

Тема номера: **Диагностика трансформаторов**

- Тепловизионная диагностика подстанций и распределительных устройств
- Испытания и анализ трансформаторного масла
- Тестирование качества обмоток силовых трансформаторов
- Контроль состояния контактов и соединений РПН силовых трансформаторов
- Электромагнитные испытания силовых трансформаторов



Работайте с удовольствием!

Уважаемые специалисты! Представляем вам выпуск первого электронного журнала компании ЭЛЕКТРОНПРИБОР, посвященный диагностике трансформаторов.

Журнал будет выходить регулярно: вас ждет увлекательный цикл публикаций, посвященный различным аспектам диагностики электротехнического оборудования и кабельных линий.

Мы будем публиковать статьи как о приборах давно известных, так и о новинках. Хотите быть в курсе последних достижений приборостроения - оставайтесь с нами!

Мы твердо убеждены в том, что наши клиенты достойны самого лучшего. Являясь крупным, известным и надежным поставщиком, экспертом рынка измерительного, испытательного и диагностического оборудования для энергетики, компания ЭЛЕКТРОНПРИБОР предлагает вам не только широчайший ассортимент, но и эффективные инструменты для правильного и успешного выбора.

Мы наблюдаем за тем, как ежегодно на рынке появляются десятки новых разработок, основанные на современных методиках измерений и испытаний. Мы гордимся тем, что можем не только рассказать вам об этом, но и предложить к поставке самое современное оборудование!

Вы все еще привозите выставки каталоги и диски, а также много времени тратите на поиск в интернете, чтобы узнать, что появилось нового в сфере диагностики и испытаний? Просто подписывайтесь на наш электронный журнал и рассылку новостей: мы будем держать вас в курсе последних разработок! Сделать это достаточно просто: чтобы

получать по подписке наш электронный журнал и новости, достаточно зарегистрироваться на нашем сайте [www.electronpribor.ru](http://www.electronpribor.ru) - рассылка будет осуществляться автоматически.

**Читайте, выбирайте и работайте с удовольствием!**

Мы надеемся, что вы не только станете постоянным читателем нашего журнала, но и выберете нашу компанию в качестве поставщика.

**7 причин обратиться к нам:**

✓ Мы - за разделение труда как за наиболее эффективный путь развития. Энергетик не должен думать о том, что, где и по какой цене купить, как доставить и хватит ли средств в бюджете предприятия. Ваша задача - чтобы вверенные вам объекты поддерживались в надлежащем состоянии, а неисправности вовремя выявлялись и были устранены. Помощь в выборе оборудования и организационная работа по вашей поставке - наша специализация.

✓ Сообщите нам о том, в каких средствах для диагностики и ремонта вы нуждаетесь, и вы получите все что вам необходимо в минимально возможные сроки, по заводским ценам, с заводскими гарантиями, действующими с момента продажи.

✓ Пришла эра супермаркетов, потому что люди осознали ценность времени. Заказывать приборы непосредственно на заводах так же нерационально, как пытаться вычерпать озеро ложкой. Изучить несколько сайтов или каталогов, разместить заказы на десяти заводах, проконтролировать несколько платежей, организовать забор нескольких грузов пришедших из разных горо-

дов, оприходовать несколько поставок на складе, подписать и вернуть несколько комплектов бухгалтерских документов... Есть ли в этом смысл, если можно получить несколько единиц оборудования по иной схеме: один заказ - одна поставка?

✓ Мы успешно участвуем в проводимых нашими клиентами конкурсных процедурах. Широкий ассортимент оборудования позволяет нам осуществлять поставки по большим лотам, включающим в себя продукцию десятков производителей.

✓ Большая часть предлагаемого нами оборудования уже есть на нашем складе, что гарантирует оперативность и своевременность поставок.

✓ Мы предлагаем широкий спектр самого разного оборудования: от мегаомметра до передвижной электротехнической лаборатории.

✓ Ваш опыт и знания бесценны. Наши возможности по поставкам оборудования - велики. Объединив наши усилия, мы имеем все шансы достигнуть наилучшего результата.

**Качество Вашей работы - наша забота!**

Оставить свои комментарии, высказать пожелания по поводу тематики следующих публикаций, а также сделать заказ вы можете, отправив сообщение на адрес [market@electronpribor.ru](mailto:market@electronpribor.ru).

Журнал не является средством массовой информации. Распространяется бесплатно.

Материалы предоставлены техническими специалистами предприятий - разработчиков. Копирование материалов журнала запрещено без согласия ООО "ЭЛЕКТРОНПРИБОР".

# Измерение влажности в трансформаторных маслах

В процессе эксплуатации трансформаторных масел в них накапливаются продукты окисления, загрязнения, увеличивается влагосодержание, что резко снижает качество масел.

Основное влияние на пробивное напряжение трансформаторного масла оказывает растворенная в нем вода

Влажность масла - это содержание в масле воды, как в молекулярно-растворенной (далее растворенной), так и в связанной формах, которые находятся в масле в состоянии динамического равновесия и в зависимости от условий (температуры, степени увлажнения масла и состояния твердой изоляции) могут переходить из одной формы в другую.

Нефтеперерабатывающая промышленность выпускает несколько сортов трансформаторного масла. Они различаются по используемому сырью и способу получения. Перед заполнением электроаппаратов масло подвергают глубокой термовакуумной обработке.

## Нормы и стандарты

В процессе эксплуатации трансформаторных масел в них накапливаются продукты окисления, загрязнения, увеличивается влагосодержание, что резко снижает каче-

ство масел. С целью контроля за состоянием трансформаторного масла проводят целый ряд измерений.

Основное влияние на пробивное напряжение трансформаторного масла оказывает растворенная в нем вода, содержание которой в масле нормируется.

Согласно действующему отраслевому стандарту РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» содержание воды в масле, заливаемом в трансформаторы с пленочной или азотной защитой, герметичные вводы и герметичные измерительные трансформаторы, не должно превышать 0,001% (массовая доля) или  $10 \text{ млн}^{-1}$ . В силовые трансформаторы без пленочной защиты и негерметичные вводы допускается заливать трансформаторное масло с содержанием воды 0,0025% (массовая доля) или  $25 \text{ млн}^{-1}$ .

## Приборы и методы

Для определения содержания воды в трансформаторном масле выпускаются приборы, использующие разные методы измерений.

Один из таких приборов - влагомер трансформаторного масла ВТМ-МК, позволяющий проводить измерения содержания растворенной воды в трансформаторных маслах разных марок.



Влагомер трансформаторного масла ВТМ-МК создан на базе кулонометрического метода измерений, который не требует применения химических реагентов.

Этот метод основан на извлечении влаги сухим газом-носителем из находящейся в десорбционной колонке точно дозированной пробы масла и последующем электролизе влаги в кулонометрической электролитической ячейке.

Конструктивные параметры десорбционной колонки, такие, как диаметры колонки и подводящей газ трубки, величина отверстий в последней, выбраны из условия обеспечения наибольшей поверхности контакта фаз при заданных объемах дозы масла и расходах газа.

Барботаж в десорбционной колонке влагомера осуществляется следующим образом. Газ-носитель, проходя через барбо-

тажную трубку, выходит через отверстия на ее конце в масло на дне колонки, в результате чего образуются пузырьки газа, поднимающиеся через столб масла. При этом возникает циркуляция масла в вертикальном направлении, так как восходящие потоки пузырьков, двигающиеся в центральной части колонки вдоль барботажной трубки, увлекают за собой часть масла, которая затем стекает вниз вдоль стенок колонки по кольцевому сечению. В результате обеспечивается перемешивание жидкости, предотвращается возникновение в ней застойных зон, создаются лучшие условия для подвода газа-носителя к границе раздела фаз.

В результате проведенных экспериментов производителем были выбраны следующие параметры десорбционной колонки: диаметр колонки 12мм, внутренний диаметр барботажной трубки 3мм, высота рабочего объема колонки – 60мм. При этих конструктивных параметрах обеспечивается циркуляция масла без возникновения застойных зон.

В течение цикла измерений, составляющего 15 минут, происходит перенос всей растворенной влаги из масла в газ-носитель. Извлеченная влага с газом-носителем непрерывно подается в кулонометрическую ячейку, где влага поглощается гигроскопической пленкой пятиоксида фосфора и подвергается электролизу. Количество электричества, интегрированное за время

цикла измерения, пропорционально массовой доле влаги в масле.

### Гарантия качества

Производителем был проведен анализ приемо-сдаточных испытаний и поверок влагомеров **ВТМ-МК**, результаты которых приведены в табл.1

Максимальное значение положительной абсолютной погрешности составило 2,1 млн<sup>-1</sup> при анализе масла с содержанием воды 28,8ppm, а максимальное значение отрицательной абсолютной погрешности составило минус 2,4 млн<sup>-1</sup> при анализе масла с содержанием воды 32,7 млн<sup>-1</sup>. В табл.1 внесены наиболее характерные результаты из проведенных 87 измерений.

Для проверки воспроизводимости измерений при поверках в процессе выпуска изделий из производства и при проведении поверок приборов, поступивших от потребителей на техническое обслуживание и поверку, выполнялись измерения проб масла из одной емкости, герметично закрытой для предотвращения попадания

влаги из воздуха в трансформаторное масло. Измеренная массовая доля влаги имела значения от 16,3 млн<sup>-1</sup> до 19,8 млн<sup>-1</sup>, среднее значение от 15,6 млн<sup>-1</sup> до 18,6 млн<sup>-1</sup>, с абсолютными погрешностями ±1,9 млн<sup>-1</sup>, что подтверждает воспроизводимость измерений.

### Преимущества ВТМ-МК

Работа с влагомером **ВТМ-МК** имеет следующие преимущества:

- эксплуатация прибора не требует химических реагентов и расходных материалов;
- прибор имеет обзорный диапазон массовой доли влаги от 0 до 100 млн<sup>-1</sup>;
- прибор обеспечивает высокую точность и воспроизводимость измерений;
- наличие интерфейса RS232 для связи с персональным компьютером а также архива с энергонезависимой памятью на 120 записей позволяет сохранять и обрабатывать результаты измерений.

Результаты проверок влагомеров трансформаторного масла

Таблица 1

$V_{изм}, \text{млн}^{-1}$	12,7	15,2	19,6	24,8	30,9	30,3	38,8	44,4	50,9
$V_{расч}, \text{млн}^{-1}$	11,4	15,4	19,2	26,2	28,8	32,7	40,4	46,2	52,3
$\Delta, \text{млн}^{-1}$	1,3	-0,2	0,4	-1,4	2,1	-2,4	-1,3	-1,8	-1,4

# Испытание электрической прочности трансформаторных масел

Специалисты отраслей электроэнергетики, нефтегазовой промышленности и транспорта ежегодно сталкиваются с необходимостью проведения испытаний электрической прочности трансформаторных масел.

Соблюдение должной периодичности испытаний и точность полученных результатов являются важными аспектами диагностики состояния высоковольтных трансформаторов, а значит, могут помочь определить их текущее состояние и возможные неполадки. Своевременная профилактика и диагностика высоковольтных трансформаторов позволяют избежать несоизмеримо больших потерь и последствий при неожиданном выходе их из строя.

## Аппарат испытания масла АИМ-90Ц

На сегодняшний день на российском рынке представлены несколько аппаратов, предназначенных для определения электрической прочности масел, и одним из них является аппарат испытания масла цифровой АИМ-90Ц. Этот аппарат по достоинству оценили специалисты: так, большое количество этих аппаратов было поставлено в 2011 году в рамках комплексной программы переоснащения оборудованием сило-

вых подстанций ОАО «РЖД».

АИМ-90Ц оснащается ярким шестидюймовым жидкокристаллическим дисплеем, отражающим всю необходимую информацию – текущее напряжение, результаты всех предыдущих испытаний цикла, отсчитывает и отражает временные отрезки между испытаниями. По завершении всех испытаний микроэлектроника АИМ-90Ц производит расчет среднего арифметического значения пробивного напряжения, среднюю квадратическую ошибку и коэффициент вариации, тем самым, экономит время работы оператора, ранее вынужденного выполнять эти расчеты вручную. Управление аппаратом АИМ-90Ц теперь осуществляется энкодером, это дает возможность оператору установить с помощью встроенного меню, например, пользовательские режимы испытаний и даже изменить необходимые настройки точности аппарата.

## Сертификация

Аппарат полностью отвечает требованиям применяемого сегодня ГОСТ 6581-75 «Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний» - максимальное пробивное напряжение аппа-

рата составляет 90 кВ, ёмкость измерительной ячейки - 400 см<sup>3</sup> с расстоянием между электродами в 2,5 мм. Питается аппарат от сети с напряжением (220 ± 10%) В промышленной частоты. Масса - 35 кг. АИМ-90Ц имеет необходимую для данного вида аппаратуры Декларацию о соответствии и Сертификат соответствия.

Комплектность аппарата включает две измерительные ячейки и может укомплектовываться принтером для печати протоколов испытаний по желанию покупателя.



# Обнаружение дефектов устройств РПН типа РС прибором ПКР-1

До 40% общих катастрофических аварий трансформаторов связаны с повреждениями регуляторов под напряжением.

Одной из важных составляющих повышения эксплуатационной надежности трансформаторов является объективная оценка состояния и реальный переход от ремонтов по «наработке ресурса» на ремонты «по состоянию».

Устройство регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой (РПН) по своему исполнению является сложным и часто недостаточно надежным узлом силового трансформатора. Авария РПН может привести к серьезному повреждению трансформатора в целом, в крайнем случае - к пожару и взрыву.

До 40% общих катастрофических аварий трансформаторов связаны с повреждениями регуляторов под напряжением. Кроме того, из-за наличия движущихся частей трансформаторы с РПН требуют в 3-5 раз больших трудозатрат по сравнению с нерегулируемыми под нагрузкой.

Необходимо своевременно обнаруживать развивающиеся дефекты при такой важности РПН для трансформатора в целом, а

значит, проводить профилактические мероприятия в зависимости от состояния РПН. Таким образом, нужен частый контроль во время эксплуатации.

Важно отметить, что проведение ремонтных работ на «старых» трансформаторах стандартными методами без надлежащей диагностики и уточнения технологии восстановления характеристик, зачастую оказывается не просто бесполезной тратой денег, но даже вредной процедурой, приводящей к снижению надежности трансформатора.

Замена всех трансформаторов с длительным сроком службы, учитывая реальную экономическую ситуацию, оказывается невозможной. С другой стороны, фактический ресурс многих трансформаторов не исчерпан. Более того, его удастся продлить, сохраняя требуемую эксплуатационную надежность.

Одной из важных составляющих повышения эксплуатационной надежности трансформаторов является объективная оценка состояния и реальный переход от ремонтов по «наработке ресурса» на ремонты «по состоянию».

Общепризнанно, что такой переход может быть реализован только при наличии



возможностей достоверного определения технического состояния оборудования, в том числе в процессе его комплексного обследования, которое должно решать несколько задач, в число которых входит оценка состояния регуляторов напряжения и контактной системы.

Проверка работы переключающего устройства производится согласно заводским и типовым инструкциям. Внешнему осмотру подлежат только те части, которые доступны для обзора. В частности, следует проверять герметичность шкафов управления устройством РПН, исправность устройств подогрева.

## Наиболее распространенные виды дефектов

Импортные переключающие устройства типов РС-3 и РС-4 повреждаются в основном по причине конструктивных недостатков. По количеству повреждений элементы устройств этого типа располагаются в такой последовательности: контактор, предызбиратель - избиратель и далее отдельные повреждения.

Наиболее часты дефекты контактора, сопровождающиеся выходом контактора из «замка»; этому содействует само-отвинчивание крепежных гаек, что приводит к значительному подгару контактов и разрегулировке элементов кинематики; имеет место выход из строя токоограничивающих резисторов.

Кроме перечисленных наиболее частых повреждений в устройствах РПН типов РС-3 и РС-4 встречаются и другие недостатки: негерметичность между баком трансформатора и баком контактора, задержка переключения из-за появления старения металла («усталости») переключающей пружины, повреждение защитной мембраны, повреждения изоляционного вала избирателя, разрегулировка кинематики контактора.

Частыми дефектами избирателя и предызбирателя являются несоосность контактов избирателя, подгар контактов из-за

ослабления контактного нажатия, недостаточная чистота поверхности обработки контактов.

## Методы обнаружения дефектов

Проверка последовательности действия контактов осуществляется путем снятия так называемых круговых диаграмм. Круговую диаграмму снимают при повороте ведущего вала в прямом и обратном направлении не менее чем на два положения подряд.

До сих пор ещё для снятия круговых диаграмм применяется метод сигнальных ламп, который требует больших затрат времени на сборку электрической схемы. Для современных быстродействующих устройств РПН с активными токоограничивающими сопротивлениями методом сигнальных ламп можно снять только диаграмму совместной работы переключателя и контактора, но невозможно получить картины работы шести контактов контактора (по три на четном и нечетном плечах). Поэтому правильнее использовать современные приборы.

Для проверки исправной последовательности работы переключающих устройств проводят следующие проверки: для реакторного типа РПН – это круговая диаграмма срабатывания контакторов и избирателей, для быстродействующего типа РПН – это тоже круговая диаграмма, а также требует-

ся осциллограмма работы контакторов.

Круговая диаграмма - это диаграмма последовательности срабатывания элементов переключающего устройства в зависимости от угла поворота основного вала переключающего устройства либо от количества оборотов вала привода. Так как на круговой диаграмме невозможно отразить работу контакторов, делается дополнительная проверка – «осциллограмма контакторов».

Сопоставление моментов времени и позиций переключателя позволяет выявить ненормальности в работе реверсирующего контактора и предупредить возможное залипание контактов. Такой дефект чаще всего возникает, если контакты долгое время не работают.

По полученным осциллограммам проверяют:

- отсутствие разрывов электрической цепи;
- продолжительность работы дугогасительных контактов в положении «мост»;
- продолжительность переключения между моментами размыкания и замыкания вспомогательных и дугогасительных контактов различных плеч, в течение которых происходит гашение дуги;
- отсутствие недопустимых вибраций подвижных дугогасительных контактов контактора.

### Обнаружение неисправностей с помощью прибора ПКР-1

Для снятия круговой диаграммы РПН и осциллограммы работы контактора отлично подойдет современный прибор ПКР-1.

Особенностью прибора является возможность снятия осциллограмм работы контакторов и круговой диаграммы одновременно по всем фазам, без установки дополнительных внешних элементов, таких как перемычки или внешние резисторы, в отличие от других выпускаемых приборов. Есть возможность курсорных измерений параметров осциллограмм контакторов. Также, снимая круговую диаграмму, можно одновременно осциллографировать с частотой дискретизации 100 мкс, что дает возможность измерять временные интервалы с высокой точностью. Нормативные документы на РПН указывают, что «ток в цепи контактора при замкнутых контактах должен быть не менее 2А», а используемая в нашем приборе методика измерения позволяет обеспечить для основной группы РПН как раз ток 2А, но не только через основные контакты, а также и через дугогасящие.

### Пример обнаружения неисправностей устройств РПН типа РС-4 прибором ПКР-1

Прибор ПКР-1 необходимо подключить к РПН по схеме рис.1, фотографии установки

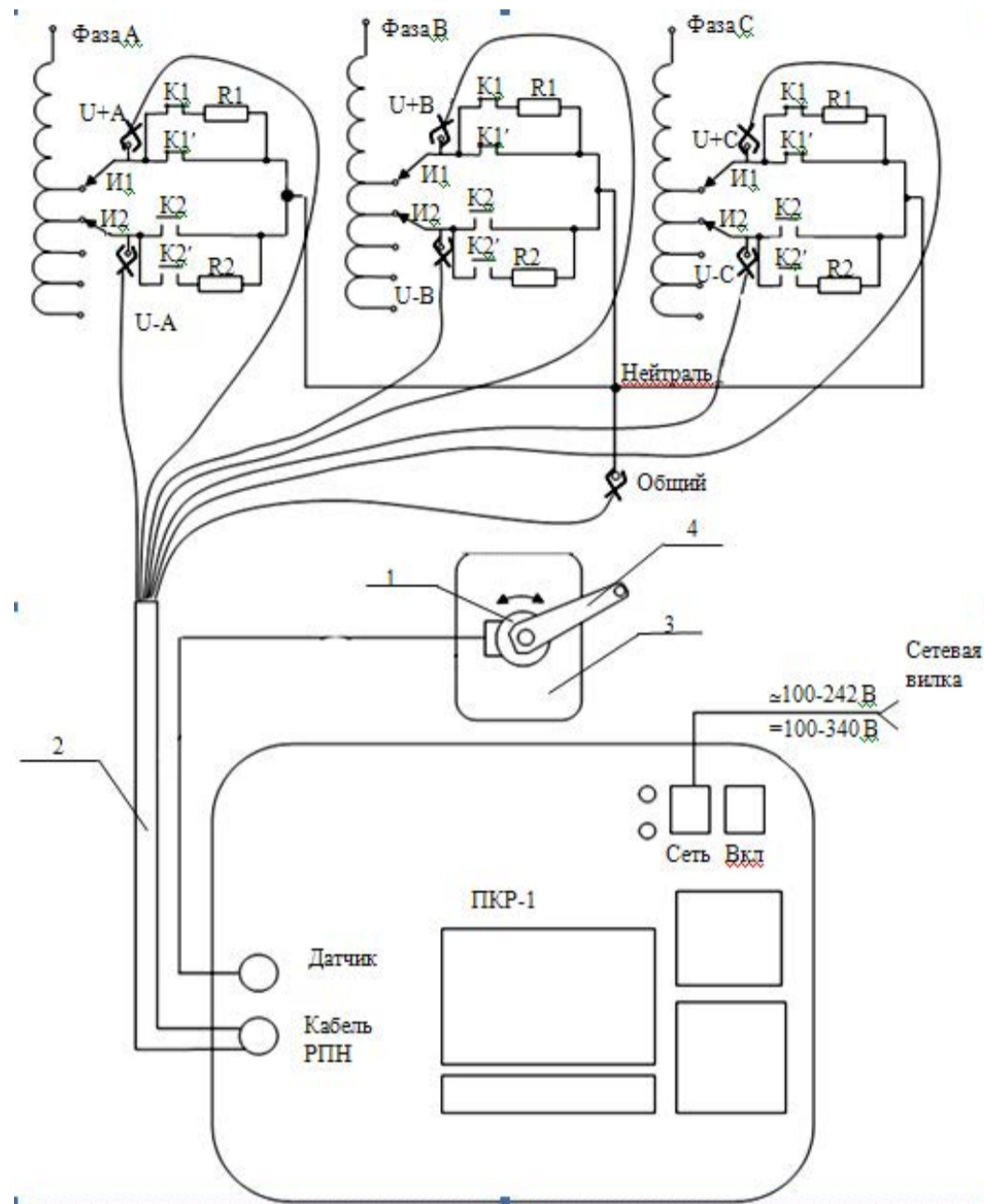


Рис.1. Схема подключения прибора ПКР-1 к РПН типа РС.

датчика угловых перемещений на привод и подключения кабеля прибора к контактам РПН приведены на рис.2. и рис.3.

Кабель измерительный прибора подключается к контактам контактора, находящимся в баке РПН, датчик ДП21 из комплекта прибора устанавливается на вал привода РПН. Прибор фиксирует угол поворота вала, а также количество оборотов вала. Набор специальных насадок позволяет установить датчик на различные приводы РПН.

Конструкция датчика позволяет проводить измерение, как при использовании электропривода, так и ручного привода РПН в отсутствие электропитания.

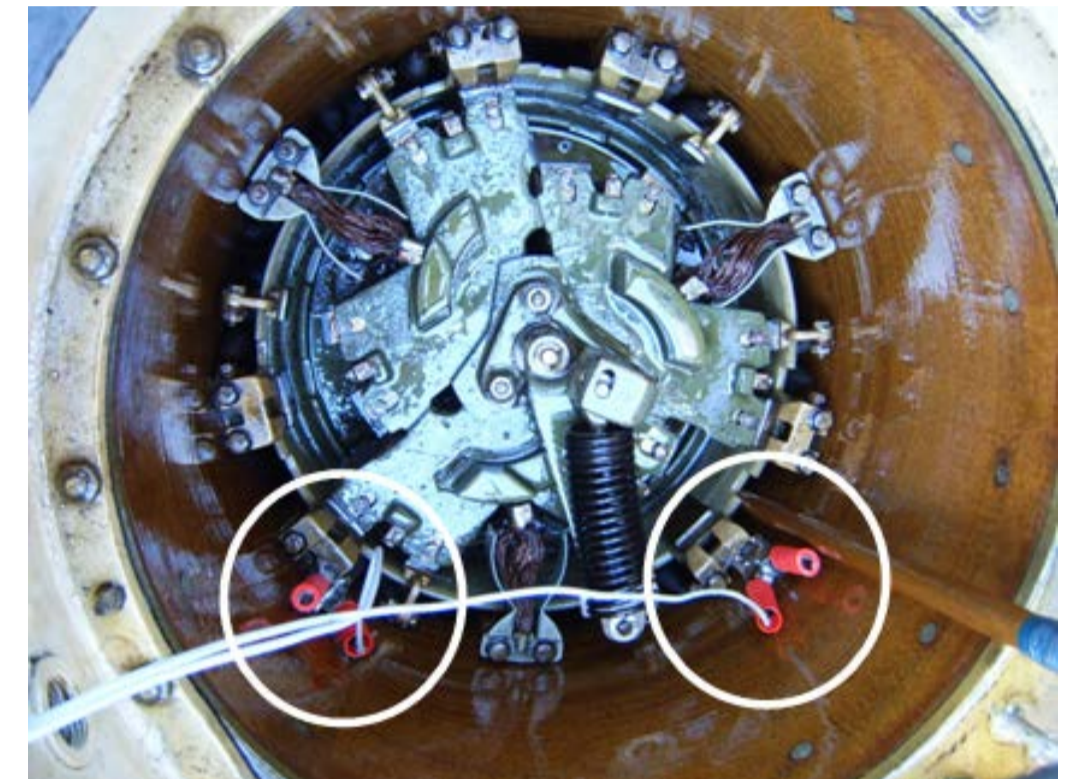


Рис.2. Подключение прибора ПКР-1 к контактам РПН типа РС-4



Рис.3. Установка датчика на привод

### Результаты измерения РПН РС-4 прибором ПКР-1

Круговая диаграмма приведена на рис. 4.

Измерение №2. Отвод 2→3

	начало избират.	конец избират.	контак- торы	конец движения
A	6.99	17.99	24.99	32.99
B	-	-	-	32.99
C	-	-	-	32.99

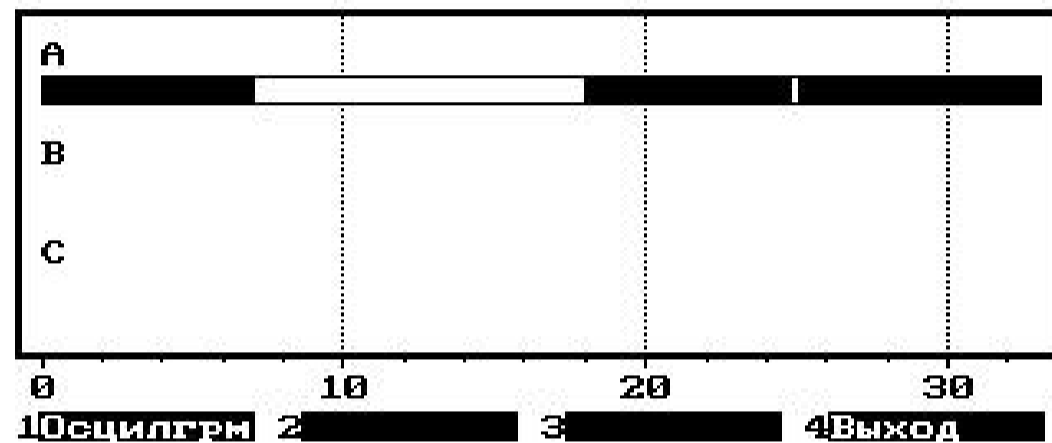


Рис.4. Круговая диаграмма

Осциллограмма контакторов переключения с отвода 2 на отвод 3 (контакты группы 32→31) приведена на рис.5.

Фаза В

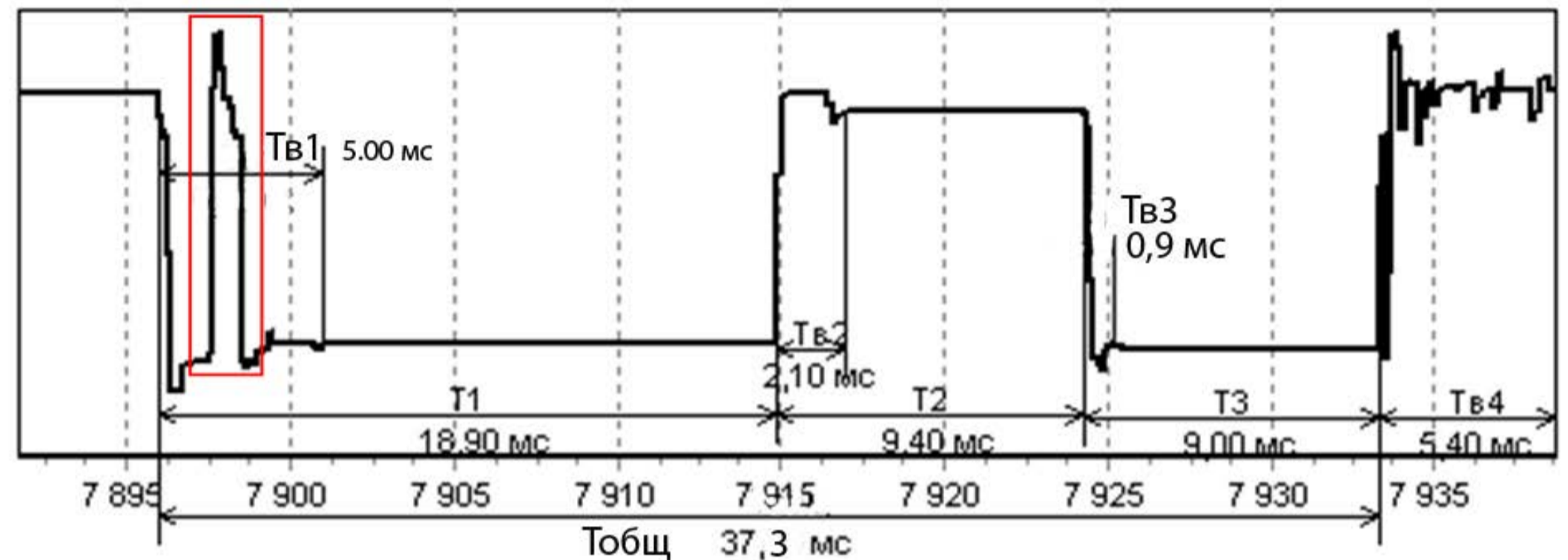


Рис. 5. Осциллограмма контактов контактора РПН типа РС-4, снятая прибором ПКР-1

Сравнивая измеренные длительности работы контактов с нормами (таблица 1), определяем нарушения работы устройства РПН.

Таблица 1. Данные осциллограммы РС-4 в сравнении с нормами

Параметр	Длит., мс	Примечание
1. T1 от момента откл. главного контакта первой пары до вкл. дугогасящего контакта второй пары	18,90	>12
2. T2 от момента вкл. дугогасящего контакта второй пары до откл. дугогасящего контакта первой пары	9,40	1...7
3. T3 от момента откл. дугогасящего контакта первой пары до вкл. главного контакта второй пары	9,00	>12
4. Tв1 дребезг первого главного контакта при откл.	5,00	<4
5. Tв2 дребезг второго дугогасящего контакта при вкл.	2,10	<4
6. Tв3 дребезг первого дугогасящего контакта при откл.	0,90	<4
7. Tв4 дребезг второго главного контакта при вкл.	5,40	<4
8. Тобщ полная длительность переключения контакторов	37,30	30...50

### Предположительные дефекты:

- Нарушение регулировки контактов, т.к. увеличено время срабатывания отдельных контактов (Т2, Т3); увеличено время дребезга Тв1, Тв4.

- Всплески на участках осциллограммы Т1, Тв4 указывают на подгар контактов.

Дополнительно по круговой диаграмме было выявлено нарушение регулировки привода переключающего устройства.

### Отзывы конечных потребителей о применении прибора ПКР-1

Прибор ПКР-1 используется как предприятиями, эксплуатирующими трансформаторы, так и организациями, занимающимися капитальным ремонтом старого и монтажом нового оборудования.

Прибор ПКР-1 внесен в Госреестр РФ за номером №46747-11.

В филиале ОАО «ОГК-3» «Костромская ГРЭС», г. Волгореченск успешно применяется прибор ПКР-1. Вот, что говорят сотрудники этого предприятия о приборе:

«На нашем предприятии для контроля правильности работы РПН трансформаторов типа ТРДНГ-32000/220, ТРДНС-32000, 40000, 63000/35, ТРДН-25000/35 и авто трансформаторов типа АДОЦТН-267000/500/220 успешно используется, начиная с 2008 года, прибор ПКР-1 зав. №1....»

«Нравится то, что есть возможность снятия осциллограмм работы контакторов и

снятие круговой диаграммы одновременно по всем фазам, без установки дополнительных внешних элементов, таких как переключки или внешних резисторов, в отличие от других выпускаемых приборов...

На экране прибора можно просматривать графики. Конструкция датчика позволяет проводить измерение, как при использовании электропривода, так и ручного привода РПН в отсутствии электропитания.»

По мнению потребителей прибор ПКР-1 отлично зарекомендовал себя при контроле РПН разных типов.

### Основные технические характеристики

Наименование	Значение	Примечание
Количество измерительных каналов	3	0
Максимальное время измерения, мин	5	0
Количество регистрируемых событий	4000	0
Пределы основной абсолютной погрешности измерений интервалов времени, с	$\pm 10^{-4} [1+tx]$	tx - измеряемый интервал времени, с
Диапазон измерений угловых перемещений при помощи датчика ДП21 и устройства сопряжения УС-1, град	от 0 до 360*70n	n-максимальное кол-во оборотов датчика при переключении РПН
Пределы основной абсолютной погрешности измерений угловых перемещений при помощи датчика ДП21 и устройства сопряжения УС-1, град	$\pm 4$	0
Максимальный выходной постоянный ток измерительных каналов, А	2,5	режим проверки быстродействующих РПН
Диапазон сопротивления дугогасящих резисторов, контролируемых прибором, Ом	от 2 до 20	
Каналы передачи данных	RS-232, USB 1.0, Ethernet IEEE 802.3	0
Потребляемая мощность не более, Вт	80	0
Габариты измерительного блока (длина*ширина*высота), мм	360x290x165	0
Масса измерительного блока не более, кг	7	0
Масса комплекта датчиков, приспособлений и кабелей не более, кг	5	0

# Применение измерительного стенда СЭИТ-3 при проведении электромагнитных испытаний силовых трансформаторов

При выпуске из производства или ремонта силовых трансформаторов необходимо проводить их электромагнитные испытания согласно ГОСТ 3484.1-88. При проведении таких испытаний требуется измерять токи, напряжения, активные мощности и сопротивления постоянному току с высокой точностью, проводить перерасчеты параметров трансформаторов в соответствии с реальными условиями испытаний и оформлять протоколы испытаний. Использование обычных универсальных измерительных приборов с соответствующими ручными расчетами и заполнением протокола требует большого времени проведения испытаний и увеличивает вероятность ошибок.

Измерительный стенд СЭИТ-3, работающий под управлением персонального компьютера (ПК), в значительной степени автоматизирует проведение измерений при электромагнитных испытаниях. Прибор СЭИТ-3 позволяет проводить:

- измерение потерь и тока холостого хода;
- определение коэффициента трансформации и группы соединения обмоток;
- измерение потерь и напряжения корот-

кого замыкания;

- измерение сопротивления обмоток постоянному току.

В состав измерительного стенда входят измерительно-вычислительный блок (ИВБ) и ПК (рис. 1). Блок-схема ИВБ представлена на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид прибора СЭИТ-3

ИВБ содержит следующие блоки:

- Два канала приема и преобразования тока, каждый из которых содержит встроенный измерительный трансформатор тока ИТТ с компенсирующей обмоткой.
- Четыре измерительных трансформатора напряжения.
- Шестиканальный аналого-цифровой преобразователь АЦП1, предназначенный для преобразования входных сигналов тока и напряжения в 16-разрядный двоичный код с частотой 8 кГц.

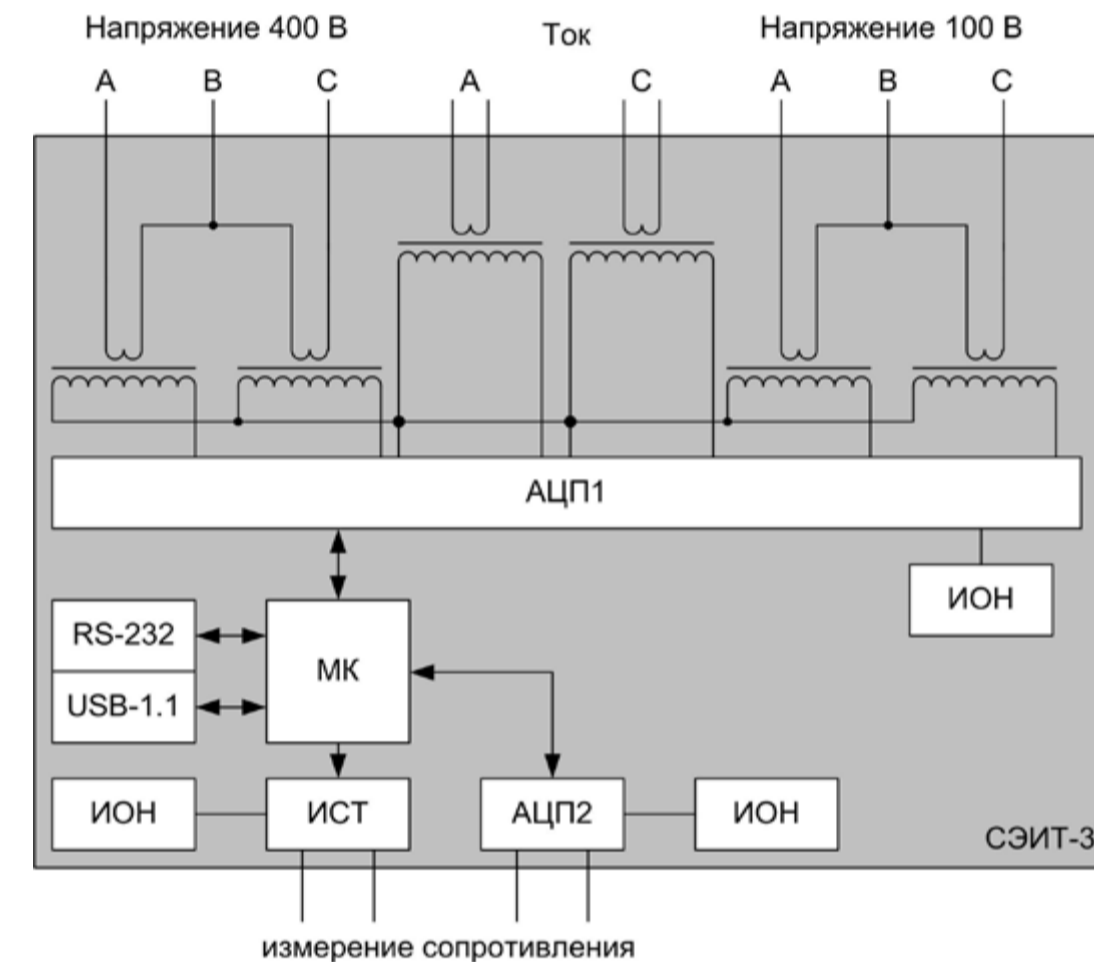


Рис. 2. Блок-схема ИВБ

- Источники опорного напряжения ИОН.
- Микроконтроллер МК, предназначенный для приема и обработки данных от АЦП.
- Стабилизированный источник тока ИСТ, формирующий измерительный постоянный ток в зависимости от выбранного предела измерения сопротивления 5 А (0,01 Ом и 0,2 Ом), 1 А (2 Ом), 0,1 А (20 Ом), или 0,01 А (200 Ом).
- 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь АЦП2 для измерения сопро-

тивления.

- Последовательные порты USB-1.1 и RS-232 для связи с ПК.

### Проведение опыта холостого хода

Цель проведения опыта холостого хода (ХХ) – определение потерь и тока ХХ. Для опыта ХХ собирают измерительную схему, показанную на рис. 3. Нулевой провод не подключают.

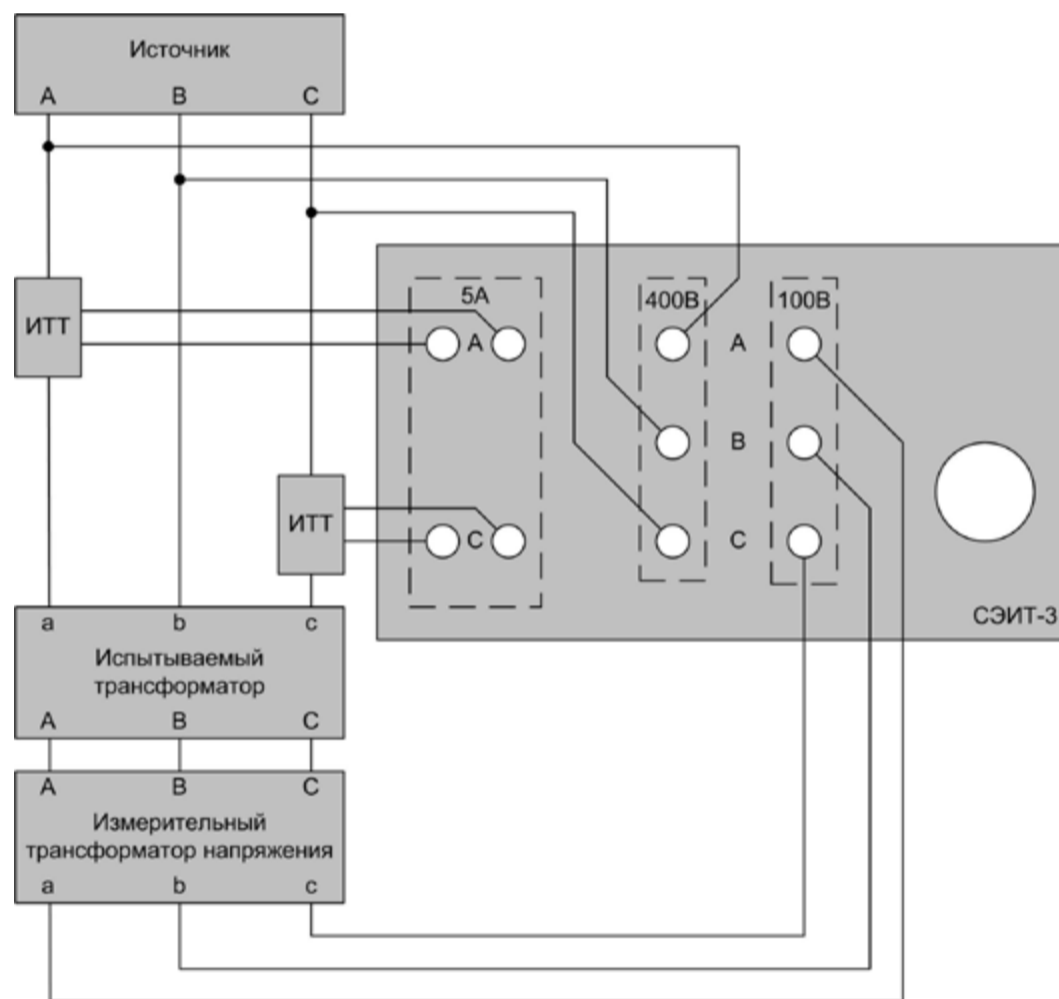


Рис. 3. Схема опыта холостого хода. ИТТ – измерительный трансформатор тока

Обычно для опыта холостого хода трансформаторов 10/0,4 кВ или 6/0,4 кВ используется трехфазный источник 400 В 50 Гц, к которому подключают обмотку низкого напряжения (НН) испытуемого трансформатора.

К источнику предъявляются высокие требования в отношении точности выходного напряжения (допустимое отклонение от номинального значения не более  $\pm 0,5\%$ ), частоты (не более  $\pm 1\%$ ), формы, симметрии, поэтому желательно использовать стабилизаторы напряжения или специальные генераторы.

В качестве измерительных трансформаторов тока (ИТТ) могут быть использованы лабораторные трансформаторы типа УТТ-5 или УТТ-5М класса точности 0,2. В качестве измерительного трансформатора напряжения (ИТН) – например, НАМИТ-10-2.

Ток ХХ трехфазных трансформаторов определяют как среднее арифметическое токов трех фаз. В процессе проведения опыта измеряются и фиксируются АЦП мгновенные значения токов  $i_A(t_k)$  и  $i_C(t_k)$ , и рассчитывается ток в фазе В по формуле

$$i_B(t_k) = -i_A(t_k) - i_C(t_k).$$

После этого рассчитываются действующие значения токов в фазах  $I_A, I_B, I_C$  и находится ток ХХ трансформатора в амперах и в процентах от номинального значения по формулам

$$I_{XX} = (I_A + I_B + I_C)/3 \text{ и } I_{XX\%} = (I_{XX}/I_{ном})100\%,$$

где  $I_{ном}$  – номинальный ток трансформатора.

Вообще говоря, для проведения опыта ХХ, целью которого является определение магнитных потерь и тока холостого хода, нет необходимости включать ИТН на высокой стороне. Это делают для того, чтобы не меняя конфигурацию схемы определить также коэффициент трансформации  $K_{тр}$  и группу соединений обмоток. Эти два последних параметра можно также найти, подключив к источнику 400 В обмотку высокого напряжения (ВН) испытуемого трансформатора. Обмотку низкого напряжения следует подключить ко входам 100 В ИВБ. В результате прибор определит величину, равную  $1/K_{тр}$ .

Для измерения потерь ХХ трансформаторов большой мощности при пониженном напряжении может быть использован метод А.К. Ашрятова.

При проведении опыта ХХ по схеме на рис. 3 прибор СЭИТ-3 одновременно находит коэффициент трансформации и группу соединений обмоток. Прибор предусматривает определение с последующим внесением в протокол коэффициентов трансформации для нескольких ответвлений обмоток (до пяти).

### Проведение опыта короткого замыкания

Цель проведения опыта короткого замыкания (КЗ) – определение потерь КЗ (номинальных электрических потерь) и напряжения КЗ. Для опыта КЗ собирают измерительную схему, показанную на рис. 4.

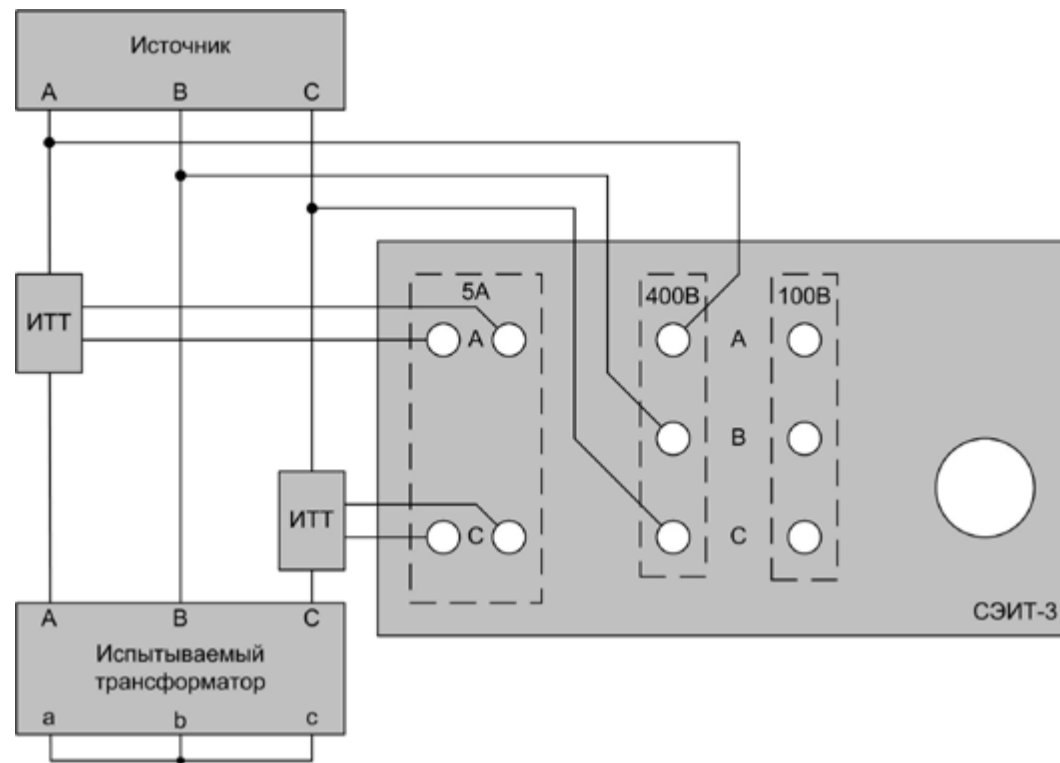


Рис. 4. Схема опыта КЗ

Как правило, обмотку НН замыкают накоротко, а источник 400 В, 50 Гц подключают к обмотке ВН. Опыт проводят при токе от 0,25 номинального до номинального, поэтому желательно применять регулируемый источник, например, трехфазный ЛАТР.

Результаты измерения приводятся прибором СЭИТ-3 к номинальному току испытываемого трансформатора по формулам:

$$P_{кз} = P_{кз} \cdot \left( \frac{I_{НОМ}}{I_{кз}} \right)^2 \text{ Вт}, \quad U_{кз} = U_{кз} \cdot \frac{I_{НОМ}}{I_{кз}} \text{ В}.$$

Результаты измерения (приведенные к номинальному току) приводятся в приборе к расчетной условной температуре обмотки по формулам:

$$P_{кз} = P_{кз} \cdot \alpha \text{ Вт}, \quad U_{кз} = \sqrt{U_{кз}^2 + \left( \frac{P_{кз}}{10 \cdot P_{НОМ}} \right)^2 \cdot (\alpha^2 - 1)} \text{ В},$$

где  $P_{НОМ}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$\alpha$  – коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$\alpha = \frac{T + 75}{T + \Theta_{оп}}$$

где  $\Theta_{оп}$  – температура окружающей среды;

$T$  – температура, равная 235 °С для обмоток из меди и 225 °С – из алюминия.

### Измерение сопротивления обмоток трансформатора постоянному току

ИВБ включает стабилизированный источник тока, пропускаемого через контролируемую обмотку трансформатора и сигма-дельта АЦП, измеряющий напряжение на обмотке (рис.5). Силу тока, в зависимости от выбранного предела измерения сопротивления обмотки, можно установить из ряда 0,01 А (200 Ом), 0,1 А (20 Ом), 1 А (2 Ом) или 5 А (0,2 Ом и 0,01 Ом).

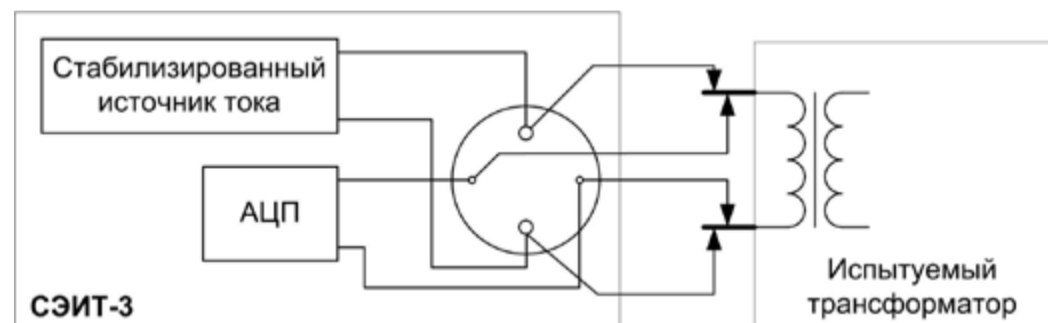


Рис. 5. Схема измерения сопротивления обмоток постоянному току

Время измерения сопротивления зависит от индуктивности обмотки и может быть значительным. Это обусловлено переходным процессом нарастания измерительного тока через обмотку. Наибольшую индуктивность имеют обмотки ВН, соот-

ветственно для них время установления измерительного постоянного тока максимально. В приборе СЭИТ-3 система управления стабилизатором тока выполнена таким образом, чтобы минимизировать время установления тока. Например, для обмотки ВН трансформатора ТМ-6300/10 с индуктивностью 6,3 Гн время установления тока силой 5 А не превышает 3 с, для обмотки ВН трансформатора ТРДНС-63000/35 с индуктивностью 13,7 Гн время установления тока силой 5 А – 7 с, а для обмотки ВН трансформатора ТДЦ-400000/242/20 с индуктивностью 58 Гн – 27 с при том же токе. При меньших токах и при измерениях на обмотках НН, имеющих значительно меньшую индуктивность, время установления тока значительно уменьшается.

Если измеряются сопротивления обмотки трансформатора с РПН, то после переключения отводов измерительный ток устанавливается очень быстро.

Еще одной особенностью измерения сопротивления постоянному току цепей с большой индуктивностью является возникновение большой ЭДС самоиндукции, возникающей при разрыве цепи с током. В приборе СЭИТ-3 организован режим ускоренного рассеяния энергии этого тока в источнике тока. Во время процесса рассеяния энергии на лицевой панели ИВБ горит красный светодиод. Зажимы прибора можно отсоединять от выводов трансформатора только после погасания этого светодиода.

После измерения сопротивлений всех трех фаз прибор рассчитывает расхождение результатов измерений по фазам в процентах.

### Составление протокола

При выборе закладки «Протокол» в меню на экране ПК в рабочем окне открывается панель для подготовки протокола (рис. 6). Все белые окна доступны для заполнения. После нажатия на кнопку «Протокол» программа создает новый протокол, подготовленный для печати. Данные, полученные при проведении испытаний, не доступны для изменения оператором. Протокол может быть сохранен в памяти ПК и (или) распечатан на принтере.

### Основные технические характеристики прибора

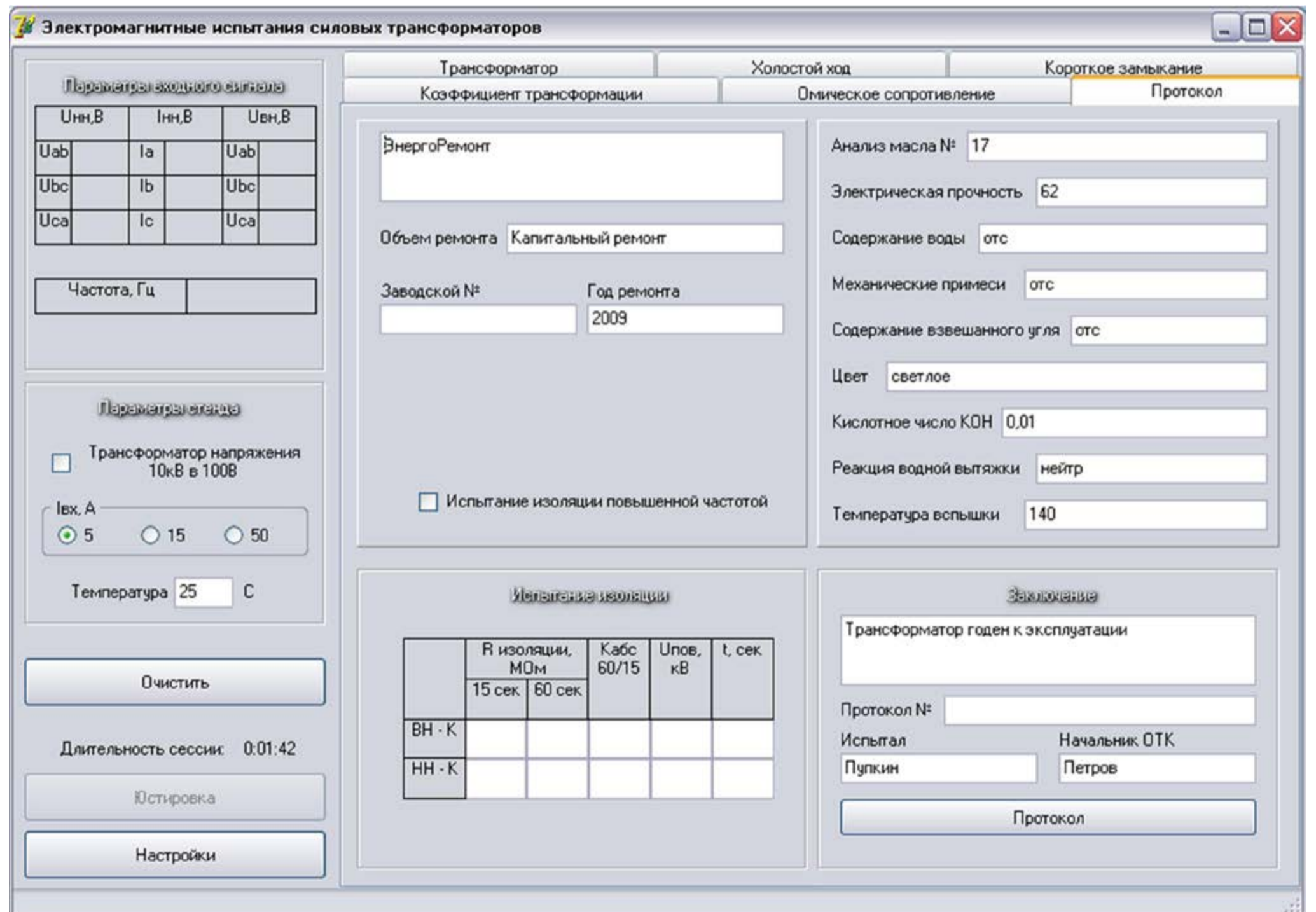
- Диапазон измеряемых переменных токов<sup>1</sup> (0–5) А.
- Диапазон измеряемых переменных напряжений<sup>2</sup> (0–100 и 0–400) В.
- Диапазон измеряемых активных мощностей<sup>1,2</sup> (0–4000) Вт.
- Диапазон измеряемых сопротивлений постоянному току (0,0001–200) Ом.
- Диапазон измеряемой частоты (45–55) Гц.
- Предел измерения тока 5 А.
- Пределы измерения напряжения 100 В; 400 В.

- Пределы измерения сопротивления (0,01, 0,2, 2, 20 и 200) Ом.
- Предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения напряжений на каждом из пределов 100 и 400 В  $\pm 0,2$  %.
- Предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения мощности  $\pm 0,5$  %.
- Предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения тока  $\pm 0,5$  %.

- Предел допускаемой основной погрешности измерения частоты  $\pm 0,15$  Гц.
- Предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения сопротивления постоянному току на каждом из пределов 0,01, 0,2, 2, 20 и 200 Ом  $\pm 0,5$  %.
- Входной ток каналов измерения напряжения, не более 2 мА.
- Падение напряжения нагрузки каналов измерения силы тока, не более 50 мВ.

Примечания:

- 1 Без использования измерительного трансформатора тока.
- 2 Без использования измерительного трансф. напряжения.



U <sub>нн</sub> , В	I <sub>нн</sub> , В	U <sub>ен</sub> , В
U <sub>ab</sub>	I <sub>a</sub>	U <sub>ab</sub>
U <sub>bc</sub>	I <sub>b</sub>	U <sub>bc</sub>
U <sub>ca</sub>	I <sub>c</sub>	U <sub>ca</sub>

	R изоляции, МОм		Кабс 60/15	U <sub>пов</sub> , кВ	t, сек
	15 сек	60 сек			
ВН - К					
НН - К					

Рис. 6. Панель для подготовки протокола испытаний

# Тепловизионная диагностика подстанций и распределительных устройств

Для подстанций требуется диагностический подход к обслуживанию, поскольку отказ оборудования может быть дорогостоящим для конечных пользователей в плане потери продукции и выручки, приводя к снижению доходов предприятий энергоснабжения в результате ненадежного обслуживания.

Так как перегрев, как и аномально низкие рабочие температуры, может указывать на ухудшение состояния электрических компонентов, тепловизоры способны предоставить возможности диагностики, необходимые для обслуживания подстанций и распределительных устройств.

В отраслях, специализирующихся на генерации и распределении энергии, термин «подстанция» используется во многих значениях. Подстанциями называют различные наружные установки, от трансформаторных подстанций на электростанциях до оборудования коммунальных или промышленных предприятий, распределяющего или изменяющего напряжение, частоту или другие характеристики электроэнергии, поступающей на входе.

Диагностическое обслуживание, основанное на прогнозировании, помогает обеспе-

чить качество электроэнергии для конечного пользователя, повышая надежность работы подстанций. Диагностическое обслуживание обеспечивает повышение надежности посредством контроля состояния оборудования во времени с целью выявления состояния, указывающего на приближающийся отказ. Цель – определить, требуется ли корректирующее действие, и если да, то выполнить это действие до возникновения отказа оборудования.

К инструментам для контроля состояния оборудования подстанций относятся переносные тепловизоры Fluke (рис. 1).



Рис. 1. Современные тепловизоры легко использовать, они имеют превосходное качество изображения и являются гораздо более прочными и надежными по сравнению с ранее выпущенными старыми моделями. Менее заметные на первый

взгляд особенности, такие, как возможность работать одной рукой или возможность использовать защитные перчатки для соблюдения требований безопасности, либо возможность работы в тяжелых погодных условиях, могут оказать значительное влияние на выбор модели.

Тепловизоры позволяют получить двумерное изображение поверхностных температур электрических компонентов и других объектов (рис. 2).



Рис. 2. Проводники от линий электроснабжения к трансформаторной подстанции. Следует заметить, что измерения можно выполнять непосредственно на видимом изображении, поскольку в программном обеспечении оба изображения совмещаются идеально.

Тепловизоры поддерживают функцию IR-Fusion® (рис. 3, 5) – технологию, объединяющую изображение в видимом свете с ИК-изображением для улучшения идентификации, анализа и управления изображением. Два изображения точно совмещаются на любом расстоянии, повышая детализацию и упрощая обнаружение проблем.

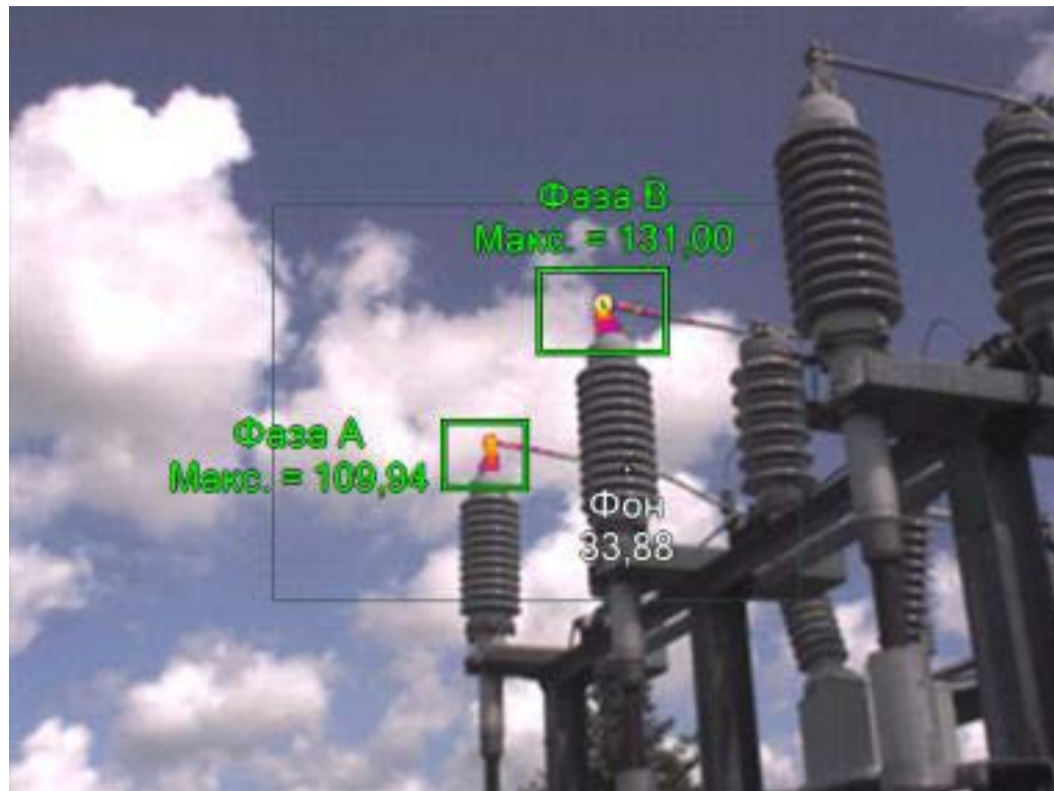


Рис. 3. Дефектные соединения на фазах А и В. На данном изображении была установлена цветовая сигнализация для температур выше 50 °С, поэтому на видимом изображении отображаются только температуры выше установленного порога. Данная новая функция делает обследование более простым и надежным для операторов, имеющих небольшой опыт.

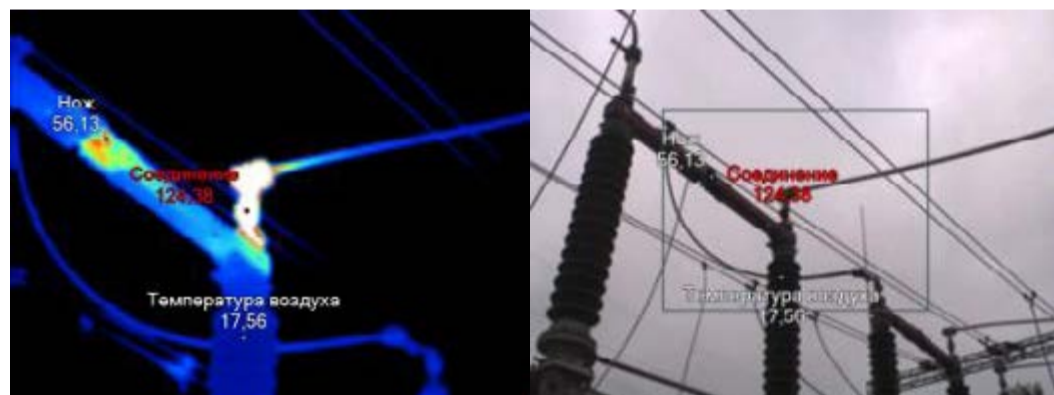


Рис. 4. Перегревы в месте подключения разъединителя и в месте соединения ножей. На видимом изображении прямоугольник обозначает участок, который охватывает инфракрасное изображение (кадр в кадре). Для облегчения идентификации инфракрасное изображение можно наложить на видимое с изменением прозрачности от 0 до 100%.



Рис. 5. Дефектное соединение на одной из фаз имеет перегрев 44,4 °С. Следует обратить внимание, что на данном изображении ИК изображение частично прозрачное (наложение 75%), что позволяет оператору ясно видеть компоненты с более низкими температурами.

### Что и когда проверять?

Подробное описание обслуживания подстанций и связанных узлов распределяющих устройств см. в стандарте NFPA Standard 70В, «Рекомендуемая практика обслуживания электрооборудования», глава 8: «Подстанции и узлы распределяющих устройств». Данный стандарт объясняет, что при преобразовании первичной электроэнергии подстанции, помимо изменения напряжения, могут обеспечивать защиту электрической системы, измерение корректировки коэффициента мощности и распределение электроэнергии (рис. 6). Подстанции и распределяющие устройства работают при высоких напряжениях. Стан-

дарт NFPA Standard 70E содержит дополнительные указания по технике безопасности и используемым средствам индивидуальной защиты, необходимым во время проведения обследования подстанций. Специалисты по тепловизионному контролю, помимо другого оборудования, обычно проверяют трансформаторы, регуляторы, переключатели, устройства отключения и конденсаторы.



Рис. 6. Для проверки и измерения величины коэффициента мощности, переходных процессов, провалов напряжения, гармоник и других параметров качества электроэнергии, которые могут привести к серьезным повреждениям трансформаторов, а так же другого оборудования, важно контролировать параметры качества электроэнергии с использованием измерительных приборов в соответствии с требованиями международных стандартов, например, IEC 61000-4-30.

Важным фактором при проведении тепловизионного обследования оборудования подстанции является время суток. Показания, снятые тихим ранним утром, позволяют избежать влияния отраженного солнечного излучения и ветра, которые способны исказить показания температуры. Влияние ветра на температуры нагретых дефектных компонентов может быть значительным, и

необходимо избегать проведения обследований при скорости ветра более 8 м/с. Однако самым важным фактором, влияющим на перегрев компонента, является нагрузка. Но в предрассветные часы нагрузки обычно ниже, и проблемы сложнее обнаружить. Чем больше нагрузка, тем проще обнаружить перегревы, а проведение обследований при нагрузках ниже 40% не рекомендуется.

Обучение и опыт специалиста также способны оказать влияние при выполнении тепловизионных обследований на улице.

### Что искать?

Следуя полному перечню оборудования подстанции, нужно просканировать каждый метр подстанции, сохраняя изображения всех возможных аномалий. Особое внимание следует обратить на похожие элементы оборудования с аналогичными нагрузками, рабочая температура которых по результатам обследования отличается.

При обследовании подстанций обычно начинают с проводников от линий электропитания, а затем продолжают обследование компонентов на той же фазе до трансформатора (рис. 3, 4, 5), не забывая проверять критически важные для безопасности подстанции элементы, такие, как грозовые разрядники (рис. 7). А заканчивают компонентами в помещении, такими, как шины, разъединители, кабельные соединения и т.д. (рис. 8).

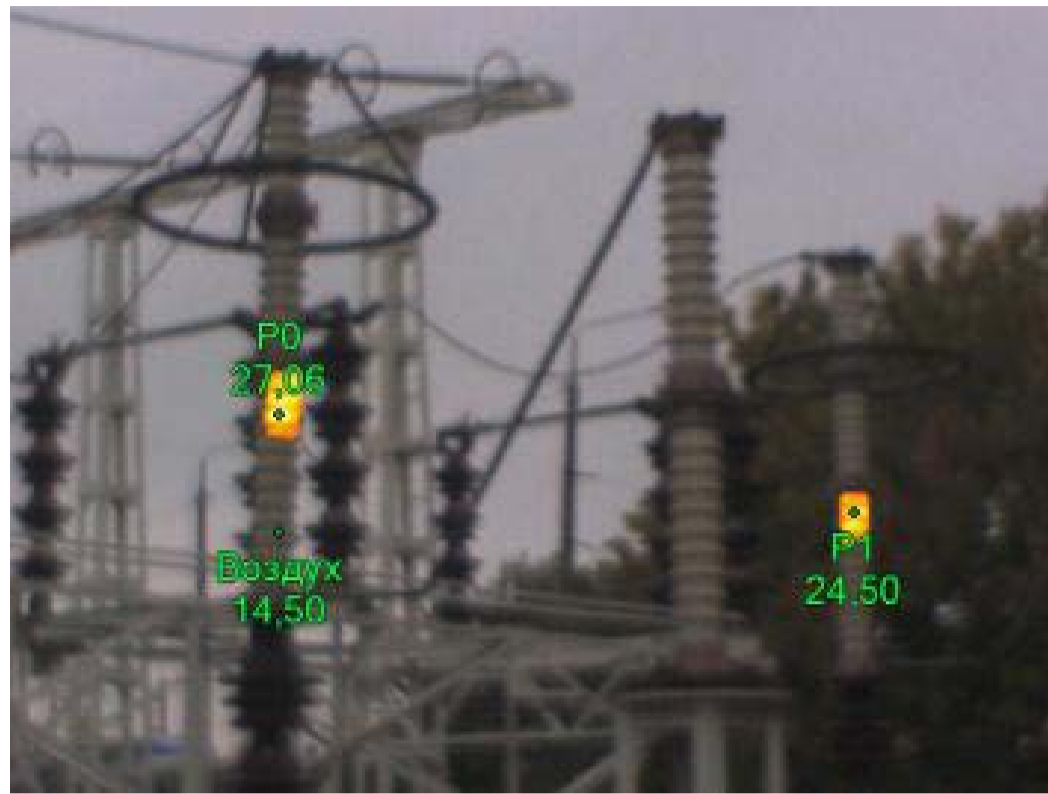


Рис. 7. Дефекты изоляторов разрядников, проявляющиеся за счет тока утечки на землю. В подобных случаях даже незначительные разности температур величиной 3-5 °С уже могут указывать на наличие серьезных проблем с изоляцией разрядника от земли, что влияет на его работу и на безопасность всей подстанции.

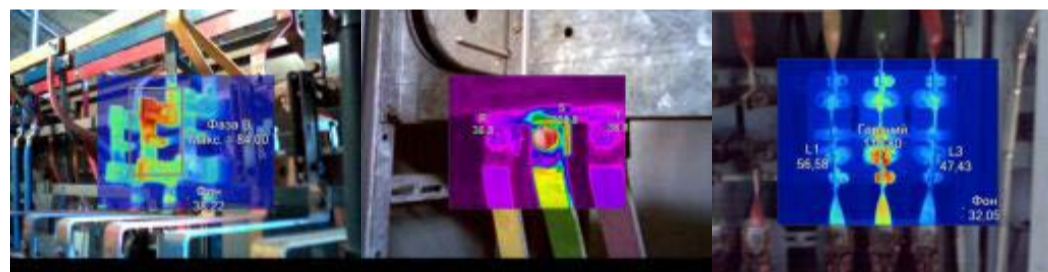


Рис. 8. Шины и разъединители в подстанции в помещении имеют перегревы в местах соединения шин. Разъединители справа имеют перегрев на фазе В, однако при последующем ремонте не обходимо все фазы. Иногда фазы с низкой температурой «исправляются», после чего невозможно разорвать контакт.

Хороший термографический подход к обслуживанию подстанции состоит в создании маршрутов обследования, включающих все подстанции, принадлежащие организации. Следует сохранить на компьютере термограммы всего оборудова-

ния подстанции и отслеживать динамику измерений температуры во времени. Это позволяет получить опорные изображения, с которыми будут сравниваться последующие данные. Такой подход поможет определить, отличаются ли уровни температуры от обычных, а после выполнения корректирующих действий определить, было ли обслуживание успешным.

### Что такое «красная тревога»?

Состояние оборудования, представляющее угрозу безопасности, должно получать максимальный приоритет с точки зрения ремонта. Кроме того, в указаниях NETA (InterNational Electrical Testing Association, Международная электротехническая ассоциация) говорится, что, когда разница температур ( $\Delta T$ ) между аналогичными элементами при аналогичных нагрузках превышает 15 °С, незамедлительно должен быть выполнен ремонт. NETA также рекомендует аналогичные действия в случае превышения показателем  $\Delta T$ , разности температуры элемента и окружающего воздуха, 40 °С.

Исходя из этих соображений, один из способов классификации задач обслуживания и выбора оборудования, требующего немедленного ремонта, – это выполнение для оборудования подстанции контроля превышения температуры на заданное количество градусов над заданными опорными значениями. Технически грамотный

персонал, отвечающий за безопасность и обслуживание, может определить соответствующие пороги в диапазоне от «продолжить контроль» до «исправить немедленно» наряду с другими, промежуточными уровнями действий, например «запланировать обслуживание» или «отремонтировать как можно быстрее».

Данный подход может быть еще успешнее, если при выборе опорных значений учитывать различия между обследованиями видимых элементов (например, контактов металл-металл распределительного оборудования) и невидимыми участками (например, внутренними элементами трансформаторов), где тепло рассеивается или скрыто от прямого взгляда специалиста и тепловизора. При сканировании невидимых участков фактическая рабочая температура будет заметно превышать показания тепловизора, поэтому пороги, сообщающие о необходимости выполнения корректирующих действий, должны быть намного ниже. Кроме того, следует контролировать как аномально горячие, так и аномально холодные элементы (рис. 9)

### Какова возможная стоимость отказа?

Расходы, связанные с отказавшей электрической подстанцией, зависят от многих факторов, включая количество и типы потребителей, которых затронет авария. Согласно данным источника в сети Интернет\*, средняя почасовая стоимость простоя по

всем отраслям оценивается приблизительно в 950 000 долл.

\*Стратегии измерения и управления ИТ-производительностью: количественное определение показателей и потерь, Meta Group, октябрь 2000; Fibre Channel Industry Association, информация с веб-сайта «Association of Contingency Planners, Washington State Chapter»: [www.acp-wa-state.org](http://www.acp-wa-state.org).

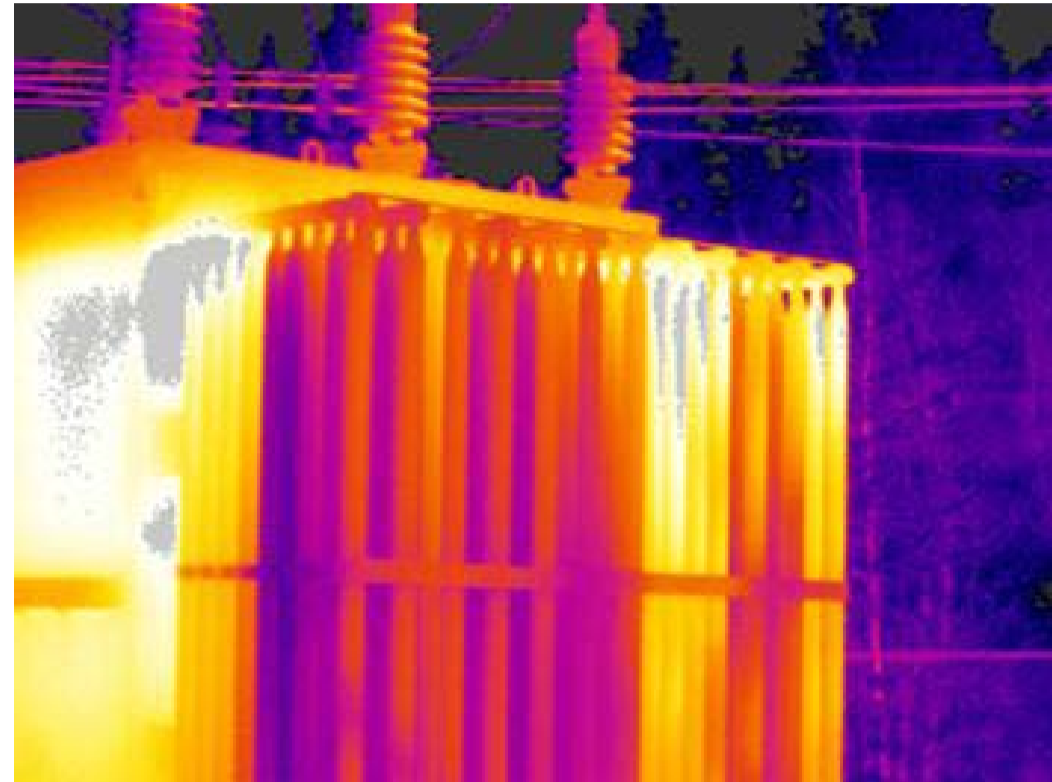


Рис. 9. С помощью термографии так же можно проверить уровни и циркуляцию масла в трансформаторах. Проверяйте все системы охлаждения, чтобы обеспечить правильную работу. На данном изображении можно увидеть засорение охлаждающих трубок. При повышении температуры оборудования, перегрев может быстро привести к выходу из строя.

### Контроль исполнения

В случае обнаружения проблемы с помощью тепловизора Fluke, необходимо использовать входящее в комплект программное SmartView обеспечение для документирования полученных данных в виде отчета, включающего цифровое изображение оборудования в видимом свете и соответствующее ИК-изображение. Это оптимальный способ сообщить о любых

обнаруженных проблемах и предложить способы их исправления. После исправляющего действия, чтобы оценить эффективность ремонта, а также используемые материалы и методы, можно использовать новое ИК-изображение. Полученные сведения позволят улучшить программу обслуживания подстанций.

### Модели тепловизоров Fluke, рекомендуемые к использованию для диагностики электрических подстанций



Fluke Ti9

Fluke Ti10

Fluke Ti25

Fluke Ti27 Industrial

Fluke Ti29

Fluke Ti32

FLUKE Ti50FT-20

FLUKE Ti55FT-20

# Некоторые вопросы прессовки обмоток силовых трансформаторов

Известно, что в процессе эксплуатации трансформаторов происходит ослабление усилия поджатия обмоток из-за: усадки изоляции; релаксации напряжений в системе прессовки и старения материалов. Эти явления вызваны воздействием:

- вибрационных механических нагрузок (явление магнитострикции в магнитопроводе);
- импульсных электродинамических нагрузок (грозовые разряды и короткие замыкания и т. п.);
- времени.

Ослабление усилия поджатия обмоток при воздействии климатических и перечисленных выше факторов может привести к выходу трансформатора из строя.

Зависимость между относительными усилиями прессовки и относительными деформациями обмоток хорошо аппроксимируется выражением:

$$P = Kx^n$$

где:  $P$  – усилие прессовки;  
 $x$  – деформация (усадка) обмотки;  
 $K$  – постоянный коэффициент;  
 $n$  – показатель степени, определяющий характер нелинейности.

Полученное выражение принято как модель, описывающая жесткость обмоток всех трансформаторов, поскольку материалы, используемые для изготовления обмоток практически одни и те же и, следовательно, обладают одинаковыми жесткостными характеристиками.

Для систем с распределенными параметрами собственные формы колебаний ортогональны, поэтому каждую форму колебаний можно рассматривать как систему с одной степенью свободы, что значительно упрощает решение поставленной задачи. Собственная частота механической системы с одной степенью свободы определяется выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}}$$

где:  $f$  – собственная (резонансная) частота;

$C$  – жесткость системы;  
 $m$  – масса.

Поскольку жесткость рассматриваемой системы является функцией от усилия прессовки:

$$C = \frac{dP}{dx} = nkx^{n-1} = nk \left( \frac{P}{k} \right)^{1-\frac{1}{n}}$$

то, для определения изменения собственной частоты от усилия прессовки воспользуемся отношением собственных частот при различных усилиях прессовки:

$$\frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{2n}}$$

или

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^{\frac{2n}{n-1}}$$

где:  $P_1$  – искомое усилие прессовки;  
 $P_2$  – известное усилие прессовки;  
 $f_1$  – измеренная собственная частота системы;  
 $f_2$  – известная собственная частота системы;  
 $n$  – показатель степени, определяющий характер нелинейности.

Таким образом, задача определения остаточного усилия прессовки обмоток трансформатора сводится к измерению собственных частот колебаний системы прессовки обмоток. При этом предполагается, что для данного трансформатора, или типа трансформаторов, определены частоты собственных колебаний при известном усилии прессовки, например, при его из-

готовлении или ремонтной подпрессовке обмоток. Подобные измерения характеризуются как «эталонные».

На основании этих рассуждений был создан специализированный диагностический комплекс **СДК-1Т**, позволяющий определить уровень опрессовки обмоток трансформатора.

Опыт работы ремонтных служб «Челябэнерго», «Свердловэнерго» и Сургутских электрических сетей заставил обратить внимание на следующие, с нашей точки зрения, весьма важные факторы:

- временной;
- силовой;
- тепловой.

Все эти факторы жестко связаны между собой. Рассмотрим каждый из них.

### **Временной фактор - влияние времени на усилие опрессовки обмоток.**

При механическом нагружении любых конструкций и материалов упругие напряжения с течением времени переходят в пластические деформации (явление релаксации). Особенно это заметно на материалах, имеющих нелинейные механические характеристики (дерево, картон, бумага, резина и пр.) Влияние этого фактора было отчетливо прослежено при испытаниях трансформатора ТДТГ-60000/110 в трансформаторном цехе г. Среднеуральск и на подстанции «Свердловская».

### **Силовой фактор - величина усилия прессовки обмоток.**

При конструировании любых машин и механизмов всегда закладываются некоторые запасы по прочности, которые используются в процессе эксплуатации при некоторых неучтенных при проектировании нагрузках. С течением времени происходит старение материалов и, следовательно, ухудшение изоляционных и механических характеристик (в частности коксование картона). Это явление существенно уменьшает податливость картона и бумажной изоляции. Поэтому нагружение обмоток заводским усилием при ремонте может привести к повреждению, а иногда и к разрушению системы «консоль - обмотки», что имело место при ремонте трансформаторов.

### **Тепловой фактор - влияние температуры на усилие опрессовки обмоток.**

При нагревании (охлаждении) меняются линейные размеры силовых элементов конструкции трансформатора. Коэффициенты линейного расширения стали, меди и картона существенно разнятся. Поэтому при повышении температуры трансформатора происходит увеличение внутренних усилий в системе прессовки обмоток, то есть увеличение усилия опрессовки обмоток. Понижение температуры приводит к противоположным явлениям, то есть к снижению внутренних усилий в системе прес-

совки обмоток. При воздействии на трансформатор импульсных или ступенчатых нагрузок (например, резкое возрастание нагрузки, короткое замыкание, удар молнии и тому подобное) происходит смещение межвитковых расстояний (оно может быть в пределах упругости, то есть после прохождения импульса система возвращается в исходное состояние) и при пониженной электрической прочности масла возможен межвитковый пробой. Это явление можно продемонстрировать на обычных пружинах, на пружины с одинаковой высотой помещается один и тот же груз пружина, имеющая меньшую жесткость (меньшие внутренние усилия) переместится на большее расстояние.

### **О методах нагрева масла.**

Если нагрев трансформатора осуществляется постоянным током, изменение линейных размеров обмоток возрастает быстрее (обмотки изолированы бумагой, которая является хорошим теплоизолятором), чем изменение размеров магнитопровода или прессующих шпилек, то есть к возрастанию внутренних усилий прессовки, что может привести к перепрессовке обмоток и как следствие этого статический изгиб витков. Если нагрев трансформатора осуществляется разогретым маслом, то происходит противоположное явление, изменение размеров магнитопровода опережает из-

менение размеров обмоток и происходит ослабление внутренних усилий прессовки, то есть на некоторое время трансформатор становится распрессованным. Это явление наблюдалось при испытаниях трансформатора ТЦ-630000/500 на РГРЭС, где после подпрессовки обмоток до усилия 0,8 от заводского при температуре +40°С при охлаждении его до ~ - 6°С усилие прессовки снизилось до нуля.

В качестве иллюстрации к вышеизложенному, рассмотрим аварии трансформаторов ТЦ-630000/500 произошедшие на Экибастузской ГРЭС. Трансформатор, охлажденный до температуры минус 28°С, был подготовлен к эксплуатации. В процессе подготовки трансформатор был нагрет маслом. Через ~16 часов эксплуатации произошло витковое замыкание фазы «А» обмотки НН. Наиболее вероятной причиной этого представляется воздействие теплового фактора, следствиями которого являются:

- увлажнение масла в придонном слое бака трансформатора;
- глубокая распрессовка обмоток.

При низких температурах днище бака трансформатора покрывается слоем льда, который образуется из влаги, присутствующей в масле. Нагревание масла сопровождается растворением влаги в придонном слое масла, при некоторых условиях, воз-

можно, его переувлажнение, и как следствие этого, уменьшение электрической прочности.

Глубокая распрессовка обмоток приводит к образованию зазоров между обмоточными проводами и прокладками. Под воздействием пульсирующего электромагнитного поля в районе этих зазоров возможно появление кавитации и пузырьков. В равномерность этого замечания указывает место повреждения – обмотка НН. Площадь контакта обмоточных проводов с прокладками обмотки НН существенно больше чем у обмотки ВН и несмотря на меньший градиент напряжения повреждение произошло на обмотке НН. (Предполагается, что обе обмотки запрессованы одинаково).

Приведенные рассуждения указывают на необходимость внимательного отношения к уровню прессовки обмоток и к регламентным работам при пуске трансформатора в эксплуатацию особенно при минусовых температурах.

## Назначение комплекса СДК-1Т:

СДК-1Т предназначен для определения остаточного усилия прессовки обмоток силовых масляных трансформаторов четвертого и выше габарита.

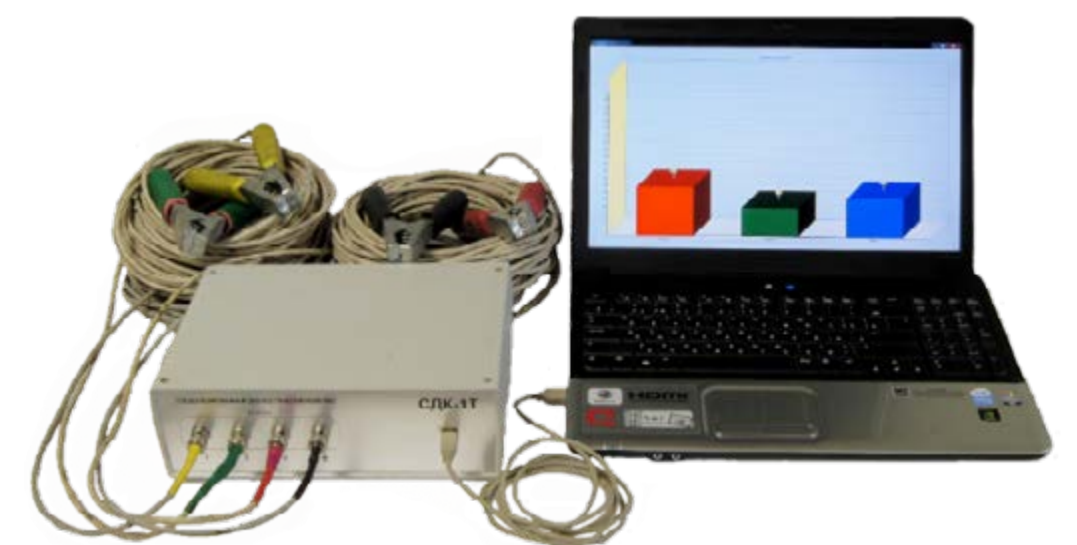
Питание СДК-1Т осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В±10%, частотой 50 Гц.

## Общие данные:

- Число каналов: 4;
- Диапазон измерения напряжений: 0 - 10 В.
- Частотный диапазон измерения напряжений: 100 - 2000 Гц.

## Порядок работы:

1. Провести полную расшивку трансформатора, заземлить нейтраль трансформатора.
2. Включить компьютер.
3. Подключить измерительные провода к высоковольтным выводам трансформатора. Соединить заземленную нейтраль трансформатора с “землей” измерительного комплекса.
4. Подсоединить провода с фаз к разъемам блока разводки (БР).
5. Провести измерения согласно “Программы сбора и обработки данных”.



# Аналитическое оборудование для контроля параметров трансформаторных масел

Содержание механических примесей и наличие влаги являются эффективными критериями для диагностики параметров трансформаторных масел. Превышение допустимых пределов сигнализирует о наличии проблем и возрастании риска аварийной ситуации.

В настоящее время наибольшее распространение в качестве метода анализа концентрации и гранулометрического состава дисперсной фазы в жидких и газовых средах получил фотоэлектрический метод. Идея метода состоит в измерении изменений светового потока, проходящего через исследуемый образец, возникающих вследствие взаимодействия оптического излучения с поглощающим материалом частиц. Различают две основных разновидности данного метода: метод анализа отобранных проб и метод встроенного контроля, при котором датчик устанавливается в магистраль, по которой протекает исследуемая жидкость.

Для реализации метода отобранных проб применяются специальные анализаторы, в частности, АЗЖ-975, производимый ПК «ЭЛДИ» (г. Самара). Прибор состоит из блока электроники с индикатором и кнопка-

ми управления, соединенного с датчиком, представляющим собой воронку, куда заливается проба жидкости, установленную на стакане для сбора проанализированной жидкости. Прибор анализирует гранулометрический состав загрязнения по фракциям, определенным ГОСТ 17216-2001, начиная с диаметра частиц 5мкм. Анализатор внесен в Госреестр средств измерений.



Анализатор предельно прост в эксплуатации, основное внимание должно уделяться соблюдению чистоты воронки и технике отбора проб. Для получения достоверных результатов необходимо обеспечивать чистоту пробоотборной посуды и чистоту воронки анализатора. Также необходимо следить, чтобы в жидкости не было пузырьков газа, которые также представляют собой оптическую неоднородность и регистриру-

ются, как частицы. Для проб, отобранных из сосудов и магистралей, находящихся под давлением, целесообразно ввести предварительное вакууммирование с целью удаления растворенного газа.

При анализе сильно загрязненных жидкостей (выше 12 класса по ГОСТ 17216-2001) необходимо применять разбавление анализируемой жидкости чистым растворителем, при этом жидкость должна оставаться гомогенной. При анализе вязких жидкостей (более 5сСт при комнатной температуре) необходимо принять меры для обеспечения протекания жидкости через канал датчика. На дисплее прибора предусмотрена индикация сообщения о необходимости регулировки расхода жидкости через канал датчика. Для регулировки расхода жидкости к штуцеру сливного стакана подключается источник разрежения. Для решения проблем с анализом вязких жидкостей и чистотой пробоотборной посуды производитель предлагает комплект дополнительного оборудования, включающий в себя вакуумно-нагнетательный насос с ресивером, пистолет для отмывки струей растворителя и емкость для сбора отработки. При необходимости проведения дополнительного микроскопического анализа может

устанавливается специальное приспособление для одновременной фильтрации на фильтр типа «Владипор» или подобный.



При анализе вязких жидкостей необходимо использовать источник разрежения, подключаемый к штуцеру приемного стакана **AZJ-975**. Кроме того, возникает необходимость тщательной мойки лабораторной посуды и контроля ее чистоты. Эти проблемы решает комплект **КВАНТ-904**, предназначенный для использования вместе с анализаторами контроля чистоты жидкости **AZJ-975**. **КВАНТ-904** комплектуется промывочным пистолетом и ресивером с вакуумметром, обеспечивает подачу профильтрованной промывочной жидкости под давлением и создание разрежения для анализа вязких жидкостей.

### Технические характеристики

► Рабочие жидкости - бензин-растворитель (нефрас), масло АМГ-10, трансформаторное масло и другие жидкости с вязко-

стью при  $T = + 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , не более 40сСт

► Объем пробы жидкости,  $\text{cm}^3$  —  $100 \pm 0.5$

► Границы размерных групп контролируемых частиц загрязнителя (по диаметру):

AZJ-975.0ЭЛДИ. 01.175.000-0 —  
5,10,25,50,100,200 мкм

AZJ-975.1 ЭЛДИ.01.175.000-01 —  
2,5,10,25,50,100 мкм

AZJ-975.2 ЭЛДИ.01.175.000-02 —  
5,10,15,25,50,100 мкм

AZJ-975.3 ЭЛДИ.01.175.000-03 —  
4,5,6,10,14,25 мкм

► Пределы основной относительной погрешности AZJ при измерении счетной концентрации частиц механических примесей размерной группы от 100 до 200 мкм —  $\pm 20 \%$

► Пределы приведенной погрешности AZJ при измерении размеров частиц механических примесей к границам размерных групп (кроме первой и последней границ) —  $\pm 10 \%$

► Дополнительная погрешность AZJ при измерении счетной концентрации частиц за счет совпадения двух и более частиц в измерительном объеме ПП при предельной концентрации частиц 1500 частиц/ $\text{cm}^3$ , составляет не более — 15%

► Время анализа пробы жидкости — от 2 до 8 мин.

**AZJ-975** может подключаться к компьютеру для дистанционного управления анализом и распечатки результатов, кроме того, в нем имеется встроенная энергонезависимая память для сохранения результатов анализа. Выпускается также модификация анализатора, регистрирующая частицы, начиная с размера 2мкм. В настоящее время разработана также исследовательская версия **AZJ-975**, позволяющая получать более детальную гистограмму распределения размеров частиц (с шагом в 1мкм).

Для лабораторий, производящих большое число анализов в течение рабочей смены и работающих с различными марками жидкостей производитель предлагает стенд централизованного контроля **КВАНТ-903**. Стенд позволяет вести одновременный контроль нескольких проб жидкости, обе-





спечивает мойку лабораторной посуды, источник разрежения для анализа вязких жидкостей и вакууммирование проб, взятых из источников под высоким давлением. В стенде предусмотрен отдельный сбор и очистка слива проанализированных проб, что позволяет осуществлять их возврат в технологическую систему.

Техника анализа отобранных проб принципиально ограничивает точность анализа в случае анализа высокочистых жидкостей и в целом ряде случаев создает организационно-технические трудности, например, при анализе токсичных жидкостей, анализе в трубопроводах под высоким давлением. Применение датчиков встроенного контроля исключает эти проблемы, повышает точность и достоверность анализа и существенно снижает влияние человеческого фактора. Основным требованием для применения встроенного контроля яв-

ляется необходимость наличия постоянно-го расхода анализируемой жидкости чрез датчик. Практика применения таких датчиков показала их эффективность и существенное повышение достоверности и оперативности контроля.

Для обеспечения встроенного контроля предлагается целый ряд модификаций точных анализаторов ФОТОН-965.

В процессе эксплуатации трансформаторных масел встает задача контроля влагосодержания, для решения которой применяются различные методы и одним из наиболее распространенных является метод Карла Фишера. Этот метод обладает рядом практических преимуществ: высокая точность и воспроизводимость, хорошая селективность по воде, малые количества необходимых образцов, легкая подготовка пробы, малое время анализа, практически неограниченный диапазон измерения (1ppm до 100 %), пригодность для автоматизации.

Метод Фишера реализован в автоматическом анализаторе количества влаги «АКВА-901», который предназначен для автоматического контроля микроконцентраций гигроскопической, сорбированной и кристаллизационной воды в трансформаторных, турбинных и других маслах.

В состав анализатора входят блок электроники и электрохимическая ячейка с магнитной мешалкой. В качестве рабочей среды используется классический раствор

Карла Фишера.

Анализатор обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- Поддержание стабильного тока генерации молекулярного йода для связывания воды;
- Определение заряда, израсходованного на титрование;
- Контроль величины тока титрования;
- Автоматическая стабилизация режима электрохимической ячейки;
- Амперометрическое определение конечной точки титрования;
- Снижение величины тока титрования в условиях низкого влагосодержания.

Анализатор может подключаться к внешнему компьютеру. В режиме дистанционного управления реализуются дополнительные функции, в частности, определение т.н. дрейфа и его программная компенсация.

Процесс анализа с помощью АКВА-901 фактически полностью соответствует традиционной схеме, применяемой в аналитической химии. Автоматическое поддержание величины тока титрования и стабилизация режима вместе с применением прецизионной схемы амперометрического определения конечной точки титрования существенно облегчают работу оператора.

# Портативные и лабораторные анализаторы электрической прочности изоляционного масла.

## Портативные анализаторы электрической прочности изоляционного масла ВА60, ВА75, ВА80 и ВА100 компании b2 high voltage Diagnostics (Швейцария)

До сегодняшнего дня еще никогда испытание трансформаторного масла на прочность не могло быть выполнено с такой легкостью и быстротой, как сейчас при помощи испытательной установки серии ВА производства компании b2 High Voltage Diagnostics (рис. 1). Оператору необходимо лишь залить пробу масла в испытательную ячейку (рис. 2), выбрать в меню програм-

му испытания – а именно ГОСТ 6581-75 «Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний» и запустить прибор. Дальнейший процесс происходит полностью автоматически и не требует вмешательства персонала. Установка будет следовать утвержденной методике испытания (ГОСТ 6581-75), проводя последовательно 6 тестов, самостоятельно перемешивать образец масла между пробоями, давая заданное ГОСТом время отстояться образцу между тестами. В конце процедуры будет рассчитано, выведено на дисплей прибора (рис. 3) или на печать

на встроенный принтер (рис. 4), который входит в стандартный комплект поставки) все результаты каждого испытания, расчет среднего арифметического значения пробивного напряжения, среднюю квадратическую ошибку и коэффициент вариации.

Испытательная установка имеет большой, цветной, графический дисплей, на котором отображается не только результаты испытания, но и в графическом виде скорость нарастания напряжения, время, напряжение пробоя.

Необходимо также отметить, что прибор имеет встроенную память и беспроводной

компьютерный интерфейс Bluetooth, что позволяет мгновенно передавать протоколы измерения на ПК. Уникаль-



Рис. 1

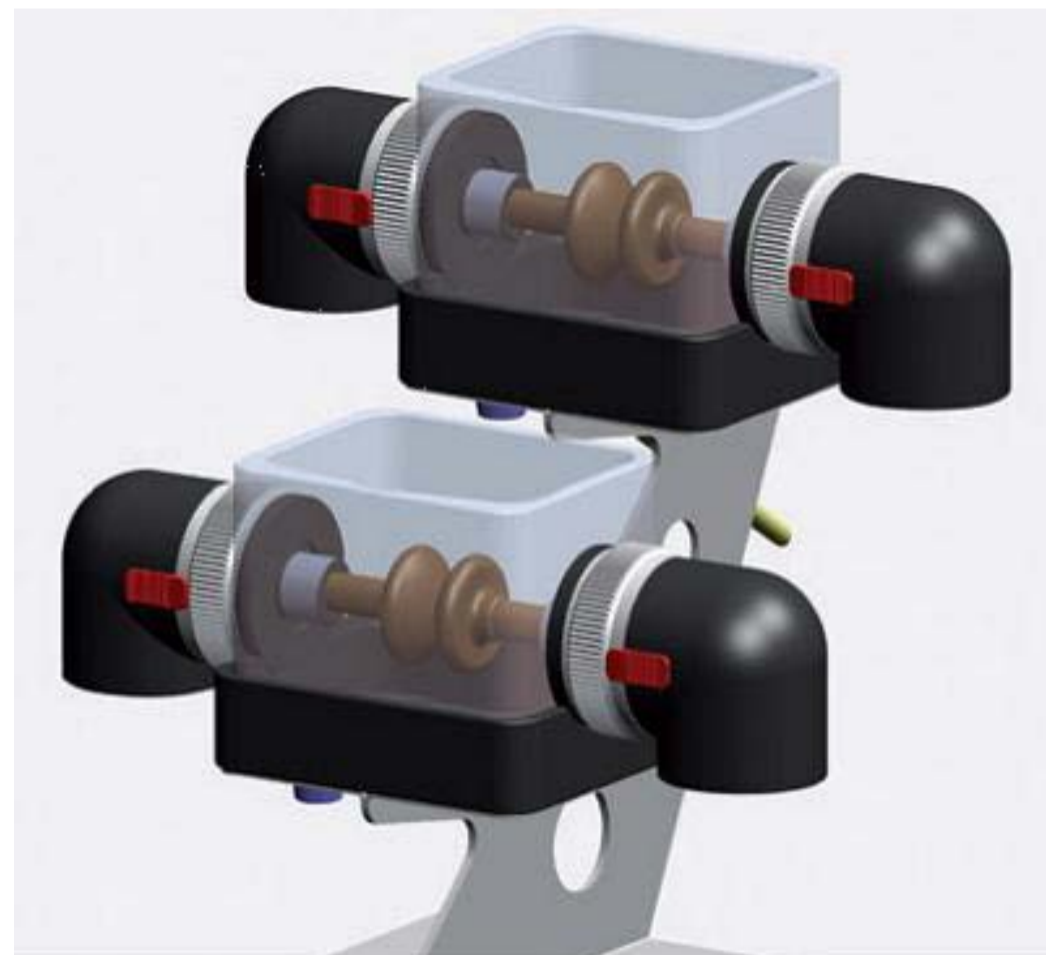


Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4

ной особенностью поставляемого вместе с прибором программного обеспечения является **возможность одновременного управления несколькими установками** для испытания. Оператор может запустить процесс испытания одной установкой, в то время как на другой он уже проводится, а третья установка в это время может передавать результаты измерения на компьютер (рис. 5).

Серия ВА состоит из 4 приборов - **ВА60**, **ВА75**, **ВА80** и **ВА100** с максимальным напряжением до 60, 75, 80 и 100кВ соответственно (рис. 6).

Очень важным параметром на сегодняшний день является не только максимально возможное подаваемое установкой напря-

жение, но и время его отключения при наступлении факта пробоя. Многие установки, генерирующие высокое напряжение при помощи высоковольтных масляных трансформаторов не позволяют мгновенно (менее 5мкс) отключить подачу высокого напряжения – данный процесс (просто из-за технологии генерации высокого напряжения) может занимать в 1000 раз большее время – до 10мсек, что недопустимо при испытании современных синтетических масел, так как ведет к разложению образца, карбонации масла и невозможности корректно продолжить испытания. Генерация высокого напряжения в установках серии ВА производится при помощи элементов силовой электроники и высоковольтных

усилителей, что позволяет не только генерировать идеальный синусоидальный испытательный сигнал, быстро (менее 5мкс) отключать подачу высокого напряжения при наступлении пробоя, но и самым прямым образом влияет на вес и размеры уста-

новки. Вес **ВА80** (до 80кВ) включая встроенные аккумуляторные батареи большой мощности составляет 19кг.

Все приборы серии ВА имеют тройное питание – от сети 220В, встроенного аккумулятора (позволяет работать сутки без перезарядки), или 12В прикуривателя автомобиля, что позволяет проводить испытание образца непосредственно на предприятии заказчика.

Одним из удобств является также встроенный датчик температуры, который позволяет непосредственно измерять и записывать реальную температуру тестируемого образца.

Необходимо отметить, что все приборы серии ВА внесены в государственный реестр средств измерений РФ по номером 46528-11, допущены к применению на территории Российской Федерации и метрологически обеспечены в эксплуатации.

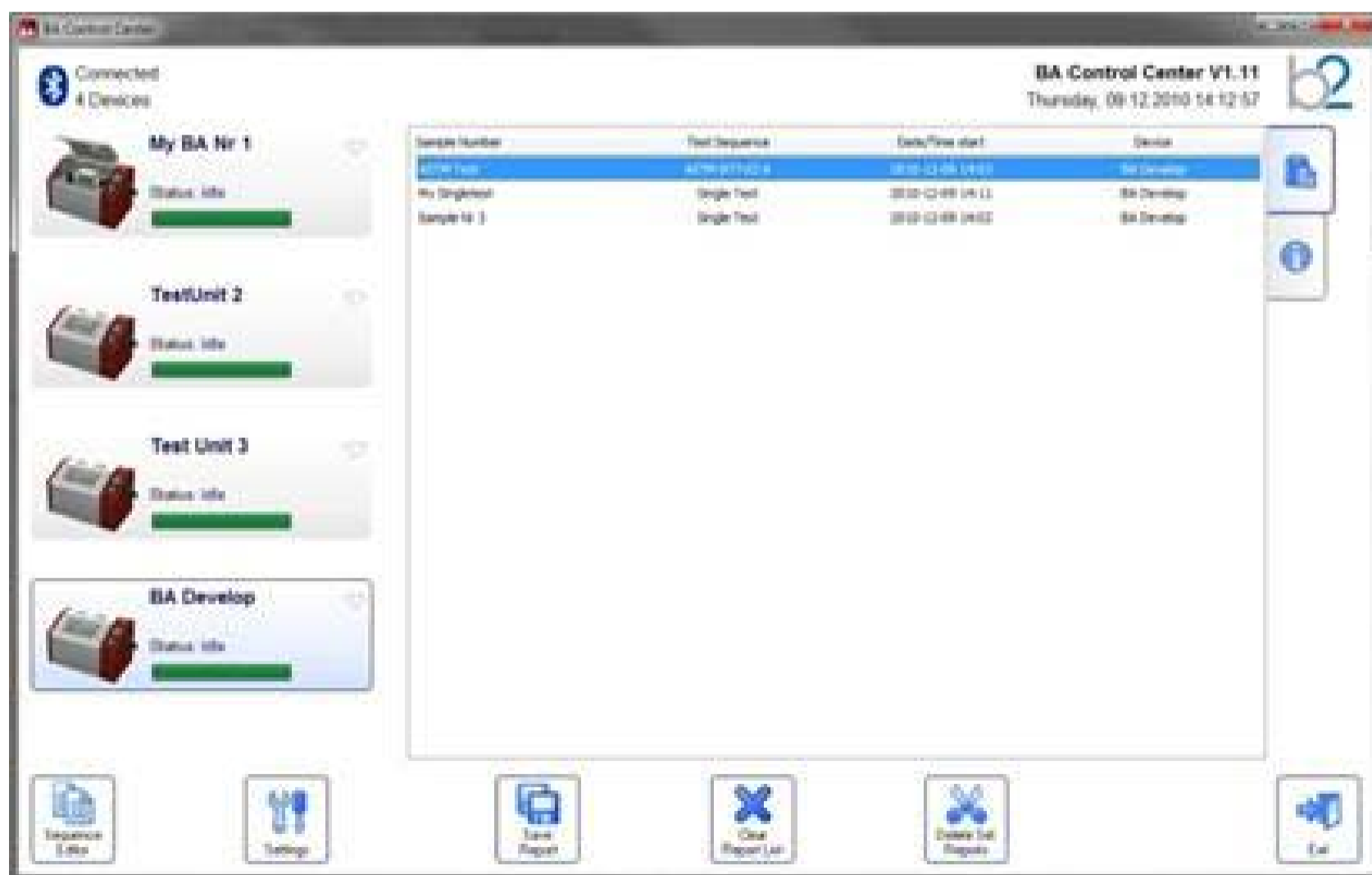


Рис. 5



Рис. 6

# DTR8510 - АВТОМАТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Проверьте коэффициент трансформации ваших трансформаторов мощности, напряжения или тока. Прибор DTR8510 специально разработан для проверки силовых трансформаторов (ТС), трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН).

Прибор DTR8510 является вторым поколением очень успешного измерителя коэффициента трансформации DTR8500 производства компании Chauvin Arnoux (Франция).

DTR Model 8510 является переносным цифровым измерителем коэффициента трансформации, предназначенным для тестирования на месте силовых трансформаторов, трансформаторов тока и напряжения. Будучи подсоединенным к предварительно отключенному трансформатору, прибор с высокой точностью измерит отношение числа витков в первичной обмотке ко вторичной и одновременно отобразит полярность и величину тока возбуждения.

Неоспоримым преимуществом данного измерительного прибора является непосредственное считывание результатов измерения коэффициента трансформации в диапазоне от 0.8000:1 до 8000:1 для силовых трансформаторов и трансформаторов по напряжению и от 0.8000 до 1000.0 для

трансформаторов тока.

Тестирование трансформатора происходит благодаря возбуждению первичной обмотки и снятия результатов испытания со вторичной. Дополнительно прибор имеет специальный режим тестирования постоянным током, который позволяет уменьшить влияние магнитных сердечников на результат измерения. Проверка непрерывности цепи позволяет определить наличие или обрыв (высокое сопротивление) соединения между выводами обмоток трансформатора.

На большом 2-х строчном ЖК дисплее с подсветкой одновременно отображаются измеренный коэффициент трансформации, полярность и величины тока возбуждения с высоким разрешением. Пользователь может вывести на экран также отклонение измеренных параметров, от указанных производителем на шильде трансформатора. При некорректном подключении проводов, обратной полярности, обрыве цепи или коротком замыкании прибор выводит сообщение об ошибке на дисплей прибора.

Прибор имеет двойное питание: от сети

220В или встроенного аккумулятора, что позволяет тестировать трансформатор непосредственно там, где он находится. Время независимой работы прибора от аккумуляторов составляет от 10 до 12 часов.

Прибор полностью автоматический и не требует от пользователя дополнительной калибровки или балансировки. При включении прибора и в процессе каждого измерения прибор самокалибруется, производит проверку целостности измерительных цепей, выявляет наличие короткого замыкания (значительное увеличение тока возбуждения), а также неверное подключение измерительных проводов и обратную полярность включения. При отсутствии каких-либо неполадок, на экране будет отображен измеренный коэффициент трансформации.

Прибор DTR 8510 спроектирован с учетом обеспечения безопасности оператора. Измерения производятся при низком напряжении и токе, что совместно со встроенной схемой защиты от ошибочного подключения кабелей X и H, предохраняет от генерации опасных тестовых напряжений, которые могут возникать при измерении

коэффициента трансформации, что существенно повышает защиту и безопасность Пользователя при работе с этим прибором.

Дополнительно новый прибор имеет:

- В комплект поставки включены 5м провода и сумка;
- Встроенная память на 10,000 измерений;
- USB двунаправленный интерфейс. Позволяет конфигурировать прибор с компьютера и передавать данные из прибора в компьютер;
- ПО DataView для записи, анализа и конфигурации прибора включено в комплект поставки.

Большой, двухстрочный, алфавитно-цифровой ЖК-дисплей с регулируемой контрастностью и подсветкой гарантирует отображение результата в любое время суток.



Прочный, герметичный корпус прибора изготовлен из структурированного полипропилена, что позволяет использовать прибор в полевых условиях эксплуатации.

Изготовленный с использованием высококачественных электронных и механических компонентов, прибор является образцом инновационных технологий.

Изготовленный с использованием высококачественных электронных и механических компонентов, прибор является образцом инновационных технологий.



Использование прибора на объекте

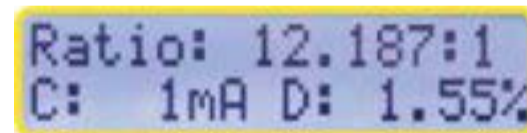
Краткие сообщения на дисплее облегчают работу оператора



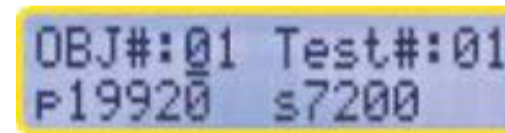
Выбор типа тестируемого трансформатора



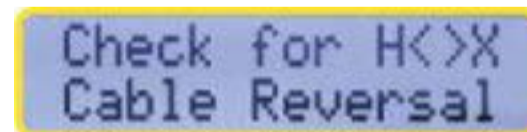
Индикация выбранного режима тестирования



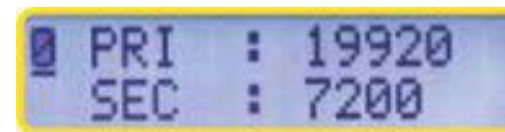
Индикация коэффициента трансформации и тока



Сохранение результата в памяти прибора



Автоматическое определение неправильного подключения



Запоминание до 10 шильд завода-изготовителя

### Спецификация

силовых трансформаторов (ТС), трансформаторы напряжения (ТН), диапазон КТ	Автоматическое 0.8000:1 до 8000:1
трансформаторов тока (ТТ), диапазон КТ	Автоматическое 0.8000 до 1000.0
Погрешность (для ТС и ТН)	КТ <10 к 1: ±0.2% КТ от 10 до 1000 к 1: ±0.1% КТ от 1000 до 5000 к 1: ±0.2% КТ от 5000 до 8000.0 к 1: ±0.25%
Погрешность (для ТТ)	КТ от 0,8 до 1000 к 1: ±0.5%
Сигнал возбуждения	ТН/ТС Режим: 32В действ макс ТТ режим: 0 до 1А автоматически выбирается прибором, 0.1 до 5 В действ макс
Ток возбуждения Погрешность	Диапазон: 0 до 1000мА ±2% ± 2мА
Частота возбуждения	70Гц
Дисплей прибора	ЖК, 2-х строчный, с подсветкой
Комп интерфейс	Оптически изолированный USB 2.0
Внутренняя память	на 10,000 измерений
Источник питания	Аккумулятор 12В NiMH
ЗУ и напряжение питания	90/240В, 50/60Гц, автоматически
Время между зарядками	до 10 часов постоянного использования; Невозможно использовать прибор во время зарядки; Индикатор разрядки аккумулятора
Время зарядки	<4 часов