



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электрические станции»

НАЛАДКА И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Пособие

**Минск
БНТУ
2024**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электрические станции»

НАЛАДКА И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Практикум для студентов специальности
7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника»
профилизации «Релейная защита и автоматика»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2024

УДК 621.31–77(075.8)

ББК 31.26–08я7

Н23

С о с т а в и т е л и :

*К. И. Артёменко, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц,
М. С. Конохов, М. М. Файзиев*

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра электрооборудования сельскохозяйственных предприятий
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
(зав. кафедрой, доктор техн. наук, профессор *М. А. Прищепов*);
начальник управления эксплуатации электротехнического
оборудования ГПО «Белэнерго» *В. Г. Петкевич*

Н23 **Наладка** и испытания электрооборудования: практикум для студентов специальности 7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника» профилизации «Релейная защита и автоматика» / сост.: К. И. Артёменко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – 42 с.

Практикум по курсу «Наладка и испытания электрооборудования» предназначен для профилизации «Релейная защита и автоматика». Содержание практикума соответствует действующей программе курса и включает семь лабораторных работ. Работы предусматривают экспериментальную часть, которую студенты должны проанализировать и сделать выводы на основе действующих требований к испытанию электрооборудования.

УДК 621.31–77(075.8)

ББК 31.26–08я7

ISBN 978-985-31-0057-0

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 СНЯТИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ПРИ НАЛАДКЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	4
Лабораторная работа № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	9
Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА И МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ	14
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МЕГАОММЕТРОМ	23
Лабораторная работа № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ ПОЛЯРОМЕРА.....	29
Лабораторная работа № 6 СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА	34
Лабораторная работа № 7 ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА.....	37
Литература.....	42

Лабораторная работа № 1

СНЯТИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ПРИ НАЛАДКЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Цель работы: приобретение умений и навыков снятия и построения векторных диаграмм.

Краткие теоретические сведения

При наладке электрооборудования завершающим этапом является проверка правильности его работы, т. е. проверка того, что оборудование имеет требуемый порядок следования (чередования) фаз, токи и напряжения в фазах (частях устройства, схемы и т. п.) совпадают с требуемыми значениями по величине и углу. Кроме того, выполняются и другие проверки.

В этой связи при наладке электрооборудования проводится комплекс измерений с последующим построением по полученным данным векторных диаграмм. Анализируя построенные векторные диаграммы, устанавливают, правильно или неправильно работает налаживаемое оборудование.

Выполняемые при этом измерения называют снятием векторных диаграмм, и они могут быть выполнены при использовании разных приборов: вольтамперфазоиндикаторов; вольтметров, амперметров и фазометров; векторметров; ваттметров и др. Эти приборы подключаются ко вторичным обмоткам измерительных трансформаторов тока и напряжения, и при правильном их подключении построенная впоследствии векторная диаграмма будет соответствовать реальным величинам (с учетом коэффициентов трансформации) и положению векторов токов и напряжений в фазах силовой цепи оборудования.

Чаще всего для снятия векторных диаграмм применяется вольтамперфазометр, например, вольтамперфазометр М2 (ВАФ М2). В качестве базового напряжения в приборе ВАФ М2 используется напряжение U_{AB} трехфазной системы.

В работе предлагается снять и построить векторные диаграммы напряжений и токов для сети с изолированной нейтралью при замыкании одной из фаз на землю с двумя разными величинами сопротивлений в месте замыкания. Для этого переменное сопротивление

ние включается в цепь замыкания на землю фазы, указанной преподавателем (рис. 1).

Используя ВАФ М2, снимают векторные диаграммы напряжений в сети и токов в цепи замыкания на землю. Чтобы не отвлекать студентов от работы при измерениях, ключ SA должен быть отключен, т. е. сигнализация замыкания на землю выводится из работы.

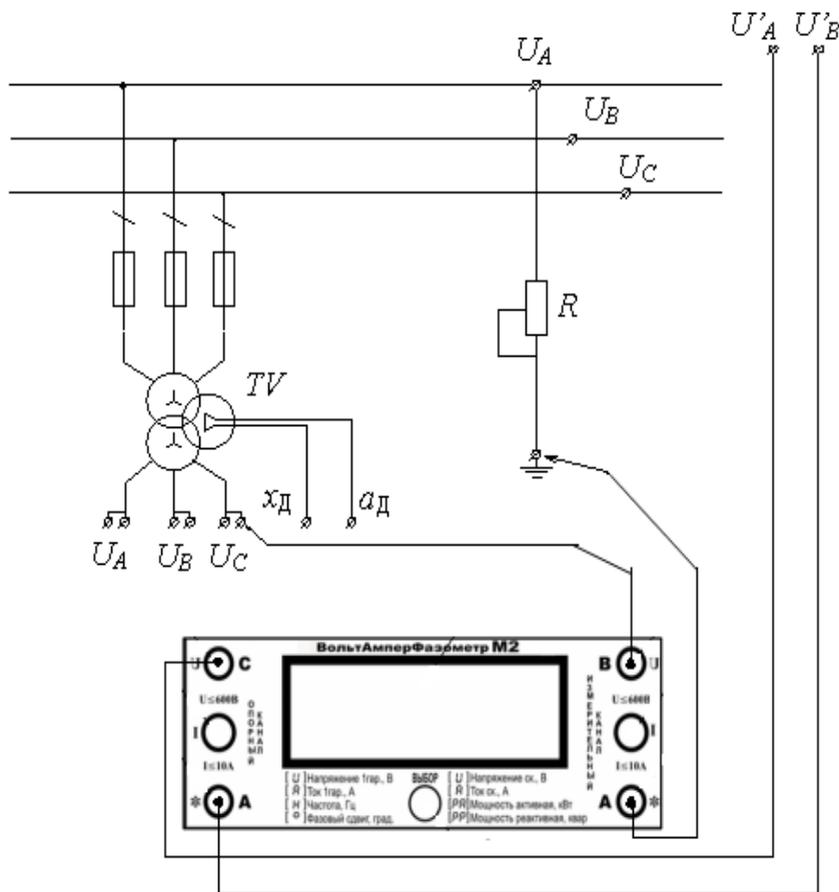


Рис. 1. Схема измерения напряжения при замыкании на землю фазы А

Варианты задания приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты задания для снятия векторных диаграмм

№ варианта	Фаза замыкания на землю	Величины сопротивления цепи, Ом	
		Первое значение	Второе значение
1	<i>A</i>	8 000	200
2	<i>B</i>	1 500	180
3	<i>C</i>	1 200	160
4	<i>A</i>	1 300	140
5	<i>B</i>	5 000	120
6	<i>C</i>	2 500	190
7	<i>A</i>	3 700	170
8	<i>B</i>	7 500	150
9	<i>C</i>	3 000	130

Описание лабораторной установки

Настоящая лабораторная работа выполняется на оборудовании установки лабораторной работы «Измерительные трансформаторы напряжения» курса «Производство электроэнергии».

Эта установка содержит трехфазный разделительный трансформатор 220/220 В, вторичная обмотка которого является источником питания сети с изолированной нейтралью; трансформатор напряжения НТМИ-10, подключенный к сети с изолированной нейтралью. Обмотки НТМИ-10 выполнены на напряжения 220/36/21 В. В состав установки входит лабораторный стенд со схемой сети и вольтметрами для контроля фазных, линейных напряжений и напряжения нулевой последовательности. Для выполнения настоящей работы в установке дополнительно выведены клеммы питающей трехфазной четырехпроводной лабораторной сети U'_A, U'_B, U'_C ; клеммы фаз сети с изолированной нейтралью U_A, U_B, U_C ; установленный ключ *SA*, выводящий из работы сигнализацию замыкания фазы сети на землю; переменное сопротивление, включаемое в цепь замыкания любой из фаз сети с изолированной нейтралью на землю.

Ключ *SA*, смонтированный на стенде, должен постоянно находиться в положении «Включено» и отключается только на время выполнения настоящей лабораторной работы.

Содержание работы и порядок ее выполнения

Рекомендуется следующий порядок снятия векторных диаграмм:

1. Собирается схема в соответствии с заданным вариантом (на рис. 1 приведена схема измерения напряжения U_C при замыкании на землю фазы A).

2. Определяются величины фазных и линейных напряжений сети (на клеммах U_A , U_B , U_C выводов вторичных обмоток трансформатора напряжения). Для этого кнопкой «Выбор» на ВАФ М2 выбираются режимы работы «Напряжение» и «Угол сдвига фаз». Соединив проводом зажим «*» измерительного канала с «землей» и поочередно присоединяя провод от зажима « U » измерительного канала к соответствующим зажимам вторичной обмотки трансформатора напряжения, измеряют величины фазных напряжений. Изменив схему подключения прибора, измеряют линейные напряжения. Начало вектора линейного напряжения подключается к зажиму «*» измерительного канала, конец вектора – к зажиму « U » измерительного канала.

3. Для измерения углов сдвига напряжений кнопкой «Выбор» выбирают режим работы «Угол сдвига фаз». После этого производится измерение угла сдвига измеряемого напряжения.

4. Величина и угол тока в цепи замыкания на землю измеряется с помощью клещевой приставки. Для этого токоизмерительными клещами приставки охватывается провод с измеряемым током таким образом, чтобы сторона их, обозначенная «*», была обращена в сторону замкнутой фазы. При этом клещи подключаются к измерительному каналу прибора. Кнопкой «Выбор» выбирается режим измерения тока. Последовательность действий при измерении величины тока и его фазового сдвига аналогична изложенному выше.

5. Измерение угла сдвига между двумя векторами U_{AB} и $3U_0$ проводится аналогично пунктам 2 и 3. Зажим « U » измерительного канала подключается к выводу a_D обмотки трансформатора напряжения, соединенной в разомкнутый треугольник, а зажим «*» измерительного канала – к выводу x_D .

6. По данным измерений для двух заданных режимов работы сети строятся совмещенные векторные диаграммы всех измеренных напряжений и тока замыкания на землю. Полученные векторные диаграммы анализируются.

7. Составляется отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать: цель работы, задание и результаты измерений, построенные векторные диаграммы, результаты анализа диаграмм.

Данные задания и результаты измерений могут быть представлены в виде табл. 2:

Таблица 2

Данные задания и результаты измерений

Величины сопротивлений, Ом			
Величины и углы сдвига фазных напряжений	$U_A, В$		
	$U_B, В$		
	$U_C, В$		
	$\varphi_{A,}^{\circ}$		
	$\varphi_{B,}^{\circ}$		
	$\varphi_{C,}^{\circ}$		
Величины и углы сдвига линейных напряжений	$U_{AB}, В$		
	$U_{BC}, В$		
	$U_{CA}, В$		
	$\varphi_{AB},^{\circ}$		
	$\varphi_{BC},^{\circ}$		
	$\varphi_{CA},^{\circ}$		
Величины и углы сдвига токов	$I_{\text{зам фазы}(A, B, C)}, А$		
	$\varphi_{(A, B, C)},^{\circ}$		
Угол сдвига между U_{AB} и $3U_0,^{\circ}$			
$3U_0, В$			

Лабораторная работа № 2 **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК** **ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Цель работы: освоение методики и приобретение навыков оценки состояния обмоток электрооборудования.

Краткие теоретические сведения

Обмотки электрического оборудования – электродвигателей, генераторов, трансформаторов, реакторов, катушки приводов коммутационных аппаратов, реле и других устройств – являются одной из активных его частей. От их исправности и работоспособности зависит работоспособность оборудования в целом.

Дефекты в обмотках оборудования могут возникать в процессе его изготовления, транспортировки, хранения, монтажа и работы. К ним относятся нарушения межвитковой и главной изоляции, ее увлажнение, механические повреждения токоведущих частей, нарушение соединений в токоведущих частях, токопроводах, выводах и др.

В этой связи при введении оборудования в эксплуатацию необходимо определять состояние обмоток с тем, чтобы своевременно выявить и устранить дефекты в них, а также оценить возможность включения под напряжение.

Для определения состояния обмоток измеряется сопротивление их изоляции постоянному току, сопротивление токоведущих частей постоянному току, проверяются схемы их соединения и проводится испытание изоляции обмоток повышенным напряжением. Оценка состояния обмоток осуществляется путем анализа и сравнения полученных результатов измерений с данными завода-изготовителя оборудования или с данными предыдущих испытаний. Если они не различаются или отличаются менее чем на 2 %, обмотки считаются исправными и работоспособными [1].

Измерение сопротивления изоляции и методика работы с цифровым мегаомметром рассматриваются в лабораторной работе № 4.

Методика определения состояния токоведущих частей обмоток основана на влиянии на сопротивление постоянному току целости обмоток.

При наличии значительного количества короткозамкнутых витков измеренное сопротивление обмотки меньше, а при обрыве или нарушении качества контактных соединений – превышает приведенное в паспорте значение.

Измеренные сопротивления постоянному току обмоток фаз трехфазного оборудования (двигателей, генераторов, трансформаторов, реакторов и др.), не имеющих повреждений, должны быть практически одинаковыми (допускается разница до 2 % [1]). Различие в результатах измерений по фазам больше допустимого является признаком наличия дефекта в пайке выводов или лобовых частей, или обрыва параллельных проводников в обмотке.

В настоящее время для измерения сопротивления обмоток используется метод амперметра-вольтметра. Современные приборы, основанные на этом методе, называются микроомметры.

Для измерения сопротивлений обмоток в данной лабораторной работе применяется микроомметр РЕТ-МОМ. На рис. 2 изображена лицевая панель установки.



Рис. 2. Лицевая панель микроомметра РЕТ-МОМ

Прибор представляет собой микроомметр с микропроцессорной обработкой данных. Прибор имеет два режима работы – миллиомметр и микроомметр. На лицевой панели расположено светодиодное табло для управления процессом измерения и индикации его результатов. Для перемещения по меню прибора предназначены кнопочный интерфейс и кнопка «ВВОД». Для запуска и остановки испытания предназначены кнопки «ПУСК» и «СТОП». С правой стороны прибора располагаются две группы токовых выводов. Верхняя группа выводов предназначена для выдачи небольших (до 12 А) токов при измерении относительно больших (от 2 мОм до 200 Ом) сопротивлений в режиме работы «Миллиомметр». Верхняя группа выводов предназначена для выдачи больших (до 600 А) токов при измерении меньших (от 1 мкОм до 100 мОм) сопротивлений в режиме работы «Микроомметр». Для снятия падения напряжения на измеряемом объекте имеется группа измерительных выводов *PV*. Токовые выводы с помощью соединительных проводов различного сечения присоединяются к объекту измерения. С помощью проводов малого сечения к объекту измерения присоединяются измерительные выводы *PV*. Для передачи результатов испытания на лицевой панели имеется интерфейс *USB*.

Сопротивление постоянному току измеряют при установившейся температуре окружающей среды, которая обычно отличается от температуры заводских испытаний. Для сопоставления результатов измерения сопротивления приводят к одной температуре 20 °С по формуле:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{C + t_2}{C + t_1},$$

где R_2 – сопротивление, приведенное к температуре t_2 ;

R_1 – сопротивление, измеренное при температуре t_1 ;

C – коэффициент, который для меди равен 235, для алюминия – 245.

Методы проверки схем соединений обмоток и испытания изоляции повышенным напряжением в содержание настоящей работы не входят.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя статор синхронного генератора СГ-35/6 и микроомметр РЕТ-МОМ. Электрическая схема обмоток статора генератора приведена на рис. 3.

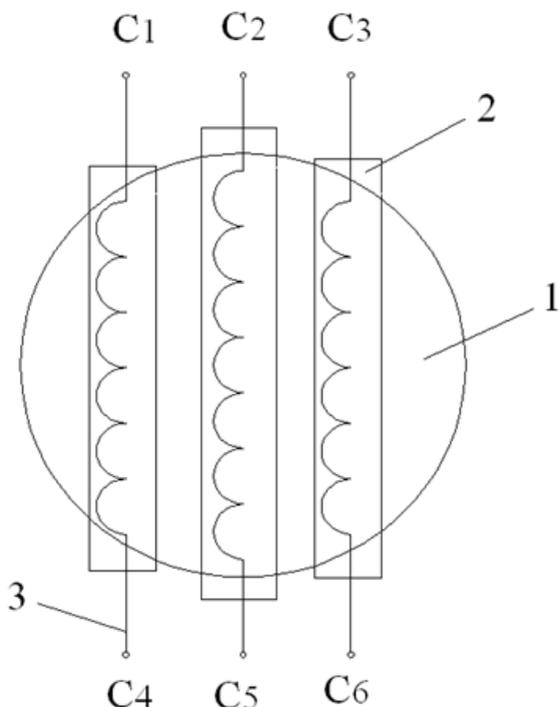


Рис. 3. Электрическая схема обмоток статора генератора:
1 – статор генератора; 2 – изоляция обмотки фазы;
3 – токоведущая часть обмотки фазы

Содержание работы и порядок ее выполнения

Последовательность работы с прибором:

1. Ознакомиться с инструкцией и лабораторной установкой.
2. Записать паспортные данные статора генератора.
3. Подключить РЕТ-МОМ к выводам фазы *A* статора генератора (C1 и C4). Провода с большим сечением подключаются к верхнему

токовому выходу I , провода с меньшим сечением – к выходу напряжения PV . Провода с красным наконечником подключаются к выходным клеммам красного цвета, с черным наконечником – к выходным клеммам белого цвета. На выводах фаз генератора красный провод цепи напряжения подключается к красному проводу цепи тока, черный провод цепи напряжения – к черному проводу цепи тока.

4. С помощью кабеля питания подключить прибор к сети 220 В, 50 Гц. Включить прибор переводом клавиши включения в положение «Вкл.»

5. После появления на светодиодном индикаторе меню выбрать строку «МИЛЛИОМЕТР» нажатием правой стрелки. Повторным нажатием правой стрелки перейти в режим настройки тока и выбрать ток испытания (не менее 10 % от номинального тока испытуемого объекта).

6. Нажатием кнопки «ПУСК» начать испытание. После завершения измерения на табло появится надпись «Размыкание цепи разрешено». После нажатия правой стрелки на табло высветится результат.

7. Собрать схему и повторить измерения для фаз B (выводы $C2$ и $C5$) и C (выводы $C3$ и $C6$).

8. Составить отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать: цель работы, результаты измерений, вывод об оценке состояния обмоток статора с необходимыми обоснованиями.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА И МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Цель работы: ознакомить студентов с простейшими методами выявления характера и места повреждения кабельных линий.

Краткие теоретические сведения

Силовые кабельные линии наряду с известными достоинствами (возможность прокладки нескольких линий вблизи различных сооружений, малая зависимость от метеорологических условий и т. п.) имеют и существенный недостаток, заключающийся в длительности выявления и ликвидации повреждений. В зависимости от конкретных условий время восстановления линии после повреждения составляет от нескольких часов до 2–3 суток. При аварийных повреждениях кабелей в ряде случаев имеет место недоотпуск электроэнергии потребителям. Поэтому первостепенное значение приобрели испытания вновь вводимых и действующих кабельных линий энергосистем и промышленных предприятий, проводимые в соответствии с действующими ТКП [2; 3] и ПУЭ [4].

подавляющее большинство повреждений кабельных линий связано с местными сосредоточенными дефектами. Поэтому методы так называемых неразрушающих испытаний (измерение токов утечки, токов абсорбции, диэлектрических потерь, сопротивления изоляции) для них обычно неэффективны. В настоящее время испытание изоляции кабелей повышенным напряжением постоянного тока является основным способом выявления сосредоточенных дефектов. Следует подчеркнуть, что повышенное испытательное напряжение не оказывает вредного влияния на здоровую изоляцию кабеля, так как при этом отсутствует даже неопасная начальная ионизация.

Основным назначением испытаний повышенным напряжением постоянного или переменного тока является доведение ослабленного места изоляции до пробоя с целью предотвращения аварий на кабельной линии в эксплуатации.

Для обеспечения надежности и экономичности энергоснабжения потребителей кабельные линии, пробитые при испытаниях или аварийно вышедшие из строя, должны быть введены в работу в крат-

чайшие сроки. В технологии ремонта силовой кабельной линии наибольшие затраты времени приходится на определение места повреждения. Эффективность этой операции зависит от условий, при которых возникло повреждение. Большая часть эффективных методов определения места повреждения (волновой, индукционный и другие) требуют, чтобы переходное сопротивление в месте повреждения было снижено обычно до десятков, единиц или даже долей Ома. Кроме того, для успешного применения индукционного метода весьма желательно перевести однофазное повреждение в двухфазное. Все это достигается путем прожигания изоляции в дефектном месте с помощью специальных установок. Прожигание дефектной изоляции силовых кабельных линий производится за счет энергии, выделяющейся в канале пробоя. При этом происходит обугливание изоляции в месте повреждения и снижение переходного сопротивления. Следует отметить, что прожигание позволяет непосредственно и просто выявлять повреждения в концевых разделках по нагреву, появлению дыма и запаха гари. Последнее значительно сокращает время ликвидации дефекта, так как не требует развертывания аппаратуры для отыскания мест повреждения.

Виды повреждений кабельных линий

Изоляция силовых кабельных линий, питающих промышленные или коммунальные объекты, должна удовлетворять требованиям нормативных материалов [2–4]. Не удовлетворяющая этим условиям кабельная линия относится к категории «поврежденных». Такая линия должна быть отключена от сети. С обеих ее сторон вывешиваются плакаты «Не включать! Работают люди». Производят определение места повреждения кабельной линии тем или иным методом измерения. Если кабельная линия после ремонта удовлетворяет требованиям [1], ее включают в эксплуатацию. Следующие причины могут вызывать повреждения кабельных линий:

- пробои и вмятины, нанесенные при раскопках на кабельных трассах;
- дефекты монтажа муфт (непропаянные шейки муфт, надломы изоляции на жилах при разводке, плохая пропайка и обработка соединительных зажимов, неполная заливка муфт мастикой);

– заводские дефекты (повреждение защитных покровов кабеля и его оболочки, совпадение бумажных лент изоляции жил кабеля, морщины, поперечные надрывы на лентах, заусенцы на проволоках токоведущих жил);

– коррозия оболочки кабеля, вызванная действием блуждающих токов электрифицированного транспорта или влиянием различных химических реагентов, содержащихся в почве;

– обрывы токоведущих жил кабельных линий, возникающие при осадках или смещениях грунта на трассе линии, при перегорании жил во время коротких замыканий;

– электрическое старение изоляции или ее перегрев;

– дефекты прокладки (крутые изгибы при поворотах трассы, перекрутка кабеля, изломы, вмятины).

Основные виды повреждений кабелей – это механические повреждения, возникающие при производстве земляных работ, и дефекты прокладки кабеля и монтажа муфт, эксплуатации кабельных линий. Своевременное выявление дефектов изоляции кабеля и муфт является задачей периодических испытаний кабельных линий. Устранение дефектов в кабелях повышает уровень изоляции сети.

Повреждения кабельных линий носят различный характер и могут быть разделены на следующие виды:

– повреждение изоляции, вызывающее замыкание одной жилы на землю;

– повреждение изоляции, вызывающее замыкание двух или трех жил на землю, двух или трех жил между собой в одном или разных местах; обрыв одной и более жил без заземления или с заземлением, как оборванных, так и необорванных.

Возможны заплывающие пробой изоляции: пробой одной жилы на землю; одной, двух или трех жил между собой без заземления и с заземлением.

Все возможные повреждения в кабельной сети связаны в той или иной степени с изменением сопротивления изоляции или жилы. На основе этих изменений сопротивлений можно построить методы, дающие возможность определить вид повреждения и поврежденную жилу.

Методы определения вида повреждения

В большинстве случаев для определения вида повреждения кабельной линии производится измерение сопротивлений изоляции каждой жилы кабеля по отношению к земле и между каждой парой жил с помощью мегаомметра. Для проведения испытаний кабель должен быть отсоединен от сети с обеих сторон. Далее проверяют отсутствие замыкания всех жил кабеля с землей и между собой.

Схема для проверки на пробой изоляции между жилой и экраном (или свинцовой оболочкой) изображена на рис. 4. Один зажим мегаомметра заземляется, а другой поочередно присоединяется ко всем жилам кабеля.

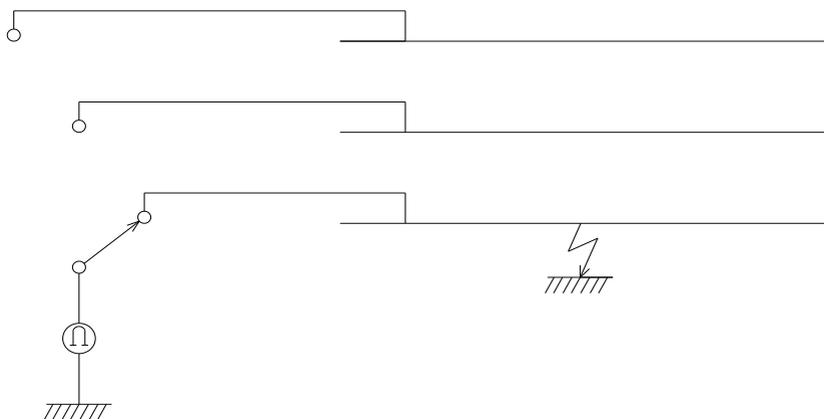


Рис. 4. Проверка на пробой изоляции между жилой и свинцовой оболочкой

Проверка на пробой изоляции между двумя фазами производится по схеме, представленной на рис. 5, а между фазой и экраном (или свинцовой оболочкой) – на рис. 6.

Чтобы обнаружить обрыв жил, необходимо произвести с обоих концов кабеля прозвонку каждой жилы относительно земли мегаомметром при наложении закоротки и заземлении всех жил кабеля на противоположном конце. Существование обрыва жилы кабеля проверяется по схеме, представленной на рис. 7.

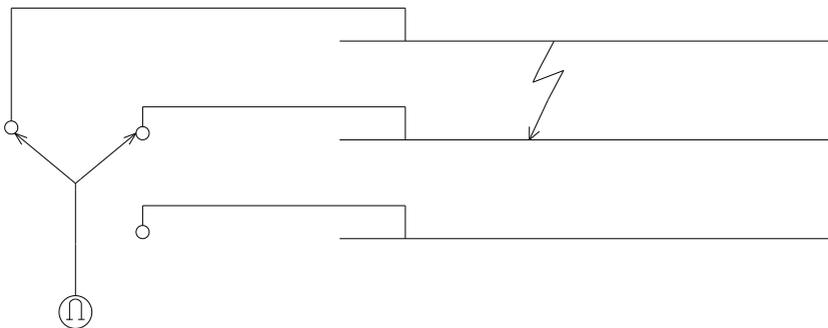


Рис. 5. Проверка на пробой изоляции между фазами

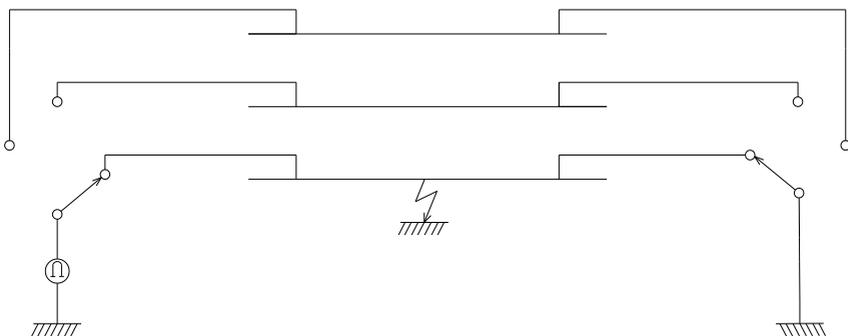


Рис. 6. Проверка на пробой изоляции между фазой и экраном (оболочкой)

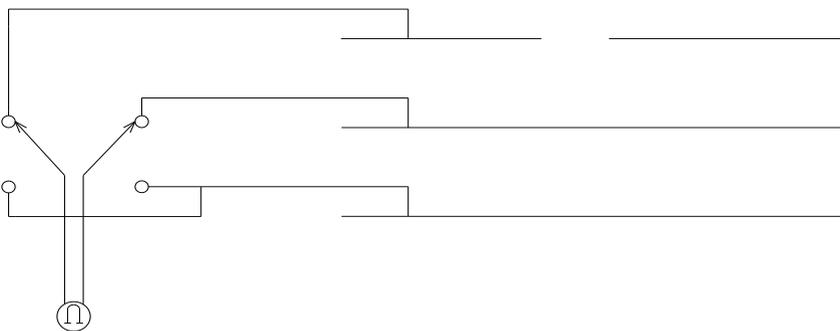


Рис. 7. Проверка на обрыв жилы кабеля

Комбинированное повреждение может быть обнаружено также на основе измерений сопротивлений по схемам рис. 4–7 и анализа полученных результатов. Знание вида повреждения кабеля дает возможность перейти к определению места повреждения.

Методы определения места повреждения

К методам определения места повреждения (ОМП) кабельных линий предъявляются следующие требования:

1) погрешность ОМП не должна превышать 3 м, что обусловлено трудностью раскопок при расположении кабельных линий под усовершенствованными покрытиями;

2) для ускорения ввода линии в эксплуатацию время определения места повреждения не должно превышать нескольких часов;

3) высокая надежность применяемых аппаратов и безопасность производства работ.

Существующие методы ОМП силовых кабельных линий целесообразно разделить на две группы: дистанционные (волновой, петлевой, емкостной), позволяющие определить расстояние от места измерения до места повреждения, и топографические (индукционный, акустический, контактный), позволяющие указать место повреждения непосредственно на трассе (топографически).

Кратко рассмотрим эти методы.

Волновой метод основан на том, что в кабельную линию посылается не кратковременный импульс, а волна напряжения большой длительности и высокого напряжения (в отличие от локационного искателя). Измеряется время прохождения фронтом волны расстояния до места повреждения (МП) и обратно. Волна высокого напряжения вызывает в МП искровой разряд, поэтому волновой метод можно использовать как при малом, так и при большом значении переходного сопротивления без «прожига» изоляции.

Петлевой метод основан на измерении соотношения активных сопротивлений двух участков жил кабельной линии: первый участок – поврежденная жила кабельной линии от одного конца кабеля до МП, второй участок – от МП до другого конца кабеля с учетом неповрежденной жилы кабеля. Измерение соотношения осуществляется четырехплечевым мостом постоянного тока. Этот метод применим при замыкании одной или двух жил на оболочку кабельной линии без обрыва через $r_{\text{пер}} = 10 \text{ кОм}$.

Емкостной метод основан на измерении емкости частей оборванной жилы кабельной линии. Измерения производятся мостом переменного тока на частоте 1 кГц. Подобные измерения дают приемлемую точность ОМП при $r_{\text{пер}} = 300\text{--}500 \text{ Ом}$.

При ОМП дистанционными методами не производят раскопки кабельной линии, поэтому дополнительно применяется ряд топографических методов.

Индукционный метод основан на улавливании магнитного поля звуковой частоты над трассой кабельной линии. Генератор звуковой частоты, например, типа ГК-77 (с частотой 800–1000 Гц) подключается к петле короткого замыкания. На поверхности земли, перемещаясь вдоль кабельной линии, при помощи индукционной рамки, усилителя и телефона можно проследить трассу КЛ, места расположения муфт (по усилению звука), оценить глубину заложения, найти МП. Для усиления сигналов, получаемых от рамки или акустического датчика, применяются переносные усилители переменного тока. В энергосистемах применяются кабелеискатели типа АИП-3М. В настоящее время разработан усовершенствованный кабелеискатель типа КАИ-77.

Акустический метод основан на прослушивании над МП звуковых колебаний, вызываемых искровым разрядом, в канале повреждения. Он эффективен при однофазных и многофазных замыканиях с различными $r_{\text{пер}}$, обрывах жил, позволяет определить МП на подводных участках кабельной линии. Прослушивание звуковых колебаний на поверхности земли производится стетоскопом или акустически датчиком с усилителем и телефоном типа АИП-3М или КАИ-77.

Контактный метод основан на измерении электрического напряжения от токов в земле. Место замыкания жилы на оболочку кабельной линии определяют по изменению направления тока в земле в районе МП при питании петли «поврежденная жила кабельной линии электропередачи – оболочка» постоянным или однополярным импульсным напряжением. Два контактных стержня, перемещаемых вдоль трассы КЛ на неизменном расстоянии 0,5–1 м между ними, подключаются к чувствительному направленному измерительному прибору.

Выявление места повреждения на кабеле при раскопке

После определения топографическим методом места повреждения кабеля на трассе приступают к его раскопке для ремонта. Раскопка повреждения кабельной линии должна производиться самим эксплуатационным персоналом или под его постоянным надзором и контролем.

Раскапывать трассу кабеля разрешается исключительно лопатами. Применение ломов, пневматических инструментов и клиньев допускается только для снятия верхнего покрова на глубину не более 0,25 м. При разогревании почвы в зимнее время приближение слоя горячих углей к кабелям допускается не ближе 0,15 м. При приближении к кабелю на ширину лопаты роются контрольные шурфы на расстоянии 0,5 м от предполагаемой трассы кабеля. После обнаружения кабеля раскопка расширяется до ширины будущей траншеи.

Первым признаком места повреждения кабеля является наличие характерного запаха горелого джута оплетки кабеля. Предполагаемое место повреждения кабеля тщательно очищается от земли. Если произошло аварийное повреждение кабеля, то его разрушение от токов короткого замыкания бывает настолько значительным, что выгорают свинец и броня с образованием видимого отверстия или вмятины, которые легко обнаруживаются на ощупь.

В тех случаях, когда повреждение кабеля произошло при профилактическом испытании, обнаружить его значительно труднее. Для выявления таких скрытых повреждений необходимо тщательно очистить предполагаемое МП от земли и по возможности приподнять кабель. В месте раскопки за кабелем устанавливается наблюдение, а на одном его конце осуществляется прожигание.

При низких переходных сопротивлениях прожигание осуществляется по схеме «поврежденная жила – земля» током 20–50 А. Прожигательной установкой могут служить генератор звуковой частоты, сварочный трансформатор или низковольтная обмотка сетевого трансформатора с токоограничивающим сопротивлением.

В большинстве случаев в самом начале прожига из-под витков брони поврежденного места кабеля появляется струйка дыма, выделяется пропиточная масса, и чувствуется запах горелого джута. В последующий момент место повреждения кабеля начинает нагреваться и может быть выявлено прощупыванием рукой.

Возникающие в кабеле разряды хорошо прослушиваются на раскопанном кабеле, и при прожигании брони наблюдается дуга разряда. Кабели, имеющие междуфазное короткое замыкание, в раскопке хорошо уточняются индукционным методом. Ведя накладную рамку кабелеискателя непосредственно по кабелю, легко установить место прекращения звучания в телефоне индукционного приемника в месте повреждения.

Содержание работы и порядок ее выполнения

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями, изложенными в данной лабораторной работе.
2. Кратко законспектировать основные виды повреждений, возникающих в кабельной линии, а также изложить и зарисовать основные методы определения вида повреждения.
3. Кратко законспектировать основные методы определения места повреждения.
4. Ознакомиться с мерами безопасности и последовательностью действий при раскопках места повреждения на кабеле.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МЕГАОММЕТРОМ

Цель работы: изучить основные методы и получить практические навыки работы с измерительной аппаратурой при определении состояния изоляции электрооборудования в процессе производства наладочных работ.

Краткие теоретические сведения

Изоляция или электроизоляционные материалы наряду с токоведущими, магнитными и конструкционными материалами являются неотъемлемыми частями каждой электроустановки.

Рассмотрим основные виды дефектов изоляции электрооборудования и способы их определения.

Механические повреждения возникают в результате неправильной транспортировки и хранения электрооборудования. Возможны видимые и невидимые скрытые механические повреждения. Видимые выявляются, в основном, визуальным осмотром. Скрытые, внутренние – в результате испытаний и проверок, которые будут рассмотрены ниже.

Наиболее часто встречающийся дефект изоляции – это ее увлажненность. Электроизоляционные материалы в большей или меньшей степени гигроскопичны, т. е. обладают способностью впитывать в себя влагу из окружающей среды, и влагопроницаемы, т. е. способны пропускать через себя пары воды. Увлажненность изоляции отрицательно сказывается на ее основных характеристиках. Основной характеристикой электрической изоляции является ее электрическое сопротивление.

Любая изоляция, применяемая в электроустановках, по существу есть конденсатор со сложной средой. Обкладками его являются наружные элементы конструкции аппарата (корпус, сердечник и др.) и токоведущие части (жилы кабеля, провода, шины), среда – изоляционный материал, структура которого определяется не только используемым материалом, но и его состоянием (наличием дефектов и увлажнением). Электрическая схема замещения изоляции приведена на рис. 8.

При приложении выпрямленного напряжения к схеме замещения в первый момент времени проходит только ток I_{Γ} заряда геометрической емкости C_{Γ} , т. е. емкости, определяемой геометрическими размерами изоляции. Этот ток быстро прекращается, а положительные и отрицательные заряды, накопившиеся на границах изоляции за этот период времени, создают в ее толще электрическое поле, под действием которого после прекращения прохождения тока I_{Γ} возникает явление поляризации. Это явление связано с прохождением тока $I_{абс}$ после заряда геометрической емкости.

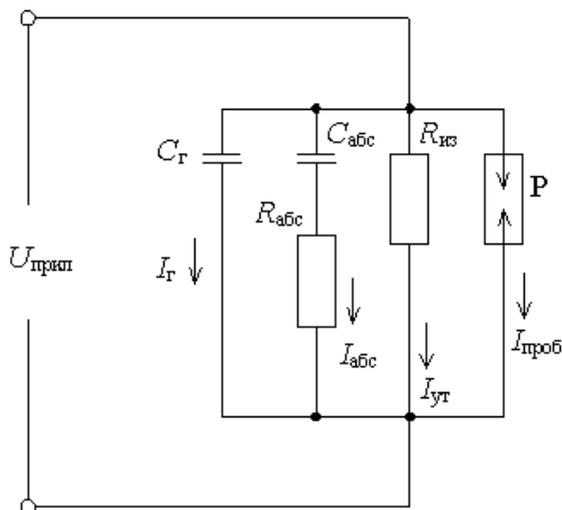


Рис. 8. Электрическая схема замещения изоляции:

- C_{Γ}, I_{Γ} – геометрическая емкость и ток ее заряда;
 $R_{абс}, C_{абс}, I_{абс}$ – сопротивление абсорбции, абсорбционная емкость и ток ее заряда;
 $R_{из}, I_{ут}$ – сопротивление изоляции постоянному току и ток утечки, им определяемый; $I_{проб}$ – ток в изоляции при ее пробое;
 $U_{прил}$ – напряжение, приложенное к изоляции при измерениях и испытаниях;
 R – разрядник, условно изображающий пробой в изоляции

Ток поляризации определяется медленным поворотом под влиянием электрического поля диполей, характерных для изоляции, а также зарядом отдельных конденсаторов $C_{абс}$, образующихся между слоями. Значение его зависит от дефектов и неоднородности изоляции и сопротивления $R_{абс}$ смежных участков, представляющих собой чисто активное сопротивление.

Известно, что процесс ориентировки диполей в электрическом поле происходит медленно и требует затрат энергии. В результате ток заряда конденсатора изменяется во времени так же медленно и значительно увеличивается. Чем больше $R_{\text{абс}}$, тем больше время заряда.

Увлажненность изоляции влияет в первую очередь на значение $R_{\text{абс}}$. Чем больше увлажненность, тем меньше $R_{\text{абс}}$, и в этом случае ток поляризации увеличивается, затухание его происходит быстрее. Это свойство используется в методе определения состояния изоляции с помощью мегаомметра, который объединяет в себе источник выпрямленного напряжения, прикладываемого при измерениях к изоляции, и прибор, измеряющий ток.

В общем случае, чем больше $R_{\text{абс}}$, что имеет место при сухой изоляции, тем меньше ток заряда абсорбционной емкости (ток абсорбции) и тем больше время заряда. Чем меньше $R_{\text{абс}}$ (у влажной изоляции), тем больше ток абсорбции и тем меньше время заряда.

После прекращения процесса поляризации, т. е. заряда абсорбционной емкости, ток $I_{\text{абс}}$ становится равным нулю, но через изоляцию продолжает протекать ток сквозной проводимости (ток утечки), определяемый общим сопротивлением постоянному току изоляции, условно изображенным на рис. 8 в виде сопротивления $R_{\text{из}}$. Сопротивление $R_{\text{из}}$ также зависит от состояния изоляции. У загрязненной или увлажненной изоляции оно значительно ниже, чем у чистой или неувлажненной, что влияет на значение тока утечки.

При приложении к изоляции напряжения, превышающего электрическую прочность, происходит пробой ее в наиболее слабом месте, сопровождающийся выгоранием и разрушением поврежденного участка.

Сопротивление изоляции постоянному току $R_{\text{из}}$ является основным показателем состояния изоляции. Наличие грубых внутренних и внешних дефектов (повреждение, увлажненность, поверхностное загрязнение) снижает сопротивление. Определение $R_{\text{из}}$ производится измерением тока утечки $I_{\text{ут}}$, проходящего через изоляцию, при приложении к ней выпрямленного напряжения $U_{\text{прил}}$:

$$R_{\text{из}} = U_{\text{прил}} / I_{\text{ут}}.$$

В связи с явлением поляризации, имеющим место в изоляции, определяемое сопротивление зависит от времени с момента прило-

жения напряжения. Правильный результат может дать измерение тока утечки по истечении 60 секунд после приложения напряжения, когда ток абсорбции в изоляции в основном затухает [5].

Коэффициент абсорбции $K_{абс}$ лучше всего определяет увлажнение изоляции. Коэффициент абсорбции – отношение $R_{из}$, измеренного мегаомметром через 60 секунд с момента приложения напряжения, к $R_{из}$, измеренному через 15 секунд:

$$K_{абс} = R_{60} / R_{15}.$$

Если изоляция сухая, то коэффициент абсорбции значительно превышает единицу. У влажной изоляции он близок к единице. Объясняется это временем заряда абсорбционной емкости у сухой и влажной изоляции. В первом случае (сухая изоляция) время велико, ток заряда изменяется медленно, значения $R_{из}$, соответствующие 15 и 60 с после начала измерения, сильно различаются. Во втором случае (влажная изоляция) время мало, ток заряда изменяется быстро и уже к 15 с после начала измерения достигает установившегося значения, поэтому $R_{из}$, соответствующие 15 и 60 с после начала измерения, почти не различаются.

На рис. 9 изображены схемы измерения сопротивления изоляции мегаомметром.

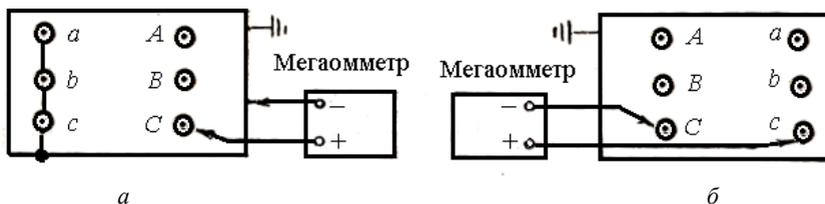


Рис. 9. Схемы измерения сопротивления изоляции обмоток:
а – по отношению к заземленному корпусу;
б – между обмотками трансформатора

Коэффициент абсорбции является вторым основным показателем состояния изоляции машин и оборудования.

Сопротивление изоляции $R_{из}$, а также коэффициент абсорбции $K_{абс}$ сильно зависят от температуры, поэтому для сравнения следует пользоваться величинами, измеренными при одной температуре.

Влияние температуры подчиняется закону:

$$R_{t_2} = R_{t_1} \cdot 10^{\frac{t_2 - t_1}{\alpha}},$$

где R_{t_1} , R_{t_2} – сопротивления изоляции постоянному току при температурах t_1 и t_2 ;

α – коэффициент, зависящий от типа изоляции: для изоляции класса А равен 40, для изоляции класса В – 60.

Сопротивление изоляции класса А при понижении температуры на каждые 10 °С увеличивается в 1,5 раза и наоборот.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов приведения $R_{из}$ к одной температуре.

Таблица 3

Коэффициенты приведения
сопротивления изоляции к температуре

Разность температур $t_1 - t_2$, °С	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
Коэффициент изменения $R_{из}$	1,04	1,08	1,13	1,17	1,22	1,5	1,84	2,25	2,75	3,4

Описание лабораторной установки

Испытательный стенд состоит из трансформатора ТСЗ 22,5/0,5, состояние изоляции которого нужно определить мегаомметром ВЕL-МІС-4.

Содержание работы и порядок ее выполнения

1. Подключите ко входу «–» мегаомметра черный провод и черные клещи, ко входу «+» – красный провод и синие клещи.
2. Клещи подключаются к обмоткам трансформатора, указанным в табл. 4.

3. Выберите подаваемое напряжение – 2500 В.

4. Включите прибор клавишей « \odot ». Нажмите и удерживайте клавишу «*Start*». Чтобы не удерживать клавишу длительное время, нажмите клавишу «*Enter*» во время измерения и одновременно отпустите обе клавиши.

5. После того, как мегаомметр измерил сопротивление через 60 секунд, остановите измерение клавишей «*Start*». Клавишами «Вверх» или «Вниз» найдите значения R_{15} , R_{60} и K_{abc} и запишите в табл. 4.

6. Переключите измерительные клещи и повторите измерения.

7. По результатам измерения коэффициента абсорбции сделайте вывод о состоянии изоляции трансформатора.

8. Составьте отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать: цель работы, результаты измерений, вывод о состоянии изоляции трансформатора.

Результаты измерений должны быть представлены в виде табл. 4.

Таблица 4

Данные, полученные в ходе выполнения работы

Измеряемое сопротивление	R_{15} , МОм	R_{60} , МОм	K_{abc}
<i>a</i> – корпус			
<i>b</i> – корпус			
<i>c</i> – корпус			
<i>A</i> – корпус			
<i>B</i> – корпус			
<i>C</i> – корпус			
<i>A – a</i>			
<i>B – b</i>			
<i>C – c</i>			

Лабораторная работа № 5
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЯ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
МЕТОДОМ ПОЛЯРОМЕРА

Цель работы: приобретение умений и навыков определения группы соединения силовых трансформаторов методом поляромера.

Краткие теоретические сведения

Одним из условий параллельной работы трансформаторов является идентичность групп соединения их обмоток, определяемых полярностью обмоток, схемой их соединения и чередованием фаз подаваемого на обмотки напряжения. В связи с этим одной из важных проверок трансформаторов является определение полярности обмоток у однофазных трансформаторов и групп соединения (в заводском исполнении) трехфазных трансформаторов, что служит основой в дальнейшем для оценки и обеспечения идентичности групп параллельно включаемых трансформаторов подачей на них при монтаже соответствующих фаз напряжения.

При оценке групп соединения силовых трансформаторов исходят, кроме принципа, заложенного в определение однополярности, из следующих основных предпосылок:

1. Выводы обмоток стороны высшего напряжения (ВН) обозначаются всегда прописными буквами $A, B, C; X, Y, Z$, а выводы обмоток низшего напряжения (НН) – буквами a, b, c, x, y, z .

2. У обмоток, имеющих одинаковое направление намотки, все начала (определяемые их однополярностью) располагаются при изображении с одной стороны, а концы – с другой. У обмоток, имеющих разное направление намотки, начала и концы располагаются с разных сторон.

3. Условно считается, что вектор первичного U_{AX} и вторичного U_{ax} напряжений и соответствующие им ЭДС E_{AX}, E_{ax} имеют одно и то же направление, если считать, что обе обмотки имеют одно и то же направление намотки, при этом положительному направлению обоих векторов соответствует обход обмоток от концов X, x к началу A, a . Если направления намотки разные, то, так как положительному

направлению вектора ЭДС соответствует обход обмотки высшего напряжения от конца X к началу A , вектор ЭДС обмотки низшего напряжения изображается противоположным ему на 180° .

4. Начало обмоток и нулевой вывод располагаются на крышках трансформаторов в последовательности $OABC$, $oabc$ слева направо, если смотреть на них со стороны выводов ВН.

5. Обмотка ВН считается первичной, НН – вторичной,

6. Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений первичного напряжения считается исходной и во всех случаях неизменной независимо от схемы соединения обмоток трансформатора и подключения его к сети.

7. Прямым принято чередование фаз A , B и C .

Непосредственная проверка группы соединения обмоток трехфазного трансформатора производится с помощью гальванометра (методом поляромера) или фазометра. С помощью гальванометра группы определяются следующим образом. На выводы A и B обмотки ВН подключается батарейка (например, на 9 В) через рубильник (рис. 10, a). К выводам ab , bc , ca поочередно подключается гальванометр с нулем посередине или магнитоэлектрический милливольтметр с полярностью, указанной на рис. 10, a . При подключенном гальванометре определяется знак отклонения его в момент замыкания рубильника. Опыт повторяется при подаче питания на выводы BC и AC . В зависимости от сочетания всех полученных знаков отклонения, записываемых в таблицы, и сравнения полученных результатов с таблицами (рис. 10, $a-e$) определяется группа.

Метод поляромера прост и удобен, но требует тщательного выполнения. В некоторых случаях не очень четко определяется нулевое значение отклонения. В этом случае гальванометр следует выбрать грубее или снизить напряжение батареи.

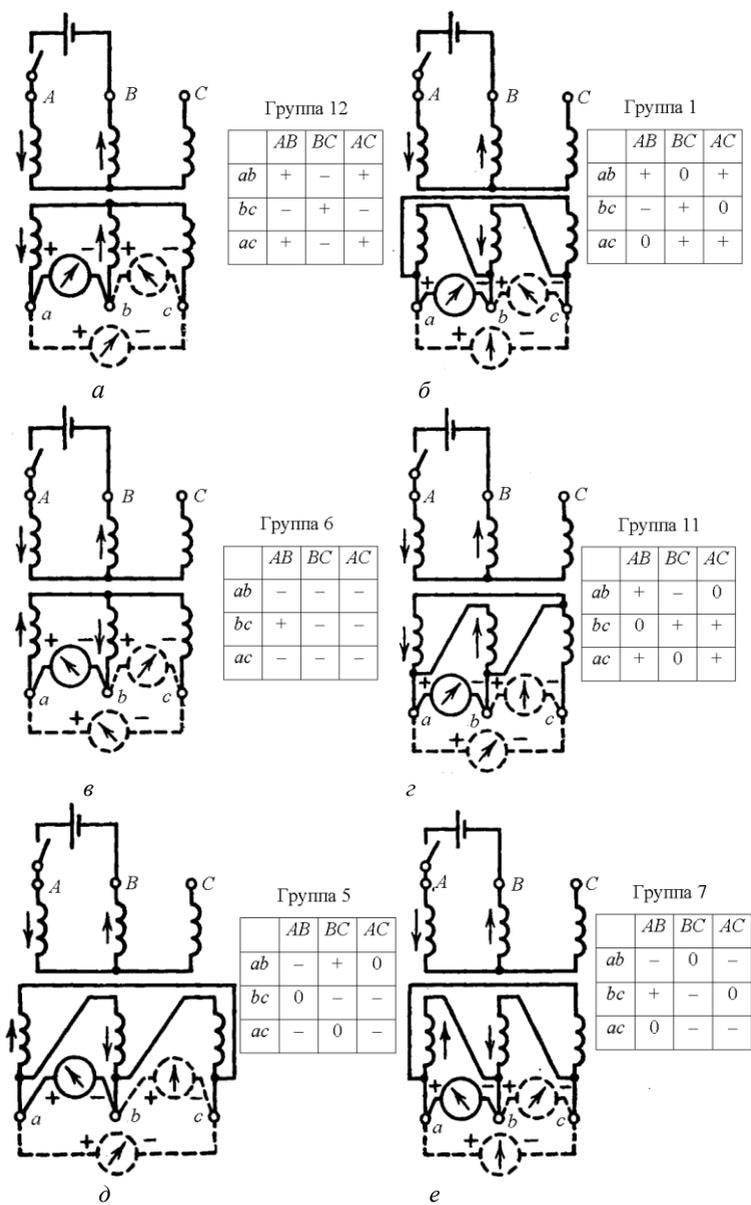


Рис. 10. Схемы и таблицы для определения группы соединения трансформатора методом поляромера

Описание лабораторной установки

Испытательный стенд состоит из трансформатора ТСЗ 22,5/0,5, группу соединения которого нужно определить при помощи батарейки с напряжением 1,5 В и миллиамперметра. Миллиамперметр смонтирован на стенде и имеет отрицательную и положительную области шкалы.

Содержание работы и порядок ее выполнения

1. К выводам a и b силового трансформатора подключить миллиамперметр, причем зажим «+» – к выводу a , а зажим «-» – к выводу b .

2. Подключить два провода к выводам A и B силового трансформатора. Замкнуть положительный полюс батарейки на вывод A силового трансформатора, отрицательный полюс – на вывод B . Наблюдать отклонение стрелки миллиамперметра и заполнить соответствующую ячейку в таблице 5. При отклонении стрелки вправо – ставится знак «+», влево – «-». Если стрелка амперметра не отклоняется – ставится «0».

3. Переключить миллиамперметр к выводам b и c силового трансформатора, причем зажим «+» – к выводу b , а зажим «-» – к выводу c . Повторить пункт 2.

4. Переключить миллиамперметр к выводам a и c силового трансформатора, причем зажим «+» – к выводу a , а зажим «-» – к выводу c . Повторить пункт 2.

5. Подключить два провода к выводам B и C силового трансформатора. Замкнуть положительный полюс батарейки на вывод B силового трансформатора, отрицательный полюс – на вывод C . Повторить пункты 1–4.

6. Подключить два провода к выводам A и C силового трансформатора. Замкнуть положительный полюс батарейки на вывод A силового трансформатора, отрицательный полюс – на вывод C . Повторить пункты 1–4.

7. Сравнить полученные результаты измерений с типовыми таблицами (рис. 10, $a-e$) и определить группу соединения обмоток силового трансформатора.

8. Составить отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать: цель работы, результаты измерений, вывод о группе соединения обмоток силового трансформатора.

Результаты измерений должны быть представлены в виде табл. 5.

Таблица 5

Данные, полученные в ходе выполнения работы

	<i>AB</i>	<i>BC</i>	<i>AC</i>
<i>ab</i>			
<i>bc</i>			
<i>ac</i>			

Лабораторная работа № 6 **СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК** **ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА**

Цель работы: изучение способа выявления витковых замыканий путем сопоставления характеристик намагничивания трансформаторов.

Краткие теоретические сведения

Измерительные трансформаторы тока (ТТ) в конструктивном отношении представляют собой надежные аппараты. Если они правильно выбраны в соответствии с требованиями ПУЭ [4], то их повреждения очень редки. Однако среди этих редких повреждений значительная доля приходится на витковые замыкания во вторичных обмотках. Выявить витковые замыкания в обмотке трансформатора можно или путем измерения полного сопротивления трансформатора со вторичной стороны при разомкнутой первичной обмотке или путем снятия характеристики намагничивания.

При наличии виткового замыкания полное сопротивление (отношение приложенного напряжения к току в обмотке) снижается по сравнению с предшествующими замерами. Снижение сопротивления тем больше, чем больше короткозамкнутых витков (индуктивное сопротивление обмотки пропорционально квадрату числа витков).

Выявить наличие замкнутых витков можно также путем снятия характеристики намагничивания ТТ и последующего сопоставления ее с характеристикой намагничивания, полученной ранее, с типовой характеристикой или характеристикой однотипного трансформатора.

При наличии короткозамкнутых витков в обмотке трансформатора, для создания в его магнитопроводе одной и той же величины магнитного потока требуется большая величина намагничивавшего тока (уменьшение числа витков требует увеличения тока для создания одинаковой намагничивающей силы, равной произведению тока на число витков). В результате кривая намагничивания трансформатора, имеющего короткозамкнутые витки, располагается ниже кривой намагничивания неповрежденного ТТ. Если разница между сравниваемыми характеристиками достигает 10 % и более, то испытываемый трансформатор подлежит отбраковке [1]. При

снятии характеристик необходимо по возможности пользоваться одними и теми же приборами (электродинамической или электромагнитной системы). Испытания следует проводить по одной и той же схеме.

Так как кривая намагничивания дефектного трансформатора располагается ниже типовой во всем диапазоне изменения намагничивающей силы, то при построении этой кривой нет необходимости рассчитывать величину индукции в магнитопроводе и напряженность магнитного поля. При снятии кривой намагничивания по схеме на рис. 11 измеряемое вольтметром напряжение будет в соответствующем масштабе пропорционально индукции, а ток – напряженности магнитного поля. По результатам испытаний трансформатора строится кривая намагничивания (вольт-амперная характеристика).

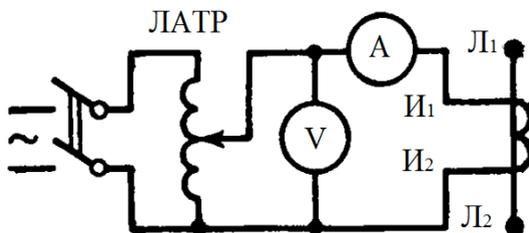


Рис. 11. Схема снятия кривой намагничивания ТТ

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя источник регулируемого однофазного напряжения (лабораторный автотрансформатор), понижающий трансформатор, два трансформатора тока типа ТК-20 (один из них имеет короткозамкнутые витки) и измерительные приборы (амперметр и вольтметр) для измерения тока и напряжения. Напряжение на автотрансформатор подается от сети через магнитный пускатель. Монтажная схема стенда лабораторной работы выполнена так, что при снятии кривой намагничивания требуется только подключение трансформатора тока и измерительных приборов к соответствующим гнездам стенда. Регулирование величины намагничивающего тока во вторичной обмотке испытываемого трансформатора тока осуществляется автотрансформатором путем изменения его вторичного напряжения.

Содержание работы и порядок ее выполнения

1. Собрать схему для снятия кривой намагничивания первого ТТ.
2. Произвести испытания трансформатора, изменяя ток во вторичной обмотке от 1 А до 5 А через 0,5 А. Для каждой величины тока зафиксировать величину приложенного к обмотке напряжения. Результаты испытаний записать в табл. 6. Отключить установку от сети.

Таблица 6

Данные, полученные в ходе выполнения работы

Ток намагничивания, А	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Напряжение на обмотке ТТ1, В									
Напряжение на обмотке ТТ2, В									

3. Выполнить пункты 1 и 2 для второго ТТ.
4. На основании результатов испытаний обоих трансформаторов построить их кривые намагничивания $U = f(I)$ и сопоставить с типовой кривой намагничивания. Типовая кривая намагничивания задана в табл. 7.

Таблица 7

Типовая кривая намагничивания ТТ марки ТК-20

Ток намагничивания, А	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Напряжение на обмотке, В	5,0	5,5	6,0	6,5	6,7	7,0	7,3	7,6	7,8

5. На основании результатов сопоставления кривых намагничивания установить трансформатор, который имеет замкнутые витки во вторичной обмотке.

6. Составить отчет по работе, который должен содержать: схему испытания трансформаторов тока (рис. 11); таблицу результатов испытаний обеих ТТ; кривые намагничивания испытываемых трансформаторов тока и типовую характеристику; заключение о ТТ по результатам анализа кривых намагничивания.

Лабораторная работа № 7 ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

Цель работы: изучение методики и получение навыков работы с аппаратурой при определении удельного сопротивления грунта.

Краткие теоретические сведения

Сопротивление грунта растеканию электрического тока является важной характеристикой, которая учитывается при проектировании заземляющих устройств. Это сопротивление определяется экспериментально. Существуют три метода определения удельного сопротивления грунта: метод пробного (контрольного) электрода, метод ступенчатого погружаемого пробного электрода и метод вертикального электрического зондирования.

Метод пробного (контрольного) электрода применяется в основном при проектировании одиночных или охватывающих небольшую площадь заземлителей. В месте испытания в землю забивают пробный электрод таких же размеров и на такую же глубину, как у предполагаемого заземлителя. Растительный или насыпной грунт в месте забивки удаляется.

Вспомогательный электрод и зонд располагают на таком же расстоянии, как и при измерении одиночного заземлителя. Затем определяют сопротивление растеканию тока от пробного электрода. Удельное сопротивление грунта определяется по следующему выражению:

$$\rho = \frac{R \cdot l}{0,366 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{t + 0,75 \cdot l}{t + 0,25 \cdot l} \right)},$$

где R – измеренное сопротивление пробного электрода;

l – длина электрода;

d – внешний диаметр электрода;

t – глубина заложения пробного электрода, равная расстоянию от поверхности земли до верхнего конца электрода.

Для горизонтального пробного электрода удельное сопротивление грунта равняется:

$$\rho = \frac{R \cdot l}{0,366 \cdot \lg \frac{l^2}{d \cdot t}}$$

Если пробный электрод из угловой стали, то для формул применяют эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$, который равен $0,95b$, где b – ширина полки уголка; для полосовой стали эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$ равен $0,56b$.

Метод ступенчатого погружаемого пробного электрода применяется при проектировании экономичных сложных заземлителей для получения данных о распределении ρ по глубине с последующим построением эпюры распределения удельного сопротивления земли. Этот метод является разновидностью метода пробного электрода и отличается от него тем, что пробный электрод погружают в землю не сразу на всю глубину, а отдельными участками, производя для каждого его положения замер сопротивления растеканию. Удельное сопротивление, соответствующее глубине погружения пробного электрода:

$$\rho = \frac{R \cdot l_t}{0,366 \cdot \lg \frac{4 \cdot l_t}{d}}$$

где l_t – длина погруженной части пробного электрода.

Удельное сопротивление ρ_n в n -ом слое земли:

$$\rho_n = \frac{l_t - l_{t-1}}{\frac{l_t}{\rho_t} - \frac{l_{t-1}}{\rho_{t-1}}}$$

где $l_t - l_{t-1}$ – толщина n -ого слоя земли.

Метод вертикального электрического зондирования является наиболее универсальным, позволяющим определить распределение удельного сопротивления земли, используя зависимость между распределением ρ по глубине и распределением на поверхности земли

потенциалов, создаваемых электрическим током в земле от точечного источника. Для измерений, симметрично относительно точки измерения забивают четыре электрода: A , B , M и N и собирают схему измерения, приведенную на рис. 12.

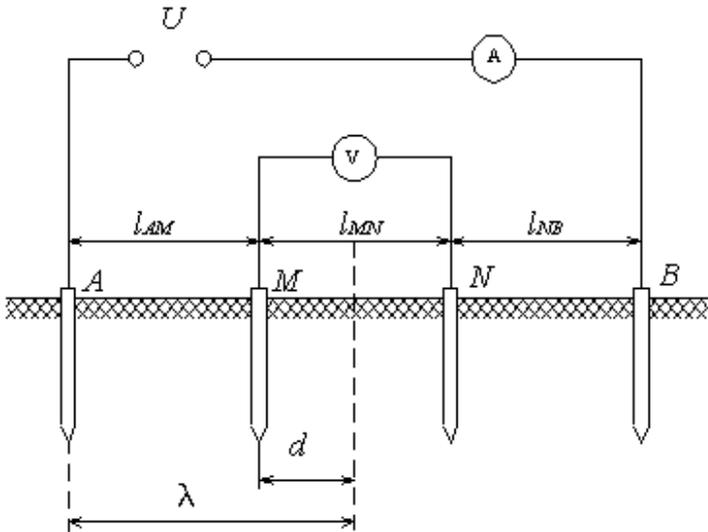


Рис. 12. Схема измерения сопротивления грунта

Электроды обычно выполняют в виде стержней, забиваемых на глубину, не превышающую $l_{MN} / 3$ или 0,7 м.

Удельное сопротивление грунта:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где U – разность потенциалов, измеренная между электродами M и N ;

I – ток в питающей сети;

K – коэффициент, зависящий от расстояния между электродами:

$$K = \frac{l_{AM} \cdot l_{AN}}{l_{MN}}.$$

Измерения можно вести, разнося электроды A и B и сохраняя расстояние $l_{MN} < l_{AB} / 3$ неизменным, при этом показания вольтметра уменьшаются.

Через некоторое число измерений увеличивают расстояние l_{MN} до $l_{AB} / 3$ последнего измерения. Измеренное удельное сопротивление вычисляют по формуле:

$$\rho_r = \pi \cdot \frac{\lambda^2 - d^2}{2 \cdot d} \cdot \frac{U}{I},$$

где $\lambda = l_{AB} / 2$;
 $d = l_{MN} / 2$.

Измерения можно вести также, сохраняя после разнеса электродов одинаковыми расстояния l_{AM} , l_{MN} , l_{NB} . Тогда значение удельного сопротивления ρ_r вычисляют по формуле:

$$\rho_r = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot U / I,$$

где $a = l_{AM} = l_{MN} = l_{NB}$.

Для измерения удельного сопротивления грунта по методу вертикального зондирования может быть использован измеритель заземления МС-08 (рис. 13). Показания измерителя представляют собой отношение напряжения к току (U / I).

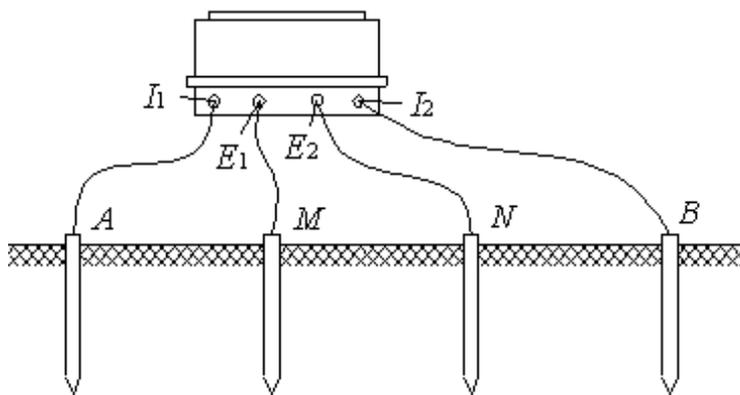


Рис. 13. Схема подключения измерителя заземления МС-08 к электродам

Измерение ведут, начиная с расстояний $l_{AB} = 1,5$ м, $l_{MN} = 0,5$ м до тех пор, пока не будет достигнута нужная глубина зондирования H . Приближенно считают, что $H = l_{AB} / 3$.

Определение ρ производится в 2 этапа:

1. По данным измерений на бумаге с сеткой в логарифмическом масштабе строят кривую зависимости $\rho_r = f(\lambda)$;
2. Полученную кривую сравнивают с набором теоретических кривых, рассчитанных для заранее известных электрических структур земли (двухслойных, трехслойных и других).

Описание лабораторной установки

Измерение удельного сопротивления грунта производится на открытой площадке. Используется прибор – измеритель сопротивления МС-08. При использовании этого прибора применяется схема, изображенная на рис. 13. В качестве электродов используются четыре медных стержня длиной 0,6 м и диаметром 11 мм.

Содержание работы и порядок ее выполнения

1. Заглубить электроды в землю на начальную глубину. Расстояния между электродами изменять в соответствии с рекомендациями, приведенными выше.
2. Подсоединить прибор МС-08, как показано на рис. 13.
3. Произвести измерение отношения U / I .
4. Рассчитать удельное сопротивление грунта по выражению (1).
5. Изменить расстояния между электродами в соответствии с рекомендациями, приведенными в кратких теоретических сведениях, и снова произвести измерение.
6. Повторить измерение несколько раз при различных расстояниях.
7. Построить на бумаге с сеткой в логарифмическом масштабе кривую зависимости $\rho_r = f(\lambda)$. Сравнить ее с теоретическими кривыми, рассчитанными для известных электрических структур земли.
8. Составить отчет по лабораторной работе, который должен содержать название, цель работы, схемы измерения, результаты измерения, кривую зависимости $\rho_r = f(\lambda)$, выводы о сравнении ее с теоретическими кривыми.

Литература

1. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы : СТП 33243.20.366-2016. – Введ. 12.10.2016. – Минск : ГПО «Белэнерго», 2016. – 283 с.
2. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2022. – Введ. 20.12.2022. – Минск : РУП «БЕЛТЭИ», 2022. – 600 с.
3. Электроустановки. Правила по обеспечению безопасности при эксплуатации : ТКП 427-2022. – Введ. 01.07.2022. – Минск : Энергопресс, 2022. – 146 с.
4. Правила устройства электроустановок. Действующие главы. – 6-е изд., доп. с исп. – Минск : Энергопресс, 2019. – 342 с.
5. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие для учреждений высшего образования по электротехническим и энергетическим специальностям / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание, 2018. – 269 с.

Учебное издание

НАЛАДКА И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Практикум для студентов специальности
7-07-0712-01 «Электроэнергетика и электротехника»
профилизации «Релейная защита и автоматика»

С о с т а в и т е л и :

АРТЁМЕНКО Кирилл Игоревич
ПОНОМАРЕНКО Евгений Геннадьевич
ПОТАЧИЦ Ярослав Владимирович и др.

Редактор *А. С. Козловская*
Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать 15.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,49. Уч.-изд. л. 1,67 Тираж 100. Заказ 365.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.