

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Лабораторный практикум



Владимир 2021

УДК 621.31

ББК 31.27

C56

Авторы-составители: Н. П. Бадалян, Г. П. Колесник

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
зав. кафедрой электротехники Ковровской государственной
технологической академии имени В. А. Дегтярева

Е. А. Чащин

Кандидат технических наук
доцент кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

В. С. Грибакин

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Современные технические средства передачи электроэнергии : лаб. практикум / авт.-сост.: Н. П. Бадалян, Г. П. Колесник ;
С56 Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир :
Изд-во ВлГУ, 2021. – 120 с.

ISBN 978-5-9984-1271-4

Содержит описание пяти расчетно-лабораторных работ, в каждой из которых приведены цель, объект и средства исследования, домашнее задание, методические указания, контрольные вопросы и учебная литература.

Составлен в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом и предназначен для студентов 1-го курса магистратуры всех форм обучения направления 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника. Практикум будет полезен студентам при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 21. Ил. 42. Библиогр.: 15 назв.

УДК 621.31

ББК 31.27

ISBN 978-5-9984-1271-4

© ВлГУ, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Потребление энергетических ресурсов человечеством, обусловленное техническим прогрессом, стремительно увеличивается, при этом значительная их часть расходуется на производство электрической энергии, которая является главным видом энергии, обеспечивающей жизнедеятельность человека. Электрическая энергия – это единственный вид продукции, который вырабатывается и потребляется в один и тот же момент времени и для транспортировки и передачи которого от производителя до потребителя используется часть самой электрической энергии. При этом ее потери неизбежны в силу физических явлений, и поэтому вопросы энергоэффективности технологического оборудования и энергосбережения считаются актуальными.

Выполнение студентами-магистрантами курса лабораторных работ позволяет им приобретать навыки подготовки, постановки, проведения и научного обоснования эксперимента, совершенствовать работу с измерительными приборами, учиться читать электрические и собирать соответствующие им электромонтажные схемы, обрабатывать и анализировать результаты эксперимента.

Приступая к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Современные технические средства передачи электроэнергии», студенты обязаны изучить правила техники безопасности и расписаться в журнале, который находится в лаборатории.

Лабораторные работы выполняются бригадами, состоящими из 2 – 3 студентов; каждая бригада должна иметь бланк отчета с письменными ответами в соответствии с требованиями п. 2 к каждой лабораторной работе и со всеми необходимыми расчетами, рисунками, графиками и таблицами.

Каждый студент должен получить у преподавателя допуск к работе, который включает в себя проверку выполнения домашней подготовки, теоретическое обоснование эксперимента, знание методик проведения эксперимента. Студентам, допущенным к занятиям, дается разрешение на сборку схемы. Студенты, не подготовившиеся к

занятиям или имеющие задолженность по двум незащищенным работам, к проведению работы не допускаются.

По окончании лабораторной работы бригада студентов подписывает у преподавателя результаты опытов, разбирает схему и приводит стенд в порядок. Студенты, выполнившие, оформившие и защитившие работу в день выполнения, предъявляют один отчет на бригаду. При защите в последующие дни отчет оформляется каждым членом бригады.

Отчеты по лабораторным работам должны быть исполнены аккуратно на листах писчей бумаги формата А4 в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.4-84. Все электрические схемы, графики и таблицы должны быть выполнены при помощи чертежных инструментов или на компьютере, причем все графики выполняют только на миллиметровой бумаге или на белой бумаге с координатной сеткой.

Обозначения на электрических схемах должны соответствовать стандартам ГОСТ 2.105-95, ГОСТ 2.702-75, ГОСТ 2.747-68, СТ СЭВ 1052-78, ГОСТ 1494-77, ГОСТ 19880-74.

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием кафедры, учебной группы, фамилии, имени и отчества студента, название, номер и дату выполнения лабораторной работы;
- фамилию, имя и отчество преподавателя, принимающего работу;
- задание; цель работы, принципиальные электрические схемы и схемы соединений (электромонтажные);
- письменные ответы на каждый вопрос пункта «Подготовка к работе»; расчетные формулы с необходимыми вычислениями;
- таблицы измеренных и вычисленных величин;
- графики и диаграммы;
- краткие выводы.

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Различают два вида потерь электрической энергии при ее транспортировке: технологические и коммерческие.

Технологические потери электроэнергии включают в себя технические потери в линиях электропередачи и оборудовании

электрических сетей, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии переменным током, в соответствии с техническими характеристиками и режимами работы линий и оборудования, с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций и потерь, обусловленных допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии.

Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям за рассматриваемый период времени рассчитываются как в целом, так и с разбивкой по уровням напряжения:

- на высоком напряжении – 110 кВ и выше (ВН);
- на среднем первом напряжении – 27,5 – 60 кВ (СНІ);
- на среднем втором напряжении – 1 – 20 кВ (СНІІ);
- на низком напряжении – 0,4 кВ и ниже (НН).

Технические потери электроэнергии в электрических сетях состоят из двух составляющих, обусловленных режимом работы:

- условно-постоянных потерь, (потери, не зависящие от значения передаваемой мощности);
- нагрузочных (переменных) потерь (потери, объем которых зависит от значения передаваемой мощности).

Условно-постоянные потери в элементах электрической системы включают потери:

- на холостой ход силовых трансформаторов (автотрансформаторов);
- в соединительных проводах и сборных шинах распределительных устройств подстанций;
- устройствах компенсации реактивной мощности (синхронных компенсаторах, батареях статических конденсаторов, статических тиристорных компенсаторах, шунтирующих реакторах);
- в системе учета электроэнергии (трансформаторах тока, трансформаторах напряжения, счетчиках и соединительных проводах);
- вентильных разрядниках, ограничителях перенапряжений;
- устройствах присоединений высокочастотной связи;
- в изоляции силовых кабелей и потери от токов утечки по изоляторам воздушных линий;
- на корону в воздушных линиях 110 кВ и выше;
- расход электроэнергии на собственные нужды подстанций (ПС);
- на плавку гололеда.

Условно-постоянные потери рассчитывают по паспортным данным оборудования завода-изготовителя с учетом таблиц нормативных документов, а также показаний приборов учета за нормативный период. Например, при расчете потерь электроэнергии холостого хода в силовом трансформаторе (автотрансформаторе) используются паспортные данные по потерям мощности холостого хода ΔP_x . В этом случае в качестве подтверждающего материала целесообразно включать официально заверенные протоколы измерений потерь мощности холостого хода

$$\Delta W_x = \Delta P_x \sum_{i=1}^m T_{pi} \left(\frac{U_i}{U_{\text{ном}}} \right)^2,$$

где T_{pi} – количество часов работы трансформатора (автотрансформатора) в i -м режиме, ч;

U_i – напряжение на высшей стороне трансформатора (автотрансформатора) в i -м режиме, кВ;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение высшей обмотки трансформатора (автотрансформатора), это измеренное или расчетное напряжение установившегося режима сети в соответствии с законами электротехники, кВ.

Потери электроэнергии в устройствах компенсации реактивной мощности, например в синхронном компенсаторе (СК) или генераторе, переведенном в режим СК, определяются по формуле

$$\Delta W_{\text{СК}} = (0,4 + 0,1\beta_Q^2) \Delta P_{\text{ном}} \cdot T_p, \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где β_Q – коэффициент максимальной нагрузки СК в базовом периоде;

$\Delta P_{\text{ном}}$ – потери мощности в режиме номинальной загрузки СК в соответствии с паспортными данными, кВт.

Потери электроэнергии в статических компенсирующих устройствах (КУ) – батареях статических конденсаторов (БК) и статических тиристорных компенсаторах (СТК) – в соответствии с паспортными данными по удельным потерям мощности рассчитываются по выражению

$$\Delta W_{\text{ку}} = \Delta P_{\text{ку}} S_{\text{ку}} T_p, \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $\Delta P_{\text{ку}}$ – удельные потери мощности в соответствии с паспортными данными КУ, кВт/квар;

$S_{\text{ку}}$ – мощность КУ (для СТК принимается по емкостной составляющей), квар.

В случае отсутствия паспортных данных оборудования значение удельных потерь $\Delta P_{\text{ку}}$ принимается равным для БК – 0,003 кВт/квар, для СТК – 0,006 кВт/квар.

Нагрузочные потери электроэнергии в электрических сетях при ее транспортировке включают в себя потери:

- в воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линиях;
- трансформаторах (автотрансформаторах);
- шинпроводах;
- токоограничивающих реакторах.

В соответствии с нормативными документами нагрузочные потери электроэнергии в каждом технологическом элементе электрических сетей могут быть рассчитаны одним из двух методов в зависимости от информационной обеспеченности (методы представлены в порядке понижения точности получаемых результатов расчета):

- 1) оперативных расчетов;
- 2) средних нагрузок.

Суммарные нагрузочные потери электроэнергии в электрической сети в целом за период T – часов (D – дней) могут быть рассчитаны одним из пяти следующих методов в зависимости от объема и точности имеющейся информации о схемах и нагрузках сетей (методы расположены в порядке снижения точности расчета):

- 1) оперативных расчетов;
- 2) расчетных суток;
- 3) средних нагрузок;
- 4) числа часов наибольших потерь мощности;
- 5) оценки потерь по обобщенной информации о схемах и нагрузках сети.

Нагрузочные потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям на регулируемый период с учетом отпуска в сеть определяются по формуле

$$\Delta W_{\text{н.р}} = \Delta W_{\text{н.б}} \left(\frac{W_{\text{oc.p}}}{W_{\text{oc.б}}} \right)^2,$$

где $\Delta W_{н.р}$, $\Delta W_{н.б}$ – нагрузочные потери электроэнергии за базовый и регулируемый периоды соответственно;

$W_{ос.б}$, $W_{ос.р}$ – отпуск электроэнергии в сеть в базовом и регулируемом периодах соответственно.

Потери электроэнергии, обусловленные допустимыми в соответствии с нормативными документами погрешностями системы учета электроэнергии, на регулируемый период определяются соотношением

$$\Delta W_{погр. р} = \frac{\Delta W_{погр. б \%} \cdot W_{ос. р}}{100},$$

где $\Delta W_{погр. б \%}$ – потери электроэнергии, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии, за базовый период в относительных единицах.

Потери электроэнергии, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии, по уровням напряжения распределяются пропорционально отпуску в сеть по уровням напряжения как в базовом, так и регулируемом периодах.

В случае превышения технологических потерь над фактическими (отчетными) в базовом году допускается принимать в регулируемом году потери электроэнергии, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета, равными нулю.

Основными факторами роста технических потерь в распределительных сетевых компаниях являются:

- физическая изношенность электрооборудования;
- использование морально устаревших типов электрооборудования;
- несоответствие используемого электрооборудования существующим нагрузкам и неоптимальный установившийся режим в сетях по уровням напряжения и реактивной мощности.

Основными факторами, определяющими уровень коммерческих потерь в электрической распределительной сети, следует назвать:

- погрешности измерений, возникающие в результате несоответствия приборов учета требуемым классам точности;
- несоответствие нагрузочных характеристик электромагнитных трансформаторов тока и существующих нагрузок, подключаемых к их вторичным обмоткам;

- нарушение сроков поверки и неисправности приборов учета электроэнергии;
- использование расчетного количества отпущенной электроэнергии при отсутствии приборов учета;
- несовершенство методов снятия показаний с приборов учета;
- несанкционированный доступ к электрическим сетям.

К приоритетным мероприятиям по снижению технических потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях напряжением 0,4 – 35 кВ относятся:

- использование 10 кВ в качестве основного напряжения распределительной сети;
- увеличение доли сетей с напряжением 35 кВ;
- сокращение радиуса действия и строительство воздушных линий (ВЛ) напряжением 0,4 кВ в трехфазном исполнении по всей длине;
- применение самонесущих изолированных и защищенных проводов для ВЛ напряжением 0,4 – 10 кВ;
- использование максимального допустимого сечения провода в электрических сетях напряжением 0,4 – 10 кВ с целью адаптации их пропускной способности к росту нагрузок в течение всего срока службы;
- разработка и внедрение нового энергоэффективного и энергосберегающего электрооборудования, в частности, распределительных трансформаторов с уменьшенными активными и реактивными потерями холостого хода, встроенных в комплектные трансформаторные подстанции (КТП) и закрытые трансформаторные подстанции (ЗТП) конденсаторных батарей;
- применение столбовых трансформаторов малой мощности (6 – 10/0,4 кВ) для сокращения протяженности сетей напряжением 0,4 кВ и потерь электроэнергии в них;
- более широкое использование устройств автоматического регулирования напряжения под нагрузкой, вольтодобавочных (последовательного включения) трансформаторов, средств местного регулирования напряжения для повышения качества электроэнергии и снижения ее потерь;
- комплексная автоматизация и телемеханизация электрических сетей, применение коммутационных аппаратов нового поколения, средств дистанционного определения мест повреждения в электрических

сетях для сокращения длительности неоптимальных ремонтных и послеаварийных режимов, поиска и ликвидации аварий;

– повышение достоверности измерений в электрических сетях на основе использования новых информационных технологий.

Коммерческие потери – это потери, обусловленные хищениями электроэнергии, несоответствием показаний счетчиков оплате электроэнергии и другими причинами в сфере организации контроля потребления энергии.

Мероприятия по уменьшению доли коммерческих потерь в суммарных потерях электроэнергии включают в себя:

– периодическую калибровку (поверку) счетчиков индукционной системы с целью определения их погрешности и своевременную замену индукционных счетчиков на электронные (за исключением бытовых индукционных однофазных счетчиков);

– осуществление коммерческого учета электроэнергии (мощности) в строгом соответствии с разработанными для энергообъектов и аттестованных методик выполнения измерений (МВИ) по ГОСТ Р 8.563-96. Разработка и аттестация МВИ энергообъектов должны проводиться в соответствии с типовыми методиками выполнения измерений РД 34.11.333-97 и РД 34.11.334-97;

– создание нормативной и технической базы для периодической поверки измерительных трансформаторов тока и напряжения в рабочих условиях эксплуатации с целью оценки их фактической погрешности;

– совершенствование правовой основы для предотвращения хищений электроэнергии, ужесточение гражданской и уголовной ответственности за эти хищения, как это имеет место в промышленно развитых странах;

– создание льготной системы налогообложения для предприятий, выпускающих оборудование автоматизированной системы контроля и учета электропотребления (АСКУЭ) и энергосберегающее оборудование;

– создание нормативной базы для ликвидации «бесхозных» потребителей и электрических сетей, обеспечение безубыточных условий их принятия на баланс и обслуживание энергоснабжающими организациями;

– создание законодательной и технической базы для внедрения приборов учета электроэнергии с предоплатой.

В настоящее время в распределительных сетях существуют оба вида потерь (коммерческие и технические) с преобладанием коммерческих потерь электроэнергии. Для борьбы с каждым видом потерь необходимо в распределительных сетевых организациях применять рассмотренные выше мероприятия по снижению потерь электроэнергии. Каждый вид мероприятия должен быть оценен с использованием различных методик (как минимум двух).

Электрические сети современных энергосистем характеризуются *многоступенчатостью, сложностью конфигурации и многорежимностью*, т. е. большим числом трансформаций на пути от источников электроэнергии к ее потребителям. Топологическая структура отдельных звеньев этой многоступенчатой сети достаточно сложна, она насчитывает десятки, а подчас и сотни узлов, ветвей и замкнутых контуров с большим разнообразием загрузки элементов сети в суточном и годовом разрезах при нормальном функционировании системы, вызываемых рабочими изменениями во времени нагрузки потребителей и обилием режимов, возникающих при выводе различных элементов сети в плановый ремонт и при их аварийных отключениях. Классификация электрических сетей по признакам, связанным с номинальным напряжением, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Трехфазная система переменного тока

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

Все электроприемники, генераторы, трансформаторы и прочие элементы электроэнергетических систем проектируются для работы в длительном нормальном режиме при определенном напряжении, при котором эти элементы обладают наиболее целесообразными технико-экономическими показателями. Эти напряжения называются номинальными,

и их значения всегда устанавливаются Государственным стандартом. В настоящее время для электрических сетей стандартизованы четыре напряжения менее 1 кВ (40, 220, 380 и 660 В) и двенадцать напряжений выше 1 кВ (3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ). Все перечисленные цифры соответствуют линейным (междуфазным) значениям напряжений трехфазной системы переменного тока.

По размерам территории, охватываемой сетью, могут быть выделены так называемые местные ($U_{\text{ном}} = 35$ кВ), районные (110 – 220 кВ) и региональные сети ($U_{\text{ном}} = 330$ кВ). Линии электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН), являющиеся основой последней категории сетей, служат как для связи отдельных районов и относительно небольших энергосистем в региональных объединенных энергосистемах (ОЭС), так и для связи между собой крупных объединений.

По назначению различают системообразующие и распределительные сети. Первые осуществляют функции формирования районных энергосистем (РЭС) путем объединения их электростанций на параллельную работу, а также объединения РЭС и ОЭС между собой. Кроме того, они осуществляют передачу электроэнергии к системным подстанциям, выполняющим роль источников питания распределительных сетей.

По данным Положения ПАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе в 2013 году общая протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи магистрального электросетевого комплекса напряжением до 1150 кВ составляет **131583,063 км**, в том числе:

- линий напряжением 1150 кВ – 948,8 км;
- линий напряжением 750 кВ – 3708,468 км
(в том числе ВЛ-800 кВ);
- линий напряжением 500 кВ – 36722,39 км
(в том числе ВЛ-400 кВ);
- линий напряжением 330 кВ – 10984,735 км;
- линий напряжением 220 кВ – 77540,93 км;
- линий напряжением 110 кВ – 1206,76 км
(в том числе ВЛ-150 кВ);
- линий напряжением 0,4 – 35 кВ – 470,98 км.

Общее количество трансформаторных подстанций (ТП) и распределительных пунктов (РП) напряжением 35 кВ и выше, находящихся в

эксплуатации магистрального электросетевого комплекса, составляет **885 ед.**, в том числе:

- напряжением 1150 кВ – 3 ед.;
- напряжением 750 кВ – 12 ед. (в том числе 3 ед. ПС 800 кВ);
- напряжением 500 кВ – 104 ед. (в том числе 1 ед. ПС 400 кВ);
- напряжением 330 кВ – 68 ед.;
- напряжением 220 кВ – 612 ед.;
- напряжением 35 – 110 кВ – 42 ед.;
- напряжением 10 кВ – 44 ед.

Состояние производственных активов магистрального электросетевого комплекса Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) характеризуется следующим объемом оборудования со сверхнормативным (более 25 лет) сроком службы: 56 % для подстанций (ПС) и 77 % для линий электропередачи (ЛЭП); при этом доля оборудования, находящегося в эксплуатации более 35 лет для подстанций и более 40 лет для ЛЭП, составляет 20 % и 35 % соответственно.

По итогам формирования балансов электрической энергии в сетях ЕНЭС за прошлые годы величина потерь электроэнергии в сети ЕНЭС, отнесенная к сальдированному отпуску электроэнергии из сети ЕНЭС в сети распределительных сетевых компаний, потребителей и независимых АО-энерго, составила 4,24 %, из них:

- условно-постоянные потери электроэнергии в сети ЕНЭС составили 41,1 % от общего объема потерь электроэнергии в сети ЕНЭС;
- нагрузочные (переменные) потери электроэнергии в сети ЕНЭС составили 58,9 % от общего объема потерь электроэнергии в сети ЕНЭС.

Установленное на объектах ЕНЭС основное электротехническое оборудование, функционирующее в непрерывном производственном цикле, определяющее надежность и экономичность работы, изготовлено в основном в пятидесятые-семидесятые годы прошедшего столетия и уступает современным разработкам по техническим характеристикам, массогабаритным показателям и показателям надежности, требует периодического, возрастающего по объемам с ростом срока службы ремонтного обслуживания.

В 2012 году было отмечено снижение средней удельной аварийности по ОАО «ФСК ЕЭС», что в первую очередь обусловлено

значительным уменьшением количества технологических нарушений из-за недостатков эксплуатации и ремонта высоковольтных выключателей, устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и повреждений опорно-стержневой изоляции (ОСИ).

Наиболее часто встречающимися причинами повреждений оборудования подстанций являются износ оборудования, недостатки эксплуатации и ремонтов, а также дефекты изготовления оборудования.

Основные причины повреждения линий электропередачи – грозовые отключения, загрязнение изоляции, воздействие сторонних лиц и организаций, пожары. Также остается стабильно высоким количество технологических нарушений из-за падения боковых деревьев. В 2013 году значение данного показателя обусловлено ростом числа технологических нарушений, связанных с валкой деревьев на провода воздушных линий при организации и выполнении целевых программ по расширению просек воздушных линий.

Распределительной линией считается линия, питающая ряд трансформаторных подстанций или вводы к электроустановкам потребителей. Такие линии представляют собой основу распределительной сети. Распределительные линии можно выделить в сетях различных номинальных напряжений, поэтому не следует отождествлять понятия местных и распределительных сетей, как это делалось ранее. В настоящее время по мере развития сетей СВН верхняя граница этого диапазона в ряде областных энергетических систем сдвинулась в сторону более высоких напряжений, и современные сети напряжением 110 – 220 и даже 330 кВ постепенно приобретают характер распределительных. Так, по мере наложения вновь создаваемой сети напряжением 750 кВ на сеть 330 кВ в тех районах, где ранее последняя выполняла функции системообразующей, сети напряжением 330 кВ постепенно переходят в разряд распределительных. В будущем аналогичный процесс будет наблюдаться в тех частях единой энергосистемы (ЕЭС) России, где линии напряжением 1150 кВ возьмут на себя роль основных связей между ОЭС, в которых сейчас основными являются сети напряжением 500 кВ.

В распределительных электрических сетях, находящихся на балансе операционных компаний, используются сети напряжением 0,4 – 220 кВ. Общая протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением 0,4 – 110 (220) кВ составляет **2109693,7 км**, в том числе:

- линий напряжением 220 кВ – 2895,4 км;
- линий напряжением 110 кВ – 254345,5 км (в том числе ЛЭП 60 и 150 кВ);
- линий напряжением 35 кВ – 162722 км;
- линий напряжением 6 – 20 кВ – 947143,2 км;
- линий напряжением 0,4 кВ – 742587,6 км.

Общее количество трансформаторных подстанций распределительных электрических сетей, находящихся в эксплуатации, составляет **461864 ед.**, в том числе:

- напряжением 110 – 220 кВ – 6884 ед.;
- напряжением 35 кВ – 7304 ед.;
- напряжением 6 – 20 кВ – 447676 ед.

Средняя степень износа электросетевых объектов распределительных электрических сетей, включая здания и сооружения, составляет свыше 70 %.

Воздушные линии напряжением 0,4 – 20 кВ построены по радиальному принципу с использованием в основном алюминиевых изолированных проводов малых сечений, а также деревянных и железобетонных опор с механической прочностью не более 27 – 35 кН·м.

Линии электропередачи напряжением 0,4 – 110 (220) кВ проектировались по критерию минимума затрат, а расчетные климатические условия принимались с повторяемостью один раз в 5 – 10 лет.

Кабельные сети построены по петлевой схеме или в виде двухлучевой схемы с одно- или двухтрансформаторными подстанциями. В качестве силового кабеля использовался в основном кабель с бумажной, пропитанной маслом изоляцией с алюминиевыми жилами.

Трансформаторные ПС напряжением 35 – 110 (220) кВ в основном укомплектованы двумя силовыми трансформаторами и построены с двухсторонним питанием на стороне высшего напряжения. Количество указанных подстанций составляет примерно 70 % от общего числа подстанций данного класса напряжения.

На вышеуказанных подстанциях установлены трансформаторы с устройствами регулирования под нагрузкой (РПН) в количестве 16694 ед., что составляет 68 % от общего количества трансформаторов – 24522 ед.

В сетях, подключенных к трансформаторам, не оборудованным устройствами РПН, как правило, происходят отклонения напряжения на

шинах потребительских подстанций выше предельно допустимых значений. Более половины парка силовых трансформаторов требует замены.

Трансформаторные подстанции напряжением 6 – 20/0,4 кВ подключены к сетям, как правило, по тупиковой схеме в однотрансформаторном исполнении. Из общего числа трансформаторных подстанций напряжением 6 – 20/0,4 кВ в закрытом исполнении выполнены 62055 ед., или 14 %.

В эксплуатации свыше 30 лет находится более 55 % подстанций.

Уровень автоматизации сетей напряжением 35 – 110 (220) кВ и особенно 6 – 20 кВ значительно отстает от аналогичного показателя в развитых странах. Только 38 % от общего количества центров питания оснащены телесигнализацией и менее 16 % имеют телеуправление.

Предприятия электрических сетей и около 78 % районных электрических сетей имеют диспетчерские пункты, из которых только 60 % оснащены диспетчерскими щитами.

Показатели надежности электроснабжения в связи с высоким износом распределительных электрических сетей за последние годы снижаются. В сетях напряжением 6 – 20 кВ происходит в среднем до 30 отключений в год в расчете на 100 км воздушных и кабельных линий. В сетях напряжением 0,4 кВ – до 100 отключений в год на 100 км.

Причинами повреждений на ВЛ напряжением 6 – 20 кВ являются:

- изношенность конструкций и материалов при эксплуатации – 18 %;
- климатические воздействия (ветер, гололед и их сочетание) выше расчетных значений – 19 %;
- грозовые перенапряжения – 13 %;
- несоблюдение требований эксплуатации, ошибки персонала – 6 %;
- посторонние, несанкционированные воздействия – 16 %;
- невыясненные причины повреждений – 28 %.

Кабельные линии в классах напряжения 0,4 – 110 (220) кВ в основном повреждаются по следующим причинам:

- дефекты прокладки – 20 %;
- естественное старение силовых кабелей – 31 %;
- механические повреждения – 30 %;
- заводские дефекты – 10 %;
- коррозия – 9 %.

Наиболее часто встречающимися повреждениями силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 (220) кВ являются отказы, вызванные снижением диэлектрических свойств изоляции, повреждениями комплектующих устройств, таких как переключатели ответвлений, устройства регулирования напряжения и вводы. Причинами повреждений трансформаторов, устройств регулирования напряжения и вводов считаются дефекты конструкций при их изготовлении, монтаже и ремонте, а также несоблюдение правил и норм эксплуатации, перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в сетях напряжением 6 – 35 кВ, ударные токи и перегрузки.

Среднее значение потерь электрической энергии в сетях напряжением 0,4 – 110 (220) кВ составляет 8,4 %.

На долю потерь электрической энергии при ее передаче по сетям, находящимся на балансе Межрегиональной сетевой компании (МРСК), приходится примерно 78 % от общей величины потерь в электрических сетях России, включая сети электросетевых компаний (ЭСК), в том числе:

- в сетях ВН – 25,4 %;
- в сетях СН1 – 5,5 %;
- в сетях СН2 – 24,6 %;
- в сетях НН – 22,6 %.

В распределительных электрических сетях потери электроэнергии, не зависящие от нагрузки, или «условно-постоянные» потери, составляют 23 %. При этом в структуре потерь, не зависящих от нагрузки, на потери холостого хода в трансформаторах приходится 67 %, на собственные нужды подстанций – 11 %, а прочие потери суммарно составляют 22 %. «Нагрузочные» потери составляют 74 % от общего значения потерь. В составе «нагрузочных» потерь 86 % приходится на потери в линиях электропередачи, а 14 % – в трансформаторах.

В дальнейшем принимаем, что несимметрия возникает только в одном месте системы, а остальная часть системы остается строго симметричной.

Анализ несимметричных переходных процессов затруднен из-за наличия пульсирующего магнитного поля ротора и связанных с ним гармоник. Суть процесса в следующем. Пусть по одной или двум фазам явнополюсной синхронной машины (СМ) без демпферных обмоток протекает ток синхронной частоты f , который создает неподвижный в

пространстве пульсирующий магнитный поток, как это показано на рис. 1. Этот поток $\Phi(f)$ разложим на два потока, вращающихся с частотой ω в противоположные стороны. Поток, не совпадающий с направлением вращения ротора, создает в обмотке возбуждения электродвижущую силу (ЭДС) удвоенной частоты (так как ротор вращается с частотой ω и один из потоков оказывается неподвижным по отношению к ротору). Обусловленный этой ЭДС ток удвоенной частоты создает пульсирующий поток удвоенной частоты, разложив его на два потока, вращающихся с частотой 2ω в противоположные стороны. При этом поток, вращающийся в противоположную ротору сторону, оказывается неподвижным по отношению к ротору, а второй вращается с частотой, равной $(2\omega + \omega) = 3\omega$, в сторону вращения ротора и наводит в обмотке статора ЭДС тройной синхронной частоты $3f$. В результате ток тройной частоты создает пульсирующий поток тройной частоты. Анализируя подробно процесс, убеждаемся, что каждая нечетная гармоника однофазного переменного тока статора вызывает очередную четную гармонику в обмотке возбуждения, а каждая четная гармоника в обмотке возбуждения вызывает следующую нечетную гармонику тока статора.

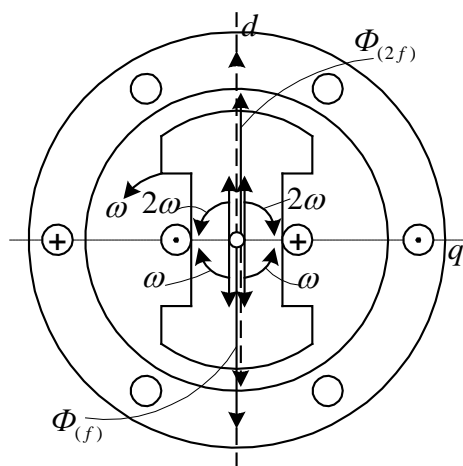


Рис. 1. К образованию высших гармоник при несимметричном режиме синхронной машины без демпферных обмоток

При наличии демпферной обмотки в поперечной оси ротора ротор (теоретически) оказывается симметричным в магнитном смысле, магнитное поле вращается, а высшие гармоники не создаются. Однако практически ротор СМ не обладает такой симметрией, поэтому при любом несимметричном режиме СМ возникают высшие гармоники. Наличие демпферной обмотки только в продольной оси еще более усиливает несимметрию ротора, и только при наличии демпферных обмоток в обеих осях ротора достигается почти полная его симметрия.

Анализ несимметричных процессов значительно упрощается при использовании метода симметричных составляющих.

Если три комплекса (или вектора), изображающих гармонически изменяющиеся величины, обозначим буквами A , B и C , то они образуют симметричную систему прямой последовательности, когда:

$$A_1 = aB_1 = a^2C \text{ или } B_1 = a^2A_1; C_1 = aA_1,$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота.

Три вектора могут образовать и другую симметричную систему, называемую системой обратной последовательности, если $B_2 = aA_2$, $C_2 = a^2A_2$. Третью симметричную систему называют системой нулевой последовательности $A_0 = B_0 = C_0$.

Суммируя одноименные векторы трех разных последовательностей, получим несимметричную систему

$$\begin{aligned} A &= A_0 + A_1 + A_2; & A &= A_0 + A_1 + A_2; \\ B &= B_0 + B_1 + B_2; & \text{или } B &= A_0 + a^2A_1 + aA_2; \\ C &= C_0 + C_1 + C_2; & C &= A_0 + aA_1 + a^2A_2. \end{aligned}$$

Определитель этой системы отличен от нуля, поэтому решение с учетом значений $a^3 = 1$ и $1 + a + a^2 = 0$ будет

$$\begin{aligned} A_0 &= (A + B + C) / 3; \\ A_1 &= (A + aB + a^2C) / 3; \\ A_2 &= (A + a^2B + aC) / 3. \end{aligned}$$

Например, для цепи с несимметричными фазными напряжениями $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ можно записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 & \dot{U}_0 &= (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / 3; \\ \dot{U}_B &= a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 + \dot{U}_0 & \rightarrow \dot{U}_1 &= (\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) / 3; \\ \dot{U}_C &= a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 + \dot{U}_0 & \dot{U}_2 &= (\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) / 3, \end{aligned}$$

т. е. генератор может быть представлен в виде трех источников в каждой фазе, как это показано на рис. 2.

В силу линейности всех параметров к такой цепи с несимметричным источником может быть применен принцип наложения. При этом расчет цепи с симметричными параметрами сводится к трем операциям:

$$1) \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1}; \quad 2) \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_2}; \quad 3) \dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_0}{\underline{Z}_0},$$

затем вычисляются линейные токи несимметричной системы:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2.$$

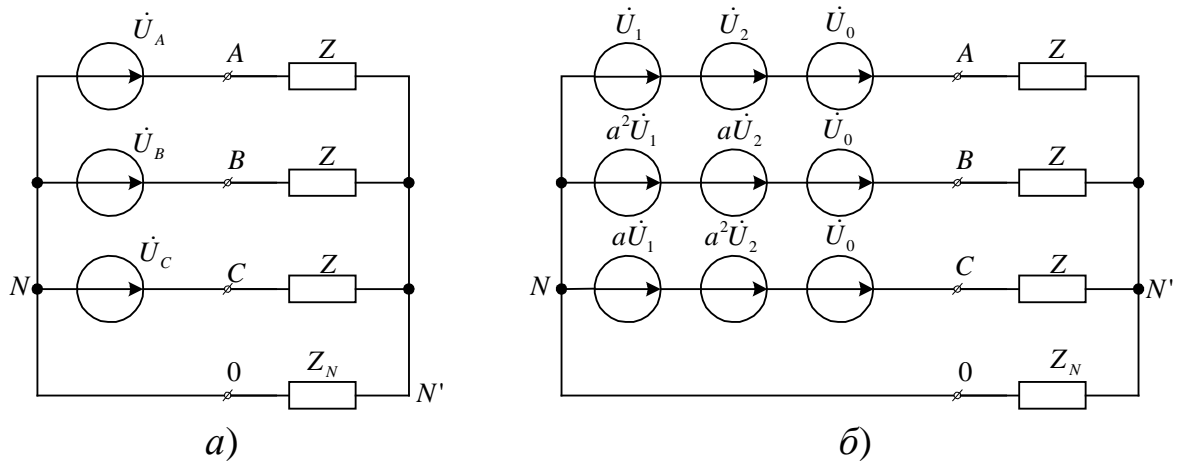


Рис. 2. Варианты представления генератора при несимметричных режимах: *a* – в виде идеальных источников фазных напряжений; *б* – в виде идеальных источников симметричных составляющих фазных напряжений

В общем случае сопротивления прямой \underline{Z}_1 , обратной \underline{Z}_2 и нулевой \underline{Z}_0 последовательностей различны. Сопротивления прямой и обратной последовательностей без вращающихся машин одинаковы и равны фазному $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_\phi$. Сопротивление нулевой последовательности при отсутствии трансформаторов и вращающихся машин определяется выражением $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_\phi + 3\underline{Z}_N$, где \underline{Z}_N – сопротивление нейтрального провода.

Если известны симметричные составляющие напряжений и токов, то мощность, отдаваемая такой системой:

$$\tilde{S} = \dot{U}_A \dot{I}_A^* + \dot{U}_B \dot{I}_B^* + \dot{U}_C \dot{I}_C^* = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 + \tilde{S}_0,$$

где $\tilde{S}_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_1^*$; $\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2^*$; $\tilde{S}_0 = \dot{U}_0 \dot{I}_0^*$, т. е. мощность взаимодействия токов одной последовательности и напряжений другой последовательности равна нулю.

Этим характеризуется ортогональность разложения на симметричные составляющие.

$$\text{Например: } \dot{U}_1 \dot{I}_0^* = a^2 \dot{U}_1 \dot{I}_0^* + a \dot{U}_1 \dot{I}_0^* = \dot{U}_1 \dot{I}_0^* (1 + a^2 + a) = 0.$$

В случае несимметрии фазных напряжений и сопротивлений

ЭДС любой симметричной составляющей способна вызвать токи всех трех составляющих. Уравнения такой цепи имеют вид $\dot{E}_k = \underline{Z}_{kl} \dot{I}_l$ и $\dot{I}_l = \underline{Y}_{kl} \dot{E}_k$, где \underline{Z}_{kl} и \underline{Y}_{kl} – передаточные сопротивления и проводимость одной из симметричных составляющих относительно другой.

Так как симметричные составляющие токов любой несимметричной системы связаны законом Ома с симметричными составляющими напряжений только одноименной последовательности, то симметричная составляющая падения напряжения на элементе, обладающем по отношению к симметричным составляющим токов прямой \dot{I}_1 , обратной \dot{I}_2 и нулевой \dot{I}_0 последовательностей соответственно сопротивлениями z_1 , z_2 и z_0 , будет

$$\Delta \dot{U}_1 = z_1 \dot{I}_1; \quad \Delta \dot{U}_2 = z_2 \dot{I}_2; \quad \Delta \dot{U}_0 = z_0 \dot{I}_0.$$

Комплексная форма записи справедлива не только для стационарного, но также и переходного режима, поскольку токи и напряжения при переходном процессе можно представить проекциями на соответствующую ось вращающихся, а также неподвижных векторов. При этом уравнения могут быть представлены в операторном виде. Однако из-за наличия высших гармоник в явнополюсных синхронных машинах при несимметричных режимах в подавляющем большинстве практических расчетов несимметричных переходных процессов обычно довольствуются учетом лишь основной гармоники токов и напряжений.

Именно только при таком ограничении представляется возможным применить метод симметричных составляющих в его обычной форме, характеризуя для этого СМ в схеме обратной последовательности соответствующей реактивностью X_2 .

При анализе несимметричных режимов принимаем, что устройства автоматической регулировки возбуждения (АРВ) синхронных машин включены через фильтры прямой последовательности.

С учетом изложенного основные уравнения Кирхгофа для произвольного несимметричного короткого замыкания имеют вид:

$$\dot{U}_{k1} = \dot{E}_\Sigma - \underline{Z}_{1\Sigma} \dot{I}_{k1}; \quad \dot{U}_{k2} = 0 - \underline{Z}_{2\Sigma} \dot{I}_{k2}; \quad \dot{U}_{k0} = 0 - \underline{Z}_{0\Sigma} \dot{I}_{k0},$$

где \dot{U}_{k1} , \dot{U}_{k2} , \dot{U}_{k0} , \dot{I}_{k1} , \dot{I}_{k2} , \dot{I}_{k0} – симметричные составляющие

напряжения и тока в месте короткого замыкания;

\dot{E}_Σ , $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ – соответственно результирующая ЭДС и сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки короткого замыкания.

Для определения искомых переменных эти три уравнения дополняют тремя уравнениями из граничных условий.

Параметры элементов в нормальном симметричном режиме являются сопротивлениями прямой последовательности. При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента его сопротивление определяется не порядком чередования фаз, а только частотой тока и, следовательно, одинаково для всех последовательностей

$$R_1 = R_2 = R_0; \quad Z_1 = Z_2 = Z_0; \quad X_1 = X_2 = X_0.$$

Для элементов с неподвижными магнитосвязанными цепями сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как взаимная индукция между фазами неизменна (трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные линии, кабели, реакторы): $R_1 = R_2$; $Z_1 = Z_2$; $X_1 = X_2$. Сопротивления нулевой последовательности существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

Реактивность обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характеристик приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемой нагрузке. Так как средняя промышленная нагрузка в основном состоит из асинхронного двигателя (АД), то с учетом изложенного выше можно принимать $X_2 = 0,35$, считая ее отнесенной к полной рабочей мощности в мегавольтамперах данной нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени, где она присоединена.

Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки включает в себя сеть и понижающие трансформаторы, поэтому привести какие-либо средние величины этого сопротивления не представляется возможным.

Наличие в электрической сети электрических машин с подвижными магнитосвязанными цепями значительно усложняет анализ несимметричного режима.

Установлено, что магнитный поток обратной последовательности синхронной машины вращается с двойной синхронной скоростью

относительно ротора. При этом его амплитуда зависит от степени несимметрии ротора. Поток обратной последовательности синхронной частоты в общем случае вызывает в статоре нечетные гармоники, которые искажают синусоидальную форму магнитного поля статора, что затрудняет определение реактивности обратной последовательности СМ, так как она зависит от внешних условий и не является параметром машины (т. е. от внешней реактивности, вида несимметрии и т. д.). Поэтому ранее полученную реактивность для СМ без демпферных обмоток принято считать реактивностью обратной последовательности

$$X_2 = \frac{2X'_d X_q}{X'_d + X_q}.$$

Эта реактивность может быть представлена схемой замещения на рис. 3. Ток в параллельной ветви с X'_d дает значения третьей гармоники тока прямой последовательности, которая вызвана потоком обратной последовательности синхронной машины.

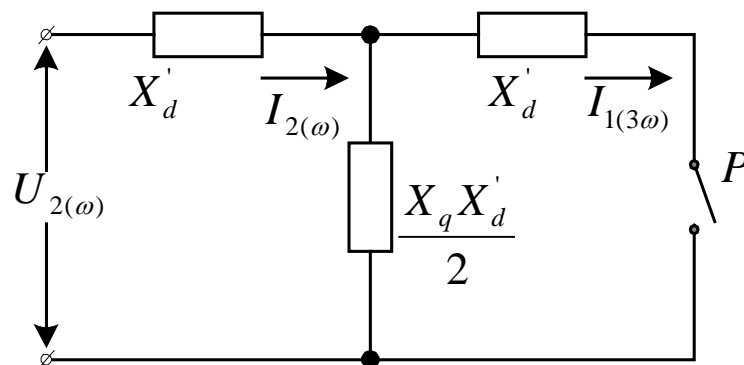


Рис. 3. Схема замещения, определяющая реактивность обратной последовательности x_2 синхронной машины с учетом влияния третьей гармоники тока прямой последовательности

Если напряжение обратной последовательности приложено к статору через произвольную внешнюю реактивность X , то общая реактивность обратной последовательности будет

$$X_{2\Sigma} = \frac{2(X'_d + X)(X_q + X)}{X'_d + X_q + 2X},$$

а на долю самой СМ приходится часть, определяемая соотношением

$$X_2 = \frac{2(X'_d + X)(X_q + X)}{X'_d + X_q + 2X} - X = \frac{2X'_d X_q + (X'_d + X_q)X}{X'_d + X_q + 2X}.$$

При увеличении внешней реактивности значение реактивности обратной последовательности синхронной машины X_2 стремится к пределу

$$X_2 = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{2X'_d X_q + (X'_d + X_q)X}{X'_d + X_q + 2X} = \frac{X'_d + X_q}{2},$$

что соответствует отсутствию третьей гармоники тока, и для моделирования этой ситуации достаточно разомкнуть рубильник P в схеме рис. 3. Однако при несимметричном режиме СМ поле обратной последовательности основной частоты вызывает в статоре весь спектр нечетных гармоник. В этом случае схема замещения на рис. 3 может быть развита в бесконечную цепную схему замещения с результирующей реактивностью $X_2 = \sqrt{X'_d X_q}$, которая также зависит от внешней реак-

тивности и в пределе стремится к значению $X_2 = \frac{(X'_d + X_q)}{2}$.

Для синхронных машин с демпферными обмотками значение реактивности X_2 может быть определено по тому же выражению при замене переходных и синхронных реактивностей X'_d и X'_q и на сверхпереходные X''_d и X''_q .

На практике значение реактивности обратной последовательности синхронной машины определяют соотношением $X_2 = \frac{(X'_d + X'_q)}{2}$.

Так это условие удовлетворяет нормальному правилу последовательного соединения реактивностей машины и ее внешней цепи. В качестве приближенных значений принимают для СМ без демпферных обмоток $X_2 \approx 1,45 X'_d$; для турбогенераторов и СМ с демпферными обмотками в обеих осях ротора $X_2 \approx 1,22 X''_d$ (при приближенных вычислениях $X_2 \approx X''_d$).

Токи нулевой последовательности в основном создают потоки рассеяния статорной обмотки, которые меньше чем при токах прямой

и обратной последовательностей, причем это уменьшение сильно зависит от типа обмотки. Поэтому значение реактивности нулевой последовательности X_0 синхронной машины колеблется в широких пределах в соответствии с выражением $X_0 = (0,15 \div 0,6) X_d''$.

При определении реактивности обратной последовательности асинхронного двигателя необходимо учитывать, что в нормальных условиях АД работает со скольжением s , а по отношению к магнитному потоку обратной последовательности СМ ротор АД имеет скольжение $(2-s)$. Следовательно, сопротивление обратной последовательности АД представляет собой его сопротивление при скольжении $(2-s)$.

Примерный характер относительного изменения реактивности асинхронного двигателя в функции скольжения показан на рис. 4, где за единицу реактивности принята реактивность двигателя при его номинальном скольжении. Можно считать, что реактивность обратной последовательности АД практически равна реактивности короткого замыкания X_k (при $S = 1$), т. е. $X_2 \approx X_{s=1} = X_k$.

Реактивность нулевой последовательности АД определяется только рассеянием статорной обмотки и сильно зависит от типа и конструкции обмотки. Поэтому ее значение определяется либо опытным путем, либо дается заводом-изготовителем.

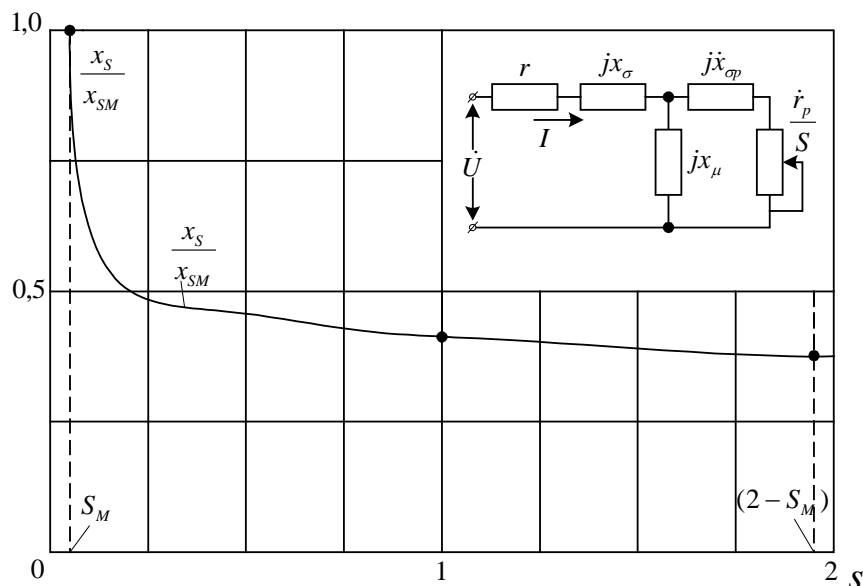


Рис. 4. Относительное изменение индуктивного сопротивления асинхронного двигателя в зависимости от скольжения

В электрических сетях напряжением менее 1,0 кВ с большим удельным весом однофазных потребителей очень сложно равномерно

распределить нагрузки по фазам, поскольку они включаются независимо друг от друга в разные моменты времени. Главной причиной необоснованного увеличения потерь в таких сетях является **несимметричная нагрузка**, под действием которой значительно увеличиваются потери энергии в трансформаторе и ухудшается качество выходного напряжения. Увеличение этих потерь и ухудшение качества отпускаемой энергии сильно зависят от применяемой **схемы соединения** обмоток трансформатора. Как известно, по стандартам России наиболее распространенными схемами соединения обмоток распределительных трансформаторов являются схемы соединения Y/Y_0 , Y/Δ , Y_0/Δ . Однако при несимметричной нагрузке в таких трансформаторах происходит искажение формы кривой фазных напряжений и резко возрастают потери энергии. Качественное улучшение связано с усложнением конструкции вторичных обмоток трансформатора, например, соединением обмоток в «зигзаг». Для соединения вторичных обмоток низкого напряжения трансформатора в схему «зигзаг» вторичная обмотка каждой фазы составляется из двух половин: одна половина расположена на одном стержне, другая – на другом. Данные половины обмотки включены встречно, т. е. конец $x1$ соединен с концом $y2$ и т. д. Начала $a2$, $b2$ и $c2$ соединены и образуют нейтраль (рис. 5).

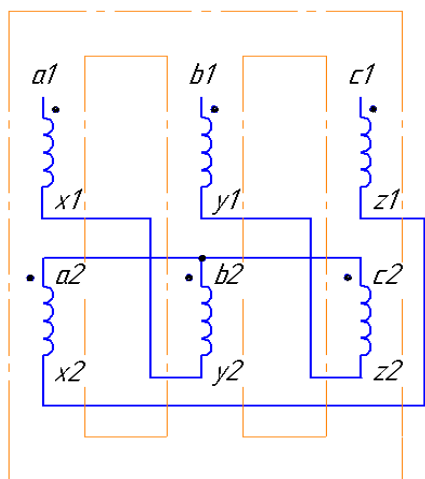


Рис. 5. Схема соединения вторичных обмоток в «зигзаг»

Следовательно, при однофазной нагрузке созданная вторичной обмоткой намагничивающая сила размагничивает сразу два стержня, и первичный ток, компенсирующий это размагничивающее действие, распределяется по фазам первичной обмотки. Магнитное равновесие практически не нарушается, не возникает однонаправленный магнитный поток рассеяния (обмотки включены встречно), отсутствуют его негативные последствия.

Оценим влияние однофазной нагрузки на работу трансформатора со схемой соединения Y/Y_0 (рис. 6). Во вторичной цепи нагружена только одна обмотка и, следовательно, созданная вторичной обмоткой намагничивающая сила размагничивает только один стержень, но первичный ток, компенсирующий размагничивающее действие вторичной обмотки, протекать только по одной нагруженной

фазе не может, это связано с отсутствием нейтрального провода на первичной стороне высокого напряжения. Первичный ток в различной степени протекает через все три обмотки ВН. Созданная им намагничивающая сила неравномерно распределяется между стержнями магнитопровода и не компенсируется в ненагруженных фазах – в данном случае нарушается магнитное равновесие трансформатора.

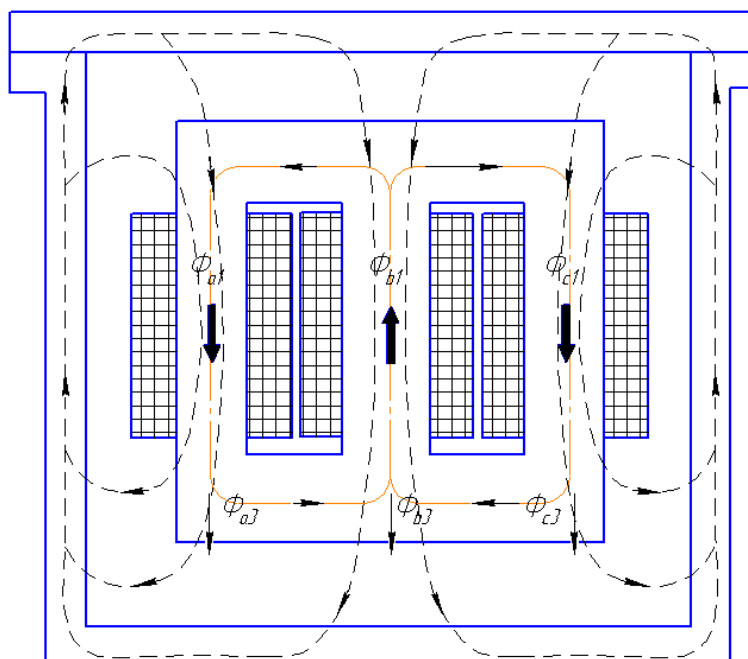


Рис. 6. Распределение магнитных потоков трансформатора: магнитные потоки Φ_{a3} , Φ_{b3} , Φ_{c3} совпадают по фазе, одинаково направлены в стержнях и поэтому вынуждены замыкаться через бак трансформатора; Φ_{a1} , Φ_{b1} , Φ_{c1} – магнитные потоки основной частоты

Последствия этого нарушения сводятся к возникновению в трех стержнях **магнитного потока рассеяния**, направленного в одну сторону Φ_{a3} , Φ_{b3} , Φ_{c3} , который не был компенсирован намагничивающей силой первичной обмотки. Он замыкается через масло, бак и дно трансформатора и нагревает его.

Кроме того, **магнитный поток рассеяния значительно увеличивает сопротивление магнитно-неуравновешенной части первичной обмотки**. Это приводит к неравномерному распределению первичного напряжения между обмотками (рис. 7) и смещению нейтральной точки напряжений вторичной обмотки трансформатора Y/Y₀-11. Но если первичные напряжения отличаются, то и вторичные напряжения не могут быть равными.

Таблица 2

Расчет срока окупаемости трансформатора

Расчетные параметры	Мощность трансформатора S_H							
	100 кВ·А				250 кВ·А			
Схема соединения	У/У _Н	У/З _Н	У/З _Н (М)	У/У _Н с СУ	У/У _Н	У/З _Н	У/З _Н (М)	У/У _Н с СУ
Конечная стоимость К, руб.	88146	90790	97842	100064	143252	146117	150414,6	153400
Увеличение стоимости ΔC , %	–	3	11	13,5	–	2	5	7
Цена за 1 кВт·ч С, руб.	2	2	2	2	2	2	2	2
Срок окупаемости t , лет	–	2,1	4	5,5	–	0,73	1,22	1,8

Таблица 3

Расчет потерь электроэнергии в трансформаторах за счет несимметрии нагрузки

S_H , кВ·А	I_0	Потери при КЗ Р, В·А				Экономия в год относительно У/У ₀ Q, кВ·Ар·ч		
		У/У ₀	У/З ₀	У/З ₀ (М)	У/У ₀ с СУ	У/З ₀	У/З ₀ (М)	
100	0	1970	2265	1970	1970	0	–590	0
100	0,1	1941	2127	1832	1854	174	–372	218
100	0,2	2125	2014	1719	1770	710	222	812
100	0,25	2278	1967	1672	1739	1078	622	1212
100	0,3	2492	1926	1631	1716	1552	1132	1722
100	0,4	3073	1863	1568	1693	2760	2420	3010

Окончание табл. 3

S_H , кВ·А	I_0	Потери при КЗ P, В·А				Экономия в год относительно $Y/Y_0 Q$, кВ·Ар·ч		
		Y/Y ₀	Y/Z ₀	Y/Z ₀ (M)	Y/Y ₀ с СУ	Y/Y ₀ с СУ	Y/Z ₀	Y/Z ₀ (M)
100	0,5	3857	1825	1530	1702	4310	4064	4654
25	0,25	633	599	509	530	206	68	248
40	0,25	979	878	758	777	404	202	442
63	0,25	1450	1278	1088	1130	640	344	724
160	0,25	3272	2645	2345	2339	1866	1254	1854
250	0,25	4665	3694	3194	3266	2798	1942	2942

Естественно, что трансформаторы со схемами соединения Y/Z₀ и Y/Y₀-11с СУ требуют дополнительных затрат на материалы и изготовление. Сравним экономическую целесообразность применения следующих трансформаторов: трансформатор со схемой соединения Y/Y₀-0; трансформатор со схемой соединения Y/Z₀-11, изготовленный на одной базе с трансформатором Y/Y₀-11, т. е. изначально имеющий большие потери при коротком замыкании; трансформатор со схемой соединения Y/Z₀-11(M), имеющий аналогичные характеристики потерь при КЗ и холостом ходе (ХХ) с трансформатором Y/Y₀-11; трансформатор со схемой соединения Y/Y₀-0 с СУ; трансформатор со встроенным симметрирующим устройством. Данные расчетов приведены с учетом следующих условий: время использования максимума нагрузки в году – 2000 ч; дополнительные потери, которые возникают за счет несимметрии нагрузки по фазам тока в нулевом проводнике, учитываются только в трансформаторе, т. е. на одной из фаз нагрузка будет меньше номинальной, что приводит к снижению общей мощности трансформатора; ток в нулевом проводнике изменяется от 0 до 0,5 номинального фазного для трансформаторов мощностью от 25 до 250 кВ·А.

Лабораторная работа № 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КОМПЛЕКСНОЙ СХЕМОЙ ЗАМЕЩЕНИЯ

Цель работы – расчет параметров элементов модели, отображающей реальную электрическую систему, для экспериментального исследования изменения значений токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания на основе комплексных схем замещения.

В результате проведения работы студенты должны **знать** основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид коротких замыканий и методики пересчета параметров режима лабораторной модели к параметрам режима реальной электрической системы; **уметь** рассчитывать параметры элементов модели и симметричных составляющих токов и напряжений и отображать их графически в виде векторных диаграмм; **приобрести** навыки экспериментального исследования параметров режимов коротких замыканий на лабораторной модели.

1. Объект и средства исследования

Объектом исследования является реализованная на лабораторном стенде электрическая схема замещения простейшей электрической системы с параметрами элементов, расчетные значения которых соответствуют заданной расчетной схеме электрической системы. Исследуемая электрическая схема составляется из элементов, расположенных на панелях лабораторного стенда. Питание схемы осуществляется от источников переменного и постоянного напряжения, расположенных на панели № 2 лабораторного стенда. Источники питания включаются путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами $A, B, C, 0$ или над зажимами «+ ÷ –» панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Трехфазный источник отключают нажатием красной кнопки. Токи напряжений измеряют амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 1.1.

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

Таблица 1.1

Измерительные приборы

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Количество приборов
1	Вольтметр		0 – 600 В	1
2	Вольтметр	»	0 – 250 В	1
3	Амперметр	»	0,5 – 1 А	2
4	Амперметр	»	2,5 – 5А	1
5	Мультиметр	APPA iMeter 5	U, I, Hz, Ω	1

2. Подготовка к работе

2.1. Ознакомиться с приведенными ниже методическими указаниями (п. 4) и рекомендованной литературой [1, с. 335 – 337].

2.2. Для заданного преподавателем варианта электрической системы по исходным данным табл. 1.2 рассчитать по формулам приближенного приведения результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов схемы замещения расчетной схемы электрической системы, изображенной на рис. 1.1.

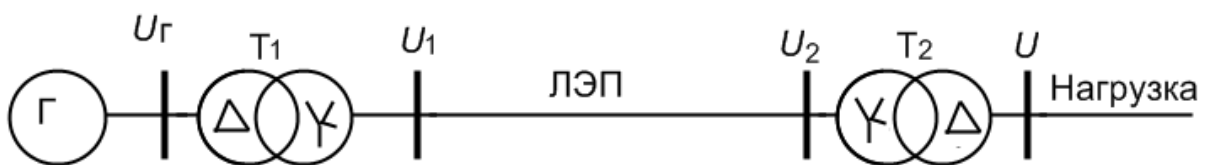


Рис. 1.1. Расчетная схема простейшей электрической системы

2.3. С учетом результатов расчета по подп. п. 2.2 изобразить комплексные электрические схемы замещения для рассматриваемых в рабочем задании п. 3 видов короткого замыкания, предусмотрев в них включение приборов для измерения необходимых для последующих расчетов токов и напряжений.

2.4. Обосновать возможность замены индуктивных элементов схемы замещения переменного тока произвольной конфигурации схемой замещения постоянного тока с чисто активными элементами, номинальные значения которых равны расчетным значениям индуктивных элементов (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Параметры элементов электрической системы

№ п/п	$S_{Г}$	x_d''	X_2	$U_{ср}$	l	$U_{к\%}$	$S_{Т}$	$x_{уд}$	$x_{уд.о}$
	МВ·А	о.е.	о.е.	кВ	км	о.е.	МВ·А	Ом/км	Ом/км
1	20	0,12	0,2	37	54	10,5	63	0,4	1,2
2	60	0,1	0,15	37	52	11	40	0,41	1,22
3	40	0,2	0,25	115	53	12	63	0,42	1,23
4	20	0,11	0,16	115	54	10,5	40	0,4	1,2
5	60	0,125	0,17	230	55	11	40	0,41	1,22
6	40	0,131	0,18	230	61	12	25	0,42	1,24
7	20	0,132	0,18	37	62	10,5	25	0,4	1,2
8	40	0,121	0,17	37	63	11	40	0,41	1,23
9	60	0,131	0,18	115	41	12	63	0,42	1,24
10	40	0,132	0,18	115	42	10,5	16	0,4	1,22
11	20	0,11	0,15	230	43	4	63	0,4	1,22
12	60	0,105	0,14	230	81	12	40	0,42	1,24
13	40	0,106	0,15	37	32	10,5	16	0,4	1,1
14	20	0,107	0,16	37	33	11	25	0,41	1,22
15	60	0,109	0,15	115	45	12	63	0,42	1,24

Примечание. $S_{Г}$, $S_{Т}$ – номинальные мощности генератора Г и трансформатора Т; $U_{к\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора; x_d'' – сверхпереходная реактивность генератора Г; X_2 – реактивность обратной последовательности генератора Г; $U_{ср}$ – среднономинальное напряжение линии электропередачи; l – длина линии электропередачи; $x_{уд}$, $x_{уд.о}$ – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательностей ЛЭП.

2.5. Провести расчет результирующих (суммарных) реактивных сопротивлений прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей в именованных единицах схемы замещения расчетной схемы электрической системы, показанной на рис. 1.1, по следующей методике.

Определяются реактивные сопротивления каждой последовательности отдельных элементов простейшей электрической системы по формулам приближенного приведения в именованных единицах.

1. Для генератора:
– реактивность прямой последовательности

$$x_{Г1} = x_d \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{Г}}, \text{ Ом};$$

- реактивность обратной последовательности

$$x_{Г2} = x_2 \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{Г}}, \text{ Ом}.$$

2. Для трансформатора

$$x_{Т1} = x_{Т2} = x_{Т0} = \frac{U_{\text{к\%}} U_{\text{ср}}^2}{100 S_{Т}}, \text{ Ом}.$$

3. Для линии электропередачи

$$x_{Л1} = x_{Л2} = x_{\text{уд}} l, \text{ Ом}; \quad x_{Л0} = x_{\text{уд.0}} l, \text{ Ом}.$$

Рассчитываются результирующие (суммарные) сопротивления каждой последовательности при условии короткого замыкания в конце передачи:

$$x_{1\Sigma} = x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1}; \quad x_{2\Sigma} = x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}; \quad x_{0\Sigma} = x_{Т0} + x_{Л0}.$$

Для последующей замены индуктивных сопротивлений активными выполнить операцию измерения мультиметром омического сопротивления каждого из девяти резистивных элементов, расположенных на панели пассивных элементов лабораторного стенда и сгруппированных по три в фазах Ax ; Bu ; Cz . Затем провести измерения сопротивления при различных групповых комбинациях включения резисторов. Результаты измерений записать в таблицу (разрабатывается самостоятельно).

По результатам измерений подобрать путем смешанного соединения одиночных и групп резисторов, а также магазинов сопротивлений с погрешностью не хуже 1 % номинальные значения сопротивлений схем замещения для прямой, обратной и нулевой последовательностей (при условии замены индуктивных элементов резистивными)

$$x_{1\Sigma} = R_{1\Sigma}; \quad x_{2\Sigma} = R_{2\Sigma}; \quad x_{0\Sigma} = R_{0\Sigma}.$$

При замене индуктивных сопротивлений на резистивные элементы необходимо осуществлять переход от переменного тока к постоянному регулируемому.

3. Рабочее задание

3.1. Собрать электрическую схему опыта на основании комплексной схемы замещения для двухфазного короткого замыкания на землю из подобранных резистивных элементов, сопротивления которых равны расчетным реактивным сопротивлениям для данного вида короткого замыкания. В качестве источника питания использовать регулируемый источник постоянного напряжения (зажимы «+ ÷ -» на панели № 2 лабораторного стенда).

3.2. После проверки схемы преподавателем регулировкой автотрансформатора установить значение постоянного напряжения $E_{1\Sigma}$ на выходе выпрямителя такого уровня, чтобы стрелки всех приборов отклонялись за середину шкалы (с целью уменьшения погрешности измерения).

При использовании магазина сопротивлений в качестве одного из резистивных элементов ток через этот элемент не должен превышать 100 мА. Записать показания приборов в табл. 1.3.

3.3. Повторить действия, указанные в подп. 3.1 и 3.2 для случаев двухфазного и однофазного короткого замыкания. Результаты измерений свести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений

№ п/п	Вид короткого замыкания	Величина тока, А					
		I_{A1}	I_{A2}	I_0	U_{A1}	U_{A2}	U_0
1	Двухфазное на землю						
2	Двухфазное						
3	Однофазное						

3.4. По данным табл. 1.3 с учетом соотношений п. 4 выполнить аналитический расчет симметричных составляющих напряжений и токов исходной электрической системы и определить погрешность измерений. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

3.5. В отчете о выполненной лабораторной работе необходимо привести сравнение результатов, полученных экспериментальным путем, с аналитическими расчетами.

4. Методические указания

4.1. Составление схемы замещения

Адекватность (полное соответствие своему объекту) схемы замещения элементов электрической системы определяется целевой задачей анализа системы, поэтому одна и та же электрическая система может быть представлена точными или упрощенными схемами замещения. При анализе токов короткого замыкания симметричного или несимметричного режима решается задача выбора оборудования, способного обеспечить надежную работу электрической системы при минимально допустимых значениях параметров системы. Минимальные значения параметров элементов электрической системы получают при пренебрежении активными сопротивлениями оборудования и линеаризацией схемы замещения. Иными словами, электрическая система представляется совокупностью индуктивных элементов и сверхпереходными ЭДС генератора и нагрузки за этими индуктивностями. При этом фазовые сдвиги во всех узловых точках системы одинаковые и составляют 90 электрических градусов, что обуславливает увеличение погрешности расчета до 10 – 15 %, т. е. оборудование будет выбрано с некоторым запасом, что в конечном итоге приводит к увеличению показателя надежности электрической системы. Отметим, что в этом случае как исключение законы Кирхгофа справедливы и для действующих значений переменного напряжения и тока. Это обстоятельство позволяет исходя из определения действующего значения синусоидальной функции осуществить замену переменного напряжения постоянным напряжением, а индуктивные элементы схемы замещения – резистивными при сохранении номинальных значений параметров элементов.

При точных расчетах, например, определение потерь в линии электропередачи, выполненной кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена с заземлением экрана с двух концов, схема замещения (без учета параметров генератора) представляется в виде, показанном на рис. 1.2. Характерно, что в таких схемах замещения передающий трансформатор Т1 изображается прямой, а приемный трансформатор Т2 – обратной Г-образной схемой замещения.

Отметим, что для расчета параметров элементов изображенной на рис. 1.2 схемы замещения необходимо знать паспортные данные конкретного типа каждого трансформатора и марку силового кабеля, а также условия его прокладки.

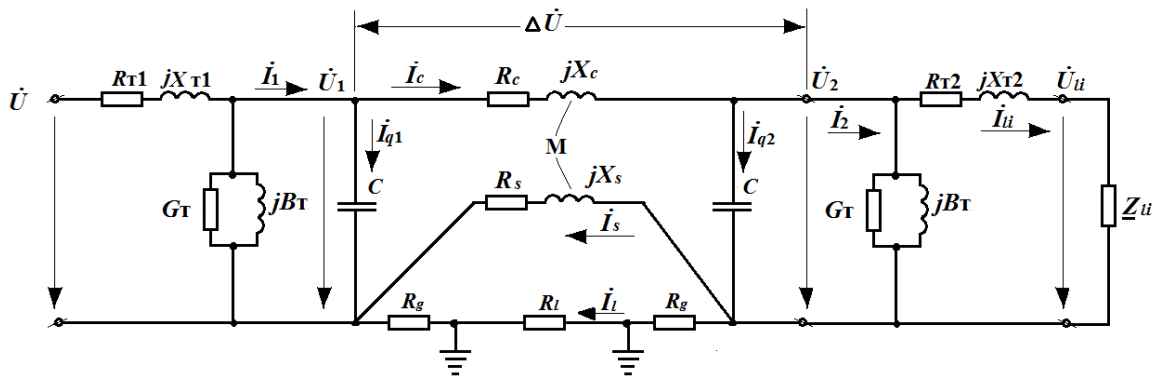


Рис. 1.2. Схема замещения для определения потерь в линии электропередачи, выполненной кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена с заземлением экрана с двух концов

В схеме рис. 1.2 приняты обозначения: R_{Ti} , X_{Ti} – активные и реактивные сопротивления обмоток трансформаторов в Γ -образной схеме замещения; R_c , X_c – активное и реактивное сопротивления токопроводящей жилы кабеля; R_s , X_s – активное и реактивное сопротивления экрана кабеля; R_g – активное сопротивление заземлителя; R_l – активное сопротивление земли; C – емкостный элемент, характеризующий зарядную мощность кабельной линии; Z_{li} – полное сопротивление нагрузки фазы.

Для сравнения приведем схему замещения простейшей электрической системы для расчета тока металлического трехфазного короткого замыкания в конце реактивированной кабельной линии (рис. 1.3).

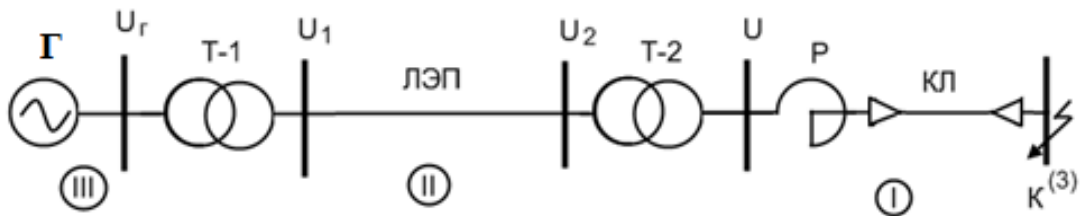


Рис. 1.3. Простейшая электрическая система с обозначением ступеней трансформации при симметричном трехфазном коротком замыкании в заданной точке

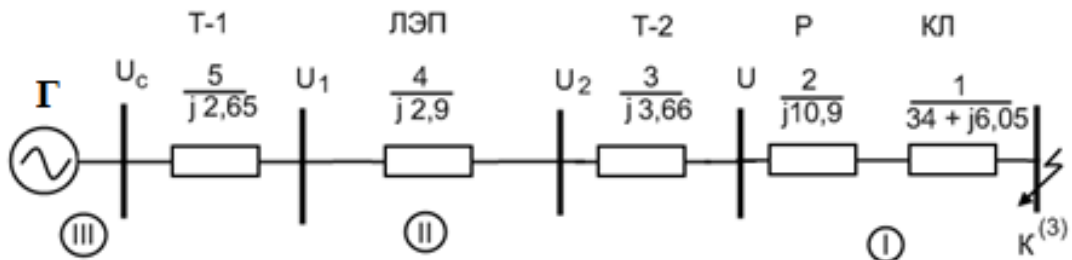


Рис. 1.4. Схема замещения простейшей электрической системы рис. 1.3 с обозначением номера элемента (в числителе) относительно ступени КЗ и значения его характера и сопротивления (в знаменателе)

Сравнение схем замещения, приведенных на рис. 1.2 и 1.4, дает представление о сложности точных расчетов параметров системы и соотношении трудозатрат при точных и приближенных инженерных методиках расчета токов короткого замыкания.

Расчетная схема замещения любого симметричного трехфазного режима или процесса является схемой прямой последовательности. Схема обратной последовательности аналогична схеме прямой последовательности. Различие только в том, что в схему прямой последовательности вводят генераторные и нагрузочные ветви соответствующими сверхпереходными реактивностями и ЭДС, а в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих и нагрузочных ветвей принимают равными нулю. Считают, что выполняется условие постоянства реактивностей обратной последовательности и их независимости от вида и условий возникшей несимметрии, а также продолжительности переходного процесса.

Началом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей; это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности (точка заземления).

Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца; ими являются точки, между которыми расположена данная продольная несимметрия. К концу или между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникших в месте несимметрии.

Схема замещения нулевой последовательности заметно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, протекающим по линии «три фазы – земля».

В схеме замещения нулевой последовательности важно не только проследить все пути протекающего по «земляному каналу» тока, но и учесть группы соединений обмоток трансформатора, т. е. учесть условия трансформации токов и напряжений нулевой последовательности. В качестве примера на рис. 1.5 показана схема замещения трансформатора с соединением обмоток «звезда-ноль / треугольник» для токов нулевой последовательности. Обмотки трехфазного трансформатора, соединенные в треугольник, являются коротким замыканием для токов нулевой последовательности. В случае разомкнутого треугольника получают фильтр нулевой последовательности.

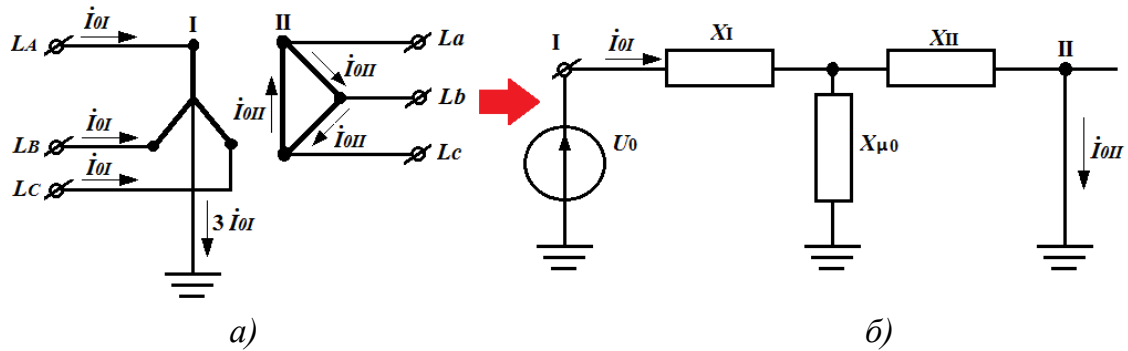


Рис. 1.5. Схема замещения трансформатора с соединением обмоток «звезда-ноль / треугольник» для токов нулевой последовательности: *а* – группа соединений обмоток трансформатора; *б* – схема замещения

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.

Далее исходя из вида несимметрии выявляют возможные пути протекания токов нулевой последовательности в электрически связанной цепи. Следует помнить, что сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной (так как схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а их три).

В зависимости от вида несимметрии напряжение нулевой последовательности прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия), или последовательно в рассечку фазных проводов (продольная несимметрия) при условии соединения трех фазных проводов в одной точке, как показано на рис. 1.6.

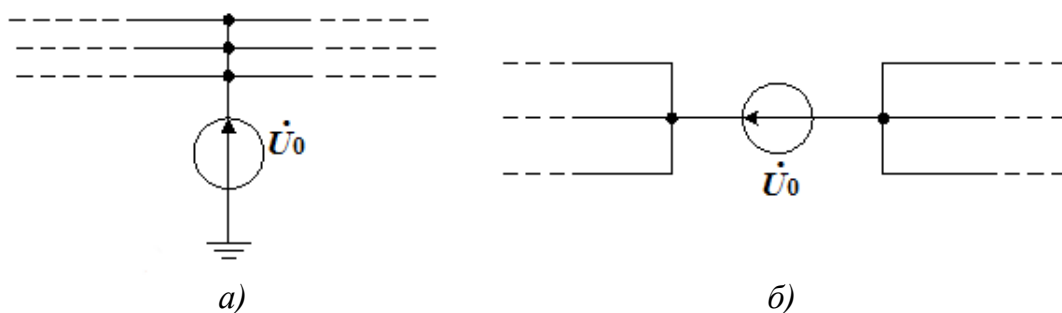


Рис. 1.6. Введение в схему замещения напряжения нулевой последовательности в точках поперечной (*а*) и продольной (*б*) несимметрии

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом – точку,

где возникла несимметрия. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии). В случае незаземленной нейтрали электрической системы начало схемы замещения теряет смысл.

Обязательным этапом расчета несимметричного режима будет определение результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла несимметрия (для схемы замещения нулевой последовательности – входное сопротивление относительно зажимов источника \dot{U}_0). При этом из схемы прямой последовательности находят также значение результирующей ЭДС относительно той же точки. Необходимые преобразования проводят с применением принципа наложения. Однако при этом необходимо помнить о принципиальных различиях в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметриях.

В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 1.7. При поперечной несимметрии в точке M_1 результирующую ЭДС и сопротивления можно определить по схеме прямой последовательности (рис. 1.7, а) путем нахождения эквивалентного сопротивления относительно зажимов источника напряжения прямой последовательности U_1 и привести к виду рис. 1.7, б.

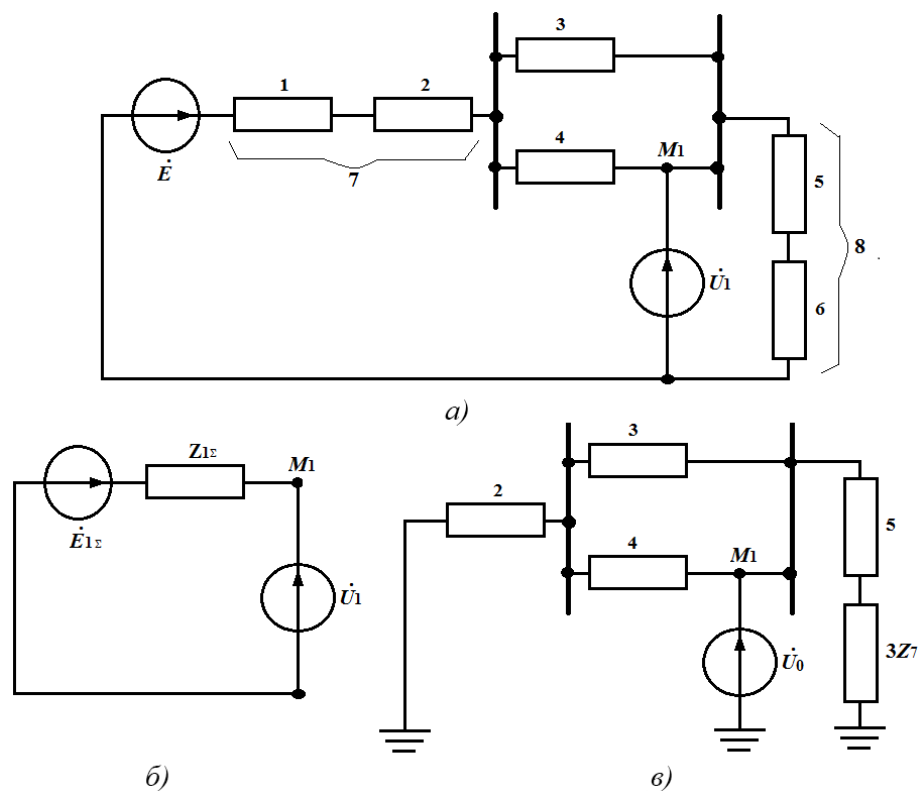


Рис. 1.7. Преобразование схем замещения: а, б – прямой и нулевой последовательностей; в – при поперечной несимметрии

Эквивалентные преобразования для схемы обратной последовательности аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников. Схему нулевой последовательности преобразовывают путем последовательного и параллельного сложения ветвей с учетом взаимоиндукции между линиями электропередачи 3 и 4.

Полученные расчетные значения сопротивлений элементов схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей используют при составлении комплексных схем замещения, структура которых зависит от вида короткого замыкания. Поскольку токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей можно выразить через ток прямой последовательности, то в соответствии со структурой формулы для расчета действующего значения тока прямой последовательности

$$I_{k1} = \frac{U_{1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}},$$

где $U_{1\Sigma}$ – суммарное напряжение прямой последовательности;

$x_{\Delta}^{(n)}$ – слагаемое, структура которого определяется видом короткого замыкания:

– однофазное КЗ ($n=1$): $x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$;

– двухфазное КЗ ($n=2$): $x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}$;

– двухфазное КЗ на землю ($n=1,1$): $x_{\Delta}^{(1,1)} = x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$;

$x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ – суммарные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В соответствии с приведенным выражением для тока короткого замыкания прямой последовательности структура комплексных схем замещения с учетом переходного сопротивления в месте КЗ (сопротивление электрической дуги) имеет вид, показанный на рис. 1.8.

При анализе токов металлического замыкания значение сопротивления электрической дуги принимается равным нулю, однако для точных расчетов учет электрической дуги в месте КЗ производится введением в расчетную схему ее активного сопротивления R_d , значение которого определяется на основе усредненных экспериментальных вольт-амперных характеристик устойчиво горящей дуги. Реальная электрическая дуга в процессе короткого замыкания под действием электродинамических сил удлиняется и перемещается, удаляясь от источника

энергии. Сопротивление дуги является случайной величиной, зависящей от большого количества факторов, в частности, от тока и длины дугового столба. Существует несколько методов получения оценки математического ожидания сопротивления электрической дуги.

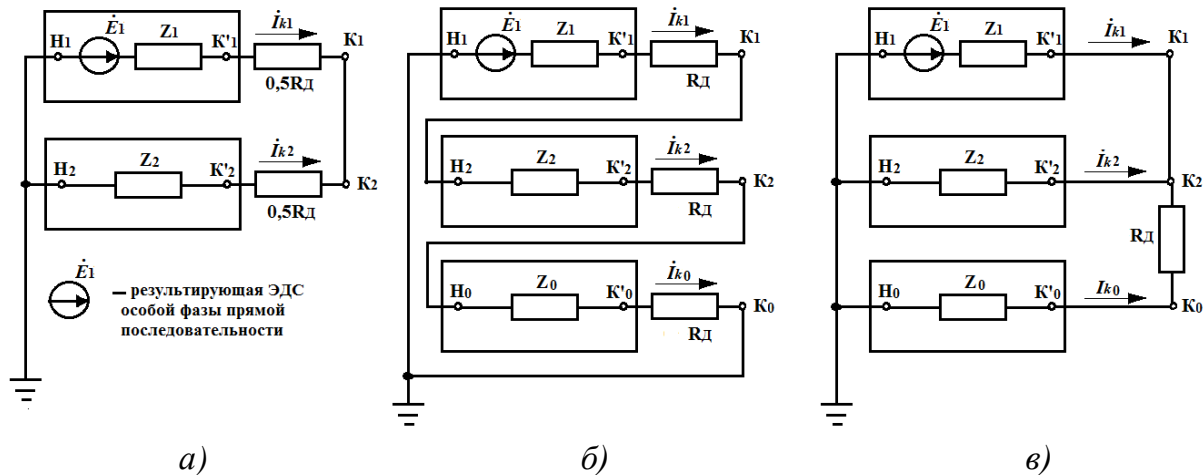


Рис. 1.8. Комплексные схемы замещения трехфазной электрической системы с учетом сопротивления электрической дуги: *а* – двухфазное замыкание через дугу; *б* – однофазное замыкание через дугу; *в* – двухфазное КЗ с замыканием на землю через дугу

Наиболее приемлемым для практических расчетов считается метод, устанавливающий связь между током дугового короткого замыкания и током металлического КЗ посредством коэффициента снижения тока (K_c). Активное сопротивление дуги при известном коэффициенте K_c можно определить по формуле

$$R_{д} = \sqrt{\frac{U_{\text{ср.н}}^2}{3I_{\text{п.0}}^2 K_c^2} - x_{1\text{эк}} - R_{1\text{эк}}},$$

где $U_{\text{ср.н}}$ – среднее номинальное напряжение ступени трансформации;

$I_{\text{п.0}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока металлического короткого замыкания;

$R_{1\text{эк}}$ и $x_{1\text{эк}}$ – соответственно эквивалентное активное и индуктивное сопротивление цепи КЗ.

Значение коэффициента K_c в функции полного сопротивления цепи короткого замыкания можно определить для различных стадий процесса по эмпирической формуле:

– для начального момента короткого замыкания

$$K_c = 0,6 - 0,025 \cdot Z_k + 0,114\sqrt{Z_k} - 0,13\sqrt[3]{Z_k};$$

– для момента отключения КЗ

$$K_c = 0,55 - 0,002 \cdot Z_k + 0,1\sqrt{Z_k} - 0,12\sqrt[3]{Z_k}.$$

При расчете несимметричных дуговых коротких замыканий удобно использовать зависимость сопротивления дуги переменного тока от тока дуги в произвольный момент времени, которая аппроксимируется выражением $R_d = \frac{47}{I_d^{0,28}} - 0,15$, где I_d – ток дуги, кА.

Полученное значение сопротивления дуги можно вводить в схемы замещения всех симметричных последовательностей. Расчет токов КЗ с учетом электрической дуги и теплового спада тока производится методом последовательных приближений. Начальное значение тока дуги рекомендуется принимать равным половине тока металлического КЗ.

Полученное значение сопротивления дуги можно вводить в схемы замещения всех симметричных последовательностей. Расчет токов КЗ с учетом электрической дуги и теплового спада тока производится методом последовательных приближений. Начальное значение тока дуги рекомендуется принимать равным половине тока металлического КЗ.

Зависимости коэффициента снижения тока $K_c = f(Z_k)$, полученные на основании статистической обработки осциллограмм токов во время опыта КЗ в сетях напряжением 0,4 кВ собственных нужд электростанций, показаны на рис. 1.9, а зависимость сопротивления электрической дуги переменного тока от тока дуги приведена на рис. 1.10.

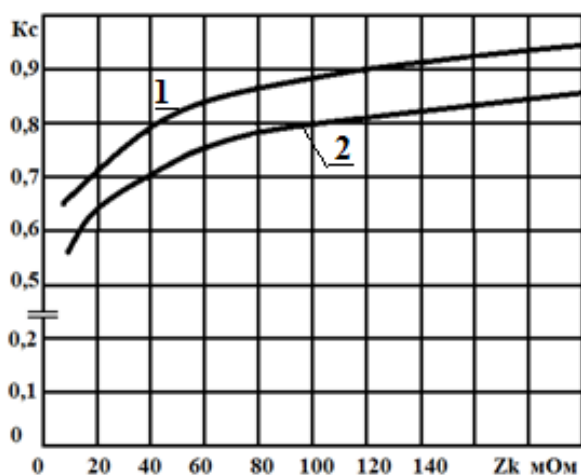


Рис. 1.9. Зависимость коэффициента снижения тока дугового КЗ по отношению к току металлического КЗ от полного сопротивления цепи КЗ:
1 – для начального момента КЗ;
2 – для момента отключения КЗ

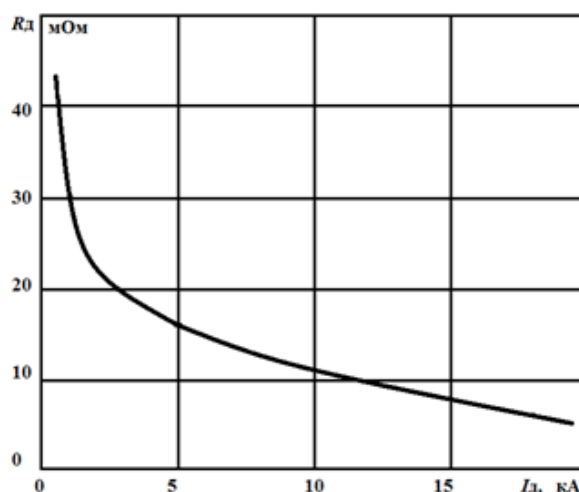


Рис. 1.10. Зависимость сопротивления электрической дуги переменного тока в дуговом столбе

4.2. Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений выполненной лабораторной работы проводится по следующей методике.

Определяется масштабный коэффициент системы

$$m = \frac{U_{\text{cp}} E''}{\sqrt{3} E_{1\Sigma}}; \quad E'' = 1,08,$$

где U_{cp} – среднее значение напряжения сети (согласно варианту задания берется из табл. 1.2);

$E_{1\Sigma}$ – суммарное напряжение прямой последовательности, определяется по показанию вольтметра (напряжение на зажимах источника питания).

$E'' = 1,08$ – значение сверхпереходной ЭДС в относительных единицах при номинальных условиях в начальный момент времени (используется только в практических расчетах);

С учетом масштабного коэффициента рассчитываются симметричные составляющие токов и напряжений для каждого вида КЗ. По результатам измерений на установке, моделирующей заданный вид короткого замыкания в простейшей системе:

$$I_{KA1}^{(M)} = m I_{A1}, \text{ кА}; \quad U_{KA1}^{(M)} = m U_{A1}, \text{ кВ};$$

$$I_{KA2}^{(M)} = m I_{A2}, \text{ кА}; \quad U_{KA2}^{(M)} = m U_{A2}, \text{ кВ};$$

$$I_{KA0}^{(M)} = m I_{A0}, \text{ кА}; \quad U_{KA0}^{(M)} = m U_{A0}, \text{ кВ};$$

где I_{A1} – ток прямой последовательности;

I_{A2} – ток обратной последовательности;

I_{A0} – ток нулевой последовательности.

Значения токов симметричных составляющих I_{A1} , I_{A2} , I_{A0} берутся согласно полученным результатам из табл. 1.3.

Верхний индекс « M » в расчетных выражениях свидетельствует об использовании результатов измерений, полученных на модельной установке.

Далее для расчета тока короткого замыкания симметричных составляющих исследуемого вида короткого замыкания определяется значение добавочного сопротивления (шунта) $x_{\Delta}^{(n)}$:

- для однофазного КЗ $x_{\Delta}^{(1)} = x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}$;
- для двухфазного КЗ $x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}$;
- для двухфазного КЗ на землю $x_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{x_{0\Sigma} \cdot x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}}$.

Затем для каждого моделируемого вида КЗ производится аналитический расчет тока прямой последовательности (верхний индекс (a))

$$I_{KA1}^{(a)} = \frac{U_{\text{ср}} E''}{\sqrt{3} (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \text{ кА.}$$

По значению тока прямой последовательности определяется ток обратной последовательности исследуемого вида короткого замыкания, кА:

- для однофазного и двухфазного КЗ $I_{KA2}^{(a)} = I_{KA1}^{(a)}$;
- для двухфазного КЗ на землю $I_{KA2}^{(a)} = I_{KA1}^{(a)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}}$.

По значению тока прямой последовательности и сопротивлению шунта находится ток нулевой последовательности исследуемого вида короткого замыкания, кА:

- для двухфазного КЗ на землю $I_{K0}^{(a)} = I_{KA1}^{(a)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}}$;
- для двухфазного КЗ $I_{K0}^{(a)} = 0$;
- для однофазного КЗ $I_{K0}^{(a)} = I_{KA1}^{(a)}$.

По значению тока прямой последовательности и суммарным сопротивлениям последовательностей рассчитываются симметричные составляющие напряжений, кВ:

- для двухфазного КЗ $U_{KA1}^{(a)} = U_{KA2}^{(a)} = x_{2\Sigma} I_{KA1}^{(a)}$;
 - для двухфазного КЗ на землю $U_{KA1}^{(a)} = U_{KA2}^{(a)} = U_{K0}^{(a)} = x_{2\Sigma} I_{KA1}^{(a)}$;
 - для однофазного КЗ
- $$U_{KA1}^{(a)} = (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) I_{KA1}^{(a)};$$
- $$U_{KA2}^{(a)} = x_{2\Sigma} I_{KA1}^{(a)};$$
- $$U_{K0}^{(a)} = x_{0\Sigma} I_{KA1}^{(a)}.$$

В заключение для каждого вида КЗ рассчитываются погрешности определения токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей аналитическим методом относительно экспериментальных данных по формулам, в которых верхний индекс «М» свидетельствует об использовании результатов измерений, полученных на модельной установке, верхний индекс «а» соответствует аналитическому расчету

$$\Delta I_i = \frac{|I_{KAi}^{(M)} - I_{KAi}^{(a)}|}{I_{KAi}^{(a)}} 100 \%; \quad \Delta U_i = \frac{|U_{KAi}^{(M)} - U_{KAi}^{(a)}|}{U_{KAi}^{(a)}} 100 \%,$$

где $i = 1, 2, 0$ – индекс (в нижнем индексе) соответствующей симметричной последовательности.

Результаты измерений и аналитических расчетов токов и напряжений симметричных составляющих и их погрешностей сводятся в табл. 1.4 и 1.5, затем отображаются в виде векторных диаграмм токов и напряжений (рис. 1.11).

Таблица 1.4

Результаты расчетов симметричных составляющих токов

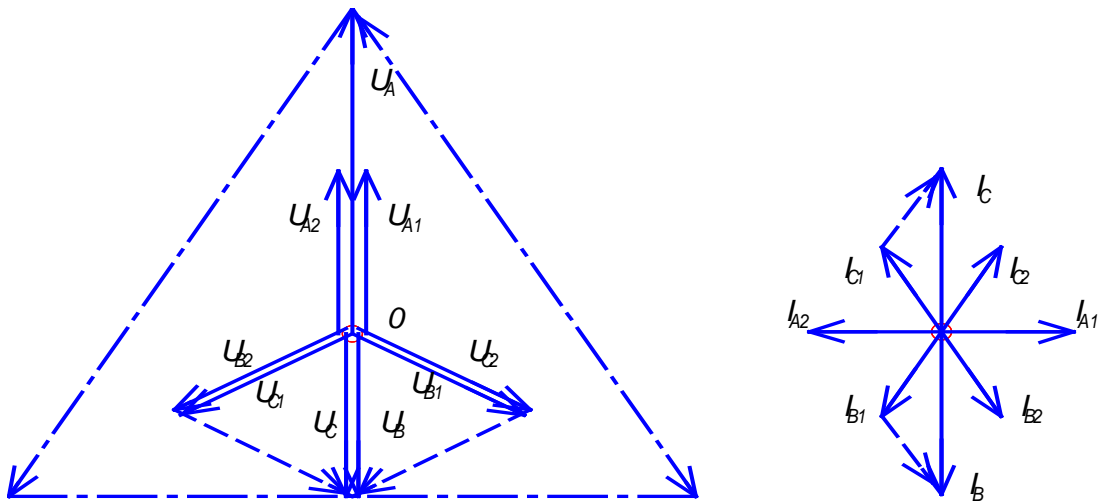
№ п/п	Вид короткого замыкания	$I_{KA1}^{(M)}$, кА	$I_{KA1}^{(a)}$, кА	ΔI_1 , %	$I_{KA2}^{(M)}$, кА	$I_{KA2}^{(a)}$, кА	ΔI_2 , %	$I_{K0}^{(M)}$, кА	$I_{K0}^{(a)}$, кА	ΔI_0 , %
1	Двухфазное на землю									
2	Двухфазное									
3	Однофазное									

Таблица 1.5

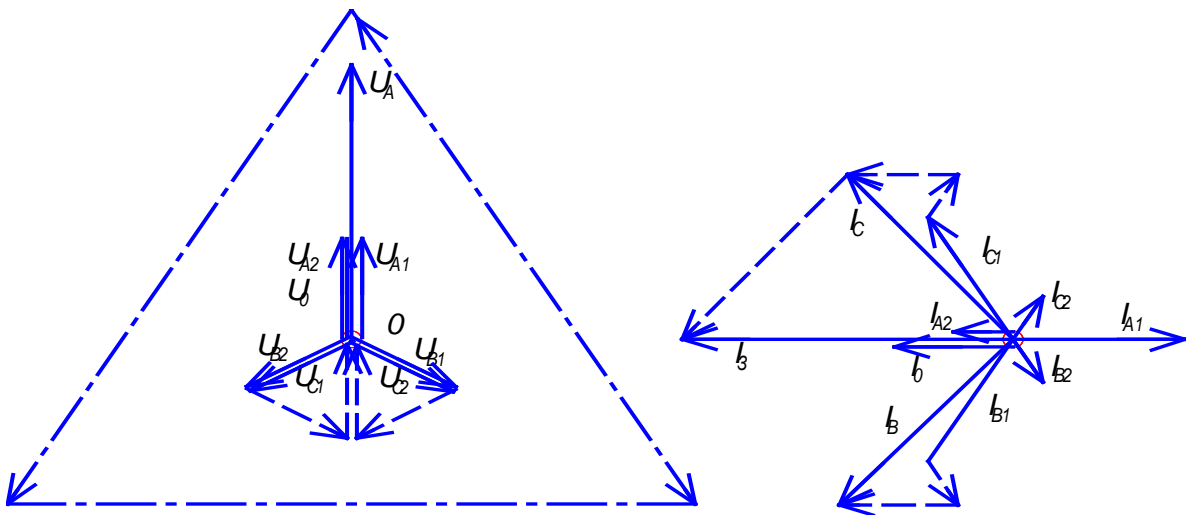
Результаты расчетов симметричных составляющих напряжений

№ п/п	Вид короткого замыкания	$U_{KA1}^{(M)}$, кВ	$U_{KA1}^{(a)}$, кВ	ΔU_1 , %	$U_{KA2}^{(M)}$, кВ	$U_{KA2}^{(a)}$, кВ	ΔU_2 , %	$U_{K0}^{(M)}$, кВ	$U_{K0}^{(a)}$, кВ	ΔU_0 , %
1	Двухфазное на землю									
2	Двухфазное									
3	Однофазное									

а) двухфазное КЗ



б) двухфазное КЗ на землю



в) однофазное КЗ

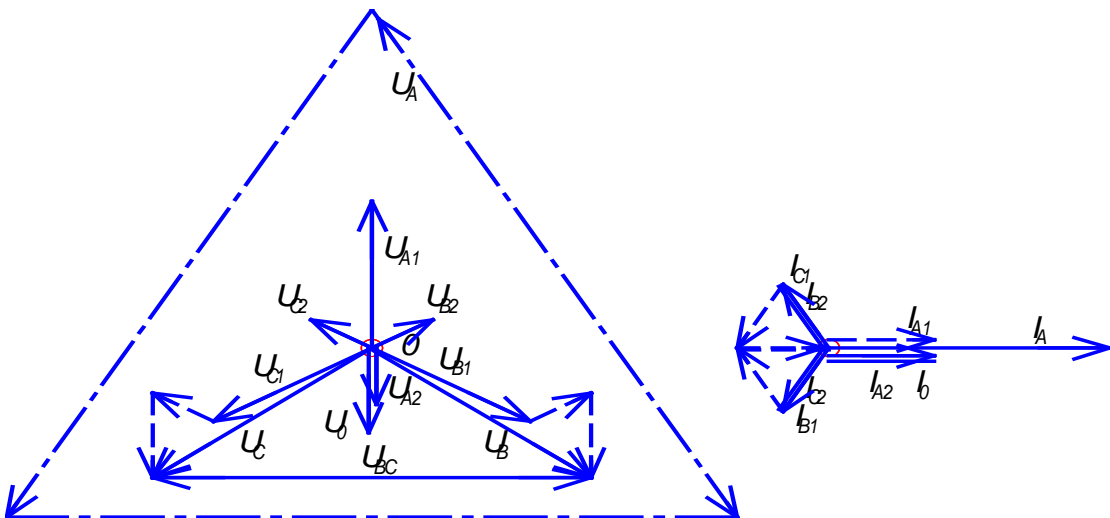


Рис. 1.11. Векторные диаграммы токов и напряжений при поперечной несимметрии

5. Оформление отчета

Отчет составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчетов, необходимые построения и выводы. Кроме того, студент должен знать ответы на приведенные ниже вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Граничные условия и их физический смысл при поперечной несимметрии.
2. В чем смысл комплексной схемы замещения?
3. В чем отличие обычной схемы замещения от комплексной?
4. В чем смысл масштабного коэффициента?
5. Какими параметрами моделируются элементы реальной электроэнергетической системы при экспериментальных измерениях токов короткого замыкания?
6. В чем отличие параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей?
7. В чем смысл начала и конца схемы замещения последовательности?
8. Как влияют вращающиеся части электромеханических устройств на значение реактивностей различных последовательностей?
9. В чем смысл добавочной реактивности (шунта) $x_{\Delta}^{(n)}$?
10. Каковы причины возникновения погрешностей при аналитическом расчете и расчетах по данным модельной установки?
11. В чем физический смысл замены индуктивных сопротивлений пассивными резистивными элементами?
12. Объясните условия замены переменного тока постоянным током при реализации комплексной схемы замещения.
13. Какие особенности преобразования (упрощения) схем замещения при поперечной несимметрии вы можете назвать?
14. Какие способы включения источников ЭДС различных симметричных составляющих в схему замещения соответствующей последовательности вам известны?
15. В чем смысл масштабирования активных сопротивлений при их подборе для замены индуктивных сопротивлений?

Лабораторная работа № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Цель работы – изучение и экспериментальное исследование переходных процессов в трехфазном силовом трансформаторе по характеристикам холостого хода и короткого замыкания. Выявление причин возникновения сверхтоков и перенапряжений, увеличения дополнительных потерь электроэнергии в трансформаторе.

В результате проведения работы студенты должны **знать** основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора и его взаимосвязь с параметрами системы; **уметь** рассчитывать величину и кратность сверхтока включения; время переходного процесса включения; величину и кратность ударного тока внезапного короткого замыкания, потери электроэнергии в трансформаторе; **приобрести** навыки экспериментального исследования параметров режима трехфазного трансформатора при переходном процессе.

1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазный силовой трансформатор, подключаемый к напряжению промышленной частоты 220/127 В и снимаемый со вторичной обмотки разделительного трехфазного трансформатора, полная мощность которого равна 2,5 кВ·А. Схема соединения обмоток разделительного трансформатора Y_0 / Y_0 . Выводы разделительного трехфазного трансформатора обозначены буквами $A, B, C, 0$ и расположены на панели № 2 стенда. Трехфазный источник включается путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами $A, B, C, 0$ панели № 2 стенда. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Трехфазный источник отключается нажатием красной кнопки. Измерение токов, напряжений и мощности осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в таблице.

Измерительные приборы

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Количество приборов
1	Вольтметр		0 – 600 В	1
2	Вольтметр	»	0 – 250 В	1
3	Амперметр	»	0,5 – 1 А	2
4	Амперметр	»	2,5 – 5 А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	1
6	Мультиметр	APPA iMeter 5	U, I, Hz, Ω	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе

2.1. Ознакомиться с приведенными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 462 – 477; 2, с. 86 – 91, 279 – 302, 502 – 507].

По результатам изучения материала по теме лабораторной работы разработать электрическую принципиальную и электромонтажную схемы для проведения опыта по указанной тематике. Предусмотреть включение в схему необходимых измерительных приборов и выделить узлы схемы для подключения осциллографа при снятии осциллограмм.

2.2. Ознакомиться с устройством и паспортными данными исследуемого трансформатора. Провести необходимые расчеты по определению ожидаемого значения сверхтока включения на холостом ходе.

Аналитическим расчетом определить ток внезапного короткого замыкания трансформатора и интервал времени, в течение которого температура обмотки достигнет 250 °С, а также механические усилия, обусловленные электродинамическими силами между проводниками (витками) обмоток.

2.3. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий п. 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. Собрать электромонтажную схему опыта и после проверки правильности ее соединений преподавателем включить питание стенда и трехфазного источника.

При снятии характеристики холостого хода напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора следует плавно регулировать от нуля до номинального. При снятии характеристики короткого замыкания к зажимам вторичной обмотки подключается амперметр, а напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора необходимо плавно регулировать таким образом, чтобы ток вторичной обмотки не превысил номинальный.

3.2. Снять характеристики холостого хода $I_{10} = f(U_1)$ и короткого замыкания $I_{1k} = f(U_1)$. Результаты замеров (не менее 9 – 12 значений) записать в таблицы (разрабатываются самостоятельно).

3.3. Снять осциллограммы:

а) тока включения;

б) тока внезапного короткого замыкания.

3.4. По осциллограммам подп. 3.3 определить и сравнить с расчетом:

а) значение и кратность сверхтока включения (по сравнению с установившимся значением тока холостого хода), а также постоянную времени и время переходного процесса включения;

б) значение и кратность ударного тока (сверхтока) внезапного короткого замыкания (по сравнению с номинальным током), а также постоянную времени и время переходного процесса внезапного короткого замыкания.

4. Методические указания

При несимметричных режимах работы силового трансформатора (неравенстве токов в фазных обмотках) в нем возникает ряд добавочных явлений, таких как искажения линейных и фазных напряжений, добавочные потери в стали и обмотках, локальный перегрев изоляции. Эти явления в наибольшей степени проявляются при несимметричных коротких замыканиях трансформатора и переходных процессах, которые возникают при всяком внезапном изменении режима их работы: присоединении трансформатора к сети (включение), резком изменении нагрузки, коротком замыкании первичной или вторичной цепи,

изменении напряжения или частоты питающей сети. Необходимо отметить также коммутационные перенапряжения при одновременном замыкании контактов выключателя.

Переходные процессы сопровождаются рядом опасных для трансформатора эффектов: недопустимыми электродинамическими усилиями между обмотками и соседними витками обмоток, неравномерным распределением напряжений между отдельными частями обмоток, недопустимым нагревом обмоток. Таким образом, переходные процессы в значительной степени определяют требования к механической, электрической и термической прочности трансформаторов, а следовательно, к надежности и долговечности работы трансформатора (по нормативным документам ПАО «Россети» не менее 30 лет).

В настоящее время основным методом анализа несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора считается метод симметричных составляющих. В зависимости от того, какой параметр – ток или напряжение – определяет в основном переходный режим трансформатора, различают две главные группы неустановившихся электромагнитных явлений: сверхтоки и перенапряжения (волновые явления) в кратности номинальным параметрам режима работы трансформатора.

Перенапряжения характерны в основном для трансформаторов относительно большой мощности и связаны с волновыми процессами в электрических сетях (перенапряжения коммутационные до 2 – 5, аварийного порядка до 7 – 8 номинальных) или с атмосферными (грозовыми) явлениями (перенапряжения до 7 – 12 номинальных).

Сверхтоки наиболее характерно проявляются и наиболее опасны в двух случаях:

- 1) при включении трансформатора на сеть при номинальном напряжении вхолостую (при отключенной нагрузке);
- 2) при внезапном коротком замыкании нагруженного трансформатора.

В условиях эксплуатации токи включения вследствие броска тока намагничивания могут на порядок превышать номинальный ток. Это необходимо учитывать при выборе и регулировке защитной аппаратуры и при оценке механических усилий, возникающих между витками первичной обмотки трансформатора. Токи короткого замыкания необходимо учитывать при оценке механической и термической прочности токоведущих частей как первичной, так и вторичной обмоток.

4.1. Включение трехфазного силового трансформатора в сеть на холостом ходу

Рассмотрим электромагнитные процессы в силовом трансформаторе с разомкнутой вторичной обмоткой (холостой ход) при подключении его к электрической сети промышленной частоты бесконечно большой мощности, напряжение которой изменяется по синусоидальному закону с произвольной начальной фазой и не изменяется по амплитуде (идеальный источник напряжения) $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi)$.

Магнитные оси электромагнитных процессов в отдельных фазах трехфазного трансформатора при идеальной симметрии сдвинуты между собой на угол 120° , поэтому в симметричном режиме для каждой из фаз можно записать однотипные соотношения.

Для одно- или трехстержневого силового трансформатора в строго синусоидальном режиме для первичной обмотки одной из фаз трансформатора справедливо (по 2-му закону Кирхгофа) соотношение

$$u_1 + e_1 = i_{10} r_1 \quad \text{или} \quad u_1 - w_1 \frac{d\Phi}{dt} = i_{10} r_1, \quad (2.1)$$

где $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$ – ЭДС первичной обмотки;

i_{10} – ток первичной обмотки при холостом ходе;

w_1, r_1 – число витков и активное сопротивление первичной обмотки соответственно;

Φ – магнитный поток самоиндукции.

В общем случае уравнение (2.1) является нелинейным и решается численными методами на ЭВМ. Поэтому рассмотрим его приближенное решение, предполагая, что магнитопровод трансформатора не насыщен и между намагничивающим током и потоком существует линейная зависимость (в предположении линейной схемы замещения трансформатора).

Потокосцепление силового трансформатора определяется по известной формуле

$$\psi = w_1 \Phi = L_1 i_{10},$$

где ψ, L_1 – потокосцепление и суммарная индуктивность первичной обмотки силового трансформатора.

Значение индуктивности L_1 в выражении для потокосцепления включает в себя собственную и взаимную индуктивность первичной и вторичной обмоток силового трансформатора, а также индуктивность рассеяния первичной цепи. Из приведенного соотношения находим мгновенное значение тока холостого хода первичной обмотки $i_{10} = \frac{w_1}{L_1} \Phi$.

Подставляя значения параметров режима трансформатора u_1 , e_1 , i_{10} в уравнение (2.1), получим

$$\frac{w_1 r_1}{L_1} \Phi + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

или

$$\frac{I}{T_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2.2)$$

где $T_1 = \frac{L_1}{r_1}$ – постоянная времени первичной обмотки;

φ_0 – начальная фаза напряжения при включении трансформатора.

Известно, что решение неоднородного дифференциального уравнения (2.2) определяется в виде двух слагаемых: частного решения уравнения (2.2) и общего решения однородного уравнения, соответствующего уравнению (2.2):

$$\Phi = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{св}},$$

где $\Phi_{\text{пр}}$ – мгновенное значение установившегося (принужденного) магнитного потока;

$\Phi_{\text{св}}$ – мгновенное значение переходного (свободного) магнитного потока.

После несложных преобразований получим выражение временной зависимости для установившегося магнитного потока

$$\Phi_{\text{пр}} = \Phi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_1) \approx -\Phi_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2.3)$$

где $\Phi_m = \frac{I_{10m} L_1}{w_1} = \frac{U_{1m} L_1}{w_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \approx \frac{U_{1m}}{w_1 \omega}$ – амплитуда магнитного по-

тока самоиндукции (приближенное равенство в правой части при условии пренебрежения активным сопротивлением первичной обмотки силового трансформатора, для которого выполняется условие $\omega L_1 \gg r_1$);

$\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$ – угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки (при условии пренебрежения активным сопротивлением обмотки, т. е. при условии $\omega L_1 \gg r_1$).

Решая уравнение (2.2) для свободной составляющей потока при нулевом значении входного напряжения, в соответствии с выражением $\frac{\Phi_{\text{св}}}{T_1} + \frac{d\Phi_{\text{св}}}{dt} = 0$ получим соотношение для свободной составляющей магнитного потока

$$\Phi_{\text{св}} = C e^{\frac{-t}{T_1}}. \quad (2.4)$$

Значение постоянной интегрирования C в выражении (2.4) определяется с учетом начальных условий: в момент включения при $t = 0$ магнитный поток равен нулю или в общем случае остаточному потоку Φ_0 .

Остаточный магнитный поток Φ_0 может иметь любой знак относительно основного потока в зависимости от направления поля остаточного магнетизма.

В начальный момент времени при $t = 0$ на основании уравнений (2.3) и (2.4) можно записать

$$\Phi = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{св}} = -\Phi_m \cos \varphi_0 + C = \pm \Phi_0,$$

получаем выражение постоянной интегрирования

$$C = \Phi_m \cos \varphi_0 \pm \Phi_0.$$

Тогда с учетом соотношения (2.4) и постоянной интегрирования C получим расчетное соотношение для свободной составляющей магнитного потока в сердечнике силового трансформатора

$$\Phi_{\text{св}} = (\Phi_m \cos \varphi_0 \pm \Phi_0) e^{\frac{-t}{T_1}}.$$

Таким образом, временная зависимость магнитного потока в сердечнике силового трансформатора может быть представлена уравнением

$$\Phi = \Phi_m \left[e^{\frac{-t}{T_1}} \cos \varphi_0 - \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \pm \Phi_0 e^{\frac{-t}{T_1}}. \quad (2.5)$$

Анализ соотношения (2.5) позволяет выявить условия двух возможных предельных случаев по характеру переходного процесса включения силового трансформатора:

1. Отсутствие электромагнитного переходного процесса. Наиболее благоприятными условиями включения силового трансформатора в сеть (при $t = 0$) в этом случае являются $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ и $\Phi_0 = 0$.

При этом согласно уравнению (2.5) выражение для магнитного потока принимает вид

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin \omega t. \quad (2.6)$$

Условие (2.6) означает, что с момента включения в трансформаторе устанавливается нормальный магнитный поток, т. е. включение происходит без переходного процесса, и сверхтоки не возникают.

2. Неблагоприятными условиями для возникновения переходного процесса согласно соотношению (2.5) будут в момент включения ($t = 0$) угол $\varphi_0 = 0$, а остаточный магнитный поток Φ_0 противоположен по направлению принужденному магнитному потоку $\Phi_{пр}$. В этом случае согласно соотношению (2.5) получим

$$\Phi = -\Phi_m \left[e^{\frac{-t}{T_1}} - \cos(\omega t) \right] + \Phi_0 e^{\frac{-t}{T_1}}. \quad (2.7)$$

Анализ выражения (2.7) показывает, что наибольшего значения магнитный поток Φ достигает (при условии неизменности магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt} = 0$) приблизительно через половину периода напряжения питающей сети после включения трансформатора ($\omega t = \pi$ или $t = \frac{\pi}{\omega}$) в со-

ответствии с выражением

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} = \Phi_m \left(1 + e^{\frac{-\pi}{\omega T_1}} \right) + \Phi_0 e^{\frac{-\pi}{\omega T_1}}. \quad (2.8)$$

Для силовых трансформаторов (одно- или трехстержневых) всегда выполняется условие $r_1 \ll \omega L_1$, следовательно, можно полагать для слагаемых уравнения (2.8) справедливым равенство

$e^{\frac{-\pi}{\omega T_1}} = e^{\frac{-\pi \eta}{\omega L_1}} \approx 1$, тогда в общем случае максимальное значение магнитного потока по (2.8) определится соотношением

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} = 2\Phi_m + \Phi_0. \quad (2.9)$$

Значение остаточного магнитного потока Φ_0 может в отдельных случаях достигать относительно больших значений (предположительно до половины основного магнитного потока), т. е. $\Phi_0 < 0,5\Phi_m$. Таким образом, в предельном случае на основании выражений (2.8) и (2.9) получим наибольшее значение магнитного потока [1]

$$\Phi_{\text{макс}} = 2\Phi_m + 0,5\Phi_m = 2,5\Phi_m.$$

При наличии остаточного намагничивания для создания рабочего магнитного потока $\Phi_{\text{раб}} = \Phi - \Phi_{\text{ост}}$ требуется намагничивающий ток i_{10} , значение которого можно определить по магнитной характеристике трансформатора. На рис. 2.1 приведены графики изменения во времени магнитного потока в магнитопроводе силового трансформатора $\Phi = \Phi(t)$ и его периодической и аperiodической составляющих в со-

ответствии с уравнением (2.7), причем $\Phi_{\text{ост}} = \Phi_0 e^{\frac{-t}{T_1}}$.

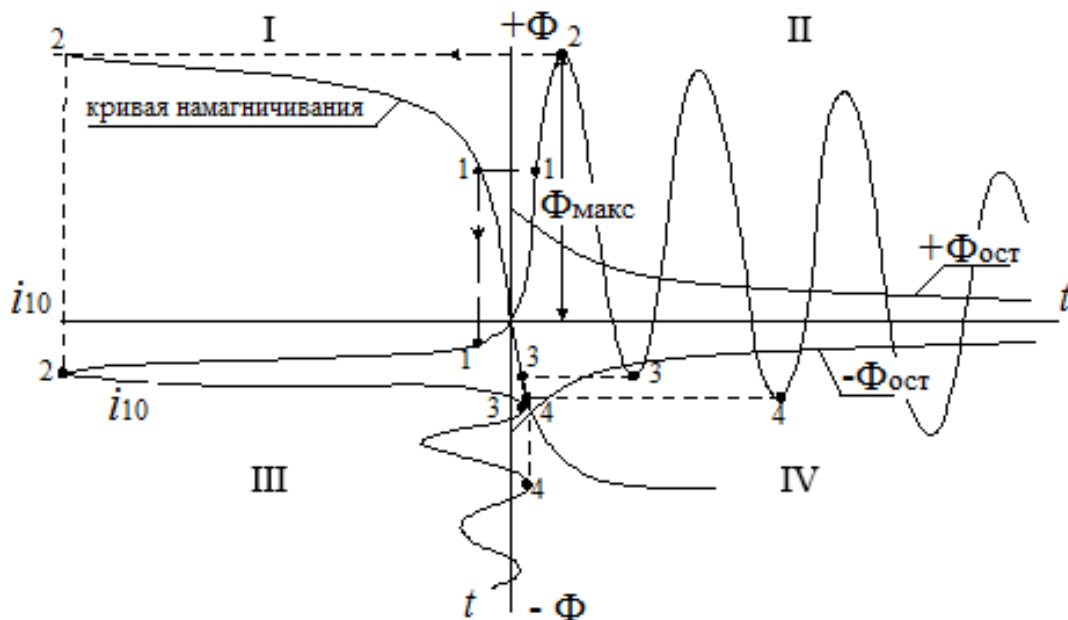


Рис. 2.1. Процесс включения трансформатора: в квадратах III и IV построены графики зависимости $i_{10} = f(t)$, полученной при помощи перехода от мгновенных значений потока Φ к мгновенным значениям тока i_{10}

Здесь же показаны построение графика тока включения $i_{10} = f(t)$ и графический способ определения намагничивающего тока $i_{10} = f(t)$ с помощью магнитной характеристики, построенной в квадратах II и IV.

Значение тока холостого хода $i_{10\text{макс}}$, соответствующее наибольшему значению рабочего потока $\Phi_{\text{раб}} = \Phi - \Phi_{\text{ост}}$, достигается при значении $t = \frac{\pi}{\omega}$, т. е. примерно через половину периода после момента включения.

Ток $i_{10\text{макс}}$ называется сверхтоком включения. При значении индукции в магнитопроводе силового трансформатора порядка 1,6 Тл сверхток включения может превосходить в несколько десятков раз номинальное значение намагничивающего тока холостого хода i_{10} , действующее значение которого для трансформаторов относительно небольшой мощности составляет 10 – 20 % от номинального, т. е. $i_{10} < (0,1 \div 0,2) i_{1н}$, где $i_{1н}$ – номинальный ток первичной обмотки.

Значение намагничивающего тока $i_{10\text{макс}}$ может превышать номинальный ток $i_{1н}$ трансформатора приблизительно в 5 – 25 раз. Опыт показывает, что для крупных трансформаторов с насыщенным магнитопроводом кратность тока $i_{10\text{макс}}$ доходит до 100 и более раз (по отношению к намагничивающему току i_{10}).

Длительность переходного процесса включения силового трансформатора большой мощности, как правило, невелика и составляет 5 – 10 периодов питающей сети промышленной частоты, т. е. сверхток достаточно быстро затухает. С уменьшением мощности трансформатора отношение активного сопротивления к индуктивному r_1/L_1 обычно увеличивается. Поэтому у трансформаторов сравнительно небольшой мощности значение постоянной времени T_1 уменьшается, следовательно, переходный процесс включения трансформатора протекает относительно быстрее и сопровождается меньшими сверхтоками.

4.2. Внезапное короткое замыкание трехфазного силового трансформатора

Проведем анализ случая короткого замыкания на зажимах вторичной обмотки трансформатора с ферромагнитным сердечником при условии неизменного по амплитуде и частоте питающего напряжения в первичной цепи (идеальный источник напряжения) и равенстве нулю напряжения вторичной обмотки (по условию закорочена) $U_{1m} = \text{const}$; $u_2 = 0$.

Рассмотрим простейший случай симметричного (трехфазного) металлического короткого замыкания при одновременном замыкании накоротко всех фаз вторичной обмотки трансформатора. В этом случае схема замещения каждой фазы трансформатора характеризуется параметрами короткого замыкания и представляет собой электрическую цепь с общим активным сопротивлением $r_k = r_1 + r_2'$ и общим индуктивным сопротивлением (ветвь намагничивания при коротком замыкании шунтируется приведенным сопротивлением вторичной обмотки и ее можно не учитывать)

$$x_k = x_1 + x_2' = \omega L_{10} + \omega L_{20}' = \omega L_k,$$

где r_2' , x_2' – приведенные к первичной обмотке активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки соответственно;

L_{10} , L_{20}' – индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки соответственно.

Поскольку потоки рассеяния трансформатора замыкаются, проходя главным образом в немагнитной среде, то индуктивность рассеяния силового трансформатора можно считать линейной с неизменным во времени значением $L_k = L_{10} + L_{20}' = \text{const}$.

Следовательно, при коротком замыкании для каждой фазы приведенного трехфазного трансформатора в соответствии со схемой замещения справедливо соотношение

$$u_1 + e_k = i_k r_k, \quad (2.10)$$

где $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_k)$ – напряжение на первичной обмотке;

φ_k – начальная фаза напряжения (в момент короткого замыкания), аналогичная фазе включения φ_0 при холостом ходе;

$$e_k = -L_k \frac{di_k}{dt} - \text{ЭДС приведенного трансформатора при коротком замыкании};$$

замыкания;

$i_k = i_{1k} = i'_{2k}$ – ток короткого замыкания приведенного трансформатора.

Подставляя значения напряжения на первичной обмотке u_1 и ЭДС приведенного трансформатора при КЗ e_k в уравнение (2.10) и нормируя его относительно L_k , получим

$$\frac{1}{T_k} i_k + \frac{di_k}{dt} = \frac{U_{1m}}{L_k} \sin(\omega t + \varphi_k), \quad (2.11)$$

где $T_k = L_k / r_k$ – постоянная времени приведенного трансформатора.

Решение уравнения (2.11) по аналогии с решением уравнения (2.2) представляется в виде суммы принужденной и свободной составляющей токов

$$i_k = i_{k.\text{пр}} + i_{k.\text{св}}, \quad (2.12)$$

где $i_{k.\text{пр}}$, $i_{k.\text{св}}$ – мгновенные значения установившегося и переходного токов короткого замыкания соответственно.

Установившийся (принужденный) ток определяется по формуле

$$i_{k.\text{пр}} = \frac{U_{1m}}{w_1 \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_1) \cong \frac{U_{1m}}{z_k} \cos(\omega t + \varphi_k), \quad (2.13)$$

где $\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$ (при $\omega L_1 \gg r_1$) – фазовый угол между током и напряжением первичной обмотки при установившемся режиме короткого замыкания;

$z_k = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}$ – кажущееся (полное) сопротивление короткого замыкания трансформатора.

Решая уравнение (2.11) при нулевом значении входного напряжения, получим временную зависимость свободного (переходного) тока короткого замыкания

$$\frac{i_{k.св}}{T_k} + \frac{di_{k.св}}{dt} = 0, \quad \text{откуда} \quad i_{k.св} = Ae^{\frac{-t}{T_k}}. \quad (2.14)$$

Постоянная интегрирования A в (2.14) определяется из начальных условий (при $t = 0$) в момент короткого замыкания.

Ток короткого замыкания при $t = 0$ равен приведенному току i'_2 , нагрузки трансформатора в момент короткого замыкания. В предельном случае получим

$$\lim_{t=0} i_k = \lim_{t=0} i_{k.нр} + \lim_{t=0} i_{k.св} = \lim_{t=0} i'_2 = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2),$$

где φ_2 – фазовый угол тока нагрузки в момент короткого замыкания.

На основании выражений (2.13) и (2.14) можно записать

$$\lim_{t=0} i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + A \approx -\frac{U_{1m}}{z_k} \cos \varphi_k + A = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2),$$

тогда выражение постоянной интегрирования в соотношении (2.14) принимает вид

$$A = I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) - \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\varphi_k - \varphi) \cong I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{U_{1m}}{z_k} \cos \varphi_k.$$

Таким образом, на основании полученных соотношений можно записать общее решение для тока короткого замыкания

$$i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_1) + \left[I'_{2m} \sin(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{U_{1m}}{z_k} \cos \varphi_k \right] e^{\frac{-t}{T_k}}. \quad (2.15)$$

Ток короткого замыкания обычно во много раз превосходит ток нагрузки, к тому же нагрузка закорочена, и поэтому при анализе уравнения (2.15) пренебрегаем током нагрузки, т. е. рассматривается незапное короткое замыкание при холостом ходе трансформатора, когда приведенный ток нагрузки равен нулю

$$i'_2 = I'_{2m} \sin(\omega t + \varphi_k - \varphi_2) = 0.$$

В этом случае временная зависимость тока короткого замыкания трансформатора (во время переходного процесса) может быть представлена уравнением

$$i_k = \frac{U_{1m}}{z_k} \left[e^{\frac{-t}{T_k}} \cos \varphi_k - \cos(\omega t + \varphi_k) \right]. \quad (2.16)$$

Соотношение (2.16) получено из выражения (2.15) при условии выполнения равенства $\varphi_2 \approx \frac{\pi}{2}$, что, как правило, соответствует действительности для силовых трехфазных трансформаторов (выполняется условие $\omega L_1 \gg r_1$) и нарушается только для трансформаторов очень малой мощности (активное сопротивление первичной обмотки резко возрастает).

Анализ уравнения (2.16) показывает, что характер переходного процесса при внезапном коротком замыкании трансформатора определяется значением начальной фазы напряжения φ_k , поэтому рассмотрим два возможных предельных случая.

1. В момент времени при $t = 0$ и значении угла $\varphi_k \approx \frac{\pi}{2}$ напряжение питающей сети проходит через максимум ($u_1 = U_{1m}$). При этих условиях свободный ток не возникает (равен нулю)

$$i_{k.св} = \frac{U_{1m}}{z_k} e^{\frac{-t}{T_k}} \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Следовательно, в силовом трансформаторе после включения наступает режим установившегося короткого замыкания с амплитудой тока $I_{km} = \frac{U_{1m}}{z_k}$.

2. Неблагоприятным случаем, который также необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации трансформаторов, является короткое замыкание в момент, когда фазный угол равен нулю $\varphi_k = 0$, т. е. когда в момент времени $t = 0$ напряжение сети проходит через нуль $u_1 = 0$. При этом ток короткого замыкания согласно уравнению (2.16) достигает наибольшего значения через половину периода напряжения (при значении времени $t = \pi/\omega$)

$$i_{k.\text{макс}} = \frac{U_{1m}}{z_k} \left(e^{-\pi/\omega T_k} - \cos \pi \right) = I_{km} \left(1 + e^{-\pi/\omega T_k} \right). \quad (2.17)$$

Изменение тока короткого замыкания во времени в соответствии с уравнением (2.17) при $\varphi_k = 0$ графически показано на рис. 2.2.

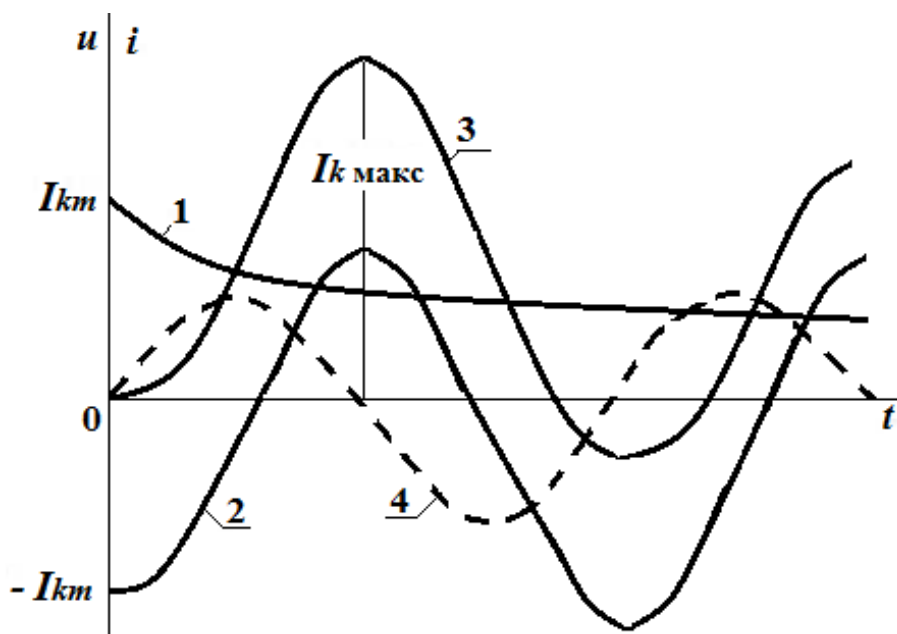


Рис. 2.2. Изменение значения тока внезапного короткого замыкания трансформатора при холостом ходе по нагрузке

в момент $\varphi_k = 0$; $u_1 = 0$: $1 - i_{k\text{св}} = \frac{U_{1m}}{z_k} e^{-\frac{t}{T_k}}$; $2 - i_{k\text{пр}} = -I_{km} \cos \omega t$;

$$3 - i_k = f(t); \quad 4 - u_1 = U_{1m} \sin \omega t$$

При оценке наибольшего значения тока короткого замыкания учитываем, что для силовых трехфазных трансформаторов большой мощности всегда справедливо соотношение $r_k \ll \omega L_k$, поэтому можно полагать $e^{-\pi/\omega T_k} = e^{-\pi r_k / \omega L_k} \approx 1$, тогда согласно (2.17) в самом неблагоприятном случае наибольшее значение тока короткого замыкания (ударный ток короткого замыкания) составляет $i_{k.\text{макс}} = 2I_{km}$.

Для трансформаторов сравнительно малой мощности, характеризующихся сравнительно большими значениями активных сопротивлений обмоток и относительно меньшими значениями индуктивного сопротивления, ударный ток несколько меньше $i_{k.\text{макс}} = (1,2 \div 1,3)I_{km}$.

Если короткое замыкание трансформатора происходит при номинальном напряжении на зажимах его первичной обмотки, то максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания может в десятки раз превосходить величину номинального тока, в особенности для трансформаторов с небольшими напряжениями короткого замыкания.

Во избежание повреждения обмоток трансформатора опыт внезапного короткого замыкания проводится при пониженном напряжении.

Переходный процесс при коротком замыкании быстро затухает. Для трансформаторов сравнительно большой мощности он заканчивается практически в течение шести-семи периодов питающего напряжения промышленной частоты, для трансформаторов малой мощности – приблизительно в течение одного-двух периодов. Это объясняется тем, что с уменьшением мощности отношение $r_k/\omega L_k$ увеличивается. Несмотря на кратковременность процесса, неустановившийся ток короткого замыкания представляет большую опасность для трансформатора с точки зрения электродинамических усилий в обмотках, которые пропорциональны квадрату тока. Эти усилия могут привести к повреждению обмоток и изоляции трансформатора.

Установившийся ток короткого замыкания представляет опасность для термической прочности трансформатора. Он может вызвать недопустимый нагрев обмотки, который также приведет к повреждению электрической изоляции и возможному возгоранию. В связи с этим короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора надо как можно скорее отключать.

5. Порядок оформления отчета

Отчет составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчетов, необходимые построения, выводы, ответы на приведённые в конце каждой лабораторной работы контрольные вопросы.

5.1. Построение характеристик холостого хода и короткого замыкания

Характеристики холостого хода $I_{10} = f(U_1)$ и короткого замыкания $I_{1k} = f(U_1)$ следует строить на одном чертеже, по графикам которого с учетом масштаба определяется значение установившегося тока

короткого замыкания $I_{1k} = I_{1н}$ при выполнении условия $U_1 < U_{1н}$. Это значение используется для определения масштаба осциллограммы тока внезапного короткого замыкания. По характеристике холостого хода определяется масштаб осциллограммы тока включения (при номинальном значении $U_1 = U_{1н}$ напряжения первичной обмотки).

5.2. Обработка осциллограмм

Среди осциллограмм переходного процесса включения силового трансформатора выбирается кривая с наиболее характерным броском тока; приближенно предполагается, что она соответствует включению трансформатора в момент времени, когда начальная фаза $\varphi_0 = 0$.

По характеристике холостого хода определяется установившийся ток I_{10} , соответствующий напряжению сети U_1 . На осциллограмме по световому следу измеряется амплитуда установившегося тока.

Для определения масштаба осциллограммы необходимо от действующего значения тока на характеристике перейти к амплитудному значению тока $I_{10i} = I_{10} \sqrt{2}$.

По осциллограмме определяют мгновенное значение тока $i_{10\text{макс}}$ (в миллиметрах) и, разделяя его на масштаб тока, находят значение сверхтока включения (в амперах). Кратность сверхтока включения составляет $k_{i0} = \frac{i_{10\text{макс}}}{I_{10m}}$.

Подсчитав количество периодов N от $t = 0$ до достижения установившегося тока, определяют время переходного процесса $t_{п} = \frac{N}{f}$, с, где f – частота питающей сети трансформатора.

Аналогично поступают при определении значения и кратности сверхтока короткого замыкания. Масштаб установившегося тока на осциллограмме определяется с помощью характеристик холостого хода и короткого замыкания по току I_{1k} , соответствующему напряжению $U_1 < U_{1н}$, при котором получается номинальное значение тока.

Токи короткого замыкания к номинальному значению напряжения в простейшем случае приводятся путем пропорционального пересчета в соответствии с выражениями

$$i_{1k} = \frac{i_{1k} U_{1н}}{U_1}; \quad k_{ik} = \frac{i_{1k \text{ макс}}}{I_{1нm}}.$$

6. Контрольные вопросы

1. Что подразумевается под понятием «переходный процесс», в чем состоит физическая суть переходного процесса?
2. Каковы начальные условия при анализе переходных процессов? Сформулируйте законы коммутации.
3. Какие методы расчета переходных процессов вы знаете? Применимы ли они для расчета переходных процессов в трехфазных силовых трансформаторах? Что лежит в основе всех методов расчета переходных процессов?
4. Какие виды переходных процессов возникают в трехфазных силовых трансформаторах? Какие из них наиболее часто возникают при эксплуатации силового трансформатора?
5. Как влияет короткозамкнутый контур на переходный процесс в магнитно-связанной электрической цепи?
6. Какую особенность имеют переходные процессы в неподвижных магнитно-связанных цепях?
7. При каких условиях можно не учитывать ток намагничивания трансформатора?
8. Чем вызван бросок тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора в электрическую сеть?
9. Как влияет нелинейность характеристики намагничивания ферромагнитного материала на форму кривой тока намагничивания катушки с ферромагнитным сердечником?
10. Почему в паспортных данных трансформатора обязательно сообщается о значении напряжения короткого замыкания?
11. Почему при короткозамкнутой вторичной обмотке силового трансформатора можно не учитывать ток нагрузки?
12. Почему опыт короткого замыкания нельзя проводить при номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки трансформатора?
13. Почему для силового трансформатора опасны как сверхтоки, так и сверхнапряжения?
14. Какие конструктивные меры принимаются для увеличения механической прочности обмоток силового трансформатора?
15. Как влияет установившийся ток короткого замыкания на термическую прочность трансформатора тора?

Лабораторная работа № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы – изучение и экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора и влияние токов и напряжений нулевой последовательности на его параметры и параметры режима работы.


В результате проведения работы студенты должны **знать** основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид режима работы трансформатора и условия трансформации токов нулевой последовательности; **уметь** рассчитывать значения полного сопротивления нулевой последовательности и его активной и реактивной составляющих, а также оценивать влияние нулевой последовательности на качество электроэнергии; **приобрести** навыки экспериментального исследования параметров сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора, выявления причин увеличения дополнительных потерь электроэнергии в трансформаторе.

1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит трехфазный трехстержневой двухобмоточный трансформатор, расположенный на рабочем столе лабораторного стенда. Напряжение, имитирующее напряжение нулевой последовательности на входных зажимах исследуемого трансформатора, снимается с зажимов однофазного регулируемого источника промышленной частоты, расположенного на передней панели лабораторного стенда и запитанного, в свою очередь, от трехфазного источника питания. Трехфазный источник включается путем нажатия черной кнопки, находящейся над зажимами *A*, *B*, *C*, *0* панели № 2 лабораторного стенда (справа). При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Отключение трехфазного источника осуществляется нажатием красной кнопки. Токи, напряжения и мощности измеряются амперметрами и вольтметрами, размещенными на лабораторном стенде, параметры которых приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Измерительные приборы

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Количество приборов
1	Вольтметр		0 – 600 В	1
2	Вольтметр	»	0 – 250 В	1
3	Амперметр	»	0,5 – 1 А	2
4	Амперметр	»	2,5 – 5 А	1
5	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	2
6	Мультиметр	APPA iMeter 5	U, I, Hz, Ω	1

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

2. Подготовка к работе

2.1. Ознакомиться с приведёнными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 279 – 315; 2, с. 272 – 315; 3, с. 184 – 238; 7, с. 32 – 44].

2.2. Составить электромонтажные схемы для проведения опытов определения параметров нулевой последовательности исследуемого трансформатора в соответствии с электрическими принципиальными схемами, представленными на рис. 3.1. Предусмотреть питание первичной обмотки трехфазного трансформатора, соединенной по схеме «разомкнутого треугольника», от регулируемого однофазного источника.

2.3. Для исследуемых схем, приведенных на рис.3.1, изобразить схемы замещения двухобмоточного трехфазного трансформатора для напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей при разомкнутом и замкнутом ключе K .

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий п. 2, изобразить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

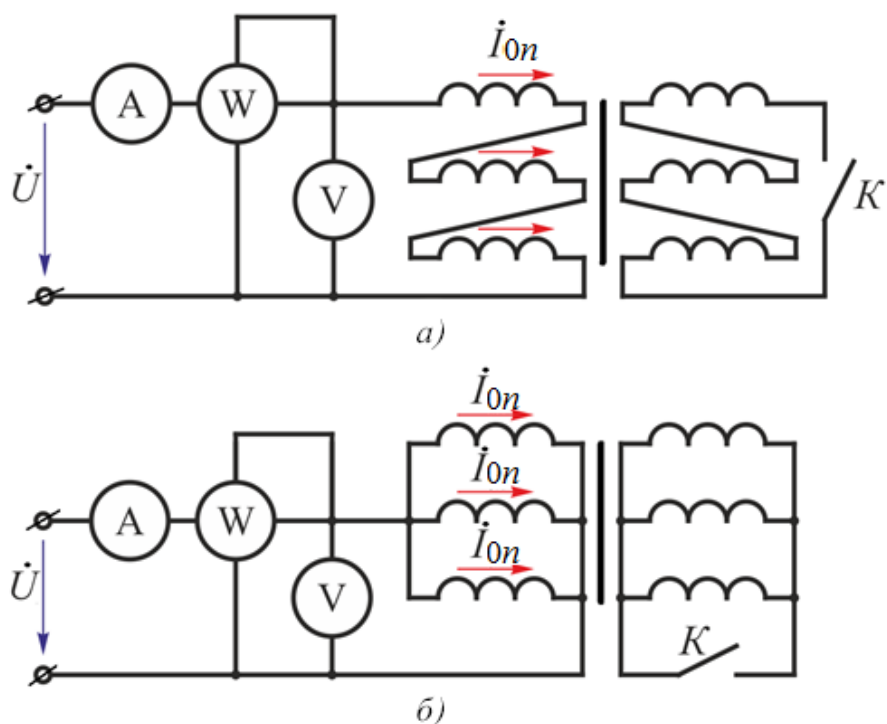


Рис. 3.1. Электрические принципиальные схемы включения обмоток трансформатора для проведения опыта по определению параметров нулевой последовательности при разомкнутом (а) и замкнутом (б) ключе

3. Рабочее задание

3.1. Соединить вторичную обмотку трансформатора по схеме, приведенной на рис. 3.1, а, в треугольник. При питании первичной обмотки, собранной по схеме разомкнутого треугольника, от однофазного регулируемого источника (автотрансформатора) и после проверки схемы преподавателем включить питание стенда, установить на зажимах первичной обмотки трансформатора напряжение в диапазоне 20 – 50 В, измерить напряжение источника питания, ток в цепи первичной обмотки и мощность, потребляемую трансформатором (ключ K разомкнут). Полученные результаты измерений занести в табл. 3.2.

3.2. Выполнить опыт определения параметров нулевой последовательности трансформатора аналогично подп. 3.1 при замкнутом ключе K ; результаты измерений занести в табл. 3.2. При проведении опыта не допускать превышение тока вторичной обмотки больше номинального.

3.3. Соединить первичную и вторичную обмотки трансформатора в звезду с заземленной нейтралью в соответствии со схемой рис. 3.1, б. После проверки схемы преподавателем включить питание стенда и измерить напряжение, ток и мощность со стороны первичной обмотки

аналогично подп. 3.1 при разомкнутом и замкнутом ключе K , результаты измерений занести в табл. 3.2.

3.4. На основании полученных данных проанализировать условия трансформации токов и напряжений нулевой последовательности и по приведенным ниже формулам определить сопротивления нулевой последовательности трансформатора (полное, активное и реактивное) Z_0 , R_0 , X_0 при соединении первичной и вторичной обмоток по схемам рис. 3.1.

Расчетные формулы для определения сопротивлений нулевой последовательности:

– для схемы соединения обмоток трансформатора по рис. 3.1, *a*

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

– для схемы соединения обмоток трансформатора по рис. 3.1, *б*

$$Z_0 = \frac{3U_0}{I_0}; \quad R_0 = \frac{3P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Таблица 3.2

Расчетные и экспериментальные данные

Схема соединения обмоток трансформатора	Экспериментальные данные			Расчетные данные, Ом		
	U_0 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	Z_0	R_0	X_0
По схеме рис. 3.1, <i>a</i> , ключ K разомкнут						
По схеме рис. 3.1, <i>a</i> , ключ K замкнут						
По схеме рис. 3.1, <i>б</i> , ключ K разомкнут						
По схеме рис. 3.1, <i>б</i> , ключ K замкнут						

4. Методические указания

Схема нулевой последовательности заметно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, протекающим

по линии «три фазы – земля». Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия) или последовательно, в расщелку фазных проводов (продольная несимметрия), как это показано на рис. 1.6 (см. лаб. работу № 1).

Далее исходя из вида несимметрии выявляют возможные пути протекания токов нулевой последовательности в электрически связанной цепи. Следует помнить, что сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенным значением (так как схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а их три, включенных параллельно).

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом (общие зажимы генерирующих и нагрузочных ветвей), а ее концом точку, где возникла несимметрия. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии L и L' на рис. 3.2). При незаземленной нейтрали системы начало схемы теряет смысл, так как отсутствуют пути протекания тока нулевой последовательности по земле.

Обязательным этапом расчета несимметричного режима является определение результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла несимметрия. При этом из схемы прямой последовательности находят также результирующую ЭДС относительно той же точки. Необходимые преобразования проводят с применением принципа наложения в предположении линейности элементов схемы замещения электрической системы. Однако при этом необходимо помнить о принципиальных различиях в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметриях.

При поперечной несимметрии в заданной точке результирующую ЭДС и сопротивления можно определить в схеме прямой последовательности путем нахождения эквивалентного сопротивления относительно зажимов источника. Эквивалентные преобразования (рис. 3.3) для схемы обратной последовательности аналогичны за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников. Схему нулевой последовательности преобразовывают путем последовательного и параллельного сложения ветвей с учетом взаимоиндукции между линиями электропередачи.

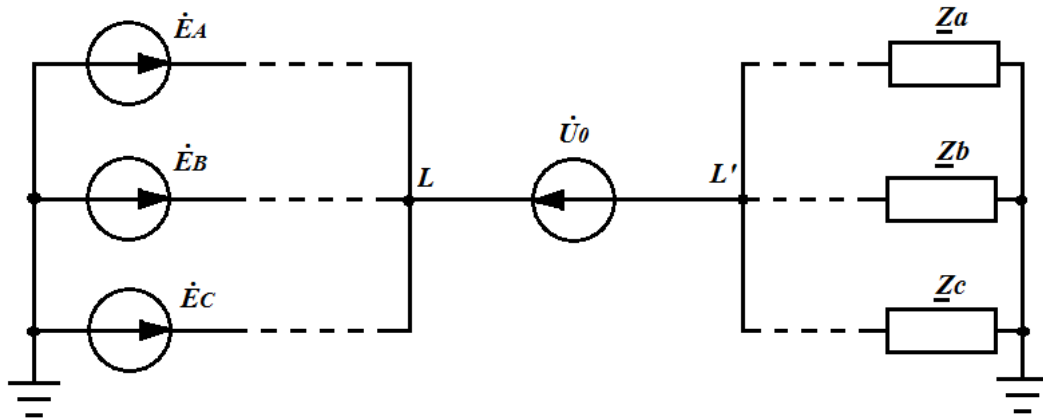


Рис. 3.2. Введение в схему замещения напряжения нулевой последовательности в точках продольной несимметрии

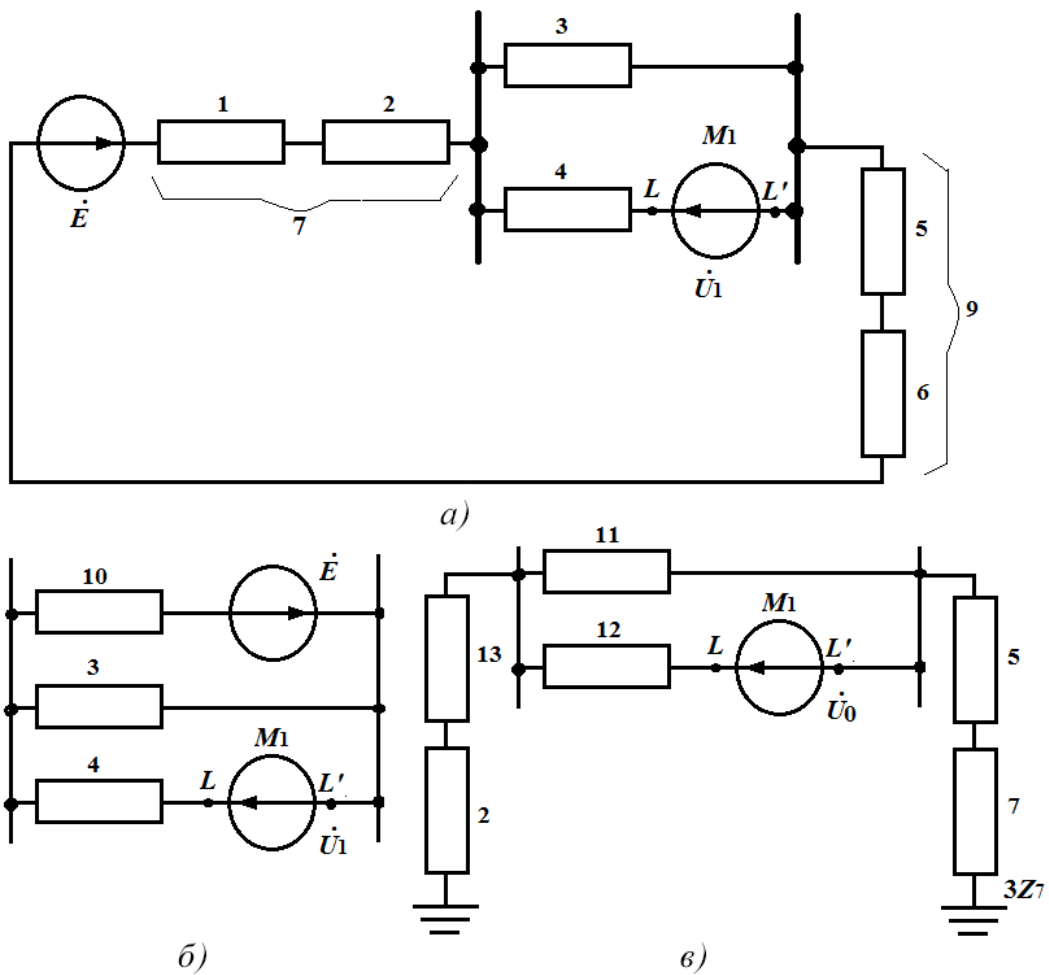


Рис. 3.3. Этапы преобразования схемы замещения с источником напряжения нулевой последовательности при продольной несимметрии в двухцепной линии электропередачи (3 и 4): а – исходная схема замещения; б – с преобразованным источником энергии \dot{E} ; в – преобразованная схема замещения относительно зажимов источника напряжения нулевой последовательности

При продольной несимметрии источник напряжения нулевой последовательности включен в рассечку участка электрической цепи, поэтому кроме преобразования ветвей схемы с индуктивными или резистивными элементами необходимо преобразовывать ветви с источниками энергии, рассматривая электрическую цепь относительно зажимов источника напряжения нулевой последовательности.

Конечное значение реактивности нулевой последовательности имеют только трансформаторы, входная обмотка которых для нулевой последовательности соединена звездой с нулевым проводом. Во всех остальных схемах соединения реактивность X_0 стремится к бесконечности.

Основные варианты соединения обмоток двух- и трехобмоточных трансформаторов, при которых приложенное к обмотке I напряжение нулевой последовательности вызывает в одной или в обеих обмотках ток той же последовательности, приведены на рис. 3.4. Здесь же показаны схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности.

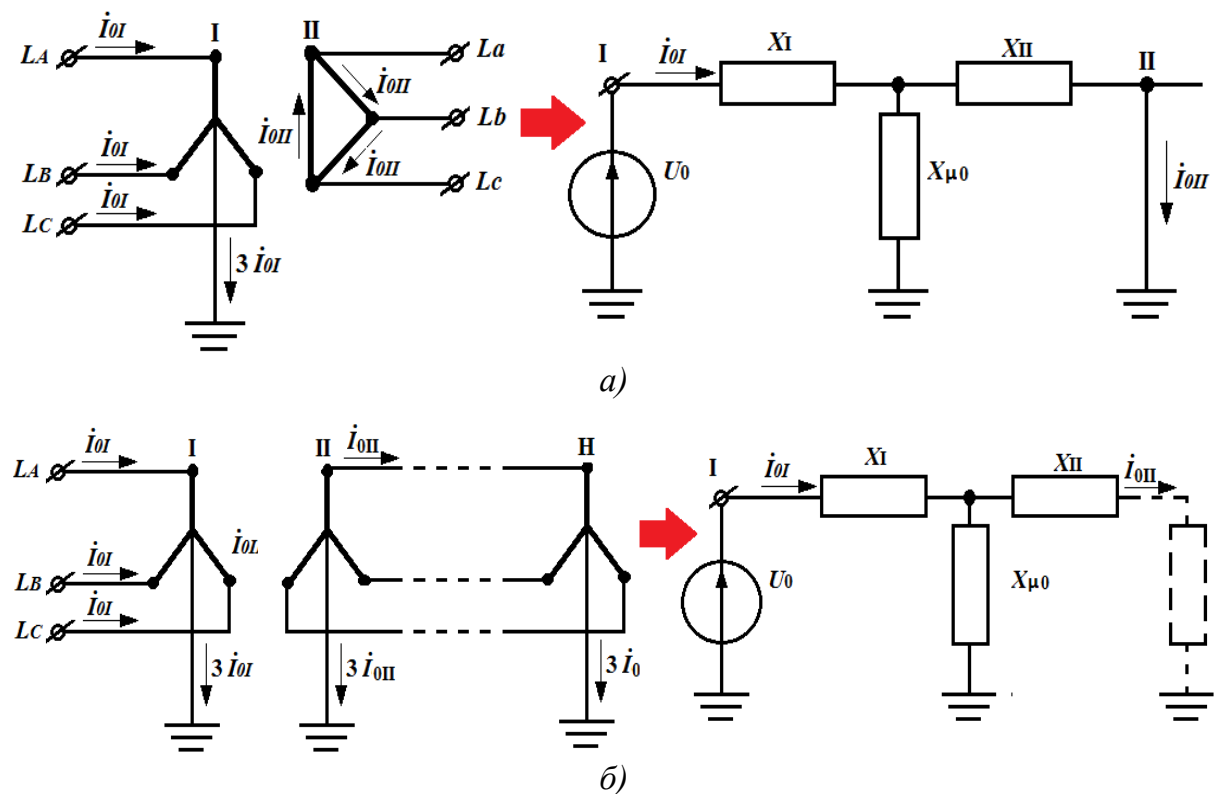
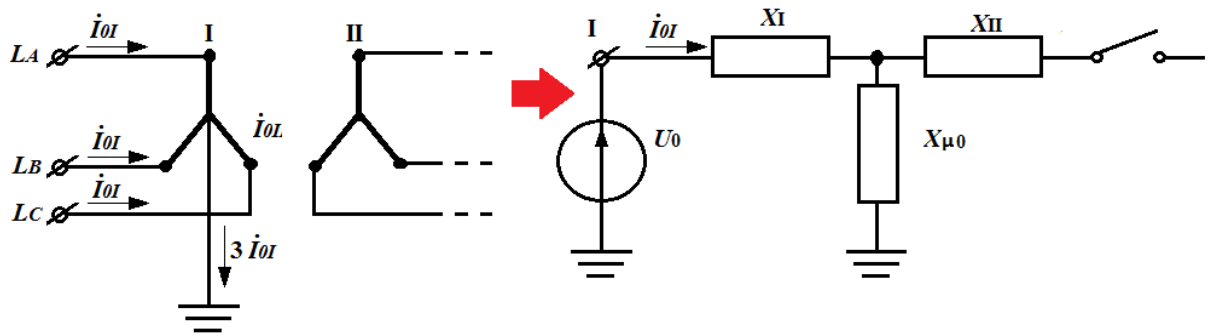
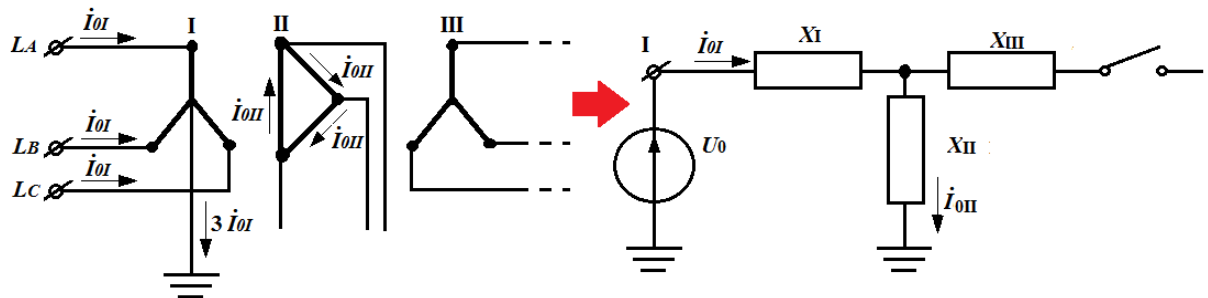


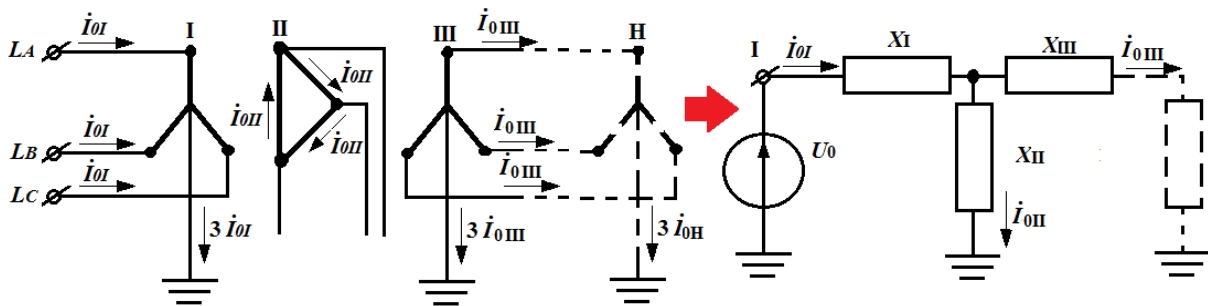
Рис. 3.4. Схемы замещения двух- и трехобмоточных трехстержневых силовых трансформаторов для токов нулевой последовательности в зависимости от группы соединения обмоток трансформатора: *a* – схема соединения первичных обмоток «звезда с нулем», вторичных – «треугольником»; *б* – схема соединения первичных обмоток «звезда с нулем», вторичных – «звезда с нулем» (окончание см. на с. 74)



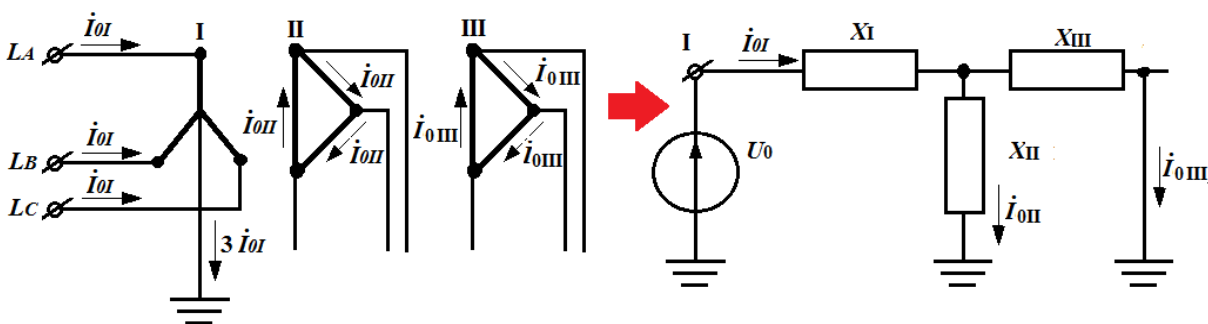
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.4. Окончание (начало см. на с. 73): а – схема соединения первичных обмоток «звезда с нулем», вторичных – «звезда без нулевого провода»; б – схема соединения первичных обмоток «звезда с нулем», вторичных – «треугольник/звезда без нулевого провода»; в – схема соединения первичных обмоток «звезда с нулем», вторичных – «треугольник/звезда с нулевым проводом»; г – схема соединения первичных обмоток «звезда с нулем», вторичных – «треугольник/треугольник»

Оценку реактивности нулевой последовательности двухобмоточных трехстержневых трансформаторов как единственно применяемых в схемах Y/Y_0 можно провести по данным табл. 3.3, т. е. определить параметры трансформатора для токов нулевой последовательности с учетом того, что эти токи протекают по схеме «три провода – земля»: полное Z_0 , активное R_0 и реактивное X_0 сопротивления нулевой последовательности по приведенным ниже формулам:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{k_{\text{тт}} 3I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

где $k_{\text{тт}}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока в измерительной части амперметра (единичное значение при отсутствии трансформатора тока).

Таблица 3.3

Оценка реактивности двухобмоточного трансформатора

Тип трансформатора и соединение его обмоток	X_0
1. Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ	X_1
2. Трехфазная группа из однофазных трансформаторов, трехфазный четырех- или пятистержневой трансформатор:	
– с соединением обмоток Y_0/Y	∞
– соединением обмоток Y_0/Y_0	X_1
3. Трехфазный трехстержневой трансформатор:	
– с соединением обмоток Y_0/Y	$X_1 + X_{\mu 0}$
– соединением обмоток Y_0/Y_0	По рис. 3.4, б и в

Автотрансформаторы. Условия протекания токов нулевой последовательности в автотрансформаторах (АТ) несколько иные из-за наличия магнитной и электрической связи между обмотками. При этом токи нулевой последовательности циркулируют в обмотках АТ как с изолированной, так и при глухозаземленной нейтрали. Способы соединения обмоток автотрансформатора и схемы их замещения для токов нулевой последовательности показаны на рис. 3.5.

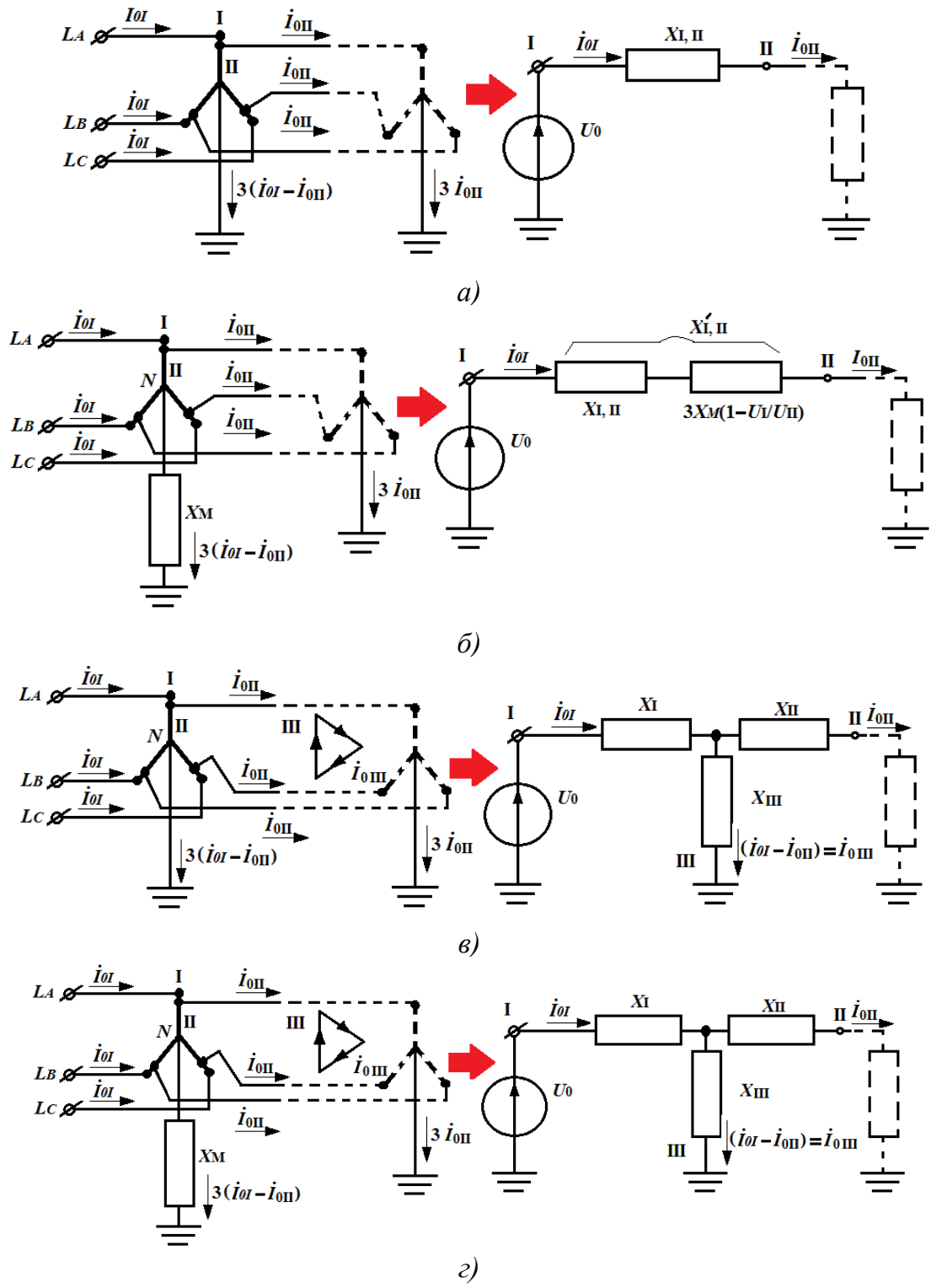


Рис. 3.5. Группы соединения обмоток трехфазных автотрансформаторов и схемы их замещения для токов нулевой последовательности: *а* – схема соединения обмоток автотрансформатора «звезда с нулем», «нагрузка звезда с нулем»; *б* – «звезда с реактором в нейтрали», «нагрузка звезда с нулем»; *в* – «звезда с нулем» с добавочной обмоткой «треугольник», «нагрузка звезда с нулем»; *г* – «звезда с реактором в нейтрали» с добавочной обмоткой «треугольник», «нагрузка звезда с нулем»

При заземлении нейтрали автотрансформатора через реактивность X_M (рис. 3.5, з) получим

$$X'_{I-II} = X_{I-II} + 3X_M \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right)^2.$$

Для трехобмоточного АТ результирующие реактивности нулевой последовательности определяются по формулам

$$X'_{I-III} = X_{I-III} + 3X_M; \quad X'_{II-III} = X_{II-III} + 3X_M \left(\frac{U_I}{U_{II}}\right)^2.$$

Реактивности трехлучевой схемы замещения рассчитываются в соответствии со следующими формулами:

$$X'_I = X_I + 3X_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right);$$

$$X'_{II} = X_{II} + 3X_N \frac{U_I(U_I - U_{II})}{U_{II}^2};$$

$$X'_{III} = X_{III} + 3X_N \frac{U_I}{U_{II}}.$$

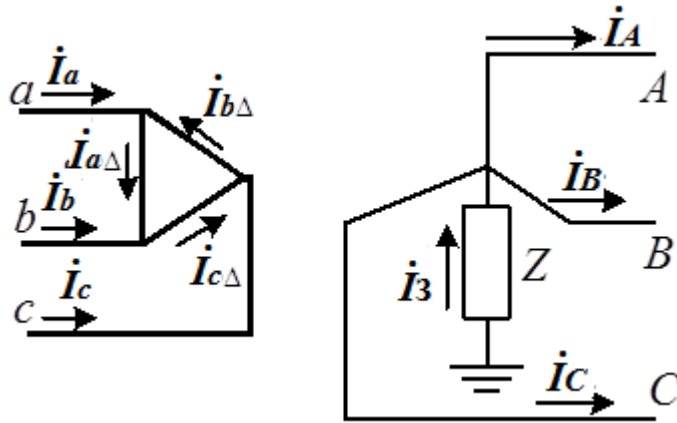
При отсутствии третьей обмотки в автотрансформаторе разземление нейтрали приводит к режиму холостого хода в схеме нулевой последовательности. Однако у АТ с третьей обмоткой, соединенной треугольником, циркуляция токов нулевой последовательности возможна.

Распределение и трансформация токов и напряжений. Фазные токи и напряжение при несимметричных режимах обычно находят путем суммирования симметричных составляющих. Полагая трехфазные схемы или устройства симметричными, распределение токов и напряжений каждой последовательности находят в схеме одноименной последовательности, руководствуясь известными правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях.

Для схем обратной и нулевой последовательностей, которые являются пассивными и их элементы остаются неизменными в течение всего переходного процесса, часто используют коэффициенты распределения, принимая за единицу ток каждой последовательности в месте

несимметричного повреждения. Однако необходимо учитывать, что при продольной и поперечной несимметрии в одной и той же точке эти коэффициенты различны.

При определении значений фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что



токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток. Например, для трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$, схема которого показана на рис. 3.6, получим:

Рис. 3.6. Схема трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$

$$\text{а) } K = \sqrt{3} \frac{W_y}{W_\Delta} \text{ — линейный}$$

коэффициент трансформации, где W_y и W_Δ — число витков в фазах обмоток, соединенных «звездой» и «треугольником» соответственно;

б) токи в линейных проводах за треугольником

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a\Delta} - \dot{I}_{b\Delta} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) \frac{W_y}{W_\Delta} = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\sqrt{3}} K;$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_C}{\sqrt{3}} K; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_\Delta}{\sqrt{3}} K;$$

в) токи в линейных проводах за треугольником через их симметричные составляющие

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \left[\frac{\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_0 - a\dot{I}_{A2} - \dot{I}_0}{\sqrt{3}} \right] K = \left[\frac{(1-a^2)\dot{I}_{A1} + (1-a)\dot{I}_2}{\sqrt{3}} \right] K = \\ &= (\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ}) K; \end{aligned}$$

г) фазные напряжения со стороны треугольника

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{K\sqrt{3}}; \quad \dot{U}_b = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{K\sqrt{3}}; \quad \dot{U}_c = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{K\sqrt{3}}$$

$$\text{или } \dot{U}_a = \left(\dot{U}_{A1} \cdot e^{j30^\circ} + \dot{U}_{A2} \cdot e^{-j30^\circ} \right) \frac{1}{K}.$$

Из полученных выражений следует, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе $Y/\Delta=11$, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности на -30° в противоположном направлении (рис. 3.7).

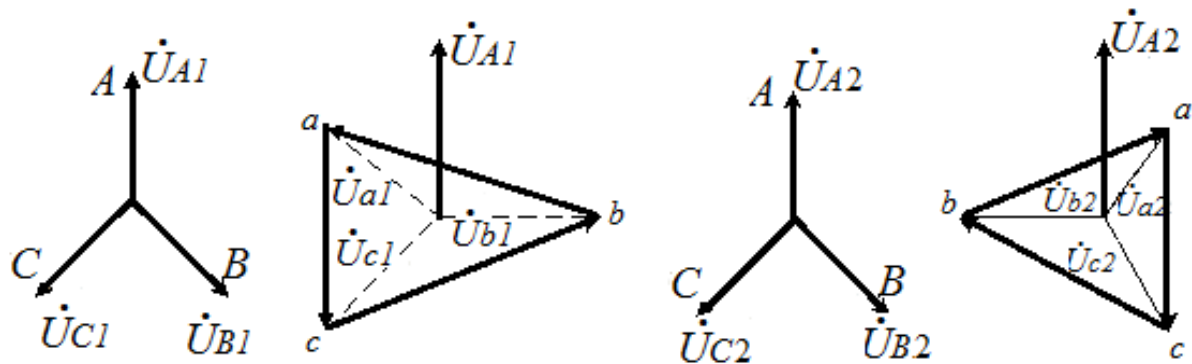


Рис. 3.7. Сдвиг векторов напряжений прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$

При соединении обмоток трансформатора по группе 12 угловые смещения токов и напряжений отсутствуют. При соединении Y_0/Y_0 должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности. При соединении по группе 3 (или 9) векторы прямой и обратной последовательностей повернуты на 90° в противоположные стороны.

Из изложенного выше следует, что при переходе через трансформатор с соединением Y/Δ (или Δ/Y) достаточно у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный. Если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

5. Порядок оформления отчета

Отчет составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему исследуемой установки, результаты измерений и расчетов, необходимые построения и выводы, а также ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Для определения каких величин строится схема замещения нулевой последовательности?
2. Зачем рассчитывается сопротивление схемы нулевой последовательности?
3. Токи однофазного короткого замыкания меньше токов трехфазного и двухфазного КЗ. Для определения каких параметров энергосистемы они рассчитываются?
4. Какие нежелательные явления происходят в неповрежденных фазах при возникновении однофазных КЗ? Почему?
5. Как влияет схема соединения вторичной обмотки на величину сопротивления нулевой последовательности?
6. Каким группам соединения обмоток трансформатора соответствуют исследуемые в лабораторной работе схемы соединения вторичной обмотки трансформатора: Y_0/Δ , Y_0/Y , Y_0/Y_0 ? Какие группы соединения обмоток трансформатора применяются в российской энергосистеме, почему?
7. Какая из схем соединения вторичной обмотки трансформатора предпочтительнее в энергосистеме с точки зрения эксплуатации и четкого срабатывания защит?
8. Как влияет конструкция магнитопровода на значение полного сопротивления нулевой последовательности Z_0 ?
9. Почему в трансформаторах с соединением обмоток Y_0/Δ ветвь с сопротивлением намагничивания нулевой последовательности $\chi_{\mu 0}$ не учитывается?
10. Как влияет заземление нейтрали «зигзага» на параметры нулевой последовательности?
11. Для силовых трансформаторов индуктивная составляющая нулевого сопротивления значительно больше активной составляющей. Почему?
12. Как влияет конструкция бака трансформатора на значение параметров нулевой последовательности?
13. Почему полное сопротивление нулевой последовательности значительно больше полного сопротивления короткого замыкания?

Лабораторная работа № 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОМПЛЕКСНОЙ СХЕМОЙ ЗАМЕЩЕНИЯ

Цель работы – расчет параметров элементов модели, отображающих реальную электрическую систему, для экспериментального исследования изменения значений токов и напряжений в месте продольной несимметрии на основе комплексных схем замещений.

В результате проведения работы студенты должны **знать** основные формы записи уравнений, описывающих тот или иной вид продольной несимметрии, и методики пересчета параметров режима лабораторной модели к параметрам режима реальной электрической системы; **уметь** рассчитывать параметры элементов модели и симметричных составляющих токов и напряжений и отображать их графически в виде векторных диаграмм; **приобрести** навыки экспериментального исследования параметров режимов продольной несимметрии на лабораторной модели.

1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служит реализованная на лабораторном стенде электрическая схема замещения с параметрами элементов, расчетные значения которых соответствуют заданной расчетной схеме простейшей электрической системы. Исследуемая электрическая схема замещения составляется из элементов, расположенных на панелях лабораторного стенда. Питание исследуемой схемы осуществляется от источников переменного и постоянного напряжения, расположенных на панели № 2 лабораторного стенда. Источники питания включаются нажатием черной кнопки, находящейся над зажимами A , B , C , 0 или над зажимами «+ ÷ –» панели № 2. При этом должна загореться сигнальная лампа, расположенная над кнопкой. Трехфазный источник отключается при нажатии красной кнопки. Измерение токов напряжений осуществляется амперметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 4.1.

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

Таблица 4.1

Измерительные приборы

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Количество приборов
1	Вольтметр		0 – 600 В	1
2	Вольтметр	»	0 – 250 В	1
3	Амперметр	»	0,5 – 1 А	2
4	Амперметр	»	2,5 – 5 А	1
5	Мультиметр	APPA iMeter 5	U, I, Hz, Ω	1

2. Подготовка к работе

2.1. Ознакомиться с приведенными ниже методическими указаниями и рекомендованной литературой [1, с. 401 – 404].

2.2. По исходным данным табл. 4.2 для заданного преподавателем варианта рассчитать по приведенной ниже методике результирующие сопротивления реактивностей прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей элементов схемы замещения расчетной схемы электрической системы при продольной несимметрии в начале линии электропередач, расчетная схема которой показана на рис. 4.1.

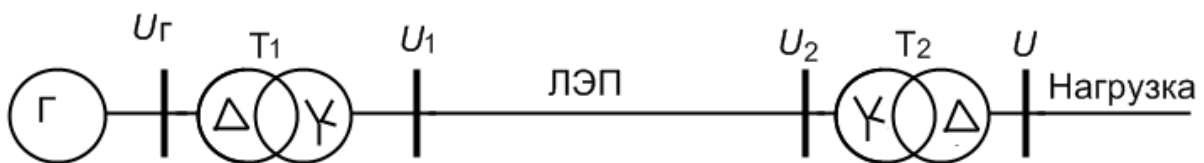


Рис. 4.1. Расчетная схема простейшей электрической системы

Суммарные реактивные сопротивления прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей определяются исходя из расчета сопротивлений отдельных элементов схемы замещения электрической системы.

Таблица 4.2

Параметры элементов электрической системы

Номер варианта	Генератор			Т1		Линия W				Т2		Нагрузка
	S_G , МВ·А	x_{II}^d , о.е.	x_2 , о.е.	S_{T1} , МВ·А	U_{K1} , %	U_{cp} , кВ	l , км	$x_{уд}$, Ом/км	$X_{уд.о}$, Ом/км	S_{T2} , МВ·А	U_{K2} , %	
1	20	0,12	0,2	25	10,5	37	55	0,4	1,2	25	11	20
2	60	0,1	0,15	63	10,5	37	50	0,41	1,22	63	14	60
3	40	0,2	0,25	40	11	115	54	0,43	1,25	40	17	35
4	20	0,11	0,16	25	11	37	60	0,42	1,24	25	10,5	20
5	60	0,125	0,17	63	12	230	65	0,4	1,2	63	17	60
6	40	0,131	0,18	40	11	115	67	0,4	1,2	40	6	35
7	20	0,13	0,16	25	10,5	37	51	0,41	1,22	25	11	20
8	40	0,15	0,19	63	11	115	47	0,42	1,24	63	17	60
9	60	0,131	0,17	63	12	230	43	0,4	1,2	63	17	60
10	40	0,111	0,18	40	11	115	40	0,41	1,22	40	11	35
11	20	0,11	0,14	25	10,5	37	81	0,43	1,25	25	10,5	20
12	60	0,105	0,17	63	12	230	80	0,4	1,2	63	6	60
13	40	0,19	0,15	63	10,5	115	35	0,43	1,26	63	10,5	60
14	20	0,13	0,16	25	10,5	37	45	0,41	1,22	25	17	20
15	60	0,2	0,25	63	12	230	40	0,4	1,2	40	11	30

Примечание: S_G , S_{T1} , S_{T2} – номинальные мощности генераторов и трансформаторов; x_{II}^d – сверхпереходная реактивность генератора; x_2 – реактивность обратной последовательности генератора; U_{K1} , U_{K2} – напряжение короткого замыкания трансформаторов; l – длина линии; U_{cp} – напряжение линии; $x_{уд}$, $x_{уд.о}$ – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательностей ЛЭП; S_h – номинальная мощность нагрузки.

Сопротивления прямой x_1 , обратной x_2 и нулевой x_0 последовательностей отдельных элементов электрической системы рассчитывают по формулам:

1. Для генератора G

$$x_{Г1} = x_d'' \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{Г}}, \text{ Ом};$$

$$x_{Г2} = x_2 \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{Г}}, \text{ Ом.}$$

2. Для трансформаторов $T1, T2$

$$x_{T1}^{(i)} = x_{T2}^{(i)} = x_{T0}^{(i)} = \frac{U_{Ki} \% \cdot U_{\text{ср}}^2}{100 \cdot S_{Ti}}, \text{ Ом}, \quad i = 1, 2.$$

3. Для линии электропередачи W

$$x_{л1} = x_{л2} = x_{уд} l, \text{ Ом};$$

$$x_{л0} = x_{уд.0} l, \text{ Ом.}$$

4. Для нагрузки

$$x_{н1} = x_{н2} = 0,35 \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{н}}, \text{ Ом.}$$

Результатирующие сопротивления каждой последовательности вычисляются по выражениям с учетом точек продольной несимметрии, при этом необходимо помнить, что общие точки генерирующих и нагрузочных ветвей заземлены:

$$x_{1\Sigma} = x_{Г1} + x_{Т1}^{(1)} + x_{л1} + x_{Т1}^{(2)} + x_{н1};$$

$$x_{2\Sigma} = x_{Г2} + x_{Т2}^{(1)} + x_{л2} + x_{Т2}^{(2)} + x_{н2};$$

$$x_{0\Sigma} = x_{Т0}^{(1)} + x_{л0} + x_{Т0}^{(2)}.$$

2.3. Составить комплексные схемы замещения расчетной схемы простейшей электрической системы по рис. 4.1 при обрыве одной и двух фаз.

2.4. Для последующей замены индуктивных сопротивлений активными выполнить операцию измерения мультиметром омического

сопротивления каждого из девяти резистивных элементов, расположенных на панели пассивных элементов лабораторного стенда и сгруппированных по три в фазах Ax ; Bu ; Cz . Затем провести измерения сопротивлений при различных групповых комбинациях включения резисторов в этих фазах. Результаты измерений записать в таблицу (разрабатывается самостоятельно).

По результатам измерений подобрать путем смешанного соединения одиночных и групп резисторов, а в некоторых случаях с использованием магазина сопротивлений с погрешностью не хуже 1 % номинальные значения суммарных сопротивлений схем замещения для прямой, обратной и нулевой последовательностей (при условии замены индуктивных элементов резистивными и перехода от переменного тока к постоянному)

$$x_{1\Sigma} = R_{1\Sigma}; x_{2\Sigma} = R_{2\Sigma}; x_{0\Sigma} = R_{0\Sigma}.$$

Для более точного подбора резистивных элементов схемы замещения допускается провести дополнительное масштабирование.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать электрическую схему опыта на основании составленной комплексной схемы замещения для случая обрыва одной из фаз в начале линии из подобранных резистивных элементов, сопротивления которых равны расчетным для данного вида повреждения.

3.2. Выставить на магазинах сопротивлений и на панели стенда в фазах Ax ; Bu ; Cz расчетные значения суммарных сопротивлений симметричных составляющих $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$.

3.3. Поднять автотрансформатором, расположенным на панели № 2 лабораторного стенда, напряжение $E_{1\Sigma}$ (вольтметр PV) так, чтобы стрелки всех приборов с целью уменьшения погрешности измерений отклонялись за середину шкалы. Записать показания $PA1$, $PA2$, $PA3$.

3.4. Повторить действия, описанные в п.п. 3.1 – 3.3, для случая обрыва двух фаз.

3.5. Результаты измерений токов и напряжений свести в табл. 4.3.

3.6. Выполнить в соответствии с методическими указаниями, приведенными в п. «Обработка результатов измерений и анализ погрешностей», аналитический расчет симметричных составляющих токов и определить погрешность измерений.

3.7. Построить векторные диаграммы токов и напряжений при обрыве одной и двух фаз.

Таблица 4.3

Результаты измерений

№ п/п	Вид повреждения	Величина тока, А		
		$I_1/PA1$	$I_2/PA2$	$I_0/PA3$
1	Обрыв фазы			
2	Обрыв двух фаз			

Обработка результатов измерений и анализ погрешностей

В отчете по лабораторной работе необходимо провести сравнение результатов, полученных экспериментально, с аналитическими расчетами.

Результаты измерения обрабатывают по следующему алгоритму.

1. Определяют масштабный коэффициент (для приведения показаний приборов к исходным данным)

$$m_I = \frac{U_{\text{ср}} E''}{\sqrt{3} E_{1\Sigma}},$$

где $U_{\text{ср}}$ – напряжение линии электропередачи W (из табл. 4.1), кВ;

$E'' = 1,08$ – значение сверхпереходной ЭДС турбогенератора мощностью до 100 МВт в начальный момент нарушения режима;

$E_{1\Sigma}$ – показание вольтметра, PV в соответствующем опыте, В.

2. На основании замеров значений токов I_1, I_2, I_0 для каждого вида повреждения рассчитывают действительные значения симметричных составляющих, кА:

$$I_{LA1}^{(M)} = m_I I_1;$$

$$I_{LA2}^{(M)} = m_I I_2;$$

$$I_{LA0}^{(M)} = m_I I_0,$$

где I_1, I_2, I_0 – соответственно показания амперметров $PA1, PA2, PA3$, А.

3. Вычисляют значение добавочного сопротивления

$$x_{\Delta}^{(1)} = \frac{x_{0\Sigma} x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}} \text{ (обрыв одной фазы);}$$

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma} \text{ (обрыв двух фаз).}$$

4. Для каждого вида несимметрии выполняют аналитический расчет значения тока прямой последовательности

$$I_{LA1}^{(a)} = \frac{U_{cp} E''}{\sqrt{3} (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \text{ кА, } n = 1, 2.$$

5. Определяют токи обратной и нулевой последовательностей при разрыве одной фазы, кА,

$$I_{LA2}^{(a)} = -\frac{x_{\Delta}^{(1)}}{x_{2\Sigma}} I_{LA1}^{(a)};$$

$$I_{L0}^{(a)} = -\frac{x_{\Delta}^{(1)}}{x_{0\Sigma}} I_{LA1}^{(a)}.$$

6. Симметричные составляющие тока при обрыве двух фаз находят из равенства

$$I_{L0}^{(a)} = I_{LA2}^{(a)} = I_{LA1}^{(a)}, \text{ кА.}$$

Для каждого вида несимметрии рассчитывают погрешности в определении токов прямой, обратной, нулевой последовательностей по формуле

$$\Delta I_i = \frac{|I_{LAi}^{(a)} - I_{LAi}^{(M)}|}{I_{LAi}^{(a)}} 100 \%,$$

где $i = 1, 2, 0$ – индекс, соответствующий симметричной последовательности.

Результаты расчетов свести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты расчетов

№ п/п	Виды повреждений	$I_{LA1}^{(M)}$, А	$I_{LA1}^{(a)}$, А	ΔI_1 , %	$I_{LA2}^{(M)}$, А	$I_{LA2}^{(a)}$, А	ΔI_2 , %	$I_{L0}^{(M)}$, А	$I_{L0}^{(a)}$, А	ΔI_0 , %
1	Обрыв одной фазы									
2	Обрыв двух фаз									

4. Методические указания

Основные положения теории продольной несимметрии

Продольная несимметрия в электрических системах (ЭС) может возникать вследствие неравенства фазных сопротивлений отдельных элементов, а также при обрывах и отключениях одной или двух фаз [1].

В условиях эксплуатации фазное отключение осуществляется не только в аварийных условиях, но и в целях проведения ремонтных, профилактических и испытательных работ. Такой режим ЭС связан с дополнительными потерями мощности, опасными перегревами двигателей и генераторов. Поэтому возникает необходимость в количественной оценке значений токов и напряжений при продольной несимметрии.

В электрических сетях напряжением 0,4 кВ с большим удельным весом однофазных потребителей очень сложно равномерно распределить нагрузки по фазам, поскольку они включаются независимо друг от друга в разные моменты времени. Главной причиной необоснованного увеличения потерь в таких сетях является *несимметричная нагрузка фаз*, под действием которой значительно увеличиваются потери электроэнергии в трансформаторе и ухудшается качество выходного напряжения. Увеличение этих потерь и ухудшение качества отпускаемой энергии зависят от применяемой *схемы соединения* обмоток силового трансформатора.

Как известно, по стандартам России наиболее распространенными схемами соединения обмоток распределительных трансформаторов считаются схемы соединения Y/Y_0 , Y/Δ , Y_0/Δ . Однако при несимметричной нагрузке в таких трансформаторах происходит искажение формы кривой фазных напряжений и резко возрастают потери энергии. Качественное улучшение связано с усложнением конструкции вторичных обмоток силового трансформатора, например, соединением

обмоток в «зигзаг», как это показано на рис. 4.2. Для соединения вторичных обмоток (НН) трансформатора в схему «зигзаг» вторичная обмотка каждой фазы составляется из двух половин; одна половина расположена на одном стержне, другая – на другом. Данные половины обмотки включены встречно, т. е. конец $x1$ соединен с концом $y2$ и т. д. Начала $a2$, $b2$ и $c2$ соединены и образуют нейтраль.

При соединении вторичных обмоток в «зигзаг» результирующие ЭДС обмоток, расположенных на разных стержнях, сдвинуты на 120° (рис. 4.3). Как уже было сказано выше, особенность данной схемы соединения является то, что каждая фаза вторичной обмотки (НН) одновременно располагается сразу на двух стержнях магнитопровода.

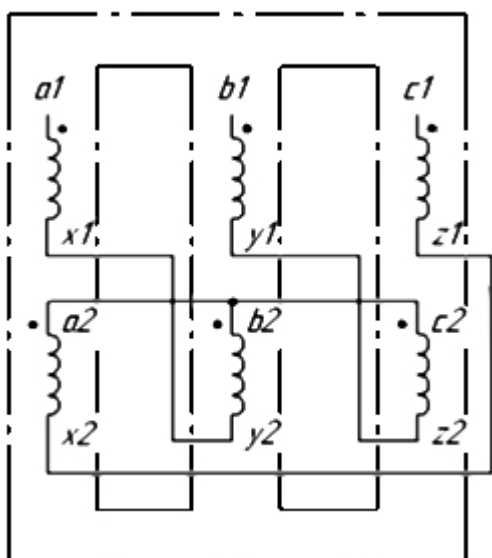


Рис 4.2. Схема соединения вторичных обмоток в «зигзаг»

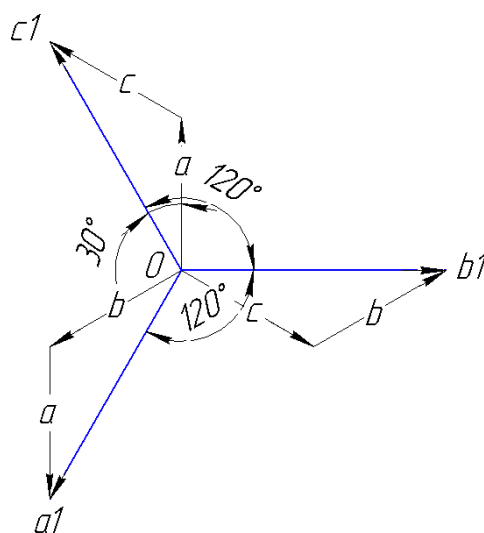


Рис. 4.3. Векторная диаграмма трансформатора с группой соединения обмоток Y/Z_0-11

Следовательно, при однофазной нагрузке, схема подключения которой показана на рис. 4.4, созданная вторичной обмоткой намагничивающая сила размагничивает сразу два стержня и первичный ток, компенсирующий это размагничивающее действие, распределяется по фазам первичной обмотки. Магнитное равновесие практически не нарушается, не возникает однонаправленный магнитный поток рассеяния (обмотки включены встречно), отсутствуют его негативные последствия.

Для распределительных силовых трансформаторов мощностью от 25 до 1250 кВ·А, защищаемых плавкими вставками (предохранителями) со стороны высшего напряжения (ВН), безусловное преимущество имеет схема соединения обмоток Y/Z_n . Несколько меньший эффект дают широко используемые схемы с группами соединения обмоток Δ/Y_n и Y/Y_n с симметрирующим устройством. Схему Y/Y_n для таких трансформаторов применять не следует.

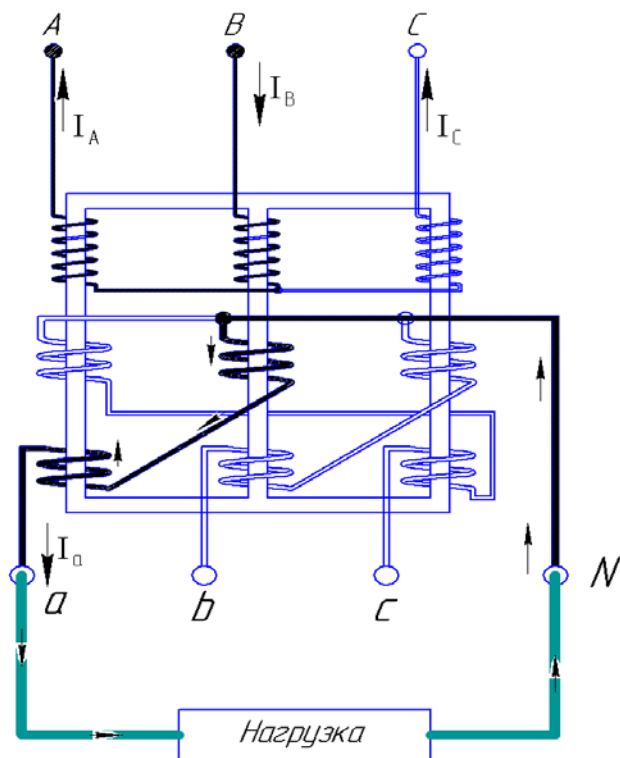


Рис. 4.4. Схема подключения однофазной нагрузки при соединении вторичных обмоток трансформатора в «зигзаг» с нулем

При несимметричной нагрузке значительный экономический эффект в разной степени дает использование трансформаторов со схемами соединения Y/Z_n , Δ/Y_n , Y/Y_n с симметрирующим устройством

вместо повсеместно используемых в настоящее время Y/Y_n . Кроме этого использование трансформаторов со схемами соединения Y/Z_n , Δ/Y_n , Y/Y_n с симметрирующим устройством позволяет значительно улучшить качество отпускаемой электрической энергии, что ведет также к снижению потерь электрической энергии в сетях напряжением 0,4 кВ.

При продольной несимметрии напряжение прямой последовательности вводится в рассечку элемента 4-й схемы замещения в точке несимметрии M_1 , как это показано на рис. 4.5, а. При преобразовании схемы замещения сначала суммируются последовательно включенные элементы 7 и 9, затем с учетом конфигурации схемы рассматриваются поэтапно последующие схемы замещения (рис. 4.5, б и 4.5, в). Схема замещения обратной последовательности аналогична схеме замещения прямой последовательности, однако в ней отсутствует ЭДС источника.

В схему замещения нулевой последовательности двухцепную линию электропередачи следует вводить трехлучевой схемой замещения (на рис. 4.5 в элементы 11, 12 и 13) с целью учета взаимоиндукции между цепями линии электропередачи. Результирующее сопротивление относительно точек обрыва (зажимов источника U_0) будет

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{12} + \frac{\underline{Z}_{11}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_7)}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_7}.$$

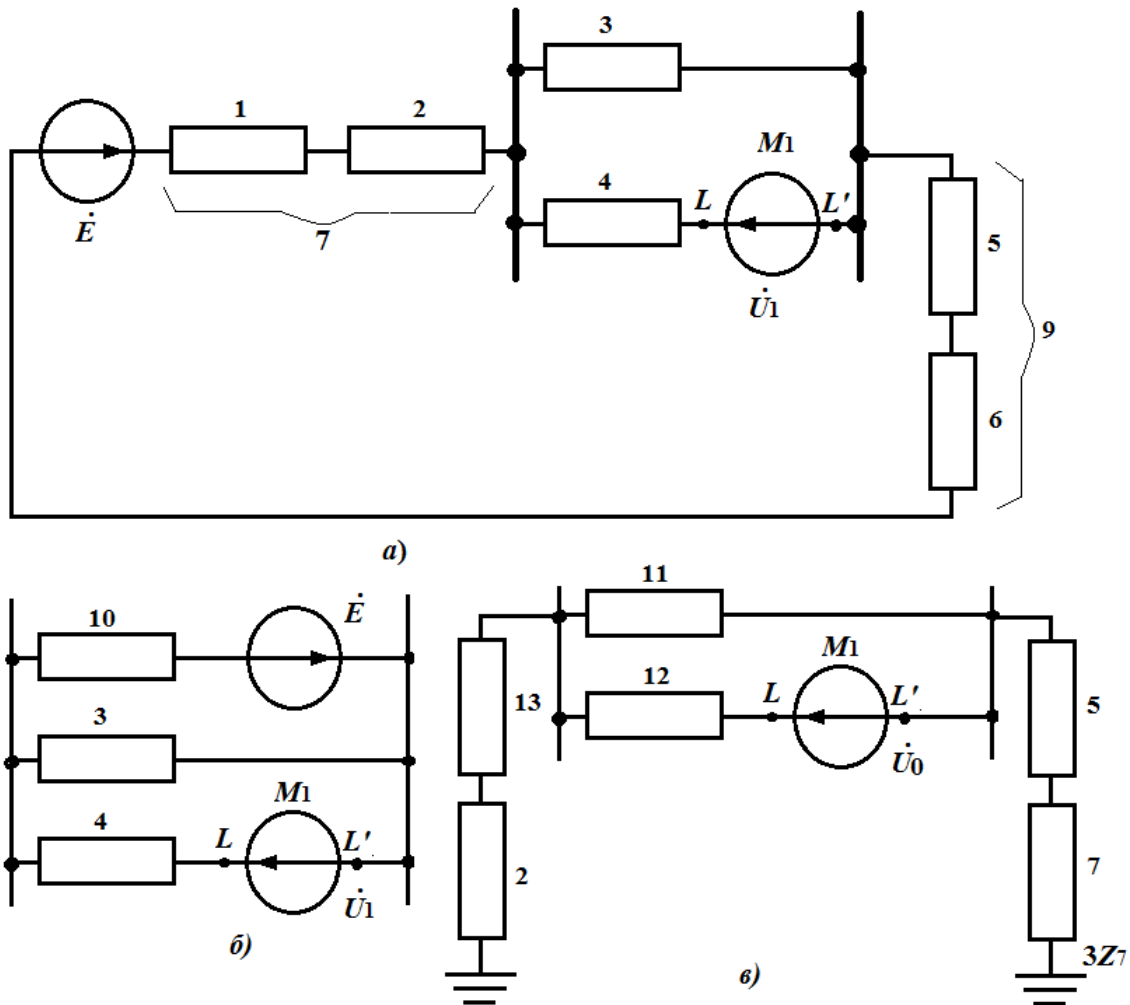


Рис. 4.5. Этапы преобразования схемы замещения с источником напряжения нулевой последовательности при продольной несимметрии в двухцепной линии электропередачи (3 и 4): а – исходная схема замещения; б – с преобразованным источником энергии \dot{E} ; в – преобразованная схема замещения относительно зажимов источника напряжения нулевой последовательности

Установленные соотношения между симметричными составляющими напряжений позволяют вместо трех схем замещения использовать

одну комплексную схему замещения для соответствующего вида продольной несимметрии. При составлении комплексных схем замещения в общем случае принимают, что продольная несимметрия сопровождается горением электрической дуги, поэтому в месте обрыва фазных проводов имеется сопротивление электрической дуги R_d , и схема каждой последовательности характеризуется полным сопротивлением ($\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$), соответствующим особой фазе (см. рис. 4.5).

Анализ процессов при продольной несимметрии проводится на основе метода симметричных составляющих. При этом предполагают, что повреждение имеет местный, сосредоточенный характер, а вся система продолжает оставаться конструктивно симметричной.

Для получения расчетных выражений в общем виде можно продольную несимметрию в какой-либо точке трехфазной системы представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений (в общем случае активно-индуктивных с полным сопротивлением Z), причем последние могут быть связаны между собой взаимной индукцией, различной для каждой пары фаз. Однако из-за громоздкости выражений и их малой наглядности при инженерных расчетах значительно проще, как и при поперечной несимметрии, проводить решение для каждого вида продольной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

Случаи включения сопротивлений Z в одну или две фазы соответствуют условию неодновременности расхождения контактов полюсов выключателя, при котором дуга отключаемого тока возникает еще не на всех полюсах. Для случая, когда имеется сопротивление, например в фазе A , изменится только одно граничное условие $\Delta \dot{U}_{LA} = \underline{Z} \dot{I}_{LA}$.

Когда одинаковые сопротивления Z включены, например, в фазы B и C изменяются два граничных условия из трех

$$\Delta \dot{U}_{LB} = \underline{Z} \dot{I}_{LB}; \Delta \dot{U}_{LC} = \underline{Z} \dot{I}_{LC}.$$

После разложения на симметричные составляющие из граничных условий следует:

$$\Delta \dot{U}_{L0} = \frac{Z}{3} \left[(\dot{I}_{L0} - \dot{I}_{LA1}) + (\dot{I}_{L0} - \dot{I}_{LA2}) \right];$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \frac{Z}{3} \left[(\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{LA2}) + (\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{L0}) \right];$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{Z}{3} \left[(\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{LA1}) + (\dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{L0}) \right].$$

Основные уравнения падений напряжений в схемах каждой последовательности, составленные для симметричной части системы при чисто индуктивной цепи, имеют вид (для фазы A):

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{A\Sigma} - jx_{L1\Sigma} \dot{I}_{LA1};$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = 0 - jx_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA2};$$

$$\Delta \dot{U}_{L0} = 0 - jx_{L0\Sigma} \dot{I}_{L0},$$

где $\Delta \dot{U}_{LA1}$, $\Delta \dot{U}_{LA2}$, $\Delta \dot{U}_{L0}$ – симметричные составляющие падения напряжения фазы A на несимметричном участке системы;

$x_{L1\Sigma}$, $x_{L2\Sigma}$, $x_{L0\Sigma}$ – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Таким образом, при анализе электрического состояния электрической системы при однократной продольной несимметрии решается система из шести уравнений. Основные расчетные соотношения продольной несимметрии при отсутствии сопротивления электрической дуги приведены в табл. 4.5.

С учетом исходных трех уравнений Кирхгофа для симметричных составляющих рассматриваемой схемы замещения и приведенных выше трех соотношений для напряжений симметричных составляющих относительно точек несимметрии можно найти расчетные выражения для всех симметричных составляющих токов и падений напряжений с учетом сопротивления электрической дуги, основные соотношения для которых приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.5

Основные расчетные соотношения продольной несимметрии при $R_D \rightarrow \infty$

Вид несимметрии	Граничные условия	Основные расчетные соотношения симметричных составляющих	Фазные величины
Разрыв одной фазы (A)	$\dot{I}_{LA} = 0$	$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L}^{(1)})}$	$\dot{I}_{LB}^{(1)} = \left(a^2 - \frac{x_{L2\Sigma} + ax_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \right) \dot{I}_{LA1}^{(1)}$

Вид несимметрии	Граничные условия	Основные расчетные соотношения симметричных составляющих	Фазные величины
Разрыв одной фазы (A)	$\Delta \dot{U}_{LB} = 0$ $\Delta \dot{U}_{LC} = 0$	$\dot{I}_{LA2} = \frac{-x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$ $\dot{I}_{L0} = \frac{-x_{L2\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$	$\dot{I}_{LC}^{(1)} = \left(a - \frac{x_{L2\Sigma} + a^2 x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \right) \dot{I}_{LA1}^{(1)}$
Разрыв двух фаз (B и C)	$\dot{I}_{LB} = 0$ $\dot{I}_{LC} = 0$ $\Delta \dot{U}_{LA} = 0$	$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L}^{(2)})}$ <p>где $x_{\Delta L}^{(2)} = x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}$;</p> $\dot{I}_{LA} = 3\dot{I}_{LA1}$	$\Delta \dot{U}_{LA1} = -(\Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0}) = jx_{\Delta L}^{(2)} \dot{I}_{LA1}$ $\Delta \dot{U}_{LA2} = -jx_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA2} = -jx_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA1}$ $\Delta \dot{U}_{L0} = -jx_{L0\Sigma} \dot{I}_{L0} = -jx_{L0\Sigma} \dot{I}_{LA1}$

На основании аналитических расчетов симметричных составляющих изображаются векторные диаграммы токов и напряжений при обрыве одной и двух фаз. Порядок их построения показан на рис. 4.6.

Схема разрыва фазы A при бесконечном значении сопротивления между точками разрыва приведена на рис. 4.6, а, соответствующие векторные диаграммы токов – на рис. 4.6, б.

Векторные диаграммы напряжений в точках разрыва для этого случая изображены на рис. 4.6, в и 4.6, г соответственно.

Таблица 4.6

Основные расчетные соотношения продольной несимметрии при конечном значении сопротивления электрической дуги

Определяемые величины	При включении сопротивления Z	
	в одну фазу [L ⁽¹⁾]	в две фазы [L ⁽²⁾]
\dot{I}_{LA1}	$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(1)})}$	$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(2)})}$
$Z_{\Delta L}^{(n)}$	$\frac{-1}{j(x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma})} + \frac{3}{Z}$ $x_{L2\Sigma} x_{L0\Sigma}$	$1 + \frac{Z}{\frac{jx_{L2\Sigma}}{Z + jx_{L2\Sigma}} + \frac{jx_{L0\Sigma}}{Z + jx_{L0\Sigma}}}$

Определяемые величины	При включении сопротивления Z	
	в одну фазу [$L^{(1)}$]	в две фазы [$L^{(2)}$]
\dot{i}_{LA2}	$\dot{i}_{LA2} = \frac{-Z_{\Delta L}^{(1)}}{jx_{L2\Sigma}} \dot{i}_{LA1}$;	$\dot{i}_{LA2} = \frac{-Z_{\Delta L}^{(2)}}{Z + jx_{L2\Sigma}} \dot{i}_{LA1}$;
\dot{i}_{L0}	$\dot{i}_{L0} = \frac{-Z_{\Delta L}^{(1)}}{jx_{L2\Sigma}} \dot{i}_{LA1}$	$\dot{i}_{L0} = \frac{-Z_{\Delta L}^{(2)}}{Z + jx_{L0\Sigma}} \dot{i}_{LA1}$;
$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$\Delta \dot{U}_{LA1} = Z_{\Delta L}^{(1)} \dot{i}_{LA1}$	$\Delta \dot{U}_{LA1} = Z_{\Delta L}^{(2)} \dot{i}_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{LA2}$	$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$\Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{jx_{L2\Sigma} (Z - Z_{\Delta L}^{(2)})}{Z + jx_{L2\Sigma}} \dot{i}_{LA1}$;
$\Delta \dot{U}_{L0}$	$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$\Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{jx_{L0\Sigma} (Z - Z_{\Delta L}^{(2)})}{Z + jx_{L0\Sigma}} \dot{i}_{LA1}$

Схема обрыва двух фаз и соответствующие этому режиму векторные диаграммы приведены на рис. 4.7.

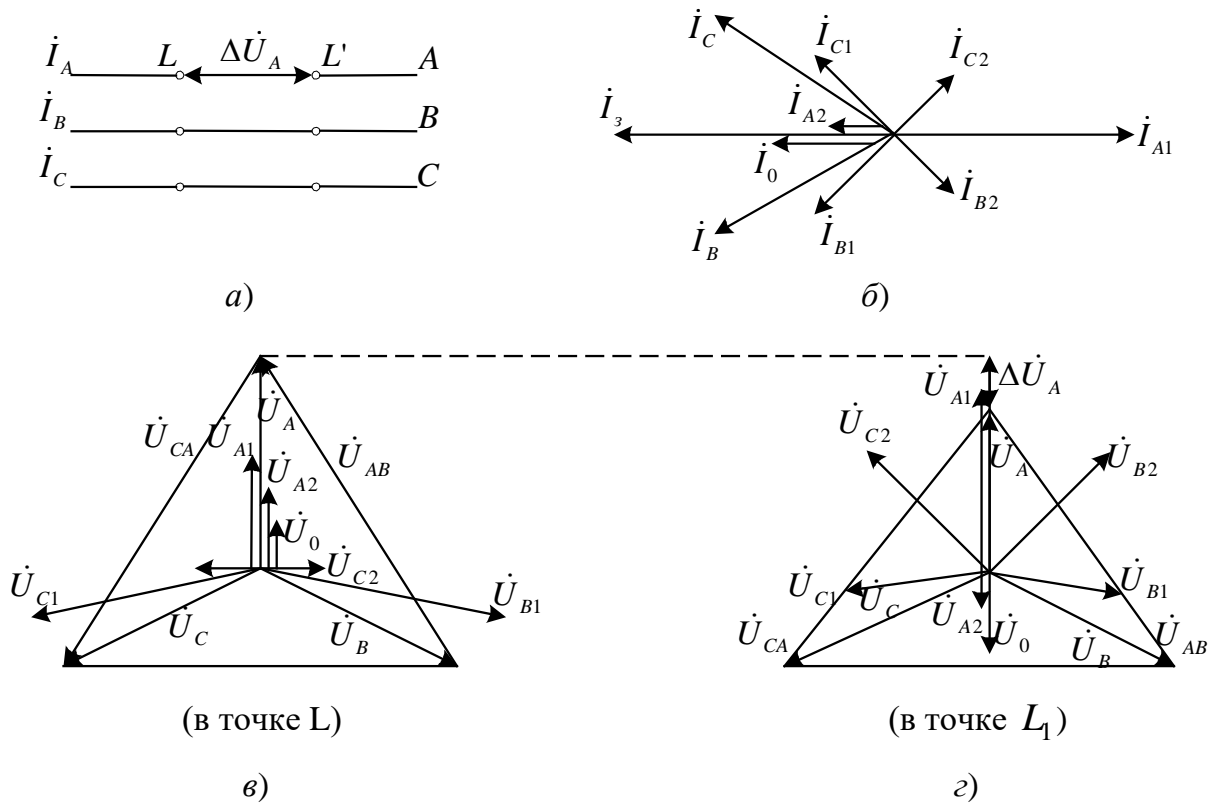


Рис. 4.6. Разрыв одной фазы трехфазной цепи

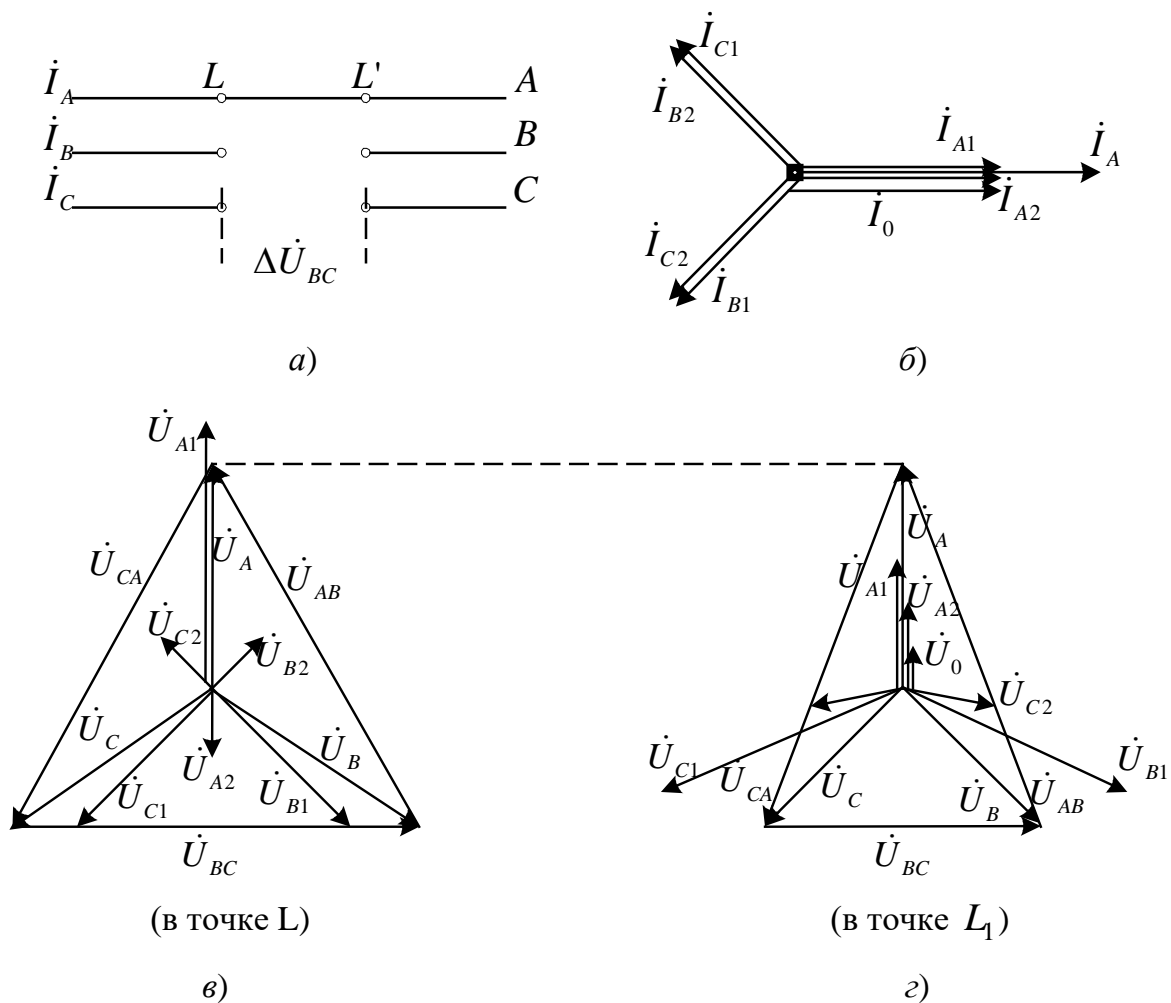


Рис. 4.7. Разрыв двух фаз трехфазной цепи: *a* – схема; *б* – векторная диаграмма токов; *в* – векторные диаграммы напряжений в точке разрыва *L*; *г* – в точке разрыва *L₁*

На основании изложенного можно составить для каждого вида несимметрии комплексную схему замещения простейшей системы электроснабжения, соединив соответствующим образом между собой схемы отдельных последовательностей и введя сопротивление Z , обуславливающее данную несимметрию. Такие схемы для случая обрыва одной и двух фаз показаны на рис. 4.8.

Комплексные схемы замещения удобны при использовании расчетных моделей для лабораторных исследований параметров режима заданного вида несимметрии в электрической сети и построении эпюра отдельных последовательностей. Если известен режим предшествующей разрыву одной или двух фаз, то определение токов и напряжений после разрыва удобно вести, используя принцип наложения. Неполнофазный режим можно представить как результат аварийного режима,

определяемого при условии, что в месте разрыва введен источник тока ($-I_{LA0}$) и все ЭДС из схемы удалены.

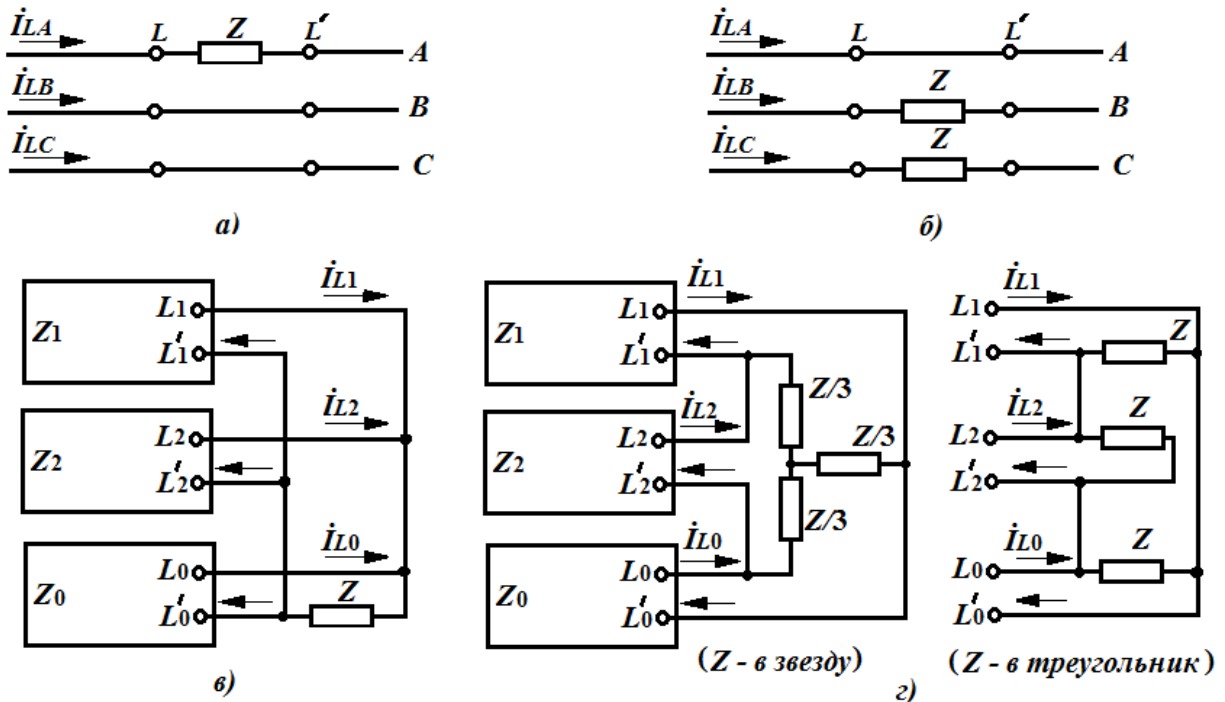


Рис. 4.8. Комплексные схемы замещения простейшей системы электроснабжения: а, в – обрыв одной фазы; б, г – обрыв двух фаз со схемой соединения сопротивлений, обуславливающих продольную несимметрию, в «звезду» и «треугольник»

5. Оформление отчета

Отчет составляется каждым студентом в соответствии с требованиями ЕСКД и должен содержать схему установки, результаты измерений и расчетов, выводы, ответы на приведенные ниже вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Как записываются граничные условия при различных однофазных продольных несимметриях?
2. Как составляются комплексные схемы замещения при продольной несимметрии?
3. Как определяются приращения напряжений при продольной несимметрии?
4. Как учитывается неодновременность расхождения контактов выключателей при анализе продольной несимметрии?
5. Как вводятся в схему замещения напряжения прямой и нулевой последовательностей?

6. Чем отличаются схемы различных последовательностей при обрывах фаз от схем при несимметричных коротких замыканиях?
7. Как определяются симметричные составляющие падений напряжений при обрыве одной фазы?
8. В каких соотношениях находятся симметричные составляющие падений напряжений при обрыве двух фаз?
9. Как влияет наличие заземляющих тросов на сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи?
10. В чем отличие расчетов продольной и поперечной несимметрии?
11. В каком случае целесообразно использовать схему соединения сопротивлений, обуславливающих продольную несимметрию, в «звезду» или «треугольник»?
12. Как оценить значение сопротивления, обуславливающего продольную несимметрию?
13. В чем отличие методик преобразования схем замещения при поперечной и продольной несимметриях?

Лабораторная работа № 5

ФАЗИРОВКА ТРАНСФОРМАТОРОВ, СБОРНЫХ ШИН ПОДСТАНЦИЙ И КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы – приобретение практических навыков при выполнении работ по определению фазировки трансформаторов, сборных шин подстанций и кабельных линий электропередачи.

В результате проведения работы студенты должны **знать** методы определения соответствия фазы кабеля, находящейся под напряжением, от распределительного устройства подстанции с предполагаемой одноименной фазой шин распределительного устройства, где производится фазировка; **уметь использовать** базовые знания по теоретическим основам электротехники при решении вопросов по определению целостности токоведущих жил и фазировке электротехнического оборудования; **приобрести навыки** составления расчетных схем и схем их замещения с учетом параметров трансформаторов, кабельных и воздушных линий;

формулирования и постановки задач расчета параметров установившихся режимов простейших электрических сетей; использования вычислительной техники для решения сетевых задач.

1. Объект и средства исследования

Объектом исследования служат силовые трансформаторы, входящие в состав лабораторного стенда, вторичные обмотки которых соединены в «звезду» с выведенной нулевой точкой и без вывода нулевой точки, а также измерительные трансформаторы напряжения, имеющие вторичные обмотки с заземленной нейтралью.


На данной лабораторной установке фазировку элементов электрической системы производят на стороне низшего напряжения с помощью вольтметра. В качестве модели кабельной линии используются отрезки кабеля типа ВВГ-3×2,5 длиной 10 м.

Измерение токов, напряжений и мощности при выполнении лабораторной работы осуществляется амперметрами, ваттметрами и вольтметрами, параметры которых приведены в табл. 5.1. Для оперативного измерения напряжения и омического сопротивления участка электрической цепи используется мультиметр.

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 33 (находятся в лаборатории).

Таблица 5.1

Измерительные приборы

№ п/п	Тип прибора	Система	Пределы измерений	Количество приборов
1	Вольтметр		0 – 600 В	1
2	Вольтметр	Электромагнитная	0 – 250 В	1
3	Амперметр	»	0 – 300 А	2
4	Ваттметр	Электродинамическая	0 – 3000 Вт	1
5	Мультиметр	APPA iMeter 5	U, I, Hz, Ω	1

2. Подготовка к работе

2.1. Изучить приведенные ниже методические указания и рекомендованную литературу [1, с. 6 – 44; 2, с. 6 – 22].

2.2. Ознакомиться со схемой установки, расположением ее элементов и правилами безопасной работы на установке. Необходимо помнить, что фазировка производится при включенных трансформаторах. При этом должны быть приняты меры по предотвращению несанкционированного включения напряжения на шины трансформаторов.

Перед началом фазировки для снятия остаточного заряда необходимо заземлить кабель на 2 – 3 мин.

2.3. По формулам подп. 4.1 и справочным таблицам Правил устройства электроустановок (ПУЭ) определить допустимое значение тока короткого замыкания для кабельной линии по условию ее термической стойкости в зависимости от материала и сечения жил кабелей, а также длительности прохождения тока короткого замыкания.

2.4. Заполнить бланк отчета по лабораторной работе с изложением заданий п. 2, составить необходимые схемы и таблицы. Привести основные расчетные формулы.

3. Рабочее задание

3.1. При обесточенных стендах провести внешний осмотр оборудования, убедиться в отсутствии повреждений, собрать схему для выполнения операции фазировки кабеля. Для этого одни концы отрезков кабеля подключить к зажимам трехфазных источников питания двух лабораторных стендов, а другие концы соединить с зажимами съемной панели одного из стендов по прилагаемой схеме (рис. 5.1).

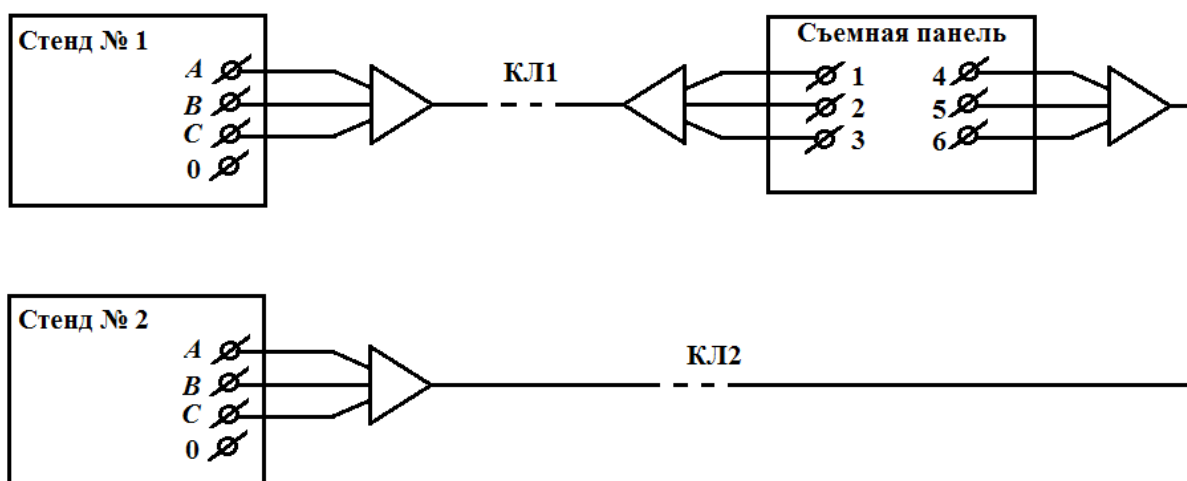


Рис. 5.1. Схема опыта для проведения фазировки кабеля

3.2. Собрать электромонтажную схему опыта и после проверки правильности ее соединений преподавателем включить питание стендов и трехфазных источников. Проверить наличие напряжения на всех шести фазируемых выводах съемной панели.

3.3. Выполнить фазировку кабельной линии электропередачи по методу вольтметра. Для этого щупом вольтметра касаться любого крайнего вывода (любой фазы), например зажима № 1 съемной панели, а другим щупом поочередно касаться трех выводов со стороны фазируемой линии (зажимы 4, 5, 6 съемной панели). Отсутствие показаний вольтметра указывает на одноименность фаз. Результаты опыта записать в отчет.

3.4. Повторить операцию фазировки для определения остальных одноименных пар выводов. Результаты опыта записать в отчет.

3.5. Выполнить операцию фазировки силовых трансформаторов, имеющих заземленные нулевые точки вторичных обмоток, по методу вольтметра в соответствии со схемой, показанной на рис. 5.2. Результаты опыта записать в отчет.

3.6. Выполнить операцию фазировки силовых трансформаторов с установкой перемычки между двумя выводами по методу вольтметра в соответствии со схемой, показанной на рис. 5.2. Результаты опыта записать в отчет.

4. Методические указания

4.1. Выбор и проверка силовых кабелей на соответствие их номинальных параметров расчетным в нормальном режиме и при коротких замыканиях

Силовые кабели выбирают по расчетному току, номинальному напряжению, способу прокладки, условиям окружающей среды и проверяют на термическую устойчивость при коротком замыкании путем расчета минимальной площади сечения токоведущей жилы по формуле

$$F_{т.у} = I_{\infty} \frac{\sqrt{t_{пр}}}{C},$$

где $F_{т.у}$ – минимальная площадь сечения токоведущей жилы кабеля;

I_{∞} – установившийся ток короткого замыкания;

$t_{пр}$ – приведенное время короткого замыкания, в течение которого установившийся ток I_{∞} выделяет такое же количество теплоты, что и изменяющийся ток короткого замыкания за действительное время, с;

C – термический коэффициент, соответствующий разности значений теплоты, выделенной в проводнике после и до короткого замыкания, значения которого принимаются для кабелей с медными жилами $C = 141$, с алюминиевыми $C = 85$.

После расчета минимальной площади сечения токоведущей жилы по термической устойчивости уточняют сечение токоведущих жил силовых кабелей с учетом установленной мощности электроприемников и проверяют его по допустимым потерям напряжения, термической стойкости к воздействию токов КЗ и на возгорание при протекании токов короткого замыкания.

Проверка силовых кабелей на возгорание при протекании тока КЗ осуществляется из предположения, что максимальный ток, протекающий в кабеле, равен действующему значению тока короткого замыкания в начале линии.

Силовые кабели на нагрев при протекании тока КЗ проверяют в соответствии с циркуляром Ц02-98 (Э) «О проверке кабелей на возгорание при протекании тока короткого замыкания». Проверку производят для каждого выбранного сечения кабелей, при этом для проверки выбирают кабельную линию с наиболее «тяжелыми» условиями, т. е. с максимальным значением тока КЗ в начале линии.

Температуру жилы силового кабеля при протекании тока КЗ определяют по формуле

$$\vartheta_k = \vartheta_n e^k + a(e^k - 1),$$

где ϑ_n – максимальная температура жилы до КЗ;

$a = 228$ °С – величина, обратная температурному коэффициенту электрического сопротивления при 0 °С;

$$\vartheta_n = \vartheta_0 + (\vartheta_{дд} - \vartheta_{окр}) \left[\frac{I_{раб}}{I_{дд}} \right]^2,$$

где ϑ_n – фактическая температура окружающей среды, °С;

$\vartheta_{\text{дд}}$ – длительно допустимая температура токопроводящих жил кабеля, °С;

$\vartheta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды:

– для кабелей в земле 15 °С;

– для кабелей на воздухе 25 °С;

$I_{\text{раб}}$ – рабочий ток, А;

$I_{\text{дд}}$ – длительно допустимый ток нагрузки кабеля, А;

$$k = \frac{b(I_k)t}{S^2},$$

где b – постоянная, характеризующая теплофизические характеристики материала токопроводящей жилы:

– для меди $b = 19,58 \text{ мм}^4/(\text{кА}^2 \cdot \text{с})$;

– для алюминия $b = 45,65 \text{ мм}^4/(\text{кА}^2 \cdot \text{с})$;

$(I_k)t$ – суммарный тепловой импульс;

I_k – действующее значение тока КЗ, кА;

t – длительность тока КЗ (время срабатывания резервной защиты вышестоящего автоматического выключателя (АВ)), с;

S – сечение токоведущей жилы кабеля, мм².

Термическая стойкость проводника обеспечивается, если площадь сечения S , мм², удовлетворяет неравенству $S \geq S_{\text{тер min}}$, где

$S \geq S_{\text{тер min}}$ – минимальное сечение проводника по условию термической стойкости, которое следует определять по формуле, мм²,

$$S_{\text{тер min}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_{\text{тер}}},$$

где $B_k = (I_k^{(3)})^2 t_{\text{откл}}$ – интеграл Джоуля, кА²·с;

$t_{\text{откл}}$ – время срабатывания защиты, зависящее от уровня напряжения (регламентированное время отключения тока КЗ), для сетей напряжением 220 кВ обычно принимается равным 0,1 с;

$C_{\text{тер}}$ – параметр, принимаемый по табл. 8 ГОСТ Р 52736-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания», значения которого равны, А·с^{1/2}/мм²:

- для кабеля 220 кВ – 90;
- для кабеля 10 кВ – 65.

Отметим, что температура жилы силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена не должна превышать 350 °С.

В соответствии с технической политикой ПАО «Россети» проектируемые, сооружаемые и модернизируемые кабельные линии электропередачи должны выполняться силовым кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция) и, поскольку половина производимых кабелей с СПЭ-изоляцией однофазные, то особую актуальность приобретает вопрос обеспечения режима экрана по току и перенапряжениям в случае включения кабеля в однофазном режиме.

Термическая стойкость электропроводящего экрана однофазного силового кабеля в сети напряжением 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью обеспечивается, если выполняется следующее условие [8]:

$$I_{ac} \geq I_{sc}^{(2)},$$

где I_{ac} – длительно допустимый ток медного экрана, кА;

$$I_{sc}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{sc}^{(3)} \text{ – ток двухфазного короткого замыкания, кА;}$$

$$I_{sc}^{(3)} \text{ – ток трехфазного симметричного короткого замыкания, кА.}$$

Значения тока I_{ac} ограничиваются сечением экрана, например:

- для кабеля 220 кВ (сечение экрана 120 мм²) – 24,36 кА;
- для кабеля 10 кВ (сечение экрана 25 мм²) – 19,2 кА.

4.2. Фазировка трансформаторов, имеющих обмотки НН до 380 В, без установки перемычки между зажимами

Этим методом (относится к прямым) фазируют силовые трансформаторы, вторичные обмотки которых соединены в «звезду» с выведенной нулевой точкой, а также измерительные трансформаторы напряжения, имеющие вторичные обмотки с заземленной нейтралью. Фазировку производят с помощью вольтметра (с пределом $2U_{\phi}$) со стороны обмотки НН. Фазируемые трансформаторы включают по схеме, представленной на рис. 5.2.

Нулевые точки вторичных обмоток при этом должны быть надежно заземлены или присоединены к общему нулевому проводу для создания между фазируемыми трансформаторами электрической связи, образующей замкнутый контур для прохождения тока через прибор. Прежде чем приступить к фазировке, проверяют симметричность

напряжений трансформаторов. Для этого вольтметр поочередно подключают к зажимам $a1 - b1$; $b1 - c1$; $c1 - a1$; $a2 - b2$; $b2 - c2$; $c2 - a2$. Если значения измеренных напряжений сильно отличаются друг от друга, проверяют положение переключателей ответвлений обоих трансформаторов. Переключением ответвлений уменьшают разницу напряжений до значений, не превышающих 10 %.

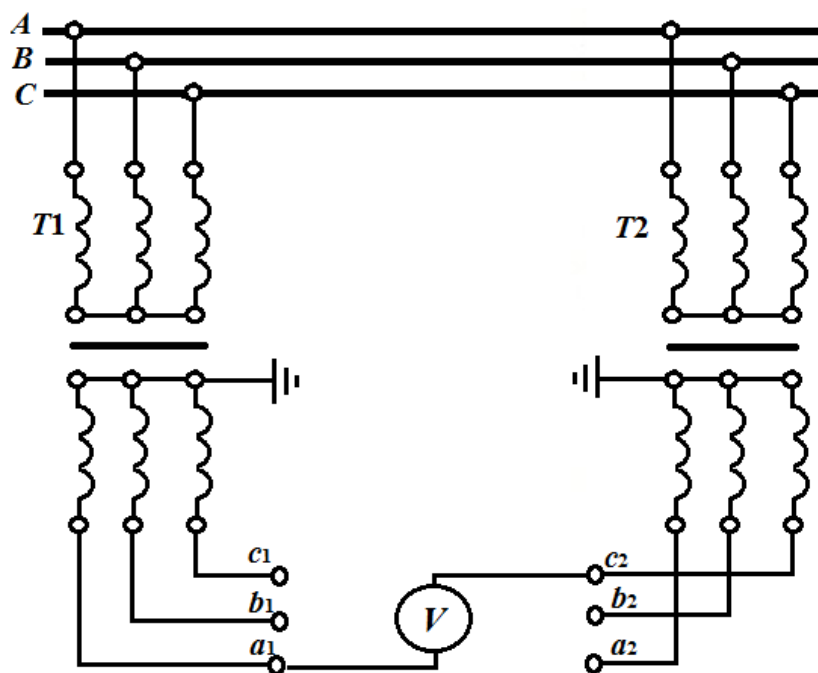


Рис. 5.2. Схема фазировки трансформаторов, имеющих заземленные нулевые точки вторичных обмоток

После проведения перечисленных операций приступают собственно к фазировке, т. е. поиску выводов, между которыми разность напряжений равна нулю. Для этого провод от вольтметра присоединяют к одному из выводов первого трансформатора, а другим проводом поочередно касаются трех выводов второго трансформатора (например, измеряют напряжение между выводами $a1 - a2$; $a1 - b2$; $a1 - c2$). Дальнейший ход фазировки зависит от полученных результатов. Если при одном из измерений (допустим, между выводами $a1 - a2$) показание вольтметра было равно нулю, то эти выводы отмечают, а вольтметр присоединяют ко второму выводу (например, $b1$) первого трансформатора и измеряют напряжение между выводами $b1 - b2$; $b1 - c2$. Если опять одно из показаний вольтметра (например, между выводами $b1 - b2$) окажется равным нулю, то фазировку считают законченной. Особой необходимости в измерении напряжения между выводами $c1 - c2$ нет, так как при двух нулевых показаниях вольтметра ($a1 - a2$ и $b1 - b2$) напряжение между третьей парой фаз, естественно, должно быть

равным нулю (см. рис. 5.2). Однако для подтверждения полученных результатов о совпадении фаз все же производят измерение между вводами $c1 - c2$. Выводы, между которыми не было разности напряжений, соединяют при включении трансформаторов на параллельную работу. У коммутационного аппарата такие выводы должны находиться непосредственно напротив друг друга.

Если после измерения ($a1 - a2$; $a1 - b2$; $a1 - c2$; $b1 - a2$; $b1 - b2$; $b1 - c2$) ни одно из показаний вольтметра не было равным нулю, то это говорит о том, что фазированные трансформаторы принадлежат к разным группам соединений и их включение на параллельную работу недопустимо. Фазировку на этом прекращают. На основании измерений строят векторные диаграммы и по ним судят, можно ли включить трансформаторы параллельно и какие пересоединения необходимо для этого выполнить. Характерными являются два случая. В первом из них соотношения между напряжениями

$$U_{a1-a2} = 1,15U_{\text{л}}; \quad U_{a1-b2} = 0,58U_{\text{л}}; \quad U_{a1-c2} = 0,58U_{\text{л}};$$

$$U_{b1-a2} = 0,58U_{\text{л}}; \quad U_{b1-b2} = 1,15U_{\text{л}}; \quad U_{b1-c2} = 0,58U_{\text{л}};$$

$$U_{a1-a2} = 2U_{\phi} = \frac{2}{\sqrt{3}}U_{\text{л}} = 1,15U_{\text{л}}.$$

Типичная для этого случая векторная диаграмма представлена на рис. 5.3. Из рисунка видно, что векторы вторичных ЭДС повернуты на 180° , а напряжение между зажимами $a1 - a2$ равно двойному фазному напряжению.

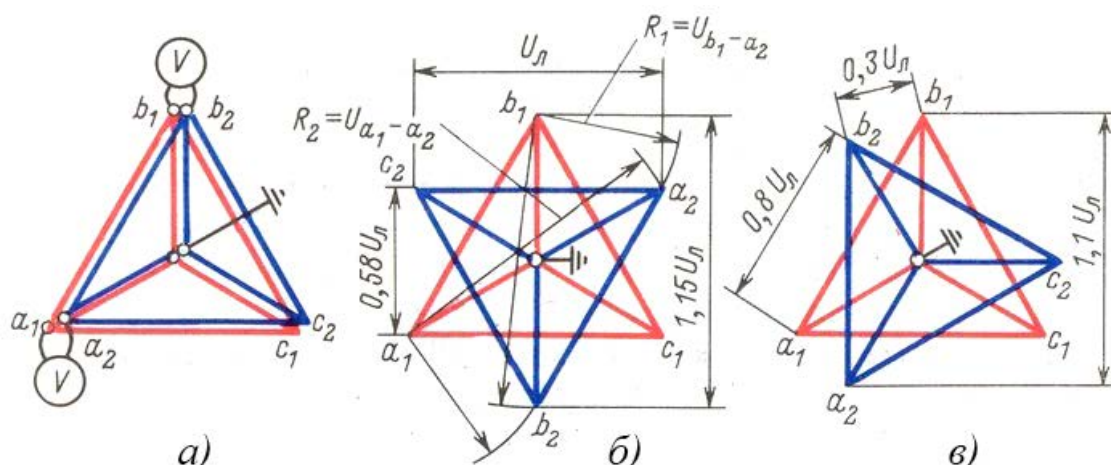


Рис. 5.3. Векторные диаграммы ЭДС обмоток НН фазированных трансформаторов при совпадении фаз (а), при сдвиге векторов на 180° , например при группах соединений Д/Ун-11 и Д/Ун-5 (б); при сдвиге векторов на 30° (У/Уа-0 и Д/Ун-11) (в)

Если оба фазлируемых трансформатора принадлежат к нечетным группам, то для включения их параллельно следует у одного из них пересоединить шины на выводах обмоток ВН и НН, т. е. произвести двойную перемаркировку фаз. Для трансформаторов четных групп (а также нулевой) необходимо внутреннее пересоединение обмоток. Во втором случае

$$U_{a1-a2} = 0,3U_{л}; \quad U_{a1-b2} = 0,8U_{л}; \quad U_{a1-c2} = 1,1U_{л};$$

$$U_{b1-a2} = 1,1U_{л}; \quad U_{b1-b2} = 0,3U_{л}; \quad U_{b1-c2} = 0,8U_{л}.$$

На типичной векторной диаграмме (см. рис. 5.3, в) векторы ЭДС сдвинуты на 30° . Такой угол сдвига может быть у трансформаторов четной (или нулевой) и нечетной групп. Параллельное включение таких трансформаторов не может быть выполнено ни при каких условиях. Техника построения векторных диаграмм показана на рис. 5.3, б. Треугольник линейных ЭДС первого трансформатора строят произвольно. А точки вершин второго треугольника находят путем засечек радиусами, численно равными напряжениям между зажимами $a1 - a2$ и $b1 - a2$; $a1 - b2$ и $b1 - b2$.

4.3. Фазировка силовых трансформаторов, имеющих обмотки НН до 380 В, с установкой перемычки между двумя выводами

Этот метод применяют при фазировке трансформаторов, вторичные обмотки которых не имеют нулевого вывода. Фазировку производят на стороне НН с помощью вольтметра. Его шкала должна быть рассчитана на двойное линейное напряжение. До включения фазлируемых трансформаторов под напряжение мегаомметром проверяют сопротивление изоляции вторичных обмоток относительно земли. Обмотки не должны иметь никаких соединений с землей, так как двойное замыкание на землю при наличии перемычки между выводами может привести к короткому замыканию. Перемычка (желательно с сопротивлением 3 – 5 кОм) устанавливается между двумя любыми зажимами одного и другого трансформатора (рис. 5.4). Ее наличие не представляет никакой опасности для трансформаторов, поскольку при этом не образуется замкнутой цепи для прохождения тока КЗ. Замкнутая цепь создается включением вольтметра, который, как известно, обладает сопротивлением десятков тысяч ом, и проходящий через него ток ничтожно мал. Для фазировки трансформаторы включают под напряжение со стороны ВН, после чего на зажимах НН каждого трансформатора вольтметром

проверяют симметрию напряжений, подведенных для фазировки. Всего производится шесть измерений. Фазировку выполняют в два приема. Сначала измеряют напряжение между одним из свободных выводов первого трансформатора и двумя свободными выводами второго трансформатора, например, между выводами $b_1 - b_2$ и $b_1 - c_2$. Затем измеряют напряжение между вторым свободным выводом и теми же выводами второго трансформатора ($c_1 - b_2$ и $c_1 - c_2$). Данные измерений зависят от того, между какими парами выводов установлена перемычка. Возможны три варианта ее установки: $a_1 - a_2$; $b_1 - a_2$; $c_1 - a_2$, которым соответствуют значения напряжения из табл. 5.2.

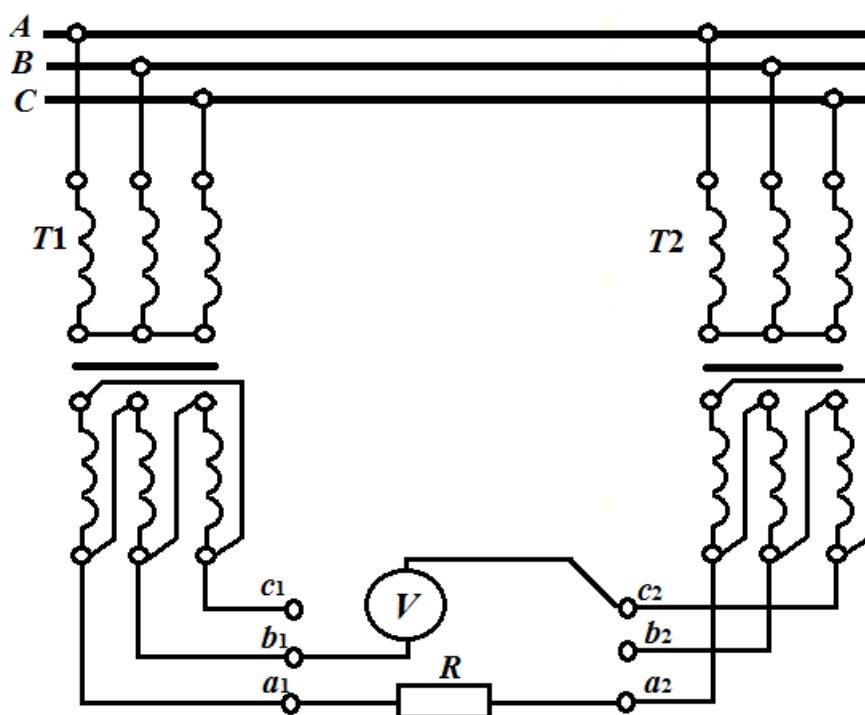


Рис. 5.4. Схема фазировки трансформаторов с установкой перемычки между их жазимами (R – резистор с сопротивлением 3 – 5 кОм)

Таблица 5.2

Пары выводов трансформаторов для установки перемычек

Соединяемые жазимы	$a_1 - a_2$	$b_1 - a_2$	$c_1 - a_2$
Напряжение между жазимами	$U_{b_1-b_2} = 0$	$U_{a_1-b_2} = 2U_{\text{л}}$	$U_{a_1-b_2} = 1,73U_{\text{л}}$
	$U_{b_1-c_2} = U_{\text{л}}$	$U_{a_1-c_2} = 1,73U_{\text{л}}$	$U_{a_1-c_2} = 2U_{\text{л}}$
	$U_{c_1-b_2} = U_{\text{л}}$	$U_{c_1-b_2} = 1,73U_{\text{л}}$	$U_{b_1-b_2} = U_{\text{л}}$
	$U_{c_1-c_2} = 0$	$U_{c_1-c_2} = U_{\text{л}}$	$U_{b_1-c_2} = 1,73U_{\text{л}}$

Построенные по этим данным векторные диаграммы ЭДС обмоток НН приведены на рис. 5.5. Из векторных диаграмм на рис. 5.5, а непосредственно следует, что трансформаторы имеют одинаковые группы соединений и параллельное включение их возможно при соединении между собой выводов $a1$ и $a2$; $b1$ и $b2$; $c1$ и $c2$. Так как две другие векторные диаграммы (рис. 5.5, в) построены для тех же трансформаторов, то и они позволяют сделать такой же вывод. Поэтому фазировку обычно заканчивают, как только будут получены данные одного из трех вариантов измерений и построена векторная диаграмма, аналогичная указанной на рис. 5.5, а, б, в.

Заметим, что характерным для этого случая фазировки (вариант соединения одноименных выводов $a1 - a2$) является получение двух нулевых показаний вольтметра при каждом приеме измерений. Однако тут же оговорим, что два нулевых показания могут быть получены и при разных группах соединений, когда векторы ЭДС сдвинуты на 240° . Но при этом соединенными перемычкой должны быть зажимы $c1$ и $a2$.

Векторные диаграммы приведены на рис. 5.5, г, д, е. Параллельное включение таких трансформаторов возможно только после пересоединения шин, подведенных к трансформатору, т. е. после циклической

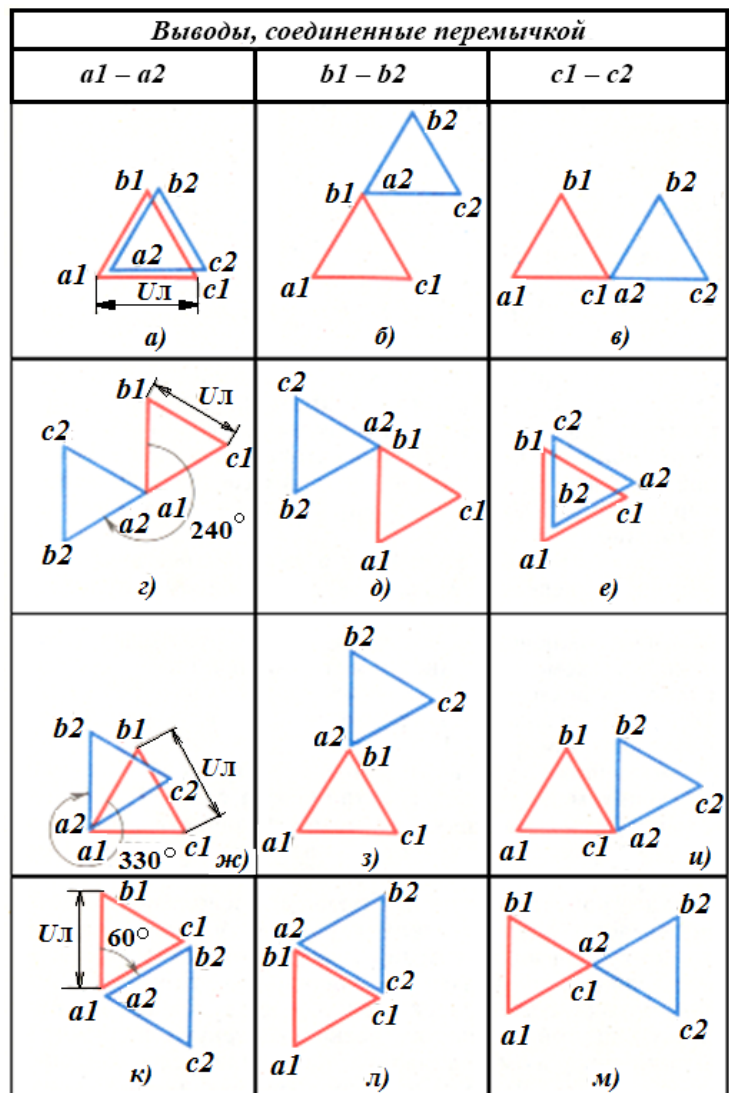


Рис. 5.5. Векторные диаграммы ЭДС при фазировке трансформаторов: а, б, в – при одинаковых группах соединений; г, д, е – при сдвиге векторов на 240° ; ж, з, и – на 330° ; к, л, м – на 60°

перемаркировки фаз. О невозможности параллельного включения трансформаторов свидетельствуют такие показания вольтметров, когда при всех трех вариантах установки переключки не получается ни одного нулевого показания (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Показания вольтметров между зажимами обмоток трансформатора

Соединяемые зажимы	$a1 - a2$	$b1 - a2$	$c1 - a2$
Напряжение между зажимами	$U_{b1-b2} = 0,5U_{л}$	$U_{a1-b2} = 1,9U_{л}$	$U_{a1-b2} = 1,4U_{л}$
	$U_{b1-c2} = 0,5U_{л}$	$U_{a1-c2} = 1,9U_{л}$	$U_{a1-c2} = 1,9U_{л}$
	$U_{c1-b2} = 1,4U_{л}$	$U_{c1-b2} = 1,9U_{л}$	$U_{b1-b2} = 0,5U_{л}$
	$U_{c1-c2} = 0,5U_{л}$	$U_{c1-c2} = 1,4U_{л}$	$U_{b1-c2} = 1,4U_{л}$

Из векторных диаграмм, приведенных на рис. 5.5, *ж, з, и*, видно, что векторы линейных ЭДС сдвинуты на 30° . Такой угол будет получен, если трансформаторы относятся к нечетной и четной (или нулевой) группам соединений, например $Y/Y-0$ и $Y/Д-11$, а их параллельное включение невозможно.

Если в процессе фазировки в двух из трех вариантов установки переключки получается по одному нулевому показанию, то это указывает на допустимость параллельного включения, но только после некоторых изменений в схеме. У трансформаторов нечетных групп со сдвигом векторов вторичных ЭДС на 60° (см. рис. 5.5, *к, л, м*) необходимо произвести двойную перемаркировку фаз.

4.4. Косвенные методы фазировки

4.4.1. Проверка совпадения фаз сборных шин и маркировка выводов вторичных обмоток трансформаторов напряжения при включении новых распределительных устройств

Расцветка сборных шин в новых распределительных устройствах (РУ) производится в соответствии с указаниями ПУЭ. Маркировка выводов вторичных обмоток трансформаторов напряжения выполняется наладочными организациями на основании паспортной и проектной документации. Проверка правильности выполненной расцветки и маркировки окончательно может быть произведена путем подачи от сети по одной из питающих линий напряжения в РУ.

Напряжение подается пофазно, т. е. сначала по фазе *A*, затем *B* и, наконец, по фазе *C*. При этом каждый раз проверяются соответствие расцветки фаз в РУ фазам энергосистемы и одновременно маркировка вторичных цепей по появлению напряжения на выводах той или иной фазы трансформатора напряжения. Вторичные обмотки других трансформаторов напряжения в дальнейшем фазируют с тем трансформатором напряжения, маркировка которого уже проверена. Фазировка производится теми же методами, что и фазировка силовых трансформаторов напряжением до 380 В.

Выбор метода зависит от схемы вторичной обмотки: заземлена ее нулевая точка или одна из фаз. В первом случае для фазировки применяют вольтметр со шкалой на двойное фазное напряжение, во втором – на двойное линейное напряжение, так как при заземлении фазы вторичных обмоток на выводы вольтметра может быть подано $2U_{\text{л}}$.

Трансформаторы напряжения одного класса напряжения фазируют при питании от одного источника. Если, например, необходимо проверить совпадение фаз двух трансформаторов напряжения, включенных со стороны ВН на разные системы шин (или секции), то для этого шины соединяют между собой включением шиносоединительного (или секционного) выключателя и затем выполняют фазировку. При фазировке оборудования косвенным методом предварительно проверяют совпадение фаз у трансформаторов напряжения.

4.4.2. Фазировка трансформаторов и линий при двойной системе шин

Этим методом фазируют трансформаторы и линии всех классов напряжения. В распределительном устройстве, где все системы шин находятся в работе, для производства фазировки освобождают одну из систем шин, т. е. выводят ее в резерв. При включенном шиносоединительном выключателе вольтметром проверяют соответствие маркировки фаз вторичных цепей трансформаторов напряжения рабочей и резервной систем шин. Затем отключают шиносоединительный выключатель и снимают с его привода оперативный ток.

На резервную систему шин включают цепь, фазировку которой следует выполнить (рис. 5.6).

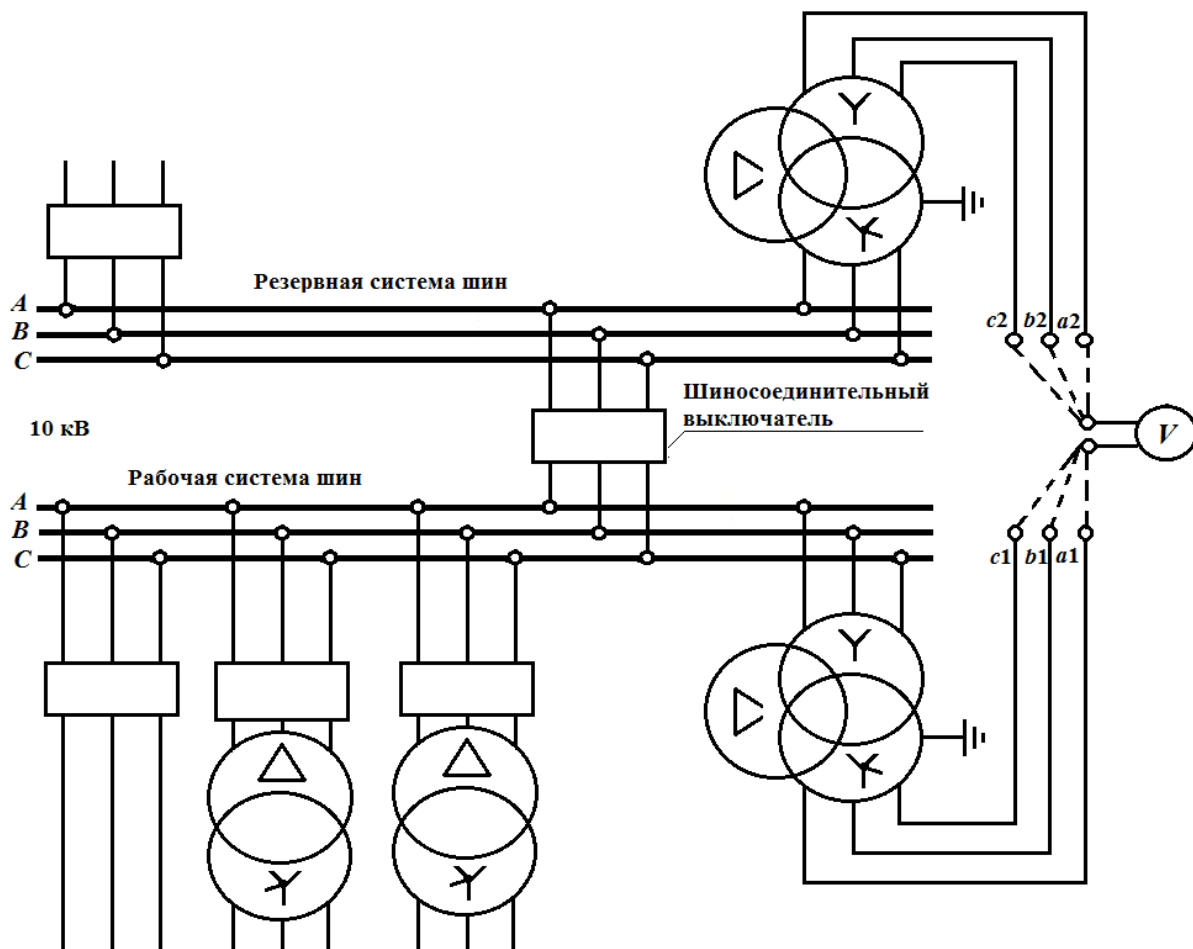


Рис. 5.6. Схема фазировки трансформатора напряжением 110/10 кВ косвенным методом на вторичных выводах трансформаторов напряжения

По фазуемой цепи с противоположного конца подают напряжение и производят фазировку на выводах вторичных цепей трансформаторов напряжения рабочей и резервной систем шин. Для этого вольтметром проводят шесть измерений в следующей последовательности: $a1 - a2$; $a1 - b2$; $a1 - c2$; $b1 - a2$; $b1 - b2$; $b1 - c2$. При совпадении фаз $a1$ и $a2$; $b1$ и $b2$; $c1$ и $c2$ (нулевые показания вольтметра) фазировку заканчивают и включением шиносоединительного выключателя, защиты на котором должны находиться в положении «отключение», сфазированную цепь включают на параллельную работу. Если при измерении напряжения между одноименными выводами будут получены не нулевые, а иные результаты, то измерения прекращают, фазуемую цепь отключают и осуществляют пересоединение токоведущих частей, добиваясь совпадения фаз. После этого фазировку производят заново.

4.5. Фазировка трехобмоточных трансформаторов

Фазировку выполняют в два приема. Сначала трансформатор включают под напряжение со стороны ВН и производят фазировку со стороны обмотки НН так же, как фазировают двухобмоточный трансформатор. При совпадении фаз трансформатор со стороны НН отключают, включают на резервную систему шин со стороны СН и осуществляют фазировку на этом напряжении. После получения положительных результатов в обоих случаях фазировки трансформатор считают сфазированным и включают его на параллельную работу тремя обмотками.

Фазировка трансформаторов и линий электропередачи подъемом напряжения с нуля

Фазировку по этому методу удобно применять в том случае, когда подъем напряжения с нуля производят одновременно и для других целей, например для проверки релейной защиты.

Схема фазировки двух трансформаторов представлена на рис. 5.7, а. Из схемы видно, что фазировуемый трансформатор Т1 включен параллельно другому, сфазированному уже с сетью трансформатору Т2. К обмоткам НН обоих трансформаторов подключен генератор. Перед фазировкой убеждаются в том, что фазировуемые трансформаторы имеют одинаковые коэффициенты трансформации (по положению переключающих устройств у ответвлений обмоток), в противном случае результаты фазировки могут быть ошибочными. Для производства фазировки генератор разворачивают до номинальной частоты вращения и медленно (с нуля) поднимают напряжение. При этом ведут наблюдение за амперметрами

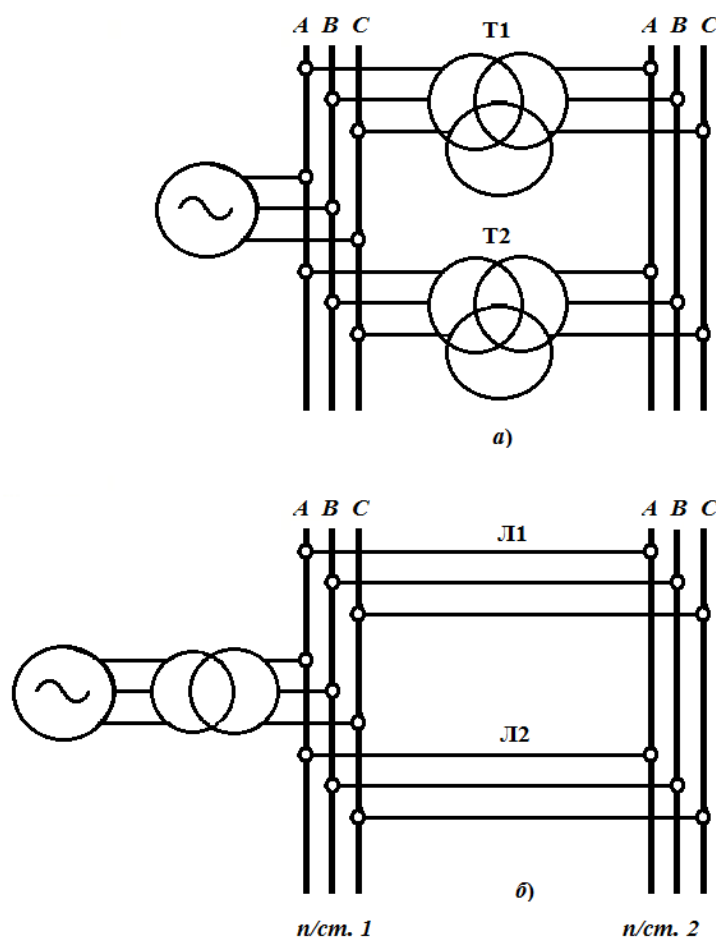


Рис. 5.7. Схема фазировки подъемом напряжения с нуля двух трансформаторов (а) и двух параллельных линий (б)

в цепи статора, по показаниям которых судят о совпадении фаз трансформаторов. Если показания амперметров близки к значению токов холостого хода, фазы трансформаторов совпадают. При несовпадении фаз амперметры покажут значительно больший ток, приближающийся с возрастанием напряжения к току короткого замыкания.

Фазировка линии по этому методу может быть произведена в том случае, если имеется другая, параллельная ей линия (рис. 5.7, б). Фазируемые между собой линии включают с каждой из сторон на одни и те же резервные шины подстанций 1 и 2, подключают генератор и поднимают напряжение с нуля. При несовпадении фаз по линиям начнет проходить ток короткого замыкания, что легко обнаружить по показаниям амперметров.

5. Контрольные вопросы

1. В чем сущность фазировки кабельных линий?
2. Какую цветовую маркировку имеют фазы в трехфазных цепях? Приведите последовательность, в которой располагаются шины в трехфазных установках напряжением до 1 кВ. Укажите, в какой последовательности располагаются шины в распределительных устройствах напряжением 6 – 220 кВ.
3. В чем отличие терминов «порядок следования фаз» и «порядок чередования фаз»?
4. В чем отличие расположения шин в пяти- и четырехпроводных цепях трехфазного переменного тока напряжением до 1 кВ?
5. В чем суть термина «группа соединения обмоток» трансформатора?
6. В чем отличие прямых методов выполнения фазировки от косвенных?
7. Как выполнить фазировку кабельной линии при помощи вольтметра?
8. Как произвести фазировку обесточенной кабельной линии при помощи мегаомметра?
9. Как выполнить фазировку кабельной линии напряжением более 1000 В при помощи указателя напряжения типа УВНФ?
10. Какова последовательность выполнения фазировки кабельных линий указателями напряжения?
11. Как осуществляется фазировка кабельных и воздушных линий напряжением 6 – 10 кВ, не имеющих непосредственной электрической связи?
12. В чем суть фазировки подъемом напряжения с нуля двух трансформаторов и двух параллельных линий?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи анализа переходных процессов в электрических системах, в частности анализ параметров режима при поперечной и продольной несимметрии, предполагает поиск путей оптимальных условий сооружения и эксплуатации электрической системы. Критерий оценки оптимальности – качество переходного процесса и наибольшая устойчивость при экономически оправданных вложениях средств на мероприятия, улучшающие качество переходных процессов и устойчивость.

То обстоятельство, что электроэнергетическая система, являясь по существу нелинейной системой с автоматическим регулированием и управлением, перерастает в систему кибернетического типа, и задачи анализа такой системы в различных режимах ближе к научным, чем к инженерным, обуславливает использование приближенных инженерных методов. Поэтому, чтобы показать инженерные подходы к анализу сложных систем, сначала вводят ограничения, позволяющие линеаризовать систему, а затем на их базе проводят анализ неподвижных магнитосвязанных цепей на холостом ходу и при коротком замыкании.

Оценка любого аварийного режима должна носить вероятностный характер, поскольку точно неизвестны ни сочетания начальных условий, при которых возникает авария, ни ее место, ни параметры системы в аварийном режиме. Кроме того, следует учитывать недостаток статистических данных о протекании аварий, связанных с нарушением устойчивости энергосистем, и случайный характер условий возникновения аварийных режимов.

Необходимость такого подхода обусловлена тем, что синхронные вращающиеся машины также могут быть приведены к двухобмоточной синхронной машине с неподвижными ортогональными обмотками в системе координат ротора. Именно это позволяет использовать уравнения Парка – Горева для анализа электромагнитных переходных процессов при различных режимах работы синхронных машин.

Короткие замыкания на шинах генератора крайне редки, поэтому логично далее рассматривать электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи, в частности, поперечной и продольной несимметрии линии электропередачи, а также замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения.

Такой подход к изложению материала позволяет провести инженерный расчет периодической и апериодической составляющих тока короткого замыкания в любой точке электрической системы и напряжения в месте продольной несимметрии с погрешностью 10 – 15 %, а также экспериментально исследовать процесс на модели в лабораторных условиях.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1972. – 544 с.
2. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 480 с.
3. Переходные процессы в электрических системах : учеб. для вузов / И. П. Крючков [и др.] ; под ред. И. П. Крючкова. – М. : МЭИ, 2008. – 416 с. – ISBN 978-5-383-00214-8.
4. Зуев, Э. Н. Математическое описание элементов электрической системы : учеб. пособие по курсу «Переходные режимы в электрических системах» / Э. Н. Зуев, В. А. Строев. – М. : МЭИ, 1983. – 84 с.
5. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 3-е изд., перераб. – М. : КНОРУС, 2012. – 648 с. – ISBN 978-5-406-00284-1.
6. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / И. П. Крючков [и др.] ; под ред. И. П. Крючкова и В. А. Старшинова. – М. : Академия, 2005. – 416 с. – ISBN 5-7695-5281-6.
7. Расчет токов при коротких замыканиях и устойчивости систем электроснабжения по практическим критериям : метод. указания к курсовой и расчетно-графической работам по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» / сост. Г. П. Колесник ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. – 86 с.
8. Современные технические средства передачи электроэнергии : метод. указания к самостоят. работе студентов / сост. Г. П. Колесник, С. А. Сбитнев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2015. – 76 с.
9. Современные технические средства передачи электроэнергии : метод. указания к практ. занятиям / сост. Г. П. Колесник ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2015. – 46 с.
10. Колесник, Г. П. Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие / Г. П. Колесник ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2004. – 128 с. – ISBN 5-89368-519-9.

11. Современные технические средства передачи электроэнергии: учеб. пособие / Н. П. Бадалян [и др.]. – Ковров : КГТА им. В. А. Дегтярева, 2019. – 192 с. – ISBN 978-5-86151-657-0.

12. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях : учеб. пособие для вузов / под ред. В. А. Веникова. – М. : Энергоиздат, 1983. – 504 с.

13. Основы современной энергетики : учебник : в 2 т. / под ред. Е. В. Аметистова. – 5-е изд., стер. – М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2010. Т. 2. Современная электроэнергетика / под ред. А. П. Бурмана, В. А. Строева. – 2010. – 632 с. – ISBN 978-5-38362-256-0.

14. Кабельные и воздушные линии электропередачи : учеб. пособие (бакалавриат) / Н. П. Бадалян [и др.] ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 262 с. – ISBN 978-5-9984-0973-8.

15. Бадалян, Н. П. Технологическое оборудование электроэнергетических систем : учеб. пособие / Н. П. Бадалян, Г. П. Колесник ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 232 с. – ISBN 978-5-9984-1149-6.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	6
<i>Лабораторная работа № 1. Моделирование поперечной несимметрии в электрической системе комплексной схемой замещения</i>	<i>31</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Экспериментальное исследование переходных процессов в трехфазном силовом трансформаторе</i>	<i>49</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности трехфазного трансформатора</i>	<i>67</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Моделирование продольной несимметрии в электрических системах комплексной схемой замещения</i>	<i>81</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Фазировка трансформаторов, сборных шин подстанций и кабельных линий электропередачи.....</i>	<i>98</i>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	115
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	117

Учебное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Лабораторный практикум

Авторы-составители:

БАДАЛЯН Нораир Петикович
КОЛЕСНИК Григорий Платонович

Редактор А. П. Володина

Технический редактор Ш. В. Абдуллаев

Корректор Н. В. Пустовойтова

Компьютерная верстка П. А. Некрасова

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 09.09.21.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 6,98. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.