинальном разделении подсистем постоянного тока и переменного тока. Первым шагом такого алгоритма является вычисление питающих напряжений холостого хода подстанций в фазных координатах. По значению этих напряжений определяются эквивалентные ЭДС и по известным соотношениям рассчитываются эквивалентные сопротивления стороны постоянного тока преобразователей. По полученным величинам определяется режим подсистемы постоянного тока, из которого находятся токи эквивалентных источников тока стороны переменного тока. Далее проводится расчет режима подсистемы переменного тока, который также выполняется в итерационном цикле, поскольку могут присутствовать нагрузки, заданные величинами мощностей.

Как показали исследования, метод фиксированных ЭДС работоспособен, но создает ряд специфических трудностей в реализации. Основная проблема состоит в нелинейности выпрямительно-инверторных преобразователей, пропускающих постоянный ток только в одном направлении, что ограничивает возможности применения в качестве одной из частей модели преобразователя источника ЭДС: необходимо отслеживать состояние источника ЭДС и отключать его при неправильном направлении тока, повторяя расчет в итерационном цикле.

Вторая проблема заключается в необходимости отработки ситуации при наличии рекуперирующих поездов, когда имеются выпрямители и инверторы с возможным вариантом питания последних от выпрямителей. Эта проблема решается заданием условного напряжения холостого хода инверторов, превышающего напряжения холостого хода выпрямителей. Как показали предварительные расчеты, такое превышение не должно быть больше нескольких десятков вольт, иначе может возникнуть «мертвая зона», когда заперты и выпрямители, и инверторы, а итерационный процесс не сходится. В примерах известного программного комплекса Кортэс (ВНИИЖТ) условные напряжения холостого хода инверторов задаются превышающими напряжения холостого хода выпрямителей всего на 20 В, хотя заданы напряжения включения инверторов 3,75 кВ. Расчеты показывают, что в ПК Кортэс реализовано включение инверторов при напряжении фидера контактной сети просто выше напряжения холостого хода.

В связи с необходимостью задания повышенных питающих напряжений для инверторов принято решение разделить модели выпрямителей и инверторов, с подключением их к моделям соответствующих трансформаторов.

Третья проблема состоит в необходимости стыкования уравнений, описывающих подсистемы постоянного и переменного токов. В принципе проблема решается известными соотношениями для многопульсовых выпрямителей [1, 4, 5, 10, 13], записанными для симметричной системы питающих напряжений. Уравнения работ [16, 17, 18, 35] для поставленных целей непригодны, поскольку базируются на задании комплексного коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, что оставляет неопределенность в значениях фазных напряжений. В *главах 1, 2, 3* монографии представлен подход, основанный на стыковании уравнений подсистем в фазных координатах.

В практике исследований систем тягового электроснабжения и в ПК Кортэс тяговые нагрузки задаются значениями токов. Такой подход значительно упрощает уравнения режима, однако создает специфическую погрешность, связанную

с необходимостью соблюдения графика движения поездов при различных напряжениях на токоприемниках электроподвижного состава. Задание тяговых нагрузок мощностями является более адекватным и особых сложностей не вызывает, но вносит нелинейность в подсистему постоянного тока.

В представленном исследовании модель шестипульсового преобразователя выполнена тремя источниками тока для подсистемы переменного тока и источником ЭДС постоянного тока. Модель преобразователя играет роль разделительного элемента подсистем переменного и постоянного токов. Узлы источников тока подключаются к узлам вторичной обмотки модели преобразовательного трансформатора, а два узла источника ЭДС — к соответствующим узлам подсистемы постоянного тока. Разработанная концепция моделирования шестипульсовых выпрямителей позволяет достаточно просто создавать модели двенадцатипульсовых ВИП путем соответствующего соединения шестипульсовых моделей.

В *главах 1–3* работы представлены основные уравнения взаимосвязи входных напряжений и токов шестипульсового преобразователя во временной области и на высших гармониках. *Глава 2* содержит уравнения для управляемого выпрямителя, а *глава 3* — для инвертора.

В *главах 4 и 5* рассмотрены два варианта расчета режима подсистемы постоянного тока: методом варьируемых ЭДС и методом фиксированных ЭДС с обоснованием выбора последнего метода для программной реализации.

В *главе 6* представлена информация по результатам примерных расчетов режимов, выполненных ПК Fazonord на основе алгоритмов *глав 1–3* для расчетных схем с тремя и с четырнадцатью тяговыми подстанциями постоянного тока.

*Главы 7 и 8* посвящены двум приложениям разработанной методики моделирования: расчетам электромагнитных полей тяговых сетей постоянного тока и плавки гололеда на проводах.

Краткое описание методики моделирования режимов подсистем переменного тока приведено в *Приложении А*.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЭЖД ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕУПРАВЛЯЕМЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

## 1.1. Исходные положения моделирования

1. В расчетной схеме для системы тягового электроснабжения постоянного тока предусматриваются модели понизительных и преобразовательных трансформаторов с соответствующими схемами соединения обмоток, а также модели выпрямительно-инверторных преобразователей. Последние включают три источника переменного тока и источник ЭДС постоянного тока и служат для пересчета нагрузок со стороны тяговой сети на вторичные обмотки моделей преобразовательных трансформаторов, а также для расчета потерь напряжения на стороне постоянного тока введением внутреннего сопротивления источника ЭДС в соответствии с уравнением (2.5) монографии [10]

$$\Delta U_{dym} = U_{d0} u_k \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} \sin \frac{\pi}{m},$$

в котором  $A = \sin(\pi/m)$  — коэффициент наклона внешней характеристики;  $u_k I_d / I_{d\text{ном}}$  учитывает внешнюю сеть, тяговый и преобразовательный трансформаторы;  $u_k$  — суммарное напряжение короткого замыкания трансформаторов и внешней сети;  $I_d$  — выпрямленный ток;  $m$  — число пульсаций выпрямленного напряжения.

Номинальный ток выпрямителя  $I_{d\text{ном}}$  относится к преобразовательному трансформатору, а не к выпрямительной схеме в целом. В [10, с. 16] приведено соотношение между мощностью сетевой обмотки и номинальным током:

$$S_1 = 3U_{1\text{фном}} I_{1\text{ном}} = 4,72 U_{2\text{фном}} I_{d\text{ном}},$$

где  $U_{2\text{ф}}$  — номинальное фазное напряжение звезды преобразовательной обмотки. Отсюда

$$I_{d\text{ном}} = \frac{3U_{1\text{фном}} I_{1\text{ном}}}{4,72 U_{2\text{фном}}} = 0,636 k_{\text{Тф}} I_{1\text{ном}},$$

где  $k_{\text{Тф}}$  — фазный коэффициент трансформации.

В формуле (1.22) источника [10] также приведено более общее соотношение токов

$$I_{1\text{ном}} = \frac{I_{d\text{ном}}}{\sqrt{6} k_{\text{Т}} \sin(\pi/m)},$$

или для  $m = 6$

$$I_{d\text{ном}} = \sqrt{6} k_{\text{Т}} I_{1\text{ном}} \sin(\pi/6) = 1,225 k_{\text{Т}} I_{1\text{ном}},$$

что не совпадает с предыдущей формулой, даже если предположить, что коэффициент трансформации взят для схемы  $Y/\Delta$ , и учесть соотношение между действующим током основной гармоники и действующим током обмотки:

$$I_{1(1)} = I_1 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = 0,954 I_1.$$

Есть, однако, совпадение с формулой (3.5а) из [34]:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{\sqrt{2} I_{d\text{ном}}}{\sqrt{3} k_T}, \quad I_{d\text{ном}} = 1,225 k_T I_{1\text{ном}},$$

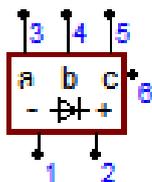
причем в соответствии с формулой (3.4) из [34] коэффициент трансформации  $k_T$  определен отношением фазных напряжений.

Коммутация мало влияет на соотношение токов. Согласно формуле из [10, с. 20] при большом угле коммутации  $\gamma = 30^\circ$  ( $\pi/6$  рад)

$$I_{2Y} = \frac{\sqrt{2 - \gamma/\pi} I_d}{\sqrt{3} k_T} = \frac{I_d}{1,279 k_T},$$

с отличием всего на 4 %.

2. Внешний вид модели шестипульсового преобразователя показан на *рис. 1.1*.



*Рис. 1.1.* Внешний вид модели шестипульсового преобразователя

Модель содержит шесть узлов: четыре узла для источников тока (номера 3, 4, 5, 6); номер 6 — для общей точки источников тока), два — для источника ЭДС (номера 1 и 2). Связи узлов источников тока с узлами источника ЭДС внутри модели отсутствуют.

3. Предполагается абсолютно сглаженная форма выпрямленного тока, поскольку со стороны тяговой сети подключается большое индуктивное сопротивление, составленное реактансами тяговой сети и реактора сглаживающего устройства.

4. При расчетах на гармониках узлы модели преобразователя со стороны переменного тока представлены источниками тока гармоник, поскольку индуктивные сопротивления КЗ понизительного и преобразовательного трансформаторов много больше реактанса питающей сети [1]. Так, суммарное индуктивное сопротивление трансформаторов ТДН-16000/110 и ТДП-12500/10, приведенное к напряжению 115 кВ, составляет 165 Ом, в то время как реактанс КЗ внешней сети в худшем случае, при мощности КЗ порядка 450 МВ·А, равен 30 Ом. Влияние высших гармоник на коммутацию вентиля преобразователя не учитывается.

5. Гармонический состав сетевого тока модели преобразователя определяется трансформацией и суммированием гармоник входных токов преобразователя с учетом несимметрии напряжений питающей сети. Для получения токов гармоник, включая первую, рассчитываются времена коммутации по фазам, угол включения очередного диода и вычисляется гармонический состав тока, представленного положительными и отрицательными трапецеидальными импульсами. Нарастание и спад импульса предполагаются квадратичными.

6. В расчетной схеме для системы тягового электроснабжения постоянного тока предусматривается установка моделей понизительных и преобразовательных трансформаторов с соответствующими схемами соединения обмоток, а также модели выпрямительно-инверторных преобразователей.

7. Для получения приемлемого алгоритма вычислений предполагается отсутствие неполнофазного режима и отличие угловых сдвигов питающих напряжений друг от друга не более чем на  $120^\circ \pm 30^\circ$ , т. е.

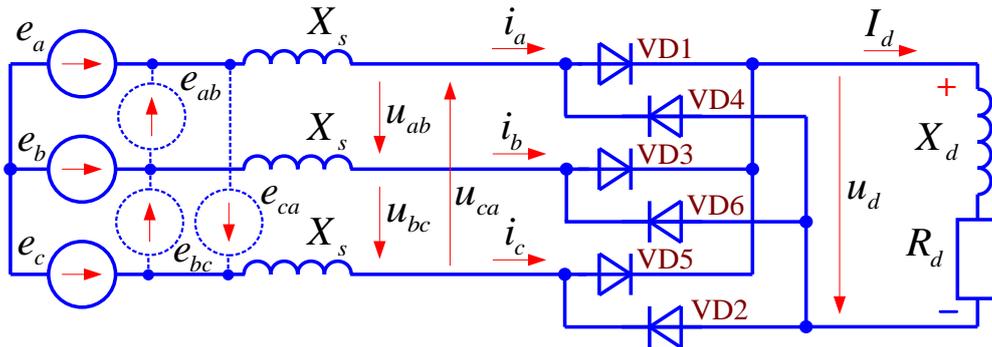
$$\varphi_{bc} \in (\varphi_{ab} - 5\pi/6; \varphi_{ab} - \pi/2);$$

$$\varphi_{ca} \in (\varphi_{ab} - 3\pi/2; \varphi_{ab} - 7\pi/6),$$

в соответствии с прямой последовательностью напряжений. Обратная последовательность напряжений на входе преобразователя не поддерживается, поскольку эта проблема решается простым пересоединением узлов на расчетной схеме.

## 1.2. Основные соотношения для выпрямителя при симметричной системе напряжений

**Трехфазный шестипульсовый мост.** Схема замещения моста показана на *рис. 1.2*. На этой схеме представлены эквивалентные фазные ЭДС источника, которые могут быть заменены эквивалентными линейными ЭДС.



*Рис. 1.2.* Мостовая схема шестипульсового выпрямителя

Индуктивное сопротивление рассеяния  $X_s$  учитывает внешнюю сеть, понизительный и преобразовательный трансформаторы. На входе преобразователя перед элементами  $X_s$  действуют три линейных симметричных ЭДС эквивалентного источника (*рис. 1.3*):

$$\dot{\mathcal{E}}_{ab} = \mathcal{E}_{ab} e^{j\varphi_{ab}}; e_{ab} = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} \sin(\omega t + \varphi_{ab});$$

$$\dot{\mathcal{E}}_{bc} = \mathcal{E}_{bc} e^{j\varphi_{bc}}; e_{bc} = \sqrt{2} \mathcal{E}_{bc} \sin(\omega t + \varphi_{bc}); \quad (1.1)$$

$$\dot{\mathcal{E}}_{ca} = \mathcal{E}_{ca} e^{j\varphi_{ca}}; e_{ca} = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ca} \sin(\omega t + \varphi_{ca}).$$

При симметричной системе ЭДС  $\mathcal{E}_{ab} = \mathcal{E}_{bc} = \mathcal{E}_{ca} = \mathcal{E}$  и коммутация вентилей при переходе с отрицательной полуволны ЭДС  $e_{bc}$  на положительную  $e_{ab}$  начинается в момент времени  $\tau_2 = \omega t_2$ , выражаемый в безразмерных единицах,

когда ЭДС  $e_{ca}$  переходит через ноль от положительных к отрицательным значениям, создавая отпирающее напряжение на вентиле VD1 в контуре  $e_{ca} - X_s - VD1 - VD5 - X_s - e_{ca}$ , т. е. при  $\tau_2 = -\varphi_{ca} - \pi$ .

Равенство  $e_{ca}(\tau_2) = 0$  эквивалентно соотношению

$$e_{ab}(\tau_2) + e_{bc}(\tau_2) = 0,$$

поскольку для любых моментов времени

$$e_{ab} + e_{bc} + e_{ca} = 0.$$

С момента  $\tau_2$  в течение времени коммутации  $\gamma$  происходит переключение диодов выпрямителя; если принять рост тока фазы  $a$  линейным, то

$$i_a = \frac{I_d}{\gamma}(\tau - \tau_2); \tau = \omega t; \tau_2 \leq \tau \leq \tau_2 + \gamma.$$

Правильнее, однако, принять квадратичный рост тока в соответствии с формулой (6.51) монографии [4] и с аппроксимацией косинуса двумя членами степенного ряда:

$$i_a = \frac{I_d}{\gamma^2}(\tau - \tau_2)^2, \tau_2 \leq \tau \leq \tau_2 + \gamma. \quad (1.2)$$

При  $\gamma < \pi/6$  погрешность представления  $\cos \gamma \approx 1 - \gamma^2/2$  не превышает 0,36 %.

Угол коммутации определяется из формулы (1.32) монографии [10]

$$\cos \gamma = 1 - 2u_k \frac{I_d}{I_{d \text{ ном}}} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right), \quad (1.3)$$

где  $I_d$ ,  $I_{d \text{ ном}}$  — величина текущего и номинального выпрямленного тока;  $m$  — число пульсаций выпрямленного напряжения;  $u_k = u_{k \text{ тт}} + u_{k \text{ пт}} S_{\text{тт}}/S_{\text{пт}}$  — суммарное напряжение короткого замыкания тягового преобразовательного и понизительного трансформаторов при пренебрежении влияния на коммутацию питающей сети, что допустимо при питании от сети 110 кВ и выше;  $S_{\text{тт}}$ ,  $S_{\text{пт}}$  — номинальные мощности тягового и понизительного трансформаторов.

При  $m = 6$  и  $\cos \gamma \approx 1 - \gamma^2/2$

$$\gamma = 2 \sqrt{u_k \frac{I_d}{I_{d \text{ ном}}} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)} = 1.414 \sqrt{u_k \frac{I_d}{I_{d \text{ ном}}}} \text{ рад.}$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения определяется формулами (6.60) — (6.61) монографии [4]:

$$A_0 = \frac{3\sqrt{2} \mathcal{E}_{\text{лин}}}{2\pi} (1 + \cos \gamma), \quad (1.4)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{лин}}$  — эффективное значение линейной ЭДС.

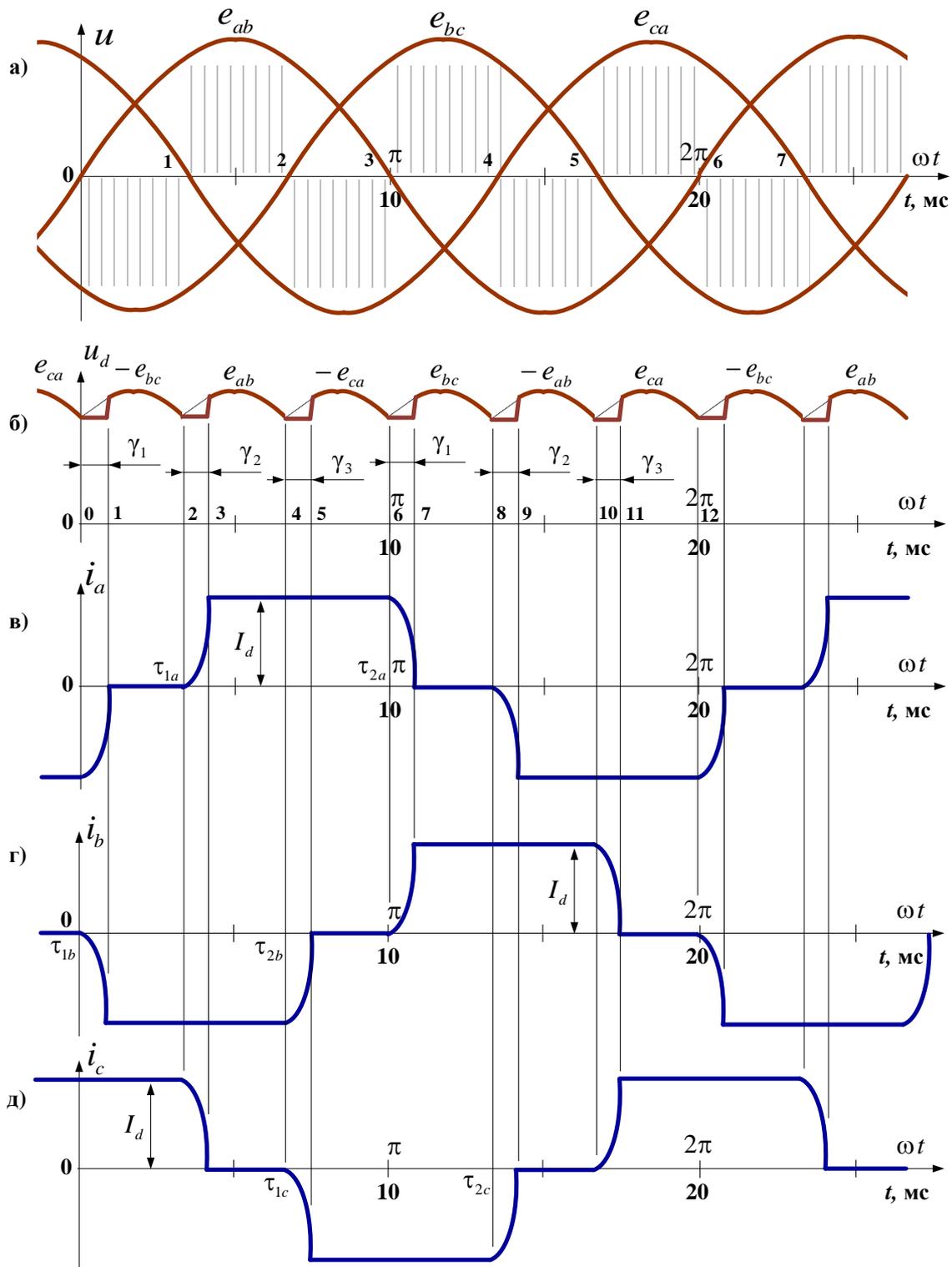


Рис. 1.3. Диаграммы напряжений и токов неуправляемого шестипульсового выпрямителя при симметричной системе питающих напряжений,  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3$

Сопоставление формул угла коммутации  $\gamma$  из разных источников. В монографии [10] угол коммутации определяется выражением (1.3). В книге [4] имеется выражение

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2I_d X_s}{\sqrt{6}U_2}. \quad (1.5)$$

В учебнике [15] приведена формула

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_d X_s}{\sqrt{2} U_2 \sin(\pi/3)}, \quad (1.6)$$

где  $X_s$  — индуктивное сопротивление трансформатора и питающей сети переменного тока, отнесенное к числу витков вентильной обмотки;  $U_2$  — действующее значение фазного напряжения вентильной обмотки.

Приведенные формулы дают одинаковые результаты, что видно из следующего. При учете следующих равенств

$$X_s \approx \frac{u_k U_{2\text{НОМ}}^2}{S_H}; \quad I_{2\text{НОМ}} = 0,82 I_{d\text{НОМ}}$$

из формулы (1.5) получается

$$X_s = \frac{u_k U_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{2\text{НОМ}}};$$

$$\cos \gamma = 1 - u_k \frac{\sqrt{3} I_d}{\sqrt{6} \cdot 0,817 I_{d\text{НОМ}} \sin(\pi/3)} = 1 - u_k \frac{I_d}{I_{d\text{НОМ}}},$$

где  $S_H$  — номинальная мощность тягового трансформатора.

Формула (1.3) при  $m = 6$  дает тот же результат. То же касается и формулы (1.6).

*Коэффициент мощности выпрямителя*

$$\lambda = \frac{3U_1 I_1^{(1)} \cos \varphi_1^{(1)}}{3U_1 I_1}$$

может быть определен двумя путями.

1. Величина  $\lambda$  может быть найдена по выражению (2.18) монографии [10]

$$\lambda_m = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left( 1 - u_k \frac{I_d}{I_{d\text{НОМ}}} \sin \frac{\pi}{m} \right), \quad (1.7)$$

где  $m$  — количество пульсаций выпрямленного напряжения.

В формуле (1.7) принята независимость коэффициента искажения формы кривой сетевого тока от нагрузки.

2. Для каждого входного узла выпрямителя по форме тока может быть определен его гармонический состав, включая модуль и угол основной частоты. По напряжению узла и току первой гармоники вычисляются его активная и реактивная мощности. Этот метод предпочтительнее для моделирования, поскольку учитывает индивидуальные характеристики токов разных фаз.

Если питающее тяговую подстанцию напряжение строго симметрично, то на выходе неуправляемого шестипульсового выпрямителя появляются гармоники с номерами  $k$ , равными 6, 12, 18 и т. д., эффективные значения коэффициентов разложения которых в ряд Фурье могут быть вычислены по скорректированным формулам (9.23) — (9.25) монографии [2]:

$$B_k = \frac{U_{d0}}{\sqrt{2}(k^2 - 1)}(k \cos k\gamma \sin \gamma - \sin k\gamma \cos \gamma); \quad (1.8)$$

$$C_k = \frac{U_{d0}}{\sqrt{2}(k^2 - 1)}(1 + k \sin k\gamma \sin \gamma + \cos k\gamma \cos \gamma),$$

где  $U_{d0} = 3\sqrt{2} \mathcal{E}_{\text{лин}} / \pi$  — постоянная составляющая выпрямленного напряжения.

Двенадцатипульсовая двухмостовая схема выпрямления последовательного типа. Схема моста показана на рис. 1.4, фазные напряжения вторичных обмоток трансформатора составляют 756 и 1310 В для соединения звездой и треугольником соответственно.

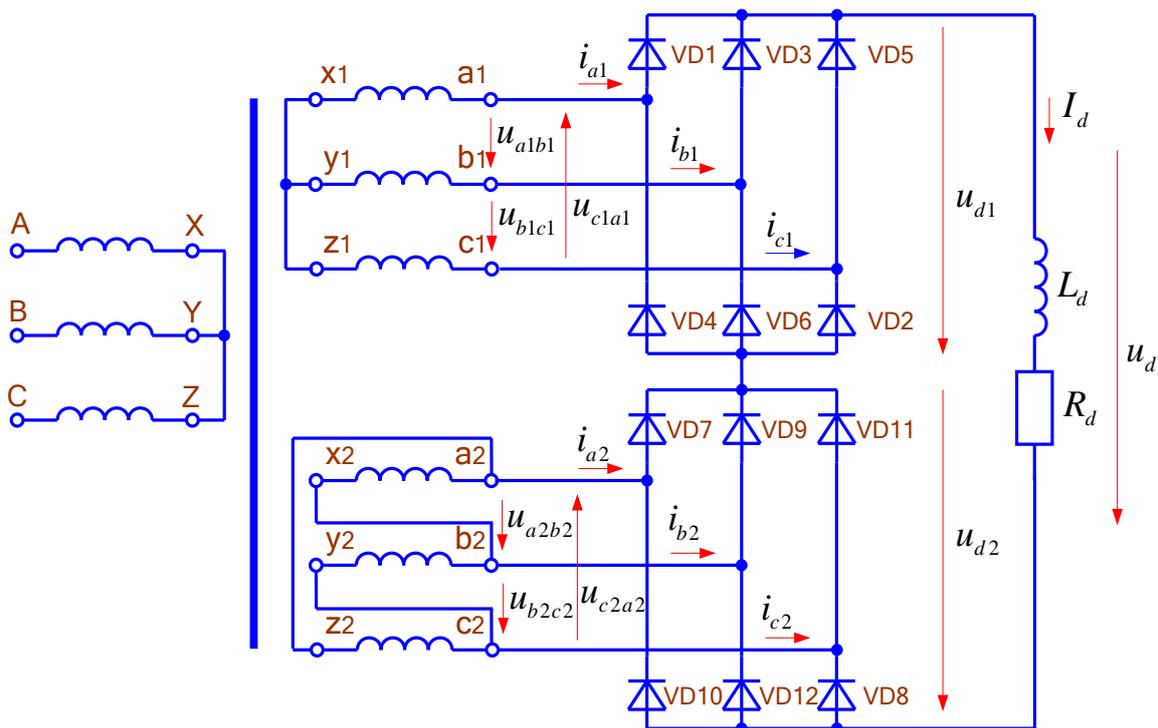


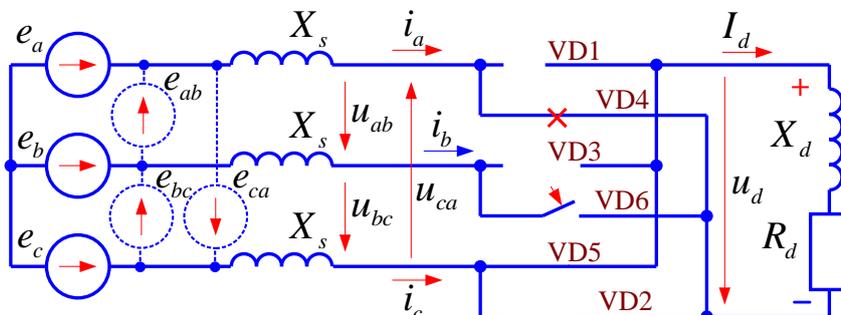
Рис. 1.4. Двенадцатипульсовая схема последовательного типа

Схема моста по рис. 1.4 может быть представлена двумя моделями шестипульсового преобразователя, соединенными последовательно, и моделью трехобмоточного трансформатора.

### 1.3. Углы коммутации при несимметричной системе синусоидальных питающих напряжений

В работах [10, 17, 18, 22, 25, 35] указывается на зависимость углов коммутации от несимметрии питающих напряжений, что определяет разные углы для разных коммутационных интервалов в течение периода. Однако формулы для углов коммутации основаны на предположении задания комплексного коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Это положение неприемлемо для моделирования, поэтому для получения пригодных расчетных формул предпринят другой подход.

На *рис. 1.5* представлена схема замещения для интервала  $\tau_{1b} \leq \tau \leq \tau_{1b} + \gamma_1$  коммутации вентиля с положительной полуволны ЭДС  $e_{ca}$  на инвертированную отрицательную полуволну ЭДС  $e_{bc}$ , когда начинается отрицательный импульс тока  $i_b$ .



*Рис. 1.5.* Схема замещения выпрямителя при коммутации вентилей с ЭДС  $+e_{ca}$  на ЭДС  $-e_{bc}$ , соответствующая интервалу  $\tau_{1b} \leq \tau \leq \tau_{1b} + \gamma_1$

Перед индуктивными элементами рассеяния  $X_s$  действуют три синусоидальных в общем случае несимметричных ЭДС эквивалентного источника:

$$e_{ab} = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} \sin(\omega t + \varphi_{ab});$$

$$e_{bc} = \sqrt{2} \mathcal{E}_{bc} \sin(\omega t + \varphi_{bc});$$

$$e_{ca} = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ca} \sin(\omega t + \varphi_{ca}).$$

Для вычисления гармоник входного тока выпрямителя необходимо определить времена начала и окончания полуволн фазных токов. В безразмерных единицах эти времена по *рис. 1.3* определяются следующим образом:

- 1)  $\tau_0 = \tau_{1b}$ ;
- 2)  $\tau_1 = \tau_{1b} + \gamma_1$ ;
- 3)  $\tau_2 = \tau_{1a}$ ;
- 4)  $\tau_3 = \tau_{1a} + \gamma_2$ ;
- 5)  $\tau_4 = \tau_{1c}$ ;
- 6)  $\tau_5 = \tau_{1c} + \gamma_3$ ;
- 7)  $\tau_6 = \tau_{2a} = \tau_{1b} + \pi$ ;
- 8)  $\tau_7 = \tau_1 + \pi$ ;
- 9)  $\tau_8 = \tau_2 + \pi$ ;
- 10)  $\tau_9 = \tau_3 + \pi$ .

До момента  $\tau_{1b}$  в контуре  $e_a - X_s - \text{VD4} - R_d - X_d - \text{VD5} - X_s - e_c$  протекает постоянный ток, а ток  $i_b = 0$ , поэтому до начала коммутации

$$u_{ca} = e_{ca}, \quad u_{bc} = e_{bc}.$$

Коммутация начинается в момент времени  $\tau_0 = \tau_{1b}$  за счет перехода ЭДС  $e_{ab}$  от отрицательных значений к положительным, то есть  $\sin(\tau_0 + \varphi_{ab}) = 0$ , и

$$\tau_0 = -\varphi_{ab}. \quad (1.9)$$

В начальный момент ток фазы  $a$  равен  $i_a = -I_d$ , коммутация заканчивается в момент  $\tau_{1b} + \gamma_1$ , когда  $i_a = 0$ . Ток  $i_b$ , наоборот, изменяется от 0 до  $i_b = -I_d$ . В течение времени коммутации  $i_c = I_d$ , уравнение переходного процесса записывается так:

$$\begin{aligned} X_s \left( \frac{di_a}{d\tau} - \frac{di_b}{d\tau} \right) &= \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} \sin(\tau + \varphi_{ab}); \quad X_s = \omega L_s \approx \frac{u_\kappa U_{2\text{НОМ}}^2}{S_H}; \\ X_s \left( \int_{-I_d}^0 di_a - \int_0^{-I_d} di_b \right) &= \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} \int_{\tau_{1b}}^{\tau_{1b} + \gamma_1} \sin(\tau + \varphi_{ab}) d\tau; \\ 2 X_s I_d &= -\sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} \cos(\tau + \varphi_{ab}) \Big|_{\tau_{1b}}^{\tau_{1b} + \gamma_1}; \\ \sqrt{2} X_s I_d &= -\mathcal{E}_{ab} (\cos \gamma_1 - 1); \\ \gamma_1 &= \arccos \left( 1 - \frac{\sqrt{2} X_s I_d}{\mathcal{E}_{ab}} \right). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Соотношения между выходным напряжением и ЭДС в коммутационный период:

$$2 X_s \int_{-I_d}^{i_a} \frac{di_a}{d\tau} d\tau = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} \int_0^\tau \sin(\tau + \varphi_{ab}) d\tau;$$

при отсчете от фазы  $ab$   $\varphi_{ab} = 0$ ,

$$2 X_s [i_a + I_d] = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} (1 - \cos \tau);$$

$$i_a = \frac{\sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} (1 - \cos \tau) - 2 X_s I_d}{2 X_s};$$

$$-2 X_s i_b = \sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} (1 - \cos \tau);$$

$$i_b = -I_d - i_a = -\frac{\sqrt{2} \mathcal{E}_{ab} (1 - \cos \tau)}{2 X_s};$$

$$X_s \frac{di_b}{d\tau} - u_d = e_{bc};$$

$$u_d = -e_{bc} + X_s \frac{di_b}{d\tau} = -e_{bc} + \frac{e_{ab}}{2} = -e_{bc} + \frac{e_{bc} + e_{ca}}{2} = \frac{e_{ca} - e_{bc}}{2}.$$

При одинаковых значениях  $X_s$  разных фаз выходное напряжение определяется соответствующей полуразностью ЭДС так же, как и в симметричном режиме.

Для проверки полученных соотношений можно воспользоваться, например, данными раздела 1.2 диссертации [17]. Однако в этом источнике в качестве исходных данных использован комплексный коэффициент несимметрии питающих напряжений по обратной последовательности  $\underline{k}_{2U} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1$ . Формулы для него можно получить из исходных выражений для напряжений прямой и обратной последовательностей при отсутствии напряжения нулевой последовательности:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C &= 0; \\ \dot{U}_1 &= \frac{(\underline{a}-1)\dot{U}_B + (\underline{a}^2-1)\dot{U}_C}{3}; \\ \dot{U}_2 &= \frac{(\underline{a}^2-1)\dot{U}_B + (\underline{a}-1)\dot{U}_C}{3};\end{aligned}\tag{1.11}$$

$$\underline{a} = e^{j120^\circ} = a_1 + ja_2 = -0,5 + j0,866;$$

$$\underline{a}^2 = e^{j240^\circ} = a_1 - ja_2 = -0,5 - j0,866.$$

Из формулы

$$\underline{k}_{2U} = \frac{(\underline{a}^2-1)\dot{U}_B + (\underline{a}-1)\dot{U}_C}{(\underline{a}-1)\dot{U}_B + (\underline{a}^2-1)\dot{U}_C}$$

можно определить только отношение комплексов напряжений, но этого недостаточно для сопоставления величин. Если же задавать напряжения  $\dot{U}_B, \dot{U}_C$ , то появляется возможность подобрать значения модуля и угла  $\underline{k}_{2U}$ .

Использованное в уравнении (2.10) диссертации [17] выражение для номинального напряжения неприемлемо для моделирования, поскольку оно позволяет получить результат только для номинального напряжения и оставляет неопределенным его угол. Однако для сопоставления расчетов результаты первой главы [17] для симметричной системы питающих напряжений можно использовать.

Если обозначить

$$\underline{a}-1 = b_1 + jb_2 = -1,5 + j0,866;$$

$$\underline{a}^2-1 = b_1 - jb_2 = -1,5 - j0,866;$$

$$\dot{U}_B = U_{Br} + jU_{Bi}; \quad \dot{U}_C = U_{Cr} + jU_{Ci},$$

то

$$\underline{k}_{2U} = \frac{(b_1 - jb_2)(U_{Br} + jU_{Bi}) + (b_1 + jb_2)(U_{Cr} + jU_{Ci})}{(b_1 + jb_2)(U_{Br} + jU_{Bi}) + (b_1 - jb_2)(U_{Cr} + jU_{Ci})};$$

$$\underline{k}_{2U} = \frac{b_1(U_{Br} + U_{Cr}) + b_2(U_{Bi} - U_{Ci}) + j[-b_2(U_{Br} - U_{Cr}) + b_1(U_{Bi} + U_{Ci})]}{b_1(U_{Br} + U_{Cr}) - b_2(U_{Bi} - U_{Ci}) + j[b_2(U_{Br} - U_{Cr}) + b_1(U_{Bi} + U_{Ci})]};$$

$$\begin{aligned}
U_{rp} &= U_{Br} + U_{Cr}; \quad U_{rm} = U_{Br} - U_{Cr}; \\
U_{ip} &= U_{Bi} + U_{Ci}; \quad U_{im} = U_{Bi} - U_{Ci}; \\
\underline{k}_{2U} &= \frac{b_1 U_{rp} + b_2 U_{im} + j(-b_2 U_{rm} + b_1 U_{ip})}{b_1 U_{rp} - b_2 U_{im} + j(b_2 U_{rm} + b_1 U_{ip})}; \\
\underline{k}_{2U} &= \frac{[b_1 U_{rp} + b_2 U_{im} + j(b_1 U_{ip} - b_2 U_{rm})][b_1 U_{rp} - b_2 U_{im} - j(b_1 U_{ip} + b_2 U_{rm})]}{(b_1 U_{rp} - b_2 U_{im})^2 + (b_1 U_{ip} + b_2 U_{rm})^2}; \\
c_1 &= b_1 U_{rp} + b_2 U_{im}; \quad c_2 = b_1 U_{ip} - b_2 U_{rm}; \\
c_3 &= b_1 U_{rp} - b_2 U_{im}; \quad c_4 = b_1 U_{ip} + b_2 U_{rm}; \\
\underline{k}_{2U} &= \frac{(c_1 + jc_2)(c_3 - jc_4)}{c_3^2 + c_4^2} = \frac{c_1 c_3 + c_2 c_4 + j(c_2 c_3 - c_1 c_4)}{c_3^2 + c_4^2}; \\
|\underline{k}_{2U}| &= \sqrt{[\operatorname{Re}(\underline{k}_{2U})]^2 + [\operatorname{Im}(\underline{k}_{2U})]^2}; \\
\arg(\underline{k}_{2U}) &= \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\underline{k}_{2U})}{\operatorname{Re}(\underline{k}_{2U})}.
\end{aligned}$$

В прежнем ГОСТе по качеству электроэнергии [9] приведены формулы для модулей напряжений:

$$\begin{aligned}
U_1 &= \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3} U_{AB} + \sqrt{4U_{BC}^2 - \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]}; \\
U_2 &= \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3} U_{AB} - \sqrt{4U_{BC}^2 - \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]}.
\end{aligned}$$

В терминах схемы замещения *рис. 1.5* вместо фазных или линейных напряжений необходимо подставлять соответствующие ЭДС.

При отсутствии нулевой последовательности

$$\begin{aligned}
U_{ab}' &= -U_{bc}' - U_{ca}'; \quad U_{ab}'' = -U_{bc}'' - U_{ca}''; \\
U_{bc}' &= U_{bc} \cos \varphi_{bc}; \quad U_{bc}'' = U_{bc} \sin \varphi_{bc}; \\
U_{ca}' &= U_{ca} \cos \varphi_{ca}; \quad U_{ca}'' = U_{ca} \sin \varphi_{ca}; \\
U_{ab} &= \sqrt{U_{ab}'^2 + U_{ab}''^2}; \quad \varphi_{ab} = \operatorname{arctg} \frac{U_{ab}''}{U_{ab}'}; \\
U_{ab} &= \sqrt{U_{bc}^2 + U_{ca}^2 + 2U_{bc} U_{ca} \cos(\varphi_{bc} - \varphi_{ca})}; \\
\varphi_{ab} &= \operatorname{arctg} \left( \frac{U_{bc} \sin \varphi_{bc} + U_{ca} \sin \varphi_{ca}}{U_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{ca} \cos \varphi_{ca}} \right).
\end{aligned}$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)