

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
№ 1, 2, 3, 4 для студентов факультета энергетики
по направлению 140400.62 «Электроэнергетика
и электротехника» всех форм обучения

УДК 621.311.2+621.311.4](076.5)
Э 455

Составители:

канд. техн. наук, доцент *В.И. Ключенович*
канд. техн. наук, доцент *Г.А. Сарапулов*
ст. преподаватель *Л.Б. Быкова*

Рецензент канд. техн. наук, доцент *М.А. Купарев*

Работа выполнена на кафедре электрических станций

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ

Методические указания

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кинит*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Подписано в печать 24.01.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экз.
Уч.-изд. л. 3,48. Печ. л. 3,75. Изд. № 281/13. Заказ № Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

© Новосибирский государственный
технический университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. ИСПЫТАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ	5
Лабораторная работа № 2. ИСПЫТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА.....	19
Лабораторная работа № 3. ИСПЫТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ. ЗНАКОМСТВО СО СХЕМОЙ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ	32
Лабораторная работа № 4. ТЕРМИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ НА ПРОВОДНИКИ	45
Литература.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Каждая лабораторная работа рассчитана на *четыре часа самостоятельной внеаудиторной* работы студентов, в течение которых студент должен изучить материал, относящийся к указанной теме, не только по данным методическим указаниям, но и по приведенной в работе литературе, и *четыре часа аудиторных* занятий в лаборатории электрических станций. Студенты с целью и содержанием лабораторной работы должны знакомиться заранее, чтобы с наибольшим эффектом использовать время, отведенное для ее выполнения.

К предстоящей лабораторной работе кроме теоретической подготовки студентам необходимо иметь подготовленный заранее протокол-отчет.

К работе допускаются студенты, представившие оформленный отчет и защитившие предыдущую работу.

Подготовленный заранее отчет должен иметь:

- 1) титульный лист с указанием наименования работы и ФИО студентов, выполняющих данную работу;
- 2) схемы испытаний или проводимых опытов;
- 3) необходимые расчеты;
- 4) таблицы, в которые должны заноситься результаты проведенных опытов;
- 5) выводы.

Лабораторная работа № 1

ИСПЫТАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить конструкцию коммутационных аппаратов, их электрические схемы и испытать их по некоторым пунктам программы [4].

Из множества видов низковольтных аппаратов широко применяются такие коммутационные аппараты, как контакторы, магнитные пускатели и автоматы максимального тока. Они служат для управления электрическими цепями и приемниками электрической энергии напряжением до 1000 В – электродвигателями, осветительными приборами, трансформаторами, выпрямителями, нагревателями и т. п.

Характеристики коммутационного аппарата должны соответствовать параметрам электроприемника для надежного и бесперебойного электроснабжения и успешного отключения аппаратом цепи вручную, дистанционно или автоматически.

Чтобы обеспечить достаточную степень надежности работы, аппараты, вторичные цепи, электропроводку напряжением до 1000 В необходимо испытывать в полном объеме в соответствии с ПУЭ [4]. Испытания проводят при сдаче установок в эксплуатацию и периодически в процессе эксплуатации. В программу испытаний входят измерение сопротивления изоляции, испытание повышенным напряжением промышленной частоты, проверка действия расцепителей автоматов, проверка работы контакторов и автоматов при пониженном и номинальном напряжении оперативного тока, проверка фазировки.

1.2. ИСПЫТАНИЕ КОНТАКТОРА

1.2.1. НАЗНАЧЕНИЕ КОНТАКТОРА

Контактор служит для дистанционного и автоматического управления электрическими цепями и приемниками электрической энергии постоянного и переменного тока напряжением до 1000 В [3].

Контакторы рассчитаны на частые включения и отключения коммутируемых ими цепей, поэтому снабжаются эффективными дугогасительными устройствами при установке в цепях постоянного тока.

Контакторы не имеют устройств защиты от перегрузки и токов короткого замыкания и в условиях эксплуатации дополняются соответствующими аппаратами – предохранителями, автоматами максимального тока и т. п.

Стенд лабораторной работы № 1 оборудован контактором типа КМВ-621.

1.2.2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОНТАКТОРА

Схема управления электроприемниками с помощью контактора показана на рис. 1.1. Силовая цепь включает электрическую сеть постоянного тока, предохранители F, главные контакты КМ:1 контактора, электродвигатель постоянного тока М.

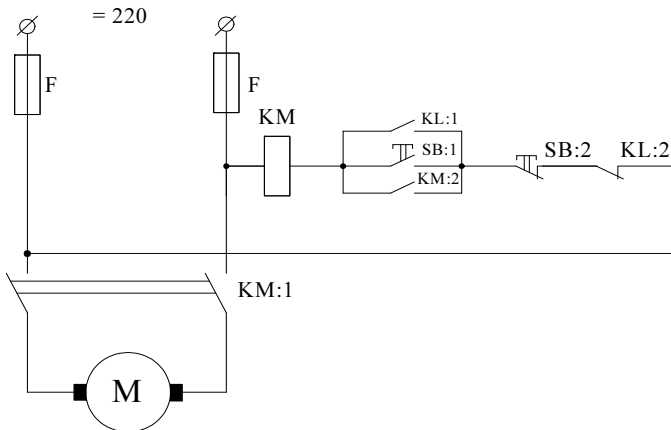


Рис. 1.1. Принципиальная схема управления электродвигателем с помощью контактора

Цепь управления включает катушку КМ электромагнита контактора, блок-контакты КМ2 контактора, кнопку пуска SB:1 и кнопку останова SB:2, контакт KL:1 пускового реле и контакт KL:2 реле останова.

Управление можно осуществлять дистанционно (вручную) и автоматически. При ручном управлении нажимают кнопку SB:1. При этом образуется цепь: (+)- KL:2- SB:2- SB:1-КМ(-); катушка обтекается током, магнитная система сближает контакты КМ:1 и замыкает их, подавая питание на двигатель М. Одновременно замыкаются блок-контакты КМ:2, которые шунтируют кнопку SB:1, после чего при отпуске катушки КМ продолжает обтекаться ток по цепи (+)- KL:2- SB:2- КМ:2-КМ(-), и контактор остается включенным. Для остановки двигателя нажимают кнопку останова SB:2. При этом цепь управления разрывается кнопкой, катушка КМ обесточивается, контакты КМ:1 разрывают цепь питания двигателя, а блок-контакт КМ:2 разрывает цепь управления.

При автоматическом управлении роль пускового органа выполняет контакт KL:1, а действие схемы при пуске двигателя аналогично описанному выше при замене SB:1 на KL:1. Остановка электродвигателя производится разрывом контакта KL:2 реле останова.

1.2.3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

подавляющее количество аварий в электроустановках происходит из-за нарушения электрической прочности изоляции элементов, находящихся под напряжением. Поэтому оценка состояния изоляции становится наиболее важным и часто выполняемым видом испытаний.

На электрическую прочность изоляции влияют длительность ее эксплуатации, температура, влажность, загрязнение и прочие факторы. За интегральный параметр, по которому судят о состоянии изоляции, принимают сопротивление изоляции. В соответствии с ПУЭ [4] сопротивление изоляции катушки контактора и главных контактов должно быть не ниже 0,5 МОм, а цепей управления контактором не ниже 1 МОм.

Для определения сопротивления изоляции элементов контактора используют мегаомметр на напряжение 500...1000 В [4]. Испытываемый элемент электрически выделяют из цепи и присоединяют к его токоведущей части один из выводов мегаомметра. Другой вывод мегаомметра присоединяют к металлической детали, соприкасающейся с изоляцией испытываемого элемента: магнитопроводом, панелью, крепежными изделиями и т. п. Рукоятку мегаомметра вращают со скоростью около 30 об/мин и через 15...20 с после начала вращения фикси-

руют показание мегамметра, не прекращая вращения его рукоятки. Величину сопротивления изоляции катушки, главных контактов и блок-контактов записывают в отчете.

1.2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВТЯГИВАНИЯ И ОТПУСКА

Напряжением вытягивания называется напряжение, при котором замыкаются главные контакты аппарата. Напряжение вытягивания для холодной катушки меньше, чем нагретой, так как у последней больше сопротивление. Поскольку в условиях эксплуатации температура катушек близка к предельно допустимой (90 °С для изоляции класса «У» и 105 °С для класса «А»), напряжение вытягивания следует определять при этих температурах катушки. По нормам требуется, чтобы в этих условиях напряжение вытягивания было не ниже 85 % от номинального.

Напряжением отпуска называется напряжение, при котором размыкаются главные контакты аппарата. Напряжение отпуска составляет 10...15 % от номинального напряжения катушки контактора.

Для испытания собирают схему, показанную на рис. 1.2. Реостат в ней использован в качестве делителя напряжения. Включают автомат QF и реостатом устанавливают напряжение, равное номинальному; при этом катушка КМ обтекается током и контактор включается. Контактор держат включенным около пяти минут, чтобы катушка прогрелась до температуры, близкой к нормальной, после чего реостатом снижают напряжение до нуля, отключая контактор. Схема готова для испытания.

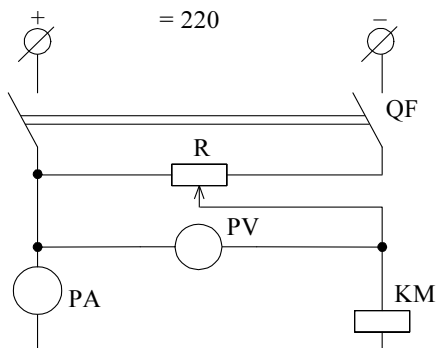


Рис. 1.2. Схема для определения напряжений вытягивания и отпуска и тока катушки контактора

Реостатом плавно повышают напряжение до значения, при котором замыкаются главные контакты контактора. Это напряжение заносят в табл. 1.1, после чего его поднимают до номинального. При этом по амперметру фиксируют величину тока, потребляемого катушкой, и заносят в таблицу. Затем с помощью реостата плавно снижают напряжение до значения, при котором размыкаются главные контакты контактора. Это напряжение фиксируют в качестве напряжения отпуска в табл. 1.1.

Испытание проводят три раза и находят средние значения напряжений втягивания и отпуска. По ним определяют коэффициент возврата контактора как отношение средних значений напряжения отпуска к напряжению втягивания: $K_v = U_{отп}^{cp} / U_{вт}^{cp}$. Коэффициент возврата для контакторов постоянного тока лежит в пределах 0,15...0,2.

Таблица 1.1

**Результаты измерения напряжений втягивания и отпуска
контактора и тока катушки**

Наименование измеряемой величины	Обозначение	Результаты измерений			Среднее значение	Коэффици- ент возврата
		1	2	3		
Напряжение втягивания	$U_{вт}, В$					
Напряжение отпуска	$U_{отп}, В$					
Ток катушки	$I_k, А$					

Значение тока катушки сравнивают с паспортным. Если опытный ток получился существенно больше паспортного, значит, в катушке произошло витковое замыкание и ее нельзя эксплуатировать.

**1.2.5. ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННОГО ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ
КОНТАКТОРА**

Собственным временем включения контактора называют время от момента подачи питания на катушку до момента касания контактов.

Схема измерения времени включения показана на рис. 1.3.

Сначала включают автоматы 1-QF переменного и 2-QF постоянного тока. Замыкают кнопку SB, при этом срабатывает реле KL и одновременно замыкает свои контакты 1 и 2, подающие питание на катушку КМ и обмотку секундомера РТ. Секундомер начинает отсчитывать

время, а катушка КМ притягивать якорь и сближать контакты. В момент замыкания контактов контактора секундомер остановится, так как замкнувшийся контакт КМ:1 шунтирует его обмотку.

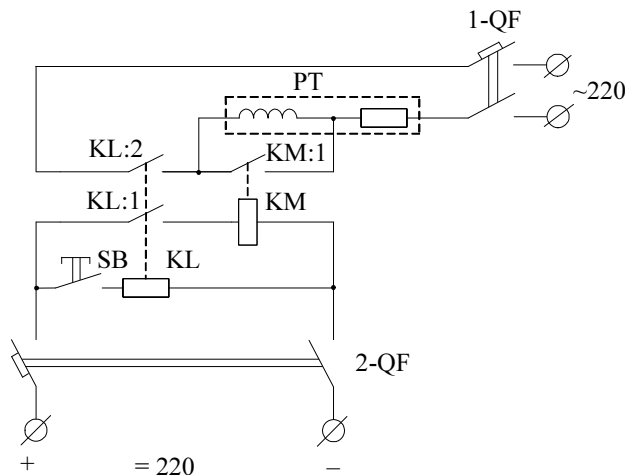


Рис. 1.3. Схема определения собственного времени включения контактора

Опыт повторяют три раза, по трем отсчетам находят среднее значение времени включения и сравнивают с паспортным, которое у контакторов типа КП лежит в пределах 0,07...0,4 с.

1.2.6. ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННОГО ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ КОНТАКТОРА

Собственным временем отключения контактора называется время от момента снятия питания с катушки до момента появления зазора между контактами.

Схема измерения времени отключения показана на рис. 1.4.

Включают автомат 2-QF, при этом катушка КМ обтекается током, контактор срабатывает и замыкает свой контакт. Включают автомат 1-QF. Секундомер при этом не работает, поскольку его обмотка шунтирована контактом КЛ2. Включают кнопку SB. При этом срабатывает промежуточное реле КЛ и одновременно размыкает свои контакты 1 и 2. Секундомер приходит в движение, и одновременно катушка КМ обесточивается и контакт КМ:1 начинает размыкаться. При появ-

лении зазора в контакте КМ:1 разрывается цепь питания секундомера РТ и он останавливается, фиксируя время отключения контактора.

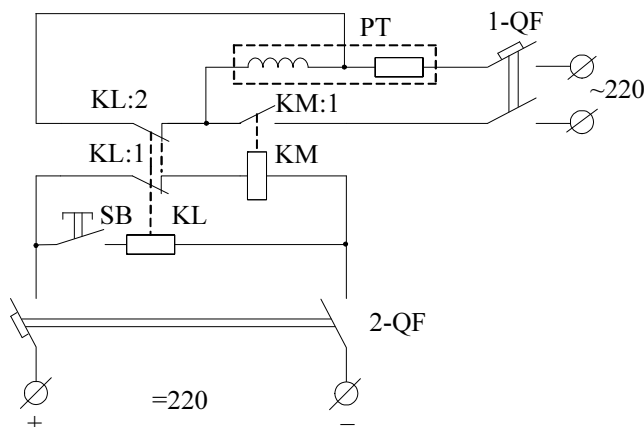


Рис. 1.4. Схема для определения собственного времени отключения контактора

Опыт проделывают три раза, по трем отсчетам находят среднее значение времени отключения и сравнивают его с паспортным, которое для контакторов типа КП лежит в пределах 0,07...0,12 с.

1.3. ИСПЫТАНИЕ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ

1.3.1. НАЗНАЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ

Магнитный пускатель предназначен преимущественно для дистанционного и автоматического управления асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями переменного тока напряжением до 1000 В, защиты их от перегрузки и от понижения напряжения в сети [3], а также от работы электродвигателей на двух фазах, так как этот режим сопровождается токами перегрузки.

Для защиты от перегрузок в пускатель встроены тепловые реле. Тепловые реле магнитного пускателя не используются для защиты двигателя от коротких замыканий, так как они работают с выдержкой времени. Защита двигателей от коротких замыканий выполняется с помощью предохранителей. При внезапных посадках напряжения до величин, не превышающих напряжение отпуска, катушка электромаг-

нита магнитного пускателя не удерживает якорь и происходит отключение. Таким образом, отключаются электродвигатели, не подлежащие самозапуску.

1.3.2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ

Схема управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя показана на рис. 1.5.

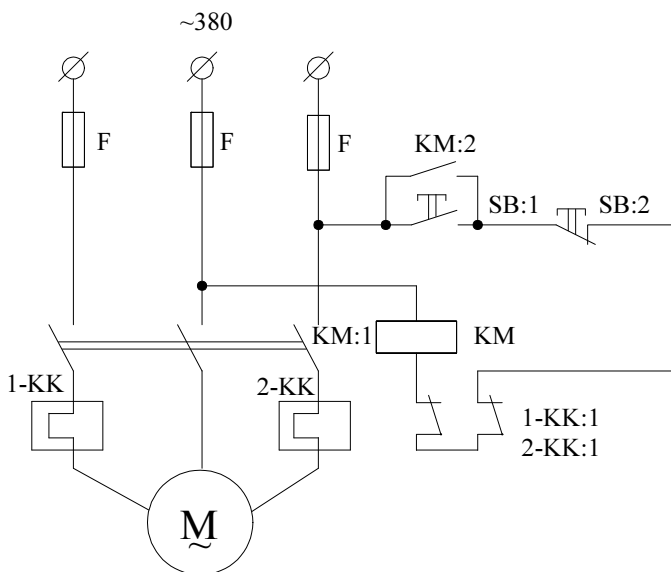


Рис. 1.5. Принципиальная схема управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя

Силовая цепь включает предохранители F (либо автомат максимального тока), контакты пускателя KM:1, нагревательные элементы тепловых реле 1-KK и 2-KK, электродвигатель M. Цепь управления включает кнопки пуска SB:1 и останова SB:2, блок-контакты KM:2 пускателя, контакты 1-KK:1 и 2-KK:1 тепловых реле, подвижная часть которых выполнена на биметаллических пластинах, и катушку KM пускателя.

Нажатием кнопки SB:1 замыкают цепь катушки KM электромагнита, который притягивает якорь и замыкает связанные с ним контакты

КМ:1 и блок-контакт КМ:2. Последний шунтирует кнопку SB:1, и пускатель остается включенным при отпускании кнопки. Отключают пускатель нажатием кнопки SB:2.

При перегрузке двигателя во время работы температура нагревателей тепловых реле возрастает, биметаллические пластинки контактов 1-КК:1 и 2-КК:1 изгибаются, эти контакты размыкаются и разрывают цепь катушки электромагнита КМ. Двигатель отключается.

1.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВТЯГИВАНИЯ И ОТПУСКА

Схема для определения напряжений втягивания и отпуска показана на рис. 1.6. Понятия о напряжениях втягивания и отпуска для магнитного пускателя те же, что и для контактора, приведенные в разд. 1.2.4. Для подготовки пускателя к испытанию следует включить его на 3...5 минут для прогрева катушки и магнитной системы.

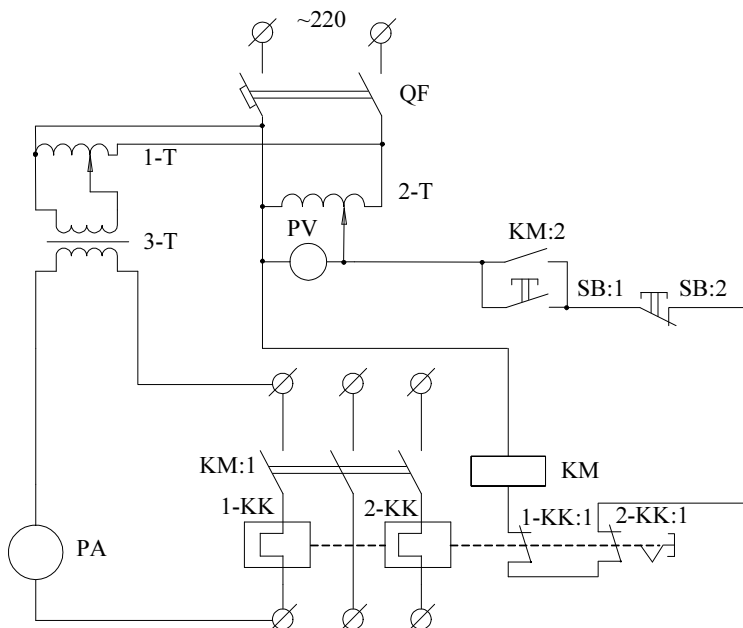


Рис. 1.6. Схема испытания магнитного пускателя

При помощи 2-Т по вольтметру PV устанавливают близким к нулю напряжение, при котором пускатель отключен. Нажимают SB:1 и ру-

котькой 2-Т плавно повышают напряжение до значения, соответствующего началу движения якоря пускателя. Это напряжение фиксируют в табл. 1.2 в качестве напряжения втягивания.

Увеличивают напряжение до номинального. Кнопку SB:1 отпускают, пускатель остается включенным за счет блок-контакта КМ:2.

Таблица 1.2

**Результаты измерения напряжений втягивания
и отпуска магнитного пускателя**

Наименование измеряемой величины	Обозначение	Единица измерения	Результаты по опытам				Среднее значение	Коэффициент возврата
			1	2	3	4		
Напряжение втягивания	$U_{вт}$	В						
Напряжение отпуска	$U_{отп}$	В						

Плавно снижают напряжение до значения, соответствующего отпаданию якоря, которое фиксируют в табл. 1.2 в качестве напряжения отпуска. Опыт продлевают три-четыре раза.

По результатам опыта определяют средние значения $U_{вт}$ и $U_{отп}$, а по ним – коэффициент возврата пускателя.

1.3.4. СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОГО РЕЛЕ

Характеристика теплового реле – это зависимость времени срабатывания реле от тока, протекающего через него. На практике снимают характеристики как без предварительного подогрева нагревательного элемента током нагрузки, так и с подогревом. Здесь следует снять характеристику без предварительного подогрева, т. е. перед каждым испытанием охладить нагревательный элемент до температуры окружающей среды. Охлаждение можно интенсифицировать, прикладывая к корпусу теплового реле влажную тряпку при снятом со стенда напряжении.

Собирают всю схему по рис. 1.6. Проводники от нагрузочного трансформатора 3-Т до пускателя должны быть сечением не менее 10 мм² во избежание их чрезмерного нагрева, так как токи по ним будут протекать 60...70 А.

Устанавливают с помощью 2-Т номинальное напряжение пускателя 220 В и включают пускатель кнопкой SB:1. По амперметру РА с

помощью 1-Т устанавливают токи, близкие к приведенным в табл. 1.3, после чего отключают пускатель и охлаждают тепловое реле до температуры окружающей среды. Включают пускатель и одновременно по секундомеру начинают отсчет времени работы пускателя. Ток через пускатель в течение всего опыта должен быть неизменным, чего добиваются корректировкой с помощью 1-Т. При отключении пускателя фиксируют время от начала его включения и заносят в соответствующий столбец табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты испытания теплового реле магнитного пускателя

Наименование измеряемой величины	Единица измерения	Значение в опытах			
		1	2	3	4
Рабочий ток пускателя	А	35	45	55	65
Время срабатывания	с				

Опыт повторяют для других токов, указанных в табл. 1.3, охлаждая тепловое реле после опыта до комнатной температуры и возвращая контакты реле в зацепление с помощью кнопки блока тепловых реле.

По результатам опытов строят характеристику тепловых реле, т. е. зависимость времени срабатывания реле от тока.

1.4. ИСПЫТАНИЯ АВТОМАТА МАКСИМАЛЬНОГО ТОКА

1.4.1. НАЗНАЧЕНИЕ АВТОМАТА И СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ

Автоматический выключатель предназначен для сравнительно редких коммутаций электрических цепей переменного и постоянного тока напряжением до 1000 В, отключения цепей при сверхтоках, а также при падении напряжения в сети ниже допустимого предела.

В отличие от контактора и магнитного пускателя подвижная система автомата оборудуется защелкой, удерживающей подвижную систему в замкнутом состоянии после включения. Поэтому нет необходимости в пропуске тока по катушке электромагнитной системы автомата в течение всего времени его включенного состояния.

Автоматы оборудуют ручным приводом (как, например, автомат типа А-3100, установленный сверху панели стенда), соленоидным приводом либо электродвигателем (как, например, автомат типа 4С-УЗ, установленный внизу панели стенда и используемый для испытаний в настоящей лабораторной работе).

На принципиальной схеме включения автомата (рис. 1.7) показаны главные контакты автомата SF, катушки 1-КА, 2-КА, 3-КА максимальных расцепителей в каждой фазе, электродвигатель 1-М, коммутируемый с помощью автомата. Контакты SF механически связаны между собой, с защелкой 1-3, ротором приводного электродвигателя 2-М и оттягиваются пружиной П-1 (на рисунке влево), обеспечивающей нормальное отключение контактов. Защелка 2-3 связана с якорями всех максимальных расцепителей КА и оттягивается пружиной П-2 (на рисунке вправо). Цепи управления включают кнопки пуска SB:1 и стоп SB:2, приводной электродвигатель 2-М, концевой выключатель SQ и нормальный расцепитель YA.

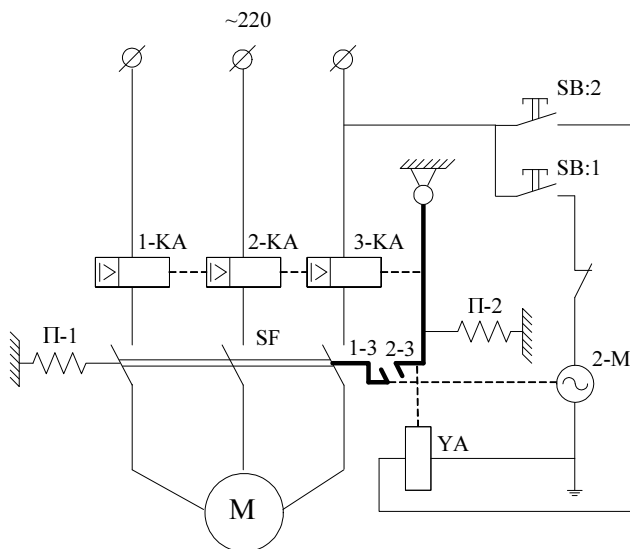


Рис. 1.7. Принципиальная схема включения электро-
двигателя с помощью автомата максимального тока

Включают автомат нажатием кнопки «пуск». При этом вращается двигатель привода, перемещает вправо контакты SF и защелку 1-3. Контакты SF замыкаются, подавая питание на двигатель 1-М, защелка 1-3 входит в зацепление с 2-3, а двигатель 2-М останавливается от разрыва цепи контактом SQ (выключатель концевой).

Для дистанционного отключения нажатием кнопки SB-2 запитывают катушку нормального расцепителя YA, его сердечник толкает

защелку 2-3, выводит ее из зацепления с 1-3, и контакты SF размыкают силовую цепь под действием пружины П-1.

При перегрузке двигателя либо при КЗ в его цепи по катушкам максимального расцепителя текут токи, превышающие номинальные, якорь КА тянут защелку 2-3 влево, выводят ее из зацепления с 1-3 и автомат разрывает цепь контактами SF.

1.4.2. ИСПЫТАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

В задачу испытаний автомата входит проверка уставки одного из реле максимального тока (расцепителя). Уставкой реле называется кратность тока срабатывания относительно номинального тока.

Для проверки уставок собирают схему по рис. 1.8. Выставляют наименьшую уставку K_y (мин) в левой (по расположению на панели) фазе автомата по шкале на максимальном расцепителе. Включают автомат кнопкой, как описано в разд. 1.4.1. О включении автомата сигнализирует световое табло на крайней правой панели стенда. С помощью рукоятки 1-Т плавно повышают ток через контакты SF и катушку 1-КА, регистрируя его по амперметру. При срабатывании реле автомат разрывает цепь, о чем сигнализирует световое табло. Величина тока перед моментом отключения есть ток срабатывания $I_{ср}$, который заносят в табл. 1.4.

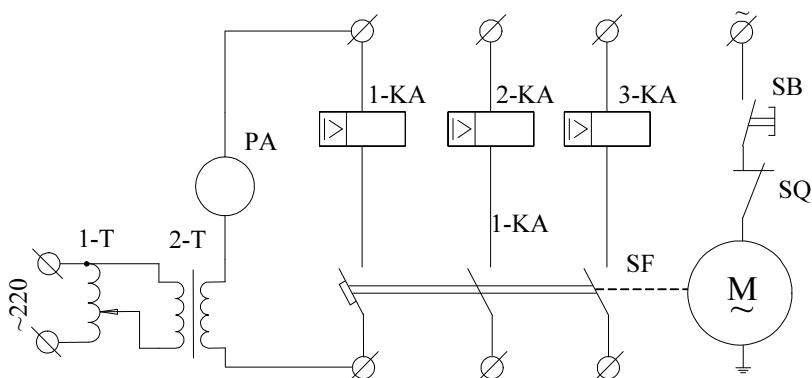


Рис. 1.8. Схема испытания автомата максимального тока

Далее по указанию руководителя изменяют уставку реле и повторяют опыт.

Таблица 1.4

Результаты испытания реле максимального тока

Наименование параметра	Обозначение или аналитическое выражение	Единица измерения	Результаты опытов					
			1	2	3	4	5	6
Уставка реле	K_y	о.е.						
Ток уставки	$I_n K_y$	А						
Ток срабатывания	$I_{ср}$	А						
Погрешность	$I_{ср} - I_n K_y$	А						
	$\frac{I_{ср} - I_n K_y}{I_n K_y}$	%						

Результаты измерений и расчетов следует оформить графически как зависимость погрешности тока срабатывания от тока уставки.

1.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение контактора?
2. Как осуществляется управление контактором?
3. Как гасится дуга в испытываемом контакторе?
4. Каково назначение магнитного пускателя?
5. Как осуществляется включение и отключение пускателя без автоматики?
6. В каких режимах пускатель отключается автоматически?
7. Каково назначение теплового реле и его устройство?
8. Как защищаются от коротких замыканий электродвигатели, управляемые пускателями и контакторами?
9. Как гасится дуга в испытываемом магнитном пускателе?
10. Каково назначение автомата максимального тока?
11. Как гасится дуга в испытываемом автомате?
12. Как изменяют уставки реле максимального тока в автомате?

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Познакомиться с устройством, работой и методикой испытаний трансформаторов тока, исследовать зависимости погрешностей трансформаторов тока от параметров первичной и вторичной цепей.

2.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Измерительным трансформатором тока называют трансформатор, предназначенный для преобразования измеряемого тока в величину, удобную для измерения, и выполненный так, что вторичный ток с требуемой точностью соответствует первичному току как по величине (уменьшенной в $K_{\text{ном}}$ раз), так и по фазе.

Применение трансформаторов тока обеспечивает безопасность людей, соприкасающихся с измерительными приборами, поскольку цепи высшего и низшего напряжений электрически разделены трансформатором тока, и позволяет унифицировать конструкцию измерительных приборов для номинального тока 5 (или 1) А, что упрощает их производство и снижает стоимость.

Сопротивление трансформатора тока вместе с присоединенными к нему измерительными приборами ничтожно мало и при последовательном включении его в цепь с напряжением в несколько тысяч вольт не влияет на величину первичного тока.

Характерная величина для трансформаторов тока – номинальный коэффициент трансформации:

$$K_{\text{ном}} = I_{1\text{ном}} / I_{2\text{ном}}, \quad (2.1)$$

где $I_{1\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$ – номинальный первичный ток и номинальный вторичный ток соответственно.

Под номинальным первичным током трансформатора тока понимают ток, для которого предназначен трансформатор. Под номинальным вторичным током понимают ток, для которого предназначены приборы, подлежащие присоединению ко вторичной обмотке трансформатора. Номинальный вторичный ток обычно равен 5 А. При значительном расстоянии от места установки трансформаторов тока до измерительных приборов применяют трансформаторы тока с номинальным вторичным током 1 А.

Ток, измеряемый с помощью трансформатора тока, определяют из приближенного равенства:

$$I_1 \cong K_{\text{ном}} I_2, \quad (2.2)$$

где I_1 – измеряемый первичный ток;

I_2 – вторичный ток.

Другая характерная величина для трансформаторов тока – отношение чисел витков вторичной и первичной обмоток:

$$K_w = w_2 / w_1, \quad (2.3)$$

несколько отличающееся от $K_{\text{ном}}$. Это отношение выбирают несколько меньшим номинального коэффициента трансформации, чтобы компенсировать ток намагничивания и повысить точность измерения (при индуктивной нагрузке).

Вторичный ток трансформатора, увеличенный в $K_{\text{ном}}$ раз, несколько отличается от первичного тока как по величине, так и по фазе. Разность этих токов, отнесенная к первичному току, представляет собой погрешность в токе

$$d = \frac{I_2 K_{\text{ном}} - I_1}{I_1}. \quad (2.4)$$

Погрешность в токе считают положительной, если $I_2 K_{\text{ном}} - I_1 > 0$, и отрицательной, если $I_2 K_{\text{ном}} - I_1 < 0$.

Угол δ между векторами первичного и повернутого на 180° вторичного тока представляет собой угловую погрешность трансформатора. Эту погрешность считают положительной, если вектор вторичного тока опережает вектор первичного тока. В противном случае угловую погрешность считают отрицательной. Погрешности трансформаторов

тока определяются в основном током намагничивания. Последний зависит от магнитных свойств стали и нагрузки вторичной цепи.

Под нагрузкой трансформатора тока понимают полное сопротивление цепи, присоединенной к выводам его вторичной обмотки. Под номинальной нагрузкой трансформатора тока понимают наибольшую нагрузку, при которой его погрешности не выходят за пределы, установленные для трансформаторов рассматриваемого класса.

Нагрузка трансформатора тока может быть также представлена как вторичная мощность ($B \cdot A$), найденная в предположении, что вторичный ток равен номинальному:

$$S = I_{2\text{ном}}^2 z. \quad (2.5)$$

Погрешности трансформатора тока, у которого отношение чисел витков равно номинальному коэффициенту трансформации, могут быть представлены как

$$d = \frac{I_0}{I_1} \sin \psi, \quad \delta = \frac{I_0}{I_1} \cos \psi. \quad (2.6)$$

Здесь I_0 – ток намагничивания трансформатора тока;

ψ – угол сдвига между током и ЭДС вторичной цепи.

Из приведенных выражений видно, что погрешности трансформатора тока зависят от отношения I_0/I_1 . Для трансформатора с определенными размерами и характеристиками стального сердечника отношение I_0/I_1 зависит от первичного тока и нагрузки трансформатора.

Зависимость погрешности трансформатора тока от первичного тока можно проследить с помощью кривой намагничивания сердечника $B = f(H)$ (рис. 2.1), поскольку при заданной нагрузке индукция в сердечнике приблизительно пропорциональна первичному току, а напряженность магнитного поля пропорциональна току намагничивания.

Погрешности при некотором токе I_1 пропорциональны тангенсу угла β , образованного секущей, проведенной из начала координат к точке, соответствующей току I_1 , и осью ординат.

Как видно из рис. 2.1, наименьшие погрешности получаются при токе, соответствующем максимуму магнитной проницаемости (точка M), при индукции (амплитудное значение) около 0,6...0,8 Тл. Индукция, соответствующая номинальному первичному току, меньше этой величины. Поэтому наименьшие погрешности возникают при то-

ке, превышающем номинальный. При больших первичных токах (при коротких замыканиях), а также при токах, меньших номинального, погрешности увеличиваются.

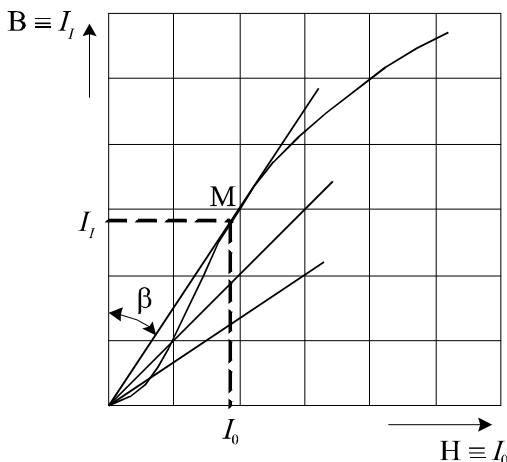


Рис. 2.1. Кривая намагничивания трансформатора тока

Повышение нагрузки при заданном первичном токе приводит к увеличению погрешностей трансформаторов тока. Объясняется это тем, что с ростом нагрузки увеличивается ЭДС и, следовательно, магнитная индукция и ток намагничивания.

Увеличение угла сдвига ψ между током и ЭДС во вторичной цепи приводит к росту погрешности в токе и уменьшению угловой погрешности.

Размеры стального сердечника и магнитные свойства стали значительно влияют на погрешности трансформаторов тока.

Погрешности трансформатора тока при прочих равных условиях снижаются с увеличением сечения сердечника S и уменьшением средней длины линии магнитной индукции $l_{\text{ср}}$. Объясняется это тем, что при увеличении S и уменьшении $l_{\text{ср}}$ снижается магнитное сопротивление сердечника, а следовательно, и величина намагничивающего тока.

Применение для изготовления сердечников трансформаторов тока высококачественных сталей с высокой магнитной проницаемостью в области рабочих индукций также позволяет уменьшить величину намагничивающего тока и снизить погрешности трансформаторов тока.

Погрешности трансформаторов тока обратно пропорциональны квадрату числа витков вторичной, а следовательно, и первичной обмотки, поскольку числа витков связаны отношением $w_2 / w_1 = K_w$. Объясняется это следующим. Для создания некоторой ЭДС, зависящей от величины вторичного тока и нагрузки трансформатора, требуется определенный результирующий магнитный поток. Но $E_2 \equiv F_0 w_2$. Следовательно, с увеличением w_2 показатель F_0 должен уменьшаться. В то же время результирующий магнитный поток пропорционален результирующей намагничивающей силе, т. е. $F_0 \equiv I_0 w_1$. Поэтому увеличение w_1 вызывает также уменьшение I_0 . Таким образом, I_0 обратно пропорционален произведению $w_1 w_2$, и, следовательно, погрешности трансформатора тока обратно пропорциональны квадрату числа витков вторичной (или первичной) обмотки.

Таблица 2.1

Пределы погрешностей трансформаторов тока (ОСТ-ЭЛ4-40)

Класс точности	Ток, % от $I_{ном}$	Максимальная погрешность в токе, %	Максимальная угловая погрешность, мин
0,2	10	$\pm 0,5$	± 20
	20	$\pm 0,35$	± 15
	100...120	$\pm 0,2$	± 10
0,5	10	± 1	± 60
	20	$\pm 0,75$	± 50
	100...120	$\pm 0,5$	± 40
1	10	$\pm 2,0$	± 120
	20	$\pm 1,5$	± 100
	100...120	$\pm 1,0$	± 80
3	50...120	$\pm 3,0$	Не нормируется - " -
10	50...120	± 10	

Измерительные трансформаторы разделены на классы точности в соответствии с величиной погрешности при определенных условиях работы, а именно: при частоте 50 Гц, нагрузке в пределах от 0,25 до 1,0 от номинальной, коэффициенте мощности нагрузки 0,8 и первичном токе в соответствии с табл. 2.1.

2.3. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

1. Проверить правильность разметки выводов обмоток.
2. Определить коэффициент трансформации.
3. Снять зависимость токовой погрешности от первичного тока.
4. Снять зависимость токовой погрешности от нагрузки.
5. Определить оптимальное число витков вторичной обмотки.

2.4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

2.4.1. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ РАЗМЕТКИ ВЫВОДОВ ОБМОТОК. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Некоторые измерительные приборы и реле (ваттметры, счетчики, реле мощности и др.) должны подключаться ко вторичным обмоткам измерительных трансформаторов так, чтобы вторичное напряжение и вторичный ток трансформаторов имели то направление по отношению к приборам, которое было бы при включении последних непосредственно в сеть (без измерительных трансформаторов).

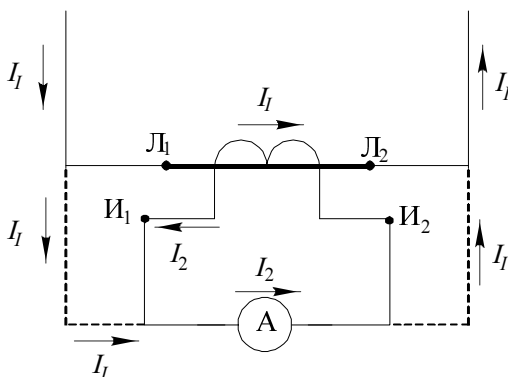


Рис. 2.2. Схема, поясняющая правило маркировки выводов трансформаторов тока

Для этого необходимо знать однополярные зажимы. Если на схеме (рис. 2.2) удален трансформатор, а выводы прибора включены непосредственно в сеть так, как показано пунктиром, то взаимное направление токов в сети и приборе остается прежним. Иными словами, началом вторичной обмотки трансформатора тока (I_1) считают тот конец, из которого ток вытекает во внешнюю цепь в тот момент времени, когда в первой обмотке он протекает от L_1 к L_2 .

2.4.2. ПРОВЕРКА ПОЛЯРНОСТИ ВЫВОДОВ ОБМОТОК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ПО СПОСОБУ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ТОЛЧКА

Проверка полярности выводов на постоянном токе основана на том, что в момент подключения источника постоянного тока на одну из обмоток трансформатора во второй обмотке возникает ЭДС постоянного направления, причем однополярные выводы будут иметь потенциал одинакового знака (рис. 2.3).

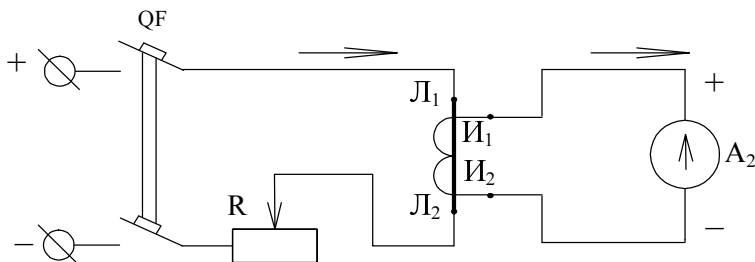


Рис. 2.3. Схема для маркировки выводов обмоток измерительного трансформатора тока по способу баллистического толчка

При правильном обозначении выводов в момент включения вывод I_1 будет иметь положительный потенциал, а I_2 – отрицательный, вследствие этого стрелка магнитоэлектрического вольтметра (или амперметра), имеющего двустороннюю шкалу, отклонится вправо. При отключении первичной цепи от сети во вторичной обмотке появляется ЭДС обратного направления и потенциалы выводов I_1 и I_2 изменяют свой знак на противоположный, отчего стрелка вольтметра (амперметра) отклоняется влево. При неправильной разметке отклонения стрелки будут противоположными указанным.

Для проверки правильности разметки выводов обмоток собирается схема, показанная на рис. 2.3. Путем проб устанавливается такой ток в первичной цепи, при включении которого амперметр A_2 имеет хорошо заметное отклонение стрелки.

По движению стрелки амперметра A_2 при включении и отключении автомата судят о правильности обозначения выводов обмоток трансформатора тока, как это описано в разд. 2.4.1.

2.4.3. ПРОВЕРКА ПОЛЯРНОСТИ ВЫВОДОВ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА МЕТОДОМ ТРЕХ АМПЕРМЕТРОВ

Для проверки разметки выводов по этому методу собирают схему, показанную на рис. 2.4. В нее входит контрольный трансформатор тока ТА1 с верным обозначением выводов и проверяемый трансформатор ТА2. Если выводы обозначены правильно, то токи во вторичных обмотках обоих трансформаторов текут от U_2 к U_1 в тот момент, когда токи в первичных обмотках направлены от L_1 к L_2 .

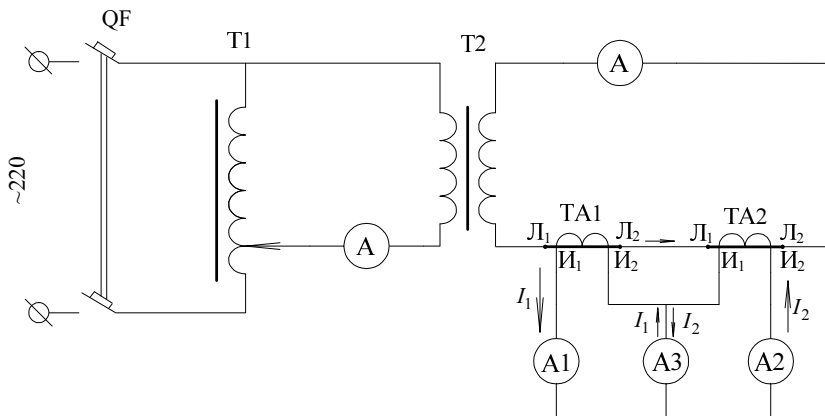


Рис. 2.4. Схема для проверки разметки выводов обмоток трансформатора тока методом трех амперметров

По амперметру А3 протекает ток I_3 , равный разности токов I_1 и I_2 . Если у трансформатора ТА2 обозначения перепутаны, то ток I_3 равен сумме токов I_1 и I_2 .

2.4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Для определения коэффициента трансформации трансформатора тока собирают схему по рис. 2.5. Затем устанавливают номинальный вторичный ток $I_2 = 5$ А, при котором измеряют первичный ток I_1 . Коэффициент трансформации $K_{\text{ном}} = \frac{I_1}{I_2}$.

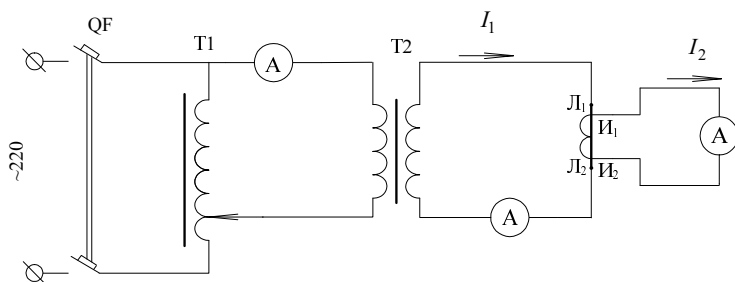


Рис. 2.5. Схема для определения коэффициента трансформации трансформатора тока

2.4.5. СНЯТИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТОКОВЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ОТ ПЕРВИЧНОГО ТОКА

Эту и последующие части работы выполняют на модельном трансформаторе тока со следующими параметрами: $I_{1\text{ном}} = 3 \text{ А}$, $K_{\text{Тном}} = 1$, $w_1 = w_2 = 298$, сечение сердечника $S = 8,1 \text{ см}^2$, средняя длина линии магнитной индукции $l_{\text{ср}} = 41,5 \text{ см}$, $Z_{2\text{ном}} = 1,93 \text{ Ом}$ в классе точности 1. Вторичная обмотка трансформатора имеет отпайки, позволяющие изменять w_2 в пределах от 291 вит до 298 вит.

При $K_{\text{Тном}} = 1$ токовая погрешность в процентах:

$$d_1 = \frac{I_2 - I_1}{I_1} 100 \text{ \%} .$$

Для снятия зависимостей токовой погрешности от первичного тока собирается схема рис. 2.6. В схеме используется магнитоэлектрический миллиамперметр, измеряющий разность средних значений выпрямленных вторичного и первичного токов. Арифметическая разность действующих значений этих токов (I_2 и I_1) превышает замеренную миллиамперметром в 1,1 раза. Следовательно, токовая погрешность при некотором первичном токе может быть вычислена как

$$d_1 = 1,1 \frac{I_0}{I_1} 100 \text{ \%} ,$$

где I_0 – ток, замеренный миллиамперметром.

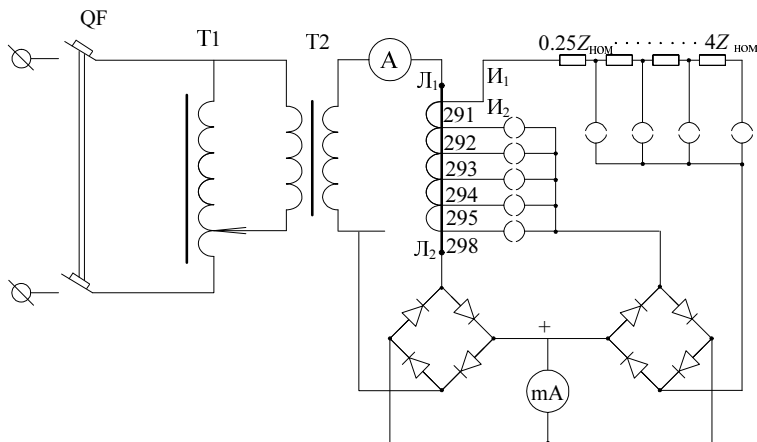


Рис. 2.6. Схема для снятия зависимостей токовой погрешности трансформатора тока от величины первичного тока и нагрузки вторичной обмотки

Зависимости $d_1 = f(I_1)$ предлагается снять для двух значений вторичной нагрузки, например $Z_{\text{ном}}$ и $4Z_{\text{ном}}$. Первичные токи следует изменять в пределах от $0,1 I_{\text{ном}}$ до $5,0 I_{\text{ном}}$.

Предостережение! работа трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой недопустима, поэтому при изменении вторичной нагрузки (переключением штекера) трансформатор необходимо отключить от сети.

Таблица 2.2

Результаты измерения токовой погрешности трансформатора тока в функции первичного тока

Параметры	$Z_{\text{нагр}} = Z_{\text{ном}}$					$Z_{\text{нагр}} = 4Z_{\text{ном}}$				
I_1, A										
I_0, mA										
$d_1, \%$										

Результаты замеров и вычислений занесите в табл. 2.2. При отсутствии витковой компенсации токовые погрешности во всем диапазоне изменения тока I_1 получаются отрицательными, поэтому показания миллиамперметра следует записывать со знаком «минус».

По данным табл. 2.2 постройте зависимость $d_1 = f(I_1)$. Объясните полученные результаты.

2.4.6. СНЯТИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ОТ НАГРУЗКИ ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ

Для снятия зависимости $d_1 = f(Z_{\text{нагр}})$ используется схема рис. 2.6. Изменяя вторичную нагрузку и поддерживая неизменным (номинальным) первичный ток, замерьте разность выпрямленных вторичного и первичного токов. По полученным величинам вычислите токовые погрешности. Значения $Z_{\text{нагр}}$, I_0 и d_1 занесите в табл. 2.3. По данным табл. 2.3 постройте зависимость $d_1 = f(Z_{\text{нагр}})$ при $I_1 = I_{\text{ном}}$. Объясните полученный результат.

Таблица 2.3

Результаты измерения токовой погрешности трансформатора тока в функции нагрузки вторичной цепи

$Z_{\text{нагр}}/Z_{\text{ном}}$, о.е.						
I_0 , мА						
d_1 , %						

2.4.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ВИТКОВ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ СОГЛАСНО КЛАССУ ТОЧНОСТИ

Число витков, при котором характеристики токовых погрешностей трансформаторов при нагрузке от $0,25 Z_{\text{ном}}$ до $Z_{\text{ном}}$ не выходят за установленные пределы (см. табл. 2.1), является оптимальным.

На рис. 2.7 показаны характеристики токовой погрешности трансформатора тока без поправки на число витков (пунктирные линии) и с поправкой (сплошные линии). На диаграмме также показаны штриховкой пределы допустимых погрешностей в токе для трансформаторов класса 1. Как видно из рисунка, после подгонки вторичных витков характеристики погрешностей не выходят за установленные пределы для класса 1 при изменении первичного тока от 0,1 до 1,2 номинального. На угловую погрешность подгонка числа витков практически не влияет.

При выполнении этого пункта работы следует число витков вторичной обмотки трансформатора тока подобрать так, чтобы при первичном токе, изменяющемся от 0,1 до 1,2 $I_{\text{ном}}$, и нагрузке от $0,25 Z_{\text{ном}}$ до $Z_{\text{ном}}$ токовые погрешности получились минимальными. Для этого надо снять зависимости $d_1 = f(I_1)$ при $Z_{\text{нагр}} = 0,25 Z_{\text{ном}}$ и $Z_{\text{нагр}} = Z_{\text{ном}}$ для разных w_2 и, построив их, определить оптимальное число витков. Данные замеров и расчетов удобно свести в табл. 2.4.

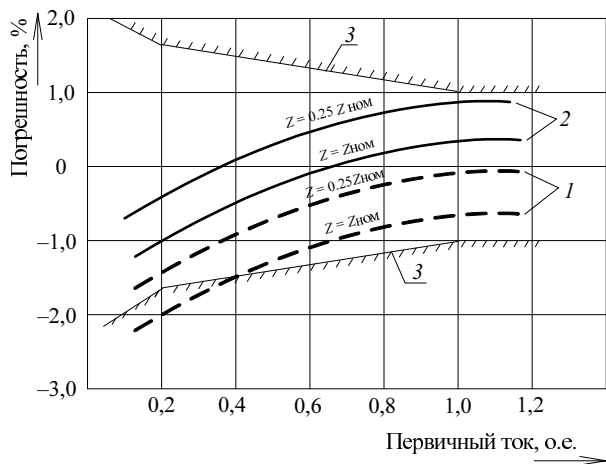


Рис. 2.7. Характеристики токовой погрешности трансформатора тока в функции от первичного тока:

1 – характеристики ТТ, выполненного без подгонки витков; 2 – характеристики ТТ, выполненного с подгонкой витков; 3 – нормированные пределы токовой погрешности для трансформатора тока класса точности I

Таблица 2.4

Результаты измерения погрешностей трансформатора тока в процессе подгонки числа витков

Ток в первичной обмотке трансформатора тока I_1, A	Число витков вторичной обмотки											
	291				...				298			
	$Z_{нагр} = 0,25Z_{ном}$		$Z_{нагр} = Z_{ном}$		$Z_{нагр} = 0,25Z_{ном}$		$Z_{нагр} = Z_{ном}$		$Z_{нагр} = 0,25Z_{ном}$		$Z_{нагр} = Z_{ном}$	
	I_0, mA	$d_1, \%$	I_0, mA	$d_1, \%$	I_0, mA	$d_1, \%$	I_0, mA	$d_1, \%$	I_0, mA	$d_1, \%$	I_0, mA	$d_1, \%$

Исходя из характеристик погрешностей определите классы точностей трансформатора тока при разных w_2 .

2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение измерительных трансформаторов тока?
2. Что понимается под номинальным коэффициентом трансформации трансформатора тока?
3. Зачем маркируются концы обмоток трансформаторов тока? Каково правило маркировки?
4. Что понимается под нагрузкой на трансформатор тока?
5. Почему недопустим холостой ход для трансформаторов тока?
6. Чем обусловлены погрешности измерительных трансформаторов тока?
7. Как изменяется токовая погрешность трансформатора тока с изменением тока по отношению к номинальному? Почему?
8. Зачем и как выполняется витковая компенсация?
9. Что понимается под классом точности трансформаторов тока?
10. На какие классы точности подразделяются трансформаторы тока?
11. Как погрешности трансформатора тока зависят от числа витков его обмоток?
12. Как изменится класс точности трансформатора тока, если его нагрузка превысит номинальную?
13. Как погрешности трансформатора тока зависят от магнитной проницаемости сердечника? Почему?
14. Как используются трансформаторы тока разных классов точности?

Лабораторная работа № 3

ИСПЫТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ. ЗНАКОМСТВО СО СХЕМОЙ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с устройством, работой и методикой испытаний трансформатора напряжения, изучить схему контроля изоляции в установках переменного тока высокого напряжения, снять зависимости погрешностей трансформаторов напряжения от параметров первичной и вторичной цепей.

3.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Измерительным трансформатором напряжения называют трансформатор, предназначенный для преобразования напряжения электроустановки до величины, удобной для измерения, и выполненный так, что напряжение у вторичных выводов трансформатора с требуемой точностью соответствует первичному напряжению как по величине (уменьшенной в $K_{ном}$ раз), так и по фазе. Применение трансформаторов напряжения обеспечивает безопасность обслуживающего персонала, соприкасающегося с измерительными приборами, так как цепи высокого и низкого напряжений электрически разделены, и позволяет унифицировать конструкцию измерительных приборов для номинального напряжения 100 В, что упрощает их производство и снижает стоимость.

Характерный параметр трансформатора напряжения – номинальный коэффициент трансформации

$$K_{ном} = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad (3.1)$$

где $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$ – номинальное первичное и номинальное вторичное напряжения соответственно.

Под номинальным первичным напряжением трансформатора напряжения понимают напряжение, для которого предназначен трансформатор. Под номинальным вторичным напряжением понимают напряжение, для которого предназначены приборы, присоединенные ко вторичной обмотке трансформатора. Номинальные вторичные напряжения установлены равными 100 В, $100/\sqrt{3}$ В и $100/3$ В в зависимости от режима заземления нейтралей источников установки и схем электрических соединений трансформаторов напряжения, для которых они предназначены.

Напряжение, измеряемое с помощью трансформатора напряжения, определяют из приближенного равенства

$$U_1 = U_2 K_{\text{ном}}, \quad (3.2)$$

где U_1 – первичное напряжение, подлежащее измерению;

U_2 – напряжение выводов вторичной обмотки трансформатора.

Другая характерная величина для трансформаторов напряжения – отношение чисел витков первичной и вторичной обмоток $K_w = w_1/w_2$, несколько отличающихся от $K_{\text{ном}}$.

Напряжение вторичной обмотки трансформатора, увеличенное в $K_{\text{ном}}$ раз, отличается от первичного напряжения как по величине, так и по фазе вследствие потерь напряжения в трансформаторе. Разность этих напряжений, отнесенная к первичному напряжению, представляет собой погрешность в напряжении:

$$d = \frac{U_2 K_{\text{ном}} - U_1}{U_1}. \quad (3.3)$$

Погрешность в напряжении считается положительной, если $U_2 K_{\text{ном}} - U_1 > 0$, и отрицательной, если $U_2 K_{\text{ном}} - U_1 < 0$.

Угол между векторами первичного напряжения и повернутого на 180° вторичного представляет угловую погрешность. Ее считают положительной, если вектор вторичного напряжения опережает вектор первичного напряжения. В противном случае погрешность считается отрицательной.

Под нагрузкой трансформатора напряжения понимают кажущуюся вторичную мощность ($B \cdot A$), найденную в предположении, что напряжение у вторичных выводов равно номинальному:

$$S = \frac{U_{2\text{ном}}^2}{Z}, \quad (3.4)$$

где S – нагрузка трансформатора, $B \cdot A$;

Z – полное сопротивление цепи, присоединенной к выводам вторичной обмотки, Ом.

Под номинальной нагрузкой трансформатора напряжения понимают наибольшую нагрузку, при которой его погрешности не выходят за пределы, установленные для трансформаторов рассматриваемого класса точности.

Измерительные трансформаторы напряжения разделены на классы точности в соответствии с величиной погрешности при определенных условиях работы, а именно: при частоте 50 Гц, первичном напряжении от 0,9 до 1,1 номинального, нагрузке в пределах от 0,25 до номинальной и коэффициенте мощности 0,8 (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Пределы погрешностей трансформаторов напряжения (ГОСТ 1983-43)

Класс точности	Максимальная погрешность в напряжении, %	Максимальная угловая погрешность, мин
0,2	$\pm 0,2$	± 10
0,5	$\pm 0,5$	± 20
1	$\pm 1,0$	± 40
3	$\pm 3,0$	Не нормируется

Погрешности трансформатора напряжения зависят от размеров магнитопровода, магнитных свойств стали, конструкции обмоток, сечения проводов, первичного напряжения, а также от нагрузки, определяемой потреблением присоединенных приборов. Чтобы уменьшить погрешности трансформатора напряжения, выбирают меньшую плотность тока в обмотках и меньшую магнитную индукцию в магнитопроводе по сравнению с соответствующими величинами для силовых трансформаторов. Магнитное рассеяние у трансформатора напряжения значительно меньше, чем у силового трансформатора. Напряжение короткого замыкания составляет всего 0,4–1,0 %.

Использование для изготовления сердечников трансформаторов напряжения высококачественных сталей позволяет снизить его погрешности.

На погрешности трансформаторов напряжения существенно влияют нагрузка и величина первичного напряжения.

3.3. ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НАПЯЖЕНИЯ ОТ НАГРУЗКИ

Зависимость погрешности трансформатора напряжения от нагрузки легко проследить с помощью векторной диаграммы (рис. 3.2), которая построена на основе схемы замещения трансформатора напряжения, показанной на рис. 3.1. Исходной величиной при построении векторной диаграммы является вектор вторичного напряжения, приведенный к числу витков первичной обмотки $U'_2 = U_2 K_{\text{ном}}$. Вектор магнитного потока Φ_0 , если пренебречь угловым сдвигом между векторами вторичного напряжения и ЭДС, отстает от U'_2 на 90° . Вектор тока холостого хода I_0 опережает вектор магнитного потока на угол потерь в стали α . Вектор I'_2 сдвинут по отношению к вектору U'_2 на угол φ_2 .

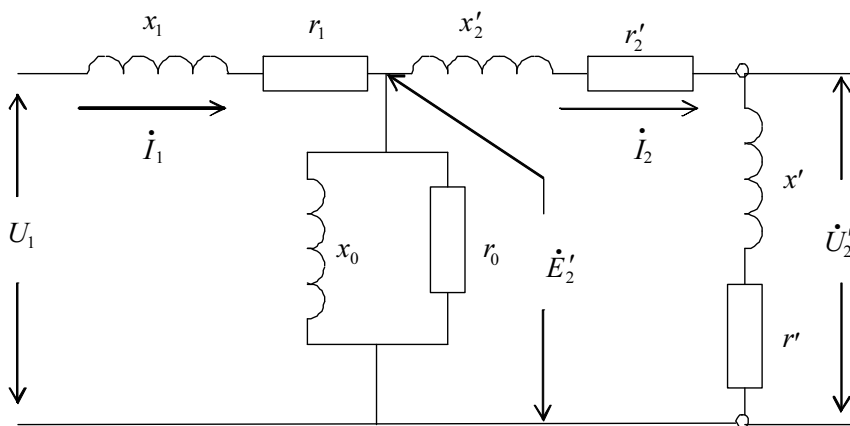


Рис. 3.1. Схема замещения измерительного трансформатора напряжения

Треугольник ABC определяет падение напряжения в сопротивлении первичной обмотки от тока холостого хода: $\dot{I}_0 Z_1 = I_0 r_1 + j \dot{I}_0 x_1$. Если трансформатор не нагружен, конец вектора U_1 находится в точке C .

Треугольник CDE определяет падение напряжения в сопротивлениях первичной и вторичной обмоток от тока нагрузки:

$$\dot{I}'_2(Z_1 + Z'_2) = \dot{I}'_2(r_1 + r'_2) + j\dot{I}'_2(x_1 + x'_2). \quad (3.5)$$

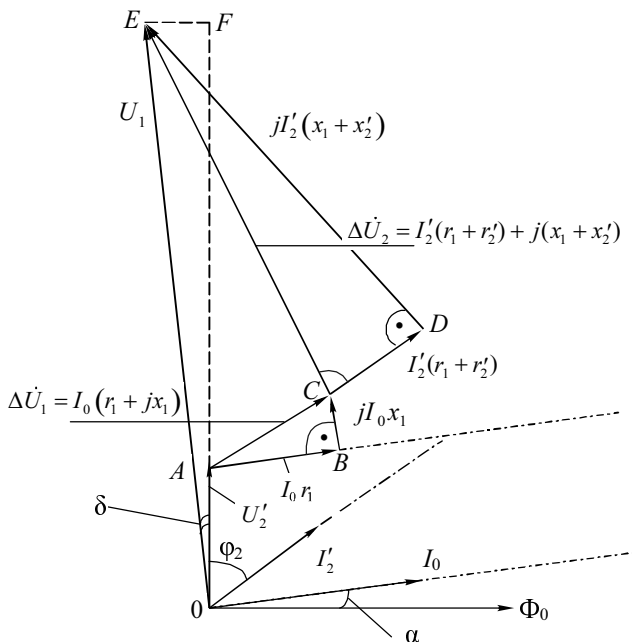


Рис. 3.2. Векторная диаграмма ИТН

Вектор OE определяет первичное напряжение нагруженного трансформатора.

С помощью векторной диаграммы легко проследить зависимость погрешностей трансформаторов напряжения от нагрузки при различных коэффициентах мощности вторичной цепи.

Треугольник CDE соответствует номинальной нагрузке трансформатора с коэффициентом мощности 0,8. При нагрузке, меньшей номинальной, стороны треугольника должны быть пропорционально уменьшены, при этом конец вектора U_1 переместится по отрезку EC вниз. Соответственно изменяются погрешности: погрешность в напряжении уменьшается, а угловая сначала уменьшается, но потом изменя-

ет свой знак и вновь растет. При изменении коэффициента мощности треугольник CDE поворачивается вокруг точки C . С помощью векторной диаграммы можно проследить, как при этом изменяются погрешности.

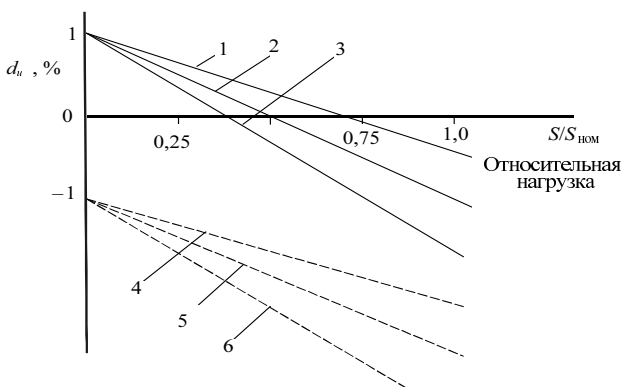


Рис. 3.3. Зависимость погрешности в напряжении ИТН от нагрузки:

1; 4 — $\cos \varphi = 1$, 2; 5 — $\cos \varphi = 0,8$, 3; 6 — $\cos \varphi = 0,5$

Зависимости погрешностей трансформаторов напряжений от нагрузки показаны на рис. 3.3. Пунктирные линии рис. 3.3 соответствуют равенству $K_w = K_{ном}$.

3.4. ПОДГОНКА ЧИСЛА ВИТКОВ ОБМОТОК

Как следует из векторной диаграммы и показанных на рис.3.3 зависимостей, при активной и индуктивной нагрузках и $K_w = K_{ном}$ погрешность в напряжении всегда отрицательна, т. е. вторичное напряжение меньше первичного. Чтобы увеличить точность измерений, принято при проектировании и изготовлении трансформаторов напряжения выбирать отношение $K_w = w_1/w_2$ несколько меньшим номинального коэффициента трансформации. Для этого увеличивают число витков вторичной обмотки по отношению к величине, соответствующей равенству $U_{1ном}/U_{2ном} = w_1/w_2$. Отношение чисел витков выбирают с таким расчетом, чтобы погрешности при нагрузке 0,25 номинальной и номинальной были приблизительно равны по величине и противополо-

ложны по знаку. Характеристики погрешности трансформатора перемещаются при этом параллельно самим себе (см. сплошные прямые на рис. 3.3).

На угловую погрешность подгонка числа витков практически не влияет.

3.5. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Стенд выполнен в виде вертикальной панели. На лицевой стороне ее изображены схемы трансформаторов напряжения и смонтированы клеммы, к которым присоединены выводы их обмоток. Для выполнения работы используются три трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками. Четвертый трансформатор с отпайками вторичной обмотки предназначен для снятия характеристик погрешностей.

3.6. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

В программу входит:

- проверка правильности обозначения выводов обмоток однофазных трансформаторов напряжения;
- определение коэффициента трансформации;
- знакомство со схемой контроля изоляции в установках трехфазного тока высокого напряжения (3–35 кВ);
- снятие характеристик погрешностей трансформатора напряжения.

3.7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

3.7.1. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ОБМОТОК ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Способ баллистического толчка. Для разметки выводов обмотка высшего напряжения трансформатора напряжения присоединяется к источнику постоянного напряжения, а в цепь вторичной обмотки включается магнитоэлектрический прибор (вольтметр или гальванометр) с нулем посередине шкалы, как это показано на рис. 3.4.

При правильном обозначении выводов в момент подачи на схему напряжения стрелка вольтметра отклонится вправо, а при отключении источника – влево. Следует разметить выводы как первичных, так и

обеих вторичных обмоток всех трех измерительных трансформаторов напряжения и зафиксировать это в отчете.

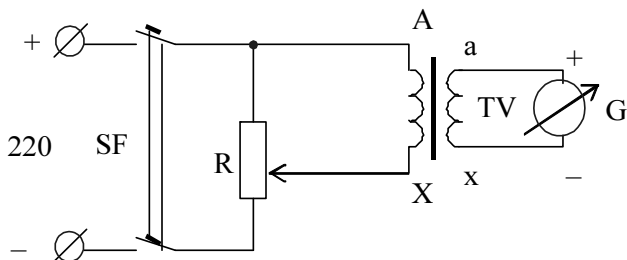


Рис. 3.4. Схема для проверки правильности обозначения выводов обмоток трансформатора напряжения по способу баллистического толчка

Метод трех вольтметров. Для проверки правильности разметки выводов собирается схема, показанная на рис. 3.5. В этой схеме TV1 – эталонный трансформатор с правильным обозначением выводов обмоток, а TV2(TV3) – трансформатор, у которого требуется проверить разметку выводов. Схема подключается к сети переменного тока. Вольтметр V3 должен иметь такой предел измерения, чтобы он мог измерить сумму вторичных напряжений V1 и V2.

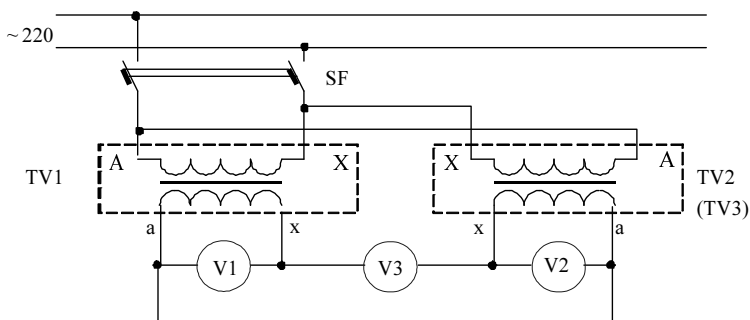


Рис. 3.5. Схема для проверки правильности обозначения выводов обмоток трансформатора напряжения по методу трех вольтметров

Если обозначения выводов у проверяемого трансформатора верны, то показание вольтметра V3 будет равно разности показаний вольтметров V1 и V2. При неправильной разметке средний вольтметр даст сумму показаний крайних вольтметров.

3.7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Для определения коэффициента трансформации трансформатора напряжения собирается схема, показанная на рис. 3.6. Затем поднимается напряжение на первичной обмотке до величины, при которой напряжение на вторичной обмотке будет равно 100 В.

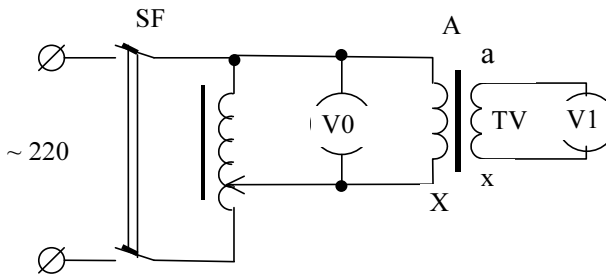


Рис. 3.6. Схема для определения коэффициента трансформации измерительного трансформатора напряжения

Коэффициент трансформации $K_{\text{ном}} = U_1 / U_2$, где U_1 – напряжение по вольтметру V0, а $U_2 = 100$ В – напряжение по вольтметру V1.

3.7.3. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В УСТАНОВКАХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В сетях с глухозаземленной нейтралью замыкание фазы на землю является коротким замыканием и отключается релейной защитой. В сетях с незаземленными нейтральями и заземленными через дугогасящие катушки, т. е. в сетях с малым током замыкания на землю, в нормальных условиях напряжения всех трех фаз по отношению к земле равны фазному напряжению. При металлическом замыкании одной фазы на землю ее напряжение относительно земли становится равным нулю, а напряжения двух других фаз увеличиваются до линейных. Междофазные напряжения при этом не изменяются, и работа электроприемников не нарушается. Такие сети при однофазном замыкании на землю могут некоторое время оставаться в работе, так как указанное замыкание сопровождается протеканием весьма малого емкостного тока. Схема контроля изоляции дает возможность выявить нарушение изоляции фазы сети относительно земли. Схема контроля изоляции показана на рис. 3.7. В ней используются три однофазных трансформа-

тора напряжения. Дополнительные обмотки соединяются в разомкнутый треугольник. В нормальных условиях вольтметры, включенные в звезду, показывают фазные напряжения, а вольтметр V0, включенный в разомкнутый треугольник, – нуль (или напряжение небаланса). При металлическом замыкании одной фазы на землю вольтметр этой фазы покажет нуль, а два других – линейные напряжения. Вольтметр V0 покажет напряжение, равное тройному фазному напряжению нормально-го режима работы.

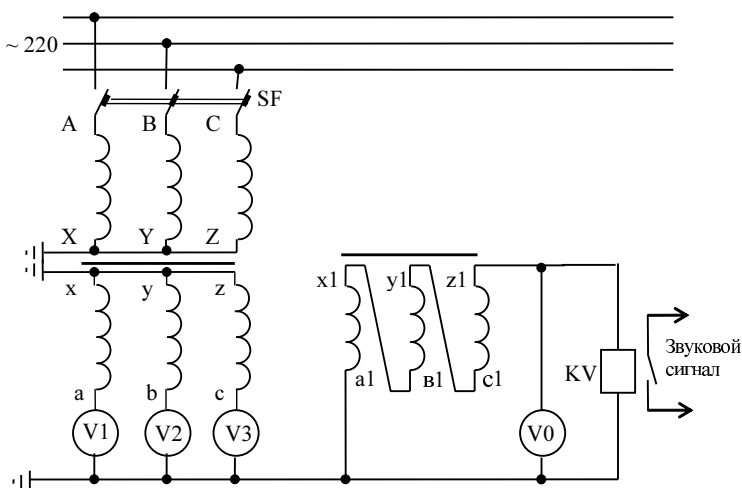


Рис. 3.7. Схема контроля изоляции в сети с изолированной нейтралью

В отчете следует привести показания вольтметров в нормальном режиме и при металлическом замыкании фазы на землю, изобразить векторные диаграммы напряжений в указанных режимах и на их основе объяснить причину изменения показаний вольтметров.

3.7.4. СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА НАПЯЖЕНИЯ

Для получения и анализа характеристик погрешностей трансформатора напряжения предлагается:

1) снять зависимость погрешностей трансформатора в напряжении от нагрузки при $K_w = K_{ном}$;

- 2) определить оптимальное число витков вторичной обмотки;
- 3) снять зависимость погрешности в напряжении от нагрузки для трансформатора напряжения с витковой компенсацией.

Для снятия характеристик погрешностей собирается схема, показанная на рис. 3.8. Автотрансформатор Т схемы используется для регулирования первичного напряжения. Вторичная нагрузка изменяется с помощью переключателей, смонтированных на стенде.

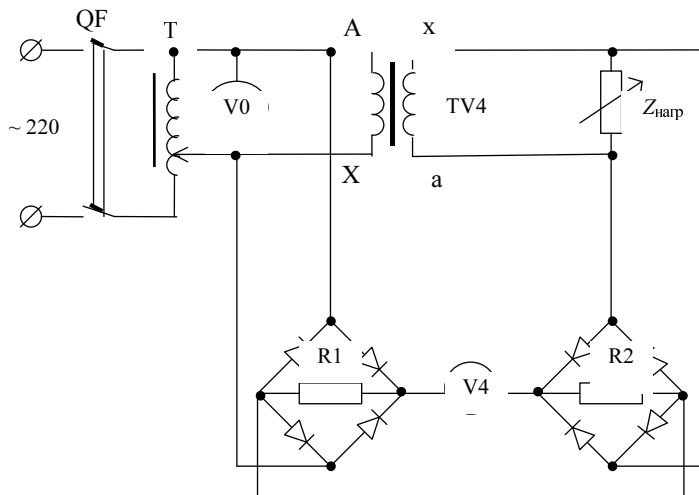


Рис. 3.8. Схема для снятия характеристик погрешностей в напряжении измерительного трансформатора напряжения

Погрешность в напряжении трансформатора напряжения при $K_{\text{ном}} = 1$ составляет

$$d_U = \frac{U_2 - U_1}{U_1} 100 \% . \quad (3.6)$$

Вольтметр V4 измеряет разность падений напряжений на сопротивлениях R1 и R2, создаваемых выпрямленными токами, которые пропорциональны первичному и вторичному напряжениям трансформатора. Разность напряжений $U_2 - U_1$ равна напряжению U_0 , измеренному вольтметром V4, умноженному на коэффициент выпрямления $K = 1,1$. Следовательно, погрешность в напряжении равна

$$d_U = \frac{U_0 K}{U_1} 100 \% \quad (3.7)$$

Подгонку числа витков вторичной обмотки при витковой компенсации необходимо выполнить так, чтобы погрешности в напряжении при нагрузке 0,25 номинальной и номинальной ($\cos \varphi = 0,8$) были приблизительно равны по величине и противоположны по знаку. Знак погрешности легко установить по направлению отклонения стрелки вольтметра V4. Известно, что при отсутствии витковой компенсации погрешности трансформатора в напряжении отрицательны. Следует заметить, в какую сторону при этом отклоняется стрелка прибора. Отклонение стрелки вольтметра в противоположную сторону свидетельствует об изменении знака погрешности. При выполнении витковой компенсации первичное напряжение трансформатора напряжения должно поддерживаться на уровне номинального.

Для трансформатора напряжения с витковой компенсацией надо снять те же характеристики, что и для трансформатора без подгонки. Сравните полученные результаты. Определите классы точности некомпенсированного и компенсированного трансформаторов.

В отчете снятые характеристики должны быть представлены в виде графиков.

3.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение трансформаторов напряжения?
2. Что понимается под номинальным коэффициентом трансформации трансформаторов напряжения?
3. Что понимается под нагрузкой трансформатора напряжения?
4. Почему недопустим режим короткого замыкания для трансформаторов напряжения?
5. Как и для чего маркируются концы обмоток трансформаторов напряжения?
6. Чем обусловлены погрешности трансформатора напряжения?
7. Как зависят погрешности трансформатора напряжения от первичного напряжения и от вторичной нагрузки?
8. Зачем и как выполняется подгонка числа витков первичной или вторичной обмоток трансформатора напряжения?

9. Как протекают токи замыкания на землю в системах с изолированной или компенсированной нейтралью источников? Какова примерная их величина?

10. Как изменяются фазные напряжения при замыкании на землю в установках с изолированной или компенсированной нейтралью?

11. При каких напряжениях нейтрали источников не заземляются глухо и почему?

12. В каких установках контролируется изоляция фаз относительно земли и как?

13. Какие трансформаторы напряжения используются для контроля изоляции?

Лабораторная работа № 4

ТЕРМИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ НА ПРОВОДНИКИ

4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать процесс нагрева и охлаждения однородного проводника прямоугольного сечения при длительном протекании по нему рабочего тока и определить температуру нагрева его при протекании тока короткого замыкания (КЗ).

Исследовать зависимость электродинамических сил взаимодействия двух параллельных проводников прямоугольного сечения от параметров цепи.

Ознакомиться с методом замера электродинамической силы.

4.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

4.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические аппараты и элементы распределительных устройств (РУ) обтекаются токами, близкими по величине к нормальным, и токами КЗ, во много раз превышающими нормальные. Токоведущие части электрического оборудования и РУ при протекании по ним тока подвергаются механическим (электродинамическим) и тепловым (термическим) воздействиям. Способность аппаратов, проводников и изоляторов противостоять электродинамическим и термическим воздействиям, возникающим при прохождении через них наибольших токов КЗ, называют соответственно электродинамической и термической стойкостью.

4.2.2. НАГРЕВ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРОТЕКАНИИ ТОКА

Если через проводник, имеющий температуру окружающей среды θ_0 , проходит ток, то температура проводника постепенно повышается, так как энергия потерь при протекании тока переходит в тепло. Ско-

рость нарастания температуры зависит от соотношения между количеством выделяющегося тепла и интенсивностью его отвода, а также теплоемкости проводника. Уравнение теплового баланса за время неустановившегося теплового процесса можно записать [1, с. 95]

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (4.1)$$

где dQ – энергия, выделяемая током в проводнике в течение времени dt ;

dQ_1 – энергия, идущая на нагрев проводника;

dQ_2 – энергия, отводимая с поверхности проводника за счет теплоотдачи в течение времени dt .

Выражению (4.1) соответствует уравнение

$$I^2 R_a dt = C d\theta + kF(\theta - \theta_0)dt, \quad (4.2)$$

где I – действующее значение тока, проходящего по проводнику, А;

R_a – активное сопротивление проводника при переменном токе, Ом;

C – теплоемкость проводника, Вт·с/°С; $(\theta - \theta_0)$ – превышение температуры проводника θ над температурой окружающей среды θ_0 , град;

k – коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплообмена, Вт/(м² · °С);

F – поверхность охлаждения проводника, м².

Для условий нормального режима температура проводника изменяется в небольших пределах, поэтому можно принять, что R_a , C , k не зависят от температуры.

Решением дифференциального уравнения нагрева проводника (4.2) будет

$$\theta - \theta_0 = \frac{I^2 R_a}{kF} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (4.3)$$

где $T = \frac{C}{kF}$ – постоянная времени нагрева токоведущего проводника, с.

Из уравнения (4.3) следует, что нагрев токоведущего проводника происходит по экспоненциальной кривой (рис. 4.1, а).

Если в уравнение нагрева (4.3) подставить значение $t = \infty$, то получим величину установившегося перегрева

$$\theta_n - \theta_0 = \frac{I^2 R_a}{kF}, \quad (4.4)$$

где θ_n – установившаяся температура поверхности проводника.

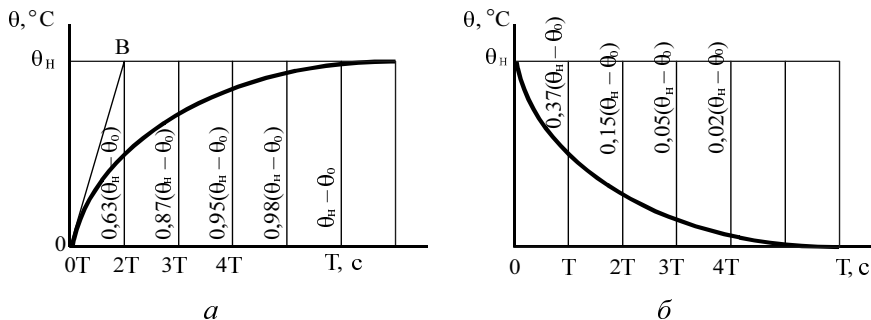


Рис. 4.1. Кривые нагрева и охлаждения проводника

Постоянная нагрева T характеризует скорость изменения температуры шин и аппаратов при их нагреве. Хотя из уравнения (4.3) видно, что установившийся режим наступает через неограниченно длительное время ($t = \infty$), на практике время достижения установившейся температуры принимают равным $3-4 T$, так как при этом температура нагрева превышает 98 % от θ_n .

Постоянную времени нагрева для простых токоведущих частей можно вычислить, а для машин и аппаратов она определяется путем тепловых испытаний и последующих графических построений (рис. 4.1). Постоянная времени нагрева определяется как подкасательная OT , постоянная по кривой нагрева, а сама касательная OB к кривой (от начала координат) характеризует подъем температуры проводника при отсутствии теплоотдачи с его поверхности.

Величина постоянной времени нагрева для электрического оборудования колеблется от нескольких минут (у шин) до нескольких часов (у мощных трансформаторов и генераторов). Установившуюся температуру нагрева проводника θ_n в условиях длительного режима можно найти по выражению, полученному из выражений (4.3) и (4.4):

$$\theta_n = \theta_0 + (\theta_{n, \text{доп}} - \theta_{\text{от}}) \frac{I_{\text{наг}}^2}{I_{\text{доп}}^2}, \quad (4.5)$$

где $I_{\text{наг}}$ – ток нагрузки, А; $I_{\text{доп}}$ – допустимое значение длительного тока для данного проводника, А; $\theta_{\text{от}}$ – расчетная (табличная) температура окружающей среды, для неизолированных проводников принята равной 25°C ; $\theta_{n, \text{доп}}$ – допустимая температура нагрева проводников в длительном режиме [2, табл. 1.12].

Допустимая температура нагрева неизолированных проводников в нормальном режиме $\theta_{н, доп}$ определяется нагревом контактных соединений. Контактные соединения обычно не позволяют повысить температуру нагрева проводников выше 70° , так как при более высокой температуре повышается интенсивность окисления их поверхностей, в результате чего значительно возрастает электрическое сопротивление в месте соединения проводников. Увеличение электрического сопротивления контактных соединений ведет к дальнейшему росту температуры последних, и может наступить лавинообразный процесс нарастания температуры, который приведет к повреждению контактов.

4.2.3. ОХЛАЖДЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

При отключении тока прекращается подвод энергии к проводнику и начиная с момента отключения проводник будет охлаждаться. Основное уравнение теплового баланса для этого случая

$$Cd\theta + kF(\theta - \theta_0)dt = 0. \quad (4.6)$$

Решением уравнения (4.6) является

$$\theta - \theta_0 = (\theta_n - \theta_0)e^{-\frac{t}{T}}. \quad (4.7)$$

Как видно из рис. 4.1, б, кривая охлаждения есть та же кривая нагрева, но обращенная выпуклостью к оси абсцисс. Постоянная времени нагрева также может быть получена из кривой охлаждения.

4.2.4. НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

При возникновении короткого замыкания токи КЗ превышают рабочие токи во много раз и, следовательно, будут дополнительно нагревать проводники сверх температур, достигнутых к моменту наступления КЗ. Длительность существования КЗ ограничена действием релейной защиты и составляет доли секунды или несколько секунд. Повышение температуры будет при этом кратковременным – пиковым, после чего температура падает в связи с отключением цепи. Несмотря на кратковременность КЗ, температура проводников может достигнуть больших и опасных значений.

Исследования работы неизолированных проводников и шин [1] показали, что нагрев их при КЗ ограничивается в большинстве случаев снижением их механической прочности. Однако при кратковременном нагреве снижение механической прочности начинается при большей

температуре, чем при длительном нагреве. Поэтому при кратковременном нагреве токами КЗ допускаются значительно более высокие температуры, чем при длительном нагреве в условиях нормального режима.

Нормируемые допустимые температуры нагрева
($\theta = \theta_{\text{Кдоп}}$, °С) проводников при КЗ [2, табл. 1.14]

Шины медные.....	300
Шины алюминиевые.....	200
Шины стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппаратом.....	400
То же, с непосредственным присоединением к аппаратам	300
Кабели с бумажно-пропитанной изоляцией до 10 кВ с медными и алюминиевыми жалами	200

Ввиду кратковременности процесса теплоотдачей в окружающую среду можно пренебречь и считать, что все выделяющееся тепло в проводнике идет только на нагрев самого проводника. Тогда уравнение нагрева будет следующим [3]:

$$i_{\text{Кт}}^2 R_a(\theta) dt = C(\theta) d\theta, \quad (4.8)$$

где $i_{\text{Кт}}$ – мгновенное значение тока КЗ, А;

Так как проводник при КЗ нагревается до значительных температур, необходимо учитывать изменения активного сопротивления и теплоемкости проводника в процессе нагрева. При этом активное сопротивление и теплоемкость можно определить по формулам:

$$R_a(\theta) \approx \frac{\rho_0 (1 + \alpha\theta) l}{S}; \quad C(\theta) \approx \gamma S C_0 (1 + \beta\theta), \quad (4.9)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника, Ом · м;

C_0 – удельная теплоемкость, Дж/кг °С;

α, β – температурные коэффициенты, учитывающие изменение удельного сопротивления и удельной теплоемкости соответственно;

S – площадь поперечного сечения проводника, м²;

l – длина проводника, м;

γ – удельная масса проводника, кг/м³.

Подставим (4.9) в (4.8) и, разделив переменные (влево переносим переменные, зависящие от t , вправо – зависящие от θ), проинтегрируем левую часть в пределах от нуля до $t_{\text{откл}}$, а правую от $\theta_{\text{н}}$ до $\theta_{\text{к}}$:

$$\frac{1}{S^2} \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{к}}^2 dt = \gamma \int_{\theta_{\text{н}}}^{\theta_{\text{к}}} \frac{C_0(1 + \beta\theta)}{\rho_0(1 + \alpha\theta)} d\theta. \quad (4.10)$$

После интегрирования имеем:

$$\begin{aligned} \frac{B_{\text{к}}}{S^2} = \frac{\gamma C_0}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha\theta_{\text{к}}) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_{\text{к}} \right] + \\ + \frac{\gamma C_0}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha\theta_{\text{н}}) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_{\text{н}} \right] = A_{\text{к}} - A_{\text{н}}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где $A_{\text{к}}$ – функция, зависящая от материала проводника, соответствующая конечной температуре нагрева $\theta_{\text{к}}$, $\text{А}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$, определяется по кривым рис. 4.2;

$A_{\text{н}}$ – то же, соответствующая начальной температуре нагрева, определяется также по кривым рис. 4.2;

$B_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{к}}^2 dt$ – интеграл Джоуля, $\text{А}^2 \cdot \text{с}$, численно равный количеству энергии, выделенной током в проводнике с сопротивлением в 1 Ом в течение времени отключения $t_{\text{откл}}$.

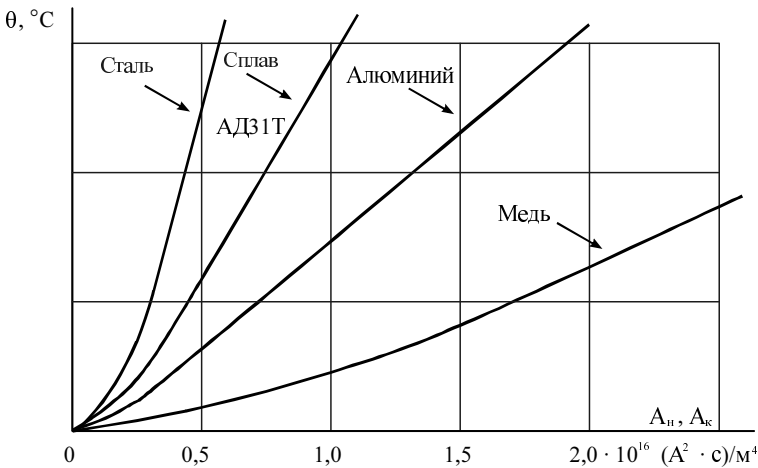


Рис. 4.2. Кривые для определения температуры нагрева при КЗ

Методы определения интеграла Джоуля B_k подробно изложены в работе [3, с. 48–56]. Поскольку в этой работе лабораторную установку можно рассматривать как электроустановку, питаемую от источника неограниченной мощности ($S_C = \infty$) и при $t_{\text{откл}} \geq T_a$, интеграл Джоуля допустимо определять по выражению

$$B_k = I_{\text{по}}^2 (t_{\text{откл}} + T_a), \quad (4.12)$$

где T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

В случаях, когда $t_{\text{откл}} > 1$ с, доля энергии, выделенной аperiodической составляющей тока КЗ, в общем балансе невелика и ею можно пренебречь, а интеграл Джоуля определять по упрощенному выражению $B_k \approx I_{\text{по}}^2 t_{\text{откл}}$. Для определения конечной температуры нагрева проводника при КЗ θ_k следует вычислять значение A_k :

$$A_k = A_n + \frac{B_k}{S^2}. \quad (4.13)$$

По найденному значению A_k с использованием кривой, соответствующей материалу проводника (рис. 4.2), определяют значение θ_k . Проводник термически стоек, если соблюдается условие $\theta_k \geq \theta_{k, \text{доп}}$.

4.2.5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЯХ

Электродинамические усилия возникают в каждом проводнике с током, находящимся в магнитном поле. Величины этих усилий для прямолинейных элементов РУ могут быть определены на основе законов Био–Савара. Если два параллельных проводника обтекаются током и проводник с током i_1 находится в магнитном поле тока i_2 , то величина усилия, действующего между ними, будет равна

$$F = 2i_1 i_2 \frac{l}{a} K_{\phi} 10^{-7}, \text{ Н}, \quad (4.14)$$

где i_1, i_2 – токи проводников, А;

a – расстояние между осями проводников, м;

l – длина проводников (расстояние между опорами), м;

K_{ϕ} – коэффициент формы.

Наибольшая величина электродинамических усилий определяется возможным максимальным током КЗ, т. е. ударным током i_y .

Если токоведущие проводники принадлежат одной цепи и $i_1 = i_2 = i_y$, то наибольшая сила взаимодействия будет равна

$$F = 2K_{\phi} i_y^2 \frac{l}{a} 10^{-7}, \text{ Н.} \quad (4.15)$$

Коэффициент формы K_{ϕ} учитывает влияние поперечных размеров проводника на электродинамические усилия и зависит от формы сечения проводников и их взаимного расположения. На рис. 4.3 показаны кривые для определения коэффициента формы K_{ϕ} шин прямоугольного сечения.

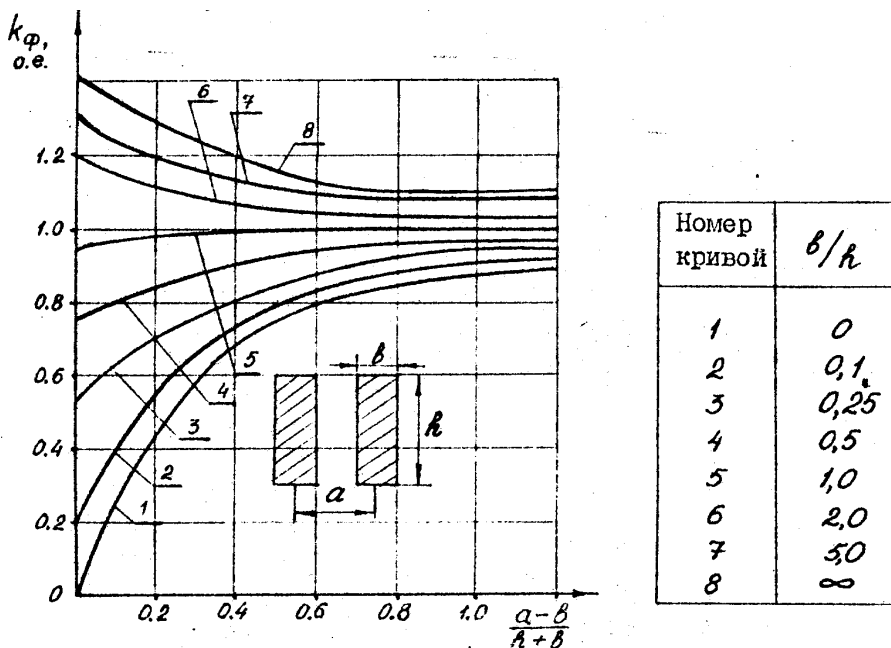


Рис. 4.3. Кривые для определения коэффициента формы шин прямоугольного сечения в функции от геометрических размеров проводника

Если расстояние между проводниками в свету ($a-b$) больше периметра $2(b+h)$, то коэффициент принимается равным единице. Электродинамическая стойкость проводников характеризуется величиной механических напряжений, возникающих в материале проводника под действием электродинамических сил.

Условие электродинамической стойкости

$$\sigma_{\text{расч}} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (4.16)$$

где $\sigma_{\text{расч}}$ – расчетное механическое напряжение при изгибе; $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимое механическое напряжение.

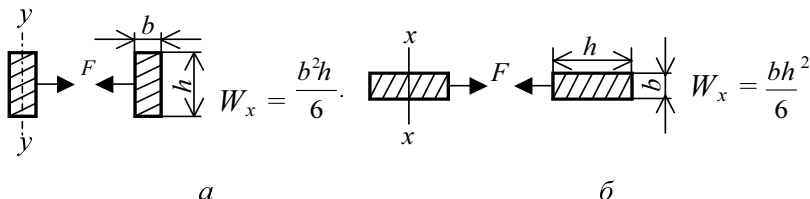


Рис. 4.4. Варианты расположения проводников прямоугольного сечения

В ПУЭ [4] указывается величина допустимых механических напряжений. Например, для алюминия марки АО и А1 $\sigma_{\text{доп}} = 82,3$ МПа, для меди марки МГМ $\sigma_{\text{доп}} = 175$ МПа ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 0,102 \text{ кгс/м}^2$).

Расчетное механическое напряжение $\sigma_{\text{расч}}$ определяется

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{w}, \quad (4.17)$$

где $M = \frac{Fl}{12}$ – изгибающий момент, Н · м;

w – момент сопротивления сечения шины, м³.

Для шин прямоугольного сечения момент сопротивления определяется по формулам, приведенным на рис. 4.4, *а* и 4.4, *б* [3, с. 65; 5, с. 223].

4.3. СПОСОБ ЗАМЕРА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ

Измерительный мост М собран на четырех резисторах R1–R4. Движок резистора R3 связан механически с шиной I. При протекании токов разного направления по шинам I и II (рис. 4.5, *а*) возникают силы, отталкивающие проводники в разные стороны. Изгибаясь, шина I заставляет перемещаться движок резистора R3 измерительного моста М (рис. 4.5, *а, б*). При перемещении движка резистора R3 мост М разбалансируется и измерительный прибор ИП1 фиксирует разность потенциалов между точками А и Б. Шкала прибора проградуирована в мегапаскалях (МПа). Резистор R2 предназначен для настройки моста

при обесточенных шинах I и II. Балансировку моста необходимо выполнять перед каждым замером. В диагональ ВГ моста М включен источник постоянного тока ИП1 = U .

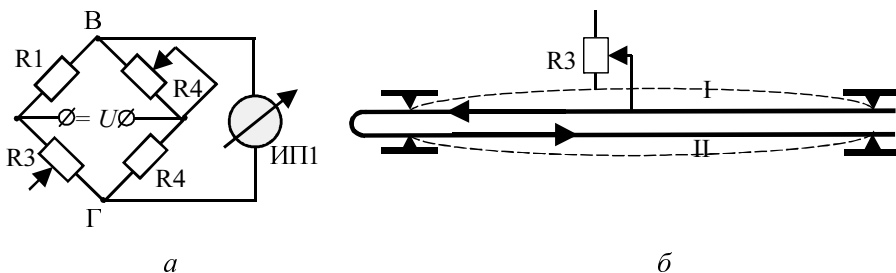


Рис. 4.5. Способ замера электродинамической силы

4.4. ЗАМЕР ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПРОВОДНИКА

Для замера температуры алюминиевой шины III в нее вмонтирован спай термопары, выход которой соединен с измерительным прибором ИП2, на дисплее которого высвечивается значение температуры в градусах Цельсия. Прибор ИП2 находится в правой нижней стороне стенда. Прибор включается в работу при подаче напряжения на стенд включением автомата АВ.

4.5. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Внешний вид передней панели стенда показан на рис. 4.6. Медные шины I и II служат для проведения опытов по замеру электродинамической силы, алюминиевая шина III – для опытов по исследованию нагрева. С правой стороны стенда имеется съемная накладка Н, с помощью которой осуществляется подключение испытываемых шин I и II (положение 2) или III (положение 1) к нагрузочному трансформатору.

Переменное напряжение U_1 , подаваемое на нагрузочный трансформатор НТ, можно менять в пределах 0...220 В с помощью регулируемого автотрансформатора АТ. Регулировочная рукоятка АТ находится под столешницей стенда. При этом меняется ток, протекающий по испытываемым шинам, в пределах 0...1000 А. Для измерения подаваемого напряжения на нагрузочный трансформатор служат два вольтметра: V1 – с пределом измерения 0...30 В и V2 – с пределом измерения 0...300 В. Вольтметр V1 автоматически отключается при $U > 30$ В.

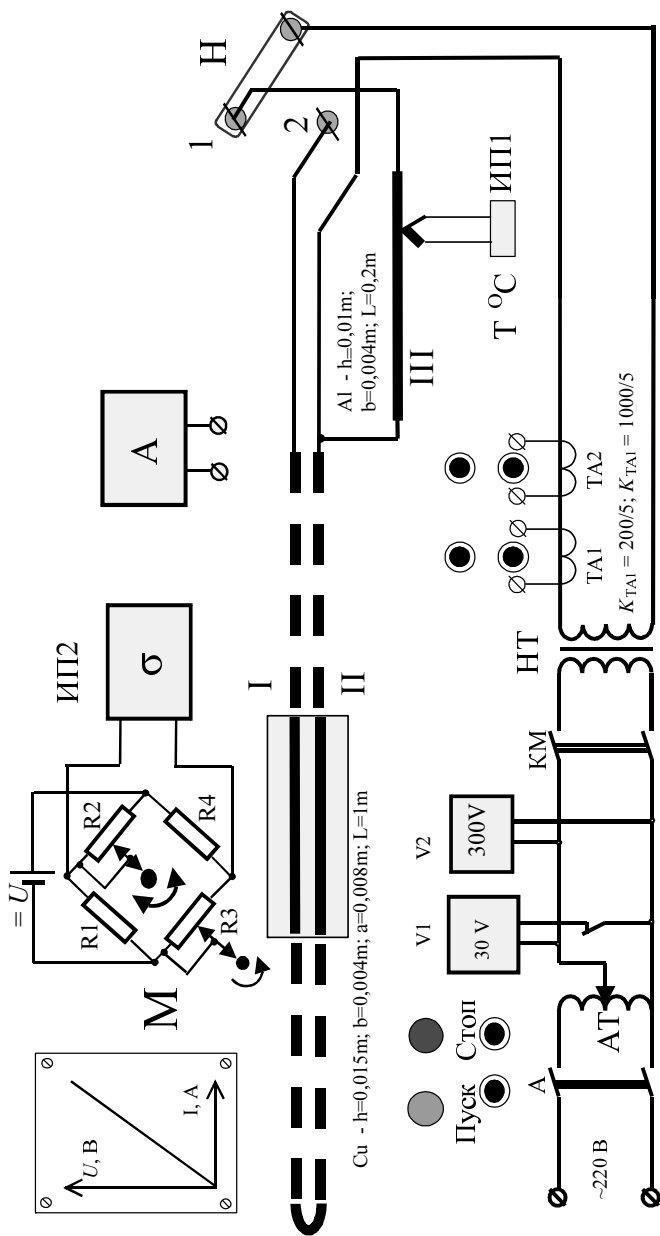


Рис. 4.6. Внешний вид передней панели стенда «Действие токов короткого замыкания»

Для получения заданного тока необходимо с помощью АТ поднять напряжение, контролируемое вольтметрами V1 и V2, до величины, определяемой по кривой $I = f(U)$. График зависимости $I = f(U)$ находится на панели стенда.

Величина тока, протекающего по испытываемым шинам, может контролироваться амперметром А, находящимся на передней панели стенда, или переносным прибором – мультиметром. Амперметр А подключается либо к трансформатору тока (ТТ) ТА1, либо к ТТ ТА2 специальными проводниками 1, подсоединенными к зажимам А. Проводники соединены с пластиной П, вид которой показан на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Специальные проводники для подключения к трансформаторам тока:

а – амперметра; *б* – мультиметра

Пластина П подсоединяется к зажимам выбранного ТТ, например, к ТА1. Наконечники *а* и *б* подсоединяются к зажимам амперметра в любом порядке. Выводы ТТ ТА2 должны быть закорочены металлической накладкой. Если амперметр подключен к ТА2, то металлическая накладка устанавливается на зажимы ТТ ТА1 и наоборот. Трансформаторы тока ТА1 служат для замера тока нормального режима; ТТ ТА2 служат для замера тока в режиме КЗ. Если выбранный ТТ не соответствует выбранному режиму, защита не позволит включить контактор КМ. При нормальном режиме горит зеленая лампа, в режиме КЗ – красная.

Мультиметр позволяет более точно зафиксировать ток как в режиме КЗ, так и в нормальном режиме. Мультиметр подключается к ТТ другими специальными проводниками 2. Они отличаются от проводников 1 наконечниками: вместо пластинчатых наконечников *а* используются штыревые – *б*.

Внимание! Красный проводник подключается к красному гнезду мультиметра, черный – к черному гнезду.

Нагрузочный трансформатор НТ включается нажатием кнопки «Пуск». Отключение при КЗ производится автоматически, а в нормальном режиме – дистанционно, нажатием кнопки «Смон». Коммутация цепи осуществляется контактами контактора КМ в первичной цепи НТ.

На левой верхней стороне стенда изображена мнемосхема моста М. На лицевую панель стенда введены рукоятки резисторов R3 и R2. Для питания моста М используется источник постоянного тока напряжением 4,5 В. Питание на мост М подается включением автомата АВ. Замер силы производится с помощью чувствительного прибора ИП1, шкала которого отградуирована в единицах силы (МПа).

В стенде имеется окно, которое служит для визуального наблюдения за шинами I и II в режиме КЗ.

4.6. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

1. Подсчитать постоянную времени нагрева алюминиевой шины III. Размер шины: $h = 0,011$ м, $e = 0,004$ м, $l = 0,20$ м. Теплоемкость шины – $19,03$ Вт · с/°С. Коэффициент теплоотдачи $k = 11,4$ Вт/(м² · °С).

2. Подсчитать установившуюся температуру θ_n шины III при протекании по ней тока нагрузки $I_{\text{нагр}} = 90$ А. Допустимый ток шины $I_{\text{доп}} = 100$ А.

3. Снять кривую нагрева шины III при протекании по ней тока $I_{\text{нагр}} = 90$ А. Полученную экспериментально установившуюся температуру нагрева сравнить с ранее подсчитанной. Отключить и снять кривую охлаждения. Определить графическим путем постоянную времени и сравнить ее с расчетной.

4. Расчетным путем определить температуру нагрева шины при токе КЗ в 1000 А и сравнить с $\theta_{\text{к.доп}}$. При расчетах необходимо учесть, что источником питания установки является система неограниченной мощности ($S_c = \infty$), при этом переходный процесс практически отсутствует и значение периодической составляющей тока КЗ остается постоянным. Время срабатывания релейной защиты равно $t_{\text{рз}} = 3,2$ с, а время отключения выключателя – $t_{\text{ПОВ}} = 0,2$ с.

5. Опытным путем определить температуру нагрева проводника при токе КЗ в 1000 А, сравнить с $\theta_{\text{к.расч}}$.

6. Расчетным путем определить величину механического напряжения $\sigma_{\text{расч}}$ (при токе КЗ в 1000 А) в испытываемых медных шинах (I и II)

и сравнить с $\sigma_{\text{доп}}$. Параметры шин: $b = 0,004$ м, $h = 0,015$ м, $a = 0,008$ м, $l = 1$ м.

7. Для тока КЗ, равного 1000 А, опытным путем определить механическое напряжение $\sigma_{\text{опыт}}$ и сравнить с $\sigma_{\text{расч}}$.

4.7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

К пункту 2

1. Подсчет θ_n предварительно произвести, приняв $\theta_0 = 20$ °С. По прибытию в лабораторию произвести пересчет по реальной температуре, замеренной прибором ИП2.

К пункту 3

Накладку Н поставить в положение 1.

Амперметр или мультиметр подключить к ТТ ТА1, а металлической накладкой закоротить выводы ТТ ТА2.

Выставить напряжение U , соответствующее току $I_{\text{нагр}} = 120$ А. Напряжение, соответствующее необходимому току, определяется по кривой $U = f(j)$.

Нажать кнопку «Пуск» и немедленно начать отсчет показаний прибора ИП2. Замеры производить через каждые 15 с и продолжать до тех пор, пока температура не достигнет установившегося значения 3–4 Т. Отключить установку и снять кривую охлаждения.

К пункту 5

1. Выставить напряжение, соответствующее расчетному току, и нажать кнопку «Пуск». Замерить температуру КЗ θ_k .

Внимание! Установка отключается устройством ВЗ за $t_{\text{откл}} \approx 3,4$ с. За это время необходимо успеть зафиксировать показания амперметра и прибора ИП2.

К пункту 7

1. Накладку Н поставить в положение 2.

2. Проверить балансировку моста М (См. «Описание работы стенда»).

3. Выставить напряжение, соответствующее току КЗ в 1000 А.

4. Нажать кнопку «Пуск» и снять показания прибора А и ИП1.

Внимание! Повторно включить установку можно через 2–3 мин во избежание нагрева шин и контактных соединений.

5. Проверить балансировку моста перед началом нового замера.

4.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Куда расходуется энергия, выделяемая в проводнике:
 - а) во время неустановившегося теплового процесса в нормальном режиме;
 - б) во время неустановившегося теплового процесса в режиме КЗ;
 - в) во время установившегося теплового процесса в нормальном режиме?
2. Как записывается уравнение теплового баланса проводника для нормального режима?
3. Что характеризует постоянная времени нагрева и как она определяется (аналитическим и графическими путем)?
4. Как рассчитывается установившаяся температура нагрева θ_n ?
5. Запишите условие термической стойкости проводника.
6. Каково уравнение нагрева проводника при КЗ?
7. Напишите выражение для определения A_k .
8. Как определяется конечная температура нагрева θ_k проводника при КЗ?
9. Чему равна допустимая температура нагрева проводника в режиме КЗ (например, для алюминиевых шин)?
10. Объясните, почему $\theta_{n, \text{доп}}$ не равна $\theta_{k, \text{доп}}$.
11. Напишите условие электродинамической стойкости проводников.
12. Запишите выражение для определения силы взаимодействия между проводниками конечной длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Новиков Ю.Н.* Теория и расчет электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1987. – 328 с. ил.
2. *Неклепаев Б.Н., Крючков И.П.* Электрическая часть станций и подстанций (справочные материалы). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с. ил.
3. *Васильев А.А. и др.* Электрическая часть станций и подстанций: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 575 с. ил.
4. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 573 с., ил.
5. *Рожкова Л.Д., Козулин В.С.* Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с. ил.
6. *Рожкова Л.Д., Карнеева Л.К., Чиркова Т.В.* Электрооборудование станций и подстанций: учебник для техникумов. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 648 с.
7. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с., ил.