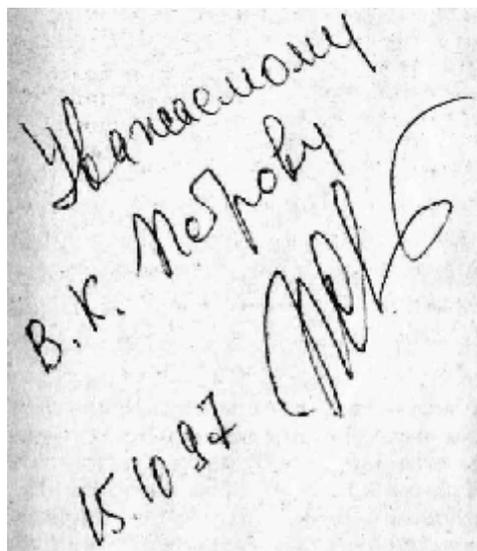


П.М.Сви

---

МЕТОДЫ  
И СРЕДСТВА  
ДИАГНОСТИКИ  
ОБОРУДОВАНИЯ  
ВЫСОКОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ



Уважаемому  
В.К. Петрову  
15.10.97

*(Signature)*

Москва

Энергоатомиздат  
1992

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Надежность современных систем производства и распределения электроэнергии в значительной мере определяется надежностью электрооборудования. Аварийные повреждения, часто сопровождающиеся разрушением оборудования, приводят к нарушениям электроснабжения и большому экономическому ущербу в энергосистеме и у потребителей. Особенно значительны потери от отказов оборудования высших классов напряжения, имеющего большую единичную мощность.

Поддержание необходимой степени надежности оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонтов. Традиционно эта система базируется на периодическом проведении плановых профилактических работ и является системой обслуживания по времени наработки. Применительно к устройствам высокого напряжения такая система не является оптимальной, ибо приводит к неоправданным отключениям работоспособного оборудования.

Напряженные графики работы электрических сетей и отсутствие достаточных резервов приводят к необходимости увеличения межремонтных периодов, что при существующей системе технического обслуживания ведет к снижению уровня надежности основного оборудования.

Большие резервы повышения эффективности эксплуатации оборудования высокого напряжения заключены в переходе на техническое обслуживание по реальной потребности. При этом необходимость в обслуживании и ремонте определяется исходя из действительного состояния оборудования.

Переход к обслуживанию оборудования по потребности невозможен без использования надежных методов выявления и оценки его текущего технического состояния. Это и определяет необходимость развития системы технической диагностики.

Необходимость совершенствования системы и методов эксплуатационного контроля электрооборудования определяется также их недостаточной эффективностью. Традиционные методы испытаний разработаны давно и направлены на выявление дефектов, которые, правило, уже не определяют надежность современного оборудования высокого напряжения. Периодичность испытаний не согласована со скоростью развития дефектов. Все это существенно снижает вероятность своевременного выявления развивающихся повреждений и возможность прогнозирования отказов.

В последние годы были предложены новые методы диагностирования, появилась возможность дистанционного контроля и испытаний без вывода оборудования из работы. Развита методика контроля, основанная на индикации излучений, связанных с наличием дефектов. К ним относятся методы обнаружения акустических, тепловых и световых эффектов, а также излучений и токов в области радиочастот. Значительное распространение получают методы выявления продуктов старения и разрушения изоляционных материалов.

Все это позволяет создать современную систему эксплуатационного контроля электрооборудования и, что особенно важно, реализовать возможность сигнализации о недопустимом (предаварийном) его состоянии.

Значительный объем работ по диагностированию, включающий не только проведение измерений, но и оценку их результатов, может быть автоматизирован. Применение при этом современной вычислительной техники обеспечивает повышение достоверности контроля и снижение влияния субъективных факторов на его результаты.

В предлагаемой вниманию читателей книге рассмотрены принципы построения системы технической диагностики оборудования высокого напряжения. Ввиду ограниченного

объема издания описаны лишь методы, применяемые при испытаниях оборудования распределительных устройств - силовых и измерительных трансформаторов, устройств защиты от перенапряжений и т. п. Основное внимание уделено специальным методам измерений и применяемым при этом приборам. Рассматриваются возможные погрешности измерений и способы их исключения. В главах, посвященных методам испытаний, также содержится изложение их физических основ и даны определения агностических параметров.

Автор не ставил задачу описания полных систем технической диагностики конкретных видов электрооборудования; эти системы еще находятся в стадии разработки. Кроме того, с изменением конструкций и условий эксплуатации оборудования такие системы должны меняться. Не рассматриваются также вопросы экономического обоснования объема контроля.

Основная задача книги - определение принципов построения диагностических систем для оборудования высокого напряжения, оценка их возможностей и описание основных методов, наиболее эффективных при выявлении типичных видов дефектов. Там, где это было целесообразно, применение описанных методов рассмотрено на примере контроля основных видов оборудования.

При написании книги были использованы литературные источники и опыт автора по разработке и исследованию методов контроля оборудования высокого напряжения.

В своей работе автор исходил из традиций ОРГРЭС - Союзтехэнерго в области создания системы эксплуатационного контроля электрооборудования и считает своим долгом отметить вклад в это направление уже ушедших М. И. Рапопорта, В. Ф. Воскресенского и М. В. Локшина, памяти которых посвящена эта книга.

Автор выражает благодарность рецензенту Б. А. Алексееву за помощь в работе над рукописью.

Замечания и пожелания по книге прошу направлять по адресу издательства: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

*Автор*

## *Глава первая* **ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

### **1.1. СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ**

**Основные понятия.** Надежность оборудования определяется его конструкцией и качеством изготовления. Однако в ходе эксплуатации из-за процессов старения материалов и внешних воздействий надежность оборудования снижается. Создание электрооборудования, показатели надежности которого за весь период эксплуатации не станут ниже допустимых, - задача достаточно трудная и в значительном числе случаев экономически нецелесообразная. Поэтому в ходе эксплуатации оборудования необходимо проведение работ по поддержанию требуемого технического состояния.

Различают несколько основных видов технического состояния: исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, правильное и неправильное функционирование. Исправным является объект, полностью отвечающий всем техническим требованиям. Работоспособным является объект, у которого техническим требованиям соответствуют лишь свойства, характеризующие способность выполнения заданных функций. Несоответствие между реальными и требуемыми свойствами объекта является дефектом. При возникновении дефекта исправный объект становится неисправным; при этом возможны два состояния - работоспособное и неработоспособное. Переход в работоспособное состояние называется повреждением; переход в неработоспособное - отказом.

В условиях эксплуатации необходимо обеспечивать как минимум работоспособное состояние. Это возлагается на систему технического обслуживания (ТО) и ремонтов. Основное содержание ТО - контроль за состоянием оборудования и собственно обслуживание, т. е. поддержание исправности или работоспособности (чистка, смазка, регулировка и т. п.). Задача ремонта - восстановление исправности или работоспособности.

Исследование технического состояния оборудования является предметом технической диагностики, цель которой - изучение проявлений (признаков) различных технических состояний, разработка методов их определения, а также принципов построения и использования систем диагностирования.

Методами диагностики производится разбиение (классификация) всей совокупности объектов на группы в соответствии с принятыми градациями состояния. Для рассматриваемых объектов установить один обобщенный показатель состояния нельзя. Поэтому основной задачей диагностирования является своевременное обнаружение и поиск дефектов, т. е. определение их наличия, характера и местонахождения. Это производится путем соответствующих испытаний (элементарных проверок).

Алгоритм (правила) диагностирования, определяющий объем, последовательность и взаимосвязь испытаний объекта, устанавливается исходя из его диагностической модели. Модель строится на основании изучения конструкции оборудования данного типа и опыта его эксплуатации. При этом классифицируются выявленные и возможные дефекты, устанавливаются наблюдаемые признаки их появления и методы выявления этих признаков. Признаки дефектов, как правило, проявляются в изменениях наблюдаемых параметров (характеристик) объекта. Поэтому необходимо установление диагностических параметров и их количественной или качественной связи с наличием и степенью развития дефекта.

Значения диагностических параметров, определенные при испытаниях, характеризуют техническое состояние объекта в данный момент времени. Для отнесения объекта к соответствующей группе состояний необходимо установить предельные значения параметров; эти значения и являются признаками дефекта. При периодическом контроле необходимо также учитывать скорость развития дефекта, чтобы неработоспособное состояние не наступило ранее следующего контроля. Поэтому браковочное значение

параметра обычно ниже предельного, устанавливаемого как граница работоспособного состояния объекта.

Диагностирование может быть функциональным (на объект поступают только рабочие воздействия) и тестовым (при подаче специальных воздействий). Соответственно строятся и средства диагностирования: для функционального диагностирования это в основном измерительные устройства; для тестового диагностирования, кроме того, необходим источник тестовых воздействий.

**Системы контроля.** Эксплуатационный контроль оборудования является системой определения его технического состояния. На основании полученных при контроле данных принимается решение о допустимости дальнейшей эксплуатации оборудования или о необходимости и объеме ремонта. Система эксплуатационного контроля должна обеспечить выявление и идентификацию дефектов (собственно диагностирование), а также прогнозирование их развития.

Необходимый объем испытаний определяется исходя из конструкции оборудования и возможных его дефектов. Как правило, основным при этом является опыт эксплуатации. Периодичность контроля определяется скоростью развития дефектов, устанавливаемой рядом повторяемых испытаний или на основании других данных. Основным при принятии решения о дальнейшей эксплуатации объекта являются результаты диагностирования и прогнозирования, ибо при этом выявляются характер дефекта и опасность его развития.

В дальнейшем термином контроль будем определять всю совокупность процедур, необходимых для принятия решения по обеспечению нормальной эксплуатации оборудования.

В наибольшей степени перечисленным требованиям соответствует контроль по прогнозирующему параметру. Предполагается, что имеется наблюдаемый параметр объекта, который прогнозирует его отказ, т. е. между вероятностью наступления отказа в определенном интервале времени после момента контроля и значением параметра имеется стохастическая связь. Достоверность прогнозирования зависит от того, насколько тесна эта связь.

I

Создание системы контроля оборудования, основанной на прогнозе надежности, возможно лишь в случае, если для каждого вида оборудования будут выявлены прогнозирующие параметры, определены их предельно допустимые значения и разработаны методы их измерения в условиях эксплуатации. Пока таких данных еще нет.

I

Первые партии вводов 500 кВ из-за неудачной конструкции и недостатков технологии имели высокую повреждаемость; в основном наблюдались тепловые пробои [1]. Такой характер развития дефекта связан с ростом диэлектрических потерь; диагностический параметр —  $\text{tg}\delta$  изоляции. Можно предположить, что  $\text{tg}\delta$  является прогнозирующим параметром. Корреляционная связь между значением  $\text{tg}\delta$  и остаточным сроком службы ввода оказалась достаточно тесной [2], что определило высокую эффективность контроля. I  
Повреждаемость вводов после отбраковки по результатам испытаний существенно уменьшилась (рис. 1.1). Показатель эффективности контроля, определенный как отношение I средних значений эмпирических плотностей распределения отказов до и после отбраковки,  $\Pi \sim 4$ .

Для вводов 110 кВ использовать в качестве прогнозирующего только параметр  $\text{tg}\delta$  нельзя; корреляционная связь его значения со сроком службы недостаточна, что подтверждается и уменьшением показателя эффективности контроля ( $\Pi \sim 2$ ). В этом случае для диагностирования необходимо использование также и других параметров.

Диагностирование дает данные о состоянии объекта в момент контроля, т. е. дает точечную оценку. Для прогнозирования необходимо знание процесса изменения технических характеристик. Проводя диагностирование достаточно часто или используя данные за длительный период, можно накопить сведения, необходимые для оценки хода и тенденций изменения параметров объекта, и при осторожной их экстраполяции получить информацию для прогнозирования. Это и используется в практике эксплуатационного контроля, так как заключение о техническом состоянии оборудования всегда делается не только по значениям контролируемых параметров, но и с учетом характера их изменения.

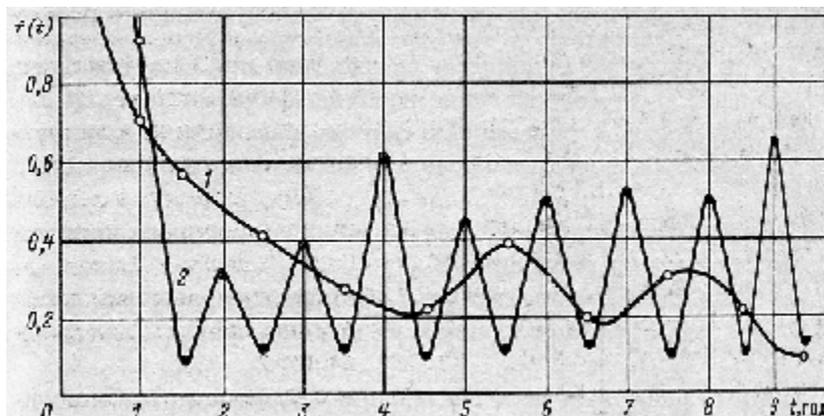


Рис. 1.1. Эмпирическая плотность распределения отказов вводов [2]:  
1 - вводы 110 кВ ( $f \cdot 10^3$ ); 2 - вводы 500 кВ ( $f \cdot 10^2$ )

Достоверность оценки надежности оборудования по результатам диагностирования не всегда достаточна. Для некоторых видов оборудования пределы значений диагностических параметров, характеризующие зону работоспособности, с достаточной достоверностью не установлены. Отказ современного мощного оборудования часто сопряжен с большими экономическими потерями. Поэтому реально реализуемая система эксплуатационного обслуживания оборудования высших классов напряжения ориентирована на поддержание практически неизменного технического состояния, хотя это требует повышенных трудозатрат и не является экономически оптимальным. При этом ТО и ремонты проводятся в заданные сроки независимо от их реальной необходимости.

Соответственно построена система контроля: с жестко регламентированным объемом и периодичностью испытаний и узкими допусками на изменение значений параметров. Кроме того, традиционная система контроля не включает в себя ряд новых методов диагностики, позволяющих обнаружить дефекты, ранее не выявляемые.

Переход к новой стратегии технического обслуживания оборудования — по его состоянию — требует значительного повышения эффективности контроля. На систему диагностики при этом возлагается еще одна задача — определение необходимости отключения объекта. Следовательно, современная система диагностики должна в первую очередь быть системой раннего выявления развивающихся дефектов.

Для создания эффективной системы эксплуатационного контроля электрооборудования необходимо:

- обобщить и проанализировать опыт эксплуатации, выявить дефекты, приводящие к отказам, причины их возникновения и ход развития;

- определить наблюдаемые характеристики (параметры) оборудования, изменение которых связано с возникновением и развитием дефектов;

- выявить связи между значениями параметров и техническим состоянием оборудования; установить предельные значения параметров, характеризующие переход объекта в другой класс технических состояний;

- разработать методы измерения этих параметров в условиях эксплуатации, выявить источники помех, определить реально выявляемые изменения параметров (чувствительность метода измерения);

- исходя из взаимосвязи изменений совокупности наблюдаемых параметров и технического состояния оборудования, определить объем и периодичность испытаний, а также их последовательность (алгоритм контроля);

- установить критерии браковки, учитывающие всю совокупность наблюдаемых изменений технического состояния, оценку их тенденций и условий эксплуатации.

Повреждения по характеру их развития можно разбить на следующие основные группы:

- повреждения, при которых переход из исправного (работоспособного) состояния в

неработоспособное (отказ) происходит очень быстро (мгновенный отказ);

локальные повреждения (дефекты), которые развиваются до отказа в течение нескольких суток или месяцев;

повреждения (дефекты) с длительным периодом развития до нескольких лет, которые можно рассматривать как процесс ускоренного старения.

В первом случае контроль с целью выявления дефектов невозможен. Это область действия защиты сети от развития повреждений. При быстро развивающихся локальных дефектах необходимы автоматизированные системы диагностики, обеспечивающие непрерывный или достаточно частый контроль. В третьем случае достаточен периодический контроль.

**Контроль оборудования без отключения.** Большинство методов контроля оборудования без вывода его из работы, под напряжением развито сравнительно недавно. Не все они широко применяются в системе диагностики, хотя уже ясно, что использование таких методов существенно повышает эффективность контроля и открывает возможность его автоматизации. Кроме того, снижаются трудозатраты на проведение испытаний и улучшаются условия труда персонала.

Контроль оборудования без отключения можно вести, проводя анализы периодически отбираемых проб, а также измеряя характеристики объекта в процессе его функционирования. Развитие получили методы измерений характеристик изоляции оборудования при рабочем напряжении на нем, а также контроль проб изоляционного масла.

Повышение эффективности контроля обеспечивается за счет увеличения частоты испытаний, так как при этом повышается вероятность своевременного обнаружения дефектов, а также появляется возможность выявления зависимостей наблюдаемых параметров от времени, температуры и т. п., которые обладают большей информативностью по сравнению с точечными оценками. Кроме того, используется ряд эксплуатационных факторов, позволяющих повысить чувствительность методов контроля (например, обнаружение увлажнения изоляции путем измерений при повышенной температуре, выявление частичных разрядов при рабочем напряжении и т. п.).

Снижение трудоемкости контроля обеспечивается применением стационарных схем измерений и отсутствием необходимости в подготовке объекта к испытаниям. Улучшение условий труда определяется снижением объема работ, проводимых в зоне высокого напряжения на месте установки оборудования, а также безопасностью стационарных измерительных систем.

Автоматизация измерений и анализов обеспечивает не только снижение объема работ персонала и возможность непрерывного контроля. Принципиальным отличием такой системы контроля является возможность передачи соответствующему устройству значительной части функций собственно диагностики, т. е. функций идентификации дефектов и оценки технического состояния объекта. Такими возможностями обладают диагностические системы на базе ЭВМ. Эти системы могут проводить измерения и математическую обработку полученных данных с целью снижения помех, анализ результатов измерений и сравнение их с нормами. При необходимости автоматическая система диагностики меняет тактику (алгоритм) контроля (периодичность измерений, способ оценки их результатов) и выдает оператору сообщение вместе с протоколом, содержащим данные для принятия решений по эксплуатации данного объекта.

Возможны два способа организации контроля оборудования под напряжением:

ранняя диагностика, т. е. выявление признаков ухудшения технического состояния, вызывающих изменения значений контролируемых параметров;

сигнализация предельных состояний, т. е. выявление, признаю ухудшения технического состояния, являющихся опасными с точки зрения надежности оборудования.

Оба способа взаимно дополняют друг друга, обеспечивая возможность выявления тенденций и скорости изменения диагностических параметров, а также своевременное

получение сигнала об опасности отказа оборудования. Это позволяет лучше планировать ремонты оборудования и при необходимости производить срочное отключение объектов, находящихся в предаварийном состоянии.

## 1.2. ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ

**Ошибки контроля.** Целью контроля в общем случае является оп] деление технического состояния объекта и прогноз его изменения, а также выявление дефектов и определение их характера. В результате должна быть установлена возможность дальнейшей эксплуатации объекта или необходимость его ремонта (восстановления).

Ошибки контроля связаны с достоверностью метода диагностик и ошибками испытаний (измерений).

Применяемые методы диагностики не обеспечивают полной достоверности оценки состояния объекта. Результаты измерений включают в себя ошибки, определяемые погрешностями приборов и влиянием помех. Поэтому всегда существует вероятность получения ложного результата контроля:

исправный объект будет признан негодным (ложный дефект или ошибка первого рода);

неисправный объект будет признан годным (необнаруженный дефект или ошибка второго рода).

Графически формирование результата при таком контроле показано на рис. 1.2, где заштрихованные площади соответствуют вероятностям получения недостоверных результатов (ошибок первого второго рода).

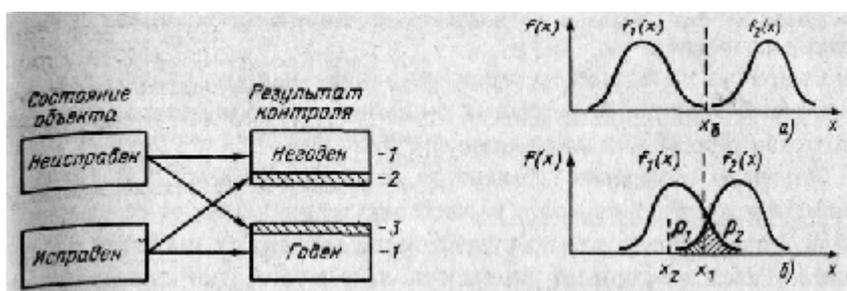


Рис. 1.2. Формирование результата при двухальтернативном контроле:

1 — достоверный результат; 2 — ошибка первого рода (ложный дефект); 3 — ошибка второго рода (необнаруженный дефект)

Рис. 1.3. Возникновение ошибки из-за несовершенства метода контроля

Ошибки контроля приводят к различным последствиям: если ^ошибки первого рода (ложный дефект) только увеличивают объем восстановительных работ, то ошибки второго рода (необнаруженный дефект) влекут за собой аварийное повреждение оборудования.

Достоверность метода диагностики определяется степенью связи технического состояния объекта с отображающими его параметрами. Как правило, эта связь - вероятностная (стохастическая). Кроме того, существует неоднозначность связи значений контролируемых параметров с состоянием объекта при различных видах дефектов. Все это создает ошибки диагностирования, связанные с несовершенством методов контроля.

На рис. 1.3 в качестве примера приведены распределения плотности вероятностей значения некоторого параметра  $x$  для двух совокупностей объектов одного вида: не имеющих дефектов  $f_1(x)$  и с дефектами  $f_2(x)$ . Предполагается, что параметр  $x$  является прогнозирующим, т. е. имеется достаточно выраженная связь между его значением и вероятностью отказа объекта. В идеальном случае (рис. 1.3, а) по значению параметра  $x$  возможна однозначная классификация объектов (годен или негоден), соответствующая их состоянию (исправен или неисправен). Действительные распределения значений параметра  $x$  для обеих совокупностей объектов имеют общую зону (рис. 1.3, б). При этом возникают ошибки из-за несовершенства метода диагностики. Для браковочного значения параметра  $x_0 = x_1$  вероятность того, что дефект не будет обнаружен,

соответствует площади заштрихованного участка  $P_1$ , а вероятность браковки объектов без дефекта — площади участка  $P_2$ . В этом случае вероятности появления ошибок первого и второго рода взаимосвязаны. Уменьшение числа обнаруженных дефектов обеспечивается снижением браковочной нормы до  $x_2$ , но при этом существенно возрастает ложная браковка.

Повысить достоверность диагноза можно, используя для контроля несколько параметров, характеризующих техническое состояние объекта. Каждый из этих параметров дает информацию об определенной характеристике объекта. Их совокупность обеспечивает повышение вероятности выявления дефектов и возможность более точной оценки их опасности.

Следует указать еще на один источник ошибок диагностирования - использование измеренных значений контролируемых параметров без приведения их к нормальным условиям.

Результаты измерений зависят от условий контроля. Так, например, существует зависимость характеристик изоляции от ее температуры. Температура контакта существенно зависит от значения протекающего тока, а результат измерения, кроме того, и от состояния поверхности. Поэтому для целей диагностирования необходимо результаты измерений привести к одинаковым базовым условиям, к сопоставимому виду.

Эти условия обычно указываются при установлении браковочных нормативов, а в методике измерений должны быть предусмотрены способы приведения результатов к сопоставимому виду (температурный пересчет и т. п.).

Погрешность измерения есть следствие ограниченной точности измерительных устройств (средств измерения), а также погрешностей, вызванных влиянием внешних факторов.

Средство измерений (СИ) обычно состоит из ряда измерительных преобразователей и отсчетного устройства. В ходе преобразований информации возникает погрешность измерения: действительному значению измеряемой величины на входе.  $x$  соответствует показание отсчетного устройства на выходе  $y$ .

Погрешность измерения (абсолютное ее значение  $\Delta = y - x$  или относительное  $\delta = \Delta/x$ ) имеет две составляющие – систематическую и случайную. Первая вызывается стабильными причинами и ее можно учесть. Вторая составляющая погрешности вызывается нестабильными факторами и имеет вероятностный характер. В дальнейшем, если это специально не оговаривается, будем учитывать лишь вторую составляющую погрешности, рассматривая ее как случайную величину.

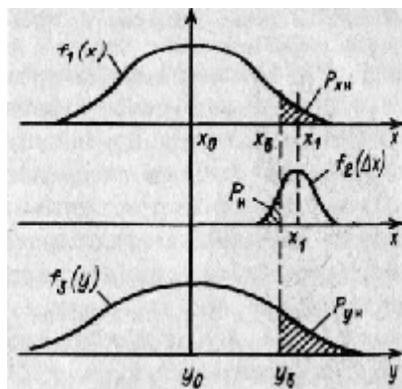


Рис. 1.4. Возникновение ошибки из-за погрешностей измерений:  
 $f_1(x)$  — распределение плотности вероятностей значений измеряемого параметра  $x$ ;  $f_2(\Delta x)$  — распределение плотности вероятностей погрешностей измерения для значения параметра  $x_1$ ;  
 $f_3(y)$  — распределение плотности вероятностей результатов измерений

В качестве примера влияния погрешностей измерения на достоверность контроля рассмотрим рис. 1.4, где приведено распределение  $f(x)$ , включающее в себя параметры всех объектов данного типа (с дефектами и с исправной изоляцией). Контролируется объект со значением параметра  $x_1$ , которое превышает браковочный норматив  $x_\delta$ , т. е. объект неисправен и должен быть отнесен к числу негодных. Измерение производится с погрешностью, имеющей распределение  $f_2(\Delta x)$ . Поэтому вместо значения параметра  $x$  с нормой будет сравниваться результат измерения  $y$ .

Неисправными считаются объекты, параметр которых  $x$  находится в зоне  $P_{хн}$ , а по результатам контроля

негодными будут признаны объекты, значения измеряемого параметра у которых находятся в зоне  $P$ . Дефект не будет обнаружен, если измеренное значение  $y$  будет меньше браковочного  $y_6 = x_6$ . На рис. 1.4 вероятность  $P_n$  этого события соответствует заштрихованной области под кривой  $f_2(\Delta x)$ .

Для уменьшения вероятности того, что дефект не будет обнаружен, необходимо увеличивать точность измерения. Однако в тех случаях, когда определяющими становятся погрешность метода или внешние влияния (помехи), высокая точность измерительных устройств не повышает эффективность контроля и лишь усложняет процесс измерений. Считается достаточным, если среднее квадратическое отклонение результатов измерения из-за погрешности СИ  $s_y$  не будет превышать одной десятой среднего квадратического отклонения  $s_x$  совокупности контролируемых значений параметра.

Ежегодная отбраковка оборудования из-за ухудшения изоляции по определяющему параметру не превышает обычно 1%, т. е. около 99% значений  $x$  оказывается ниже браковочного норматива  $x_6$ . Исходя из этого оценим в первом приближении необходимую точность эксплуатационных измерений.

Для обычно принимаемого в таких случаях нормального закона распределения 99% значений  $x$  соответствуют значению  $x_6 = 2,33 s_x$ , откуда  $s_y = 0,1 s_x = 4,3 \cdot 10^{-2} x_6$ . Следовательно, достаточная точность в рассматриваемых условиях будет достигнута, если среднее квадратическое отклонение результата измерения в области браковочных значений параметра не будет превышать 4% этого значения. Ориентировочно считают, что наибольшее значение основной погрешности измерительного прибора равно удвоенному среднему квадратическому отклонению результатов измерений. При таком допущении относительная погрешность эксплуатационных измерений контролируемых параметров не должна превышать 8%.

Иногда заводы-изготовители требуют, чтобы значение контролируемого параметра, измеренное при монтаже объекта, было близко к результатам заводского контроля. В этом случае необходима высокая точность измерений, не всегда обеспечиваемая в полевых условиях.

Так, например, при измерении малых значений  $\text{tg } \delta$  изоляции мостом P5026 нормированное значение допускаемой погрешности  $\Delta_{\text{нб}} = \Delta \text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ . Обычно для изоляции без дефектов  $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-3}$ . Только за счет погрешности моста возможен результат измерения  $\text{tg } \delta_{\text{из}} = \Delta \text{tg } \delta + \text{tg } \delta_0 = 1,6 \text{tg } \delta_0$ . Поэтому значимым для контроля следует считать лишь результат, превышающий заводские данные более чем на 60%. При более жестких браковочных требованиях будут недопустимо велики ошибки контроля.

Существует еще одна возможность ошибок контроля, вызванных ошибками измерения. При эксплуатационном контроле оборудования важно обнаружить изменение контролируемого параметра. Поэтому существенно, чтобы относительная погрешность измерения не выходила из допустимых пределов. В СИ со стрелочным прибором в качестве отсчетного устройства нормируется приведенная погрешность измерения:  $b_{\text{н. п}} = A / x_n$ , где  $x_n$  - нормирующее значение измеряемой величины, обычно верхний предел шкалы прибора. Относительная погрешность измерения в таких СИ существенно зависит от значения измеряемой величины, ибо  $b / b_{\text{н. п}} = x_n / x$ .

Поэтому даже при достаточно малой нормированной приведенной погрешности СИ надо проверить относительную погрешность; в начале шкалы она будет в десятки раз больше.

**Чувствительность метода измерения.** В эксплуатационной практике точность измерения и определяемая ею чувствительность метода, как правило, ограничивается погрешностями из-за влияния внешних факторов - помех. Возможность влияния таких факторов не всегда даже учитывается при конструировании измерительных устройств

Помехи специфичны для каждого вида измерений и поэтому рассмотрение способов снижения погрешностей возможно лишь в соответствующих главах книги. Здесь изложим только общие вопросы. Различают помехи, вызванные паразитными токами в схеме измерений и токами влияния.

Паразитными называются токи, возникающие под действием напряжения измерительной установки и протекающие через ее измерительный элемент, минуя объект

измерения. Эти токи протекают по так называемым паразитным связям между источником напряжения измерительной установки и элементами измерительного устройств! (средства измерения), а также по паразитным связям в измерительном устройстве и в объекте.

Токами влияния называются токи, возникающие под действие рабочего напряжения электрической установки, в которой находится контролируемый объект, и протекающие через измерительный элемент измерительного устройства. К ним относятся токи промышленной частоты и ее гармоник, протекающие по электрическим и электромагнитным связям между элементами измерительной установкой (включая объект) и оборудованием, находящимся под рабочим напряжением. Кроме того, токи влияния возникают в измерительной установке при наличии разности потенциалов между точками заземления ее элементов.

Известны два направления обеспечения необходимой точности измерений в условиях помех: применение помехоустойчивых измерительных устройств (СИ) и создание схем измерений, обеспечивающих их защиту от влияния помех. Помехоустойчивость СИ определяется их конструкцией. Основные возможности снижения погрешностей - в повышении помехозащищенности схем измерений.

Повышение помехозащищенности заключается в обеспечении на входе СИ наибольшего возможного относительного уровня сигнала информации (увеличение отношения сигнал/помеха). Это достигается соответствующей схемой измерений и экранированием - отведением из измерительных цепей токов помех. Возможна также селекция сигнала, например измерение его на частоте, отличающейся от частоты напряжения помехи (частотная селекция), или в периоды времени, когда помеха минимальна (временная селекция). Однако в этих случаях необходимы соответствующие измерительные устройства.

Другая группа способов основана на исключении погрешности из результатов измерений. Это обеспечивается соответствующей методикой производства измерений и обработки их результатов. В тех случаях, когда имеется возможность накопления достаточного массива информации (например, при автоматизации контроля) снижение погрешности измерения от помех, имеющих случайный характер, производится путем математической обработки результатов измерений. Известно достаточное количество методов статистической обработки данных (усреднение, корреляционный анализ и т. п.), обеспечивающих повышение достоверности измерений.

Чувствительность метода измерения - это наименьшее выявляемое изменение параметра, которое может служить для суждения об изменении характеристик объекта. В простейшем случае задача определения чувствительности сводится к установлению порогового значения параметра  $x_n$ , при котором вероятность ошибок контроля первого рода (ложная браковка) не будет превышать заданного допустимого предела.

Погрешности измерений при эксплуатационном контроле определяются в основном остаточным уровнем внешних помех. Следовательно, для определения порога чувствительности метода измерений необходимо установить закон распределения погрешностей измерения и, используя его, вычислить значение  $x_n$ , соответствующее допускаемой вероятности ошибки первого рода.

Как правило, закон распределения случайных помех близок к нормальному. Если принять, что вероятность ошибки не должна превышать 1 %, значение  $x_n = 2,33 s_n$ , где  $s_n$  — среднее квадратическое отклонение результатов измерений помех. При  $x_n = 3 s_n$  вероятность ложной браковки снижается до 0,135 %

Описанная процедура определения порога чувствительности метода измерений дает лишь грубую оценку, так как реальное распределение результатов измерения помех в области крайних членов распределения обычно отличается от нормального. Однако, как правило, полученная оценка порога чувствительности достаточна для практических целей. При необходимости более осторожного прогноза необходимо рассматривать специально распределение крайних (наибольших) членов выборки.

### 1.3. ДЕФЕКТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

К оборудованию, рассматриваемому в книге, относятся силовые трансформаторы (включая автотрансформаторы и реакторы), коммутационные аппараты (выключатели, разъединители), измерительные трансформаторы тока и напряжения, ограничители перенапряжений.

Перечисленные объекты существенно различаются своими функциями, условиями применения, видом эксплуатационных воздействий и характером типовых дефектов (табл. 1.1). Это определило большое разнообразие применяемых методов и средств диагностики.

Надежность оборудования высокого напряжения в значительной мере определяется работоспособностью изоляции. Основной объем диагностики относится к контролю изоляционных конструкций.

Таблица 1.1 Основные причины повреждений оборудования высокого напряжения

Вид оборудования	Элементы конструкций	Причины повреждений
Трансформаторы, автотрансформаторы, шунтирующие реакторы	Изоляция	Увлажнение, термическое и электрическое разрушение (включая частичные разряды); изменение физико-химических свойств, насыщение газами и загрязнение масла
	Обмотки и магнитопровод	Динамическая неустойчивость при токах короткого замыкания, перегревы, нарушение изоляции элементов (короткозамкнутые контуры)
	Устройства регулирования напряжения	Перегревы, отказы функционирования
Выключатели и разъединители	Контактная система и ее привод	Перегревы, отказы функционирования (разрегулировка)
	Изоляция	Увлажнение, пробой элементов, изменение характеристик масла (для маслонаполненных конструкций), частичные разряды (для КРУЭ)
Вводы и измерительные трансформаторы	Изоляция	Увлажнение, термическое и электрическое разрушение (включая частичные разряды), изменение физико-химических свойств, насыщение газами и загрязнение масла
	Обмотки и магнитопровод	Изменение характеристик, перегревы (в основном из-за витковых замыканий)
Ограничители перенапряжений, разрядники	Шунтирующие и рабочие элементы	Износ, увлажнение
	Искровые промежутки	Изменение разрядных напряжений

Примечание. Внешняя изоляция и механические повреждения элементов конструкции не рассматриваются.

Старение диэлектрика - постепенное его изменение, сопровождающееся ухудшением или полной потерей изоляционных свойств - вызывается рядом процессов, связанных с химическими, тепловыми механическими и электрическими воздействиями. Эти процессы

действуют одновременно и взаимозависимы; каждый из них может вызвать появление другого.

К химическим процессам ухудшения органических изоляционных материалов относятся окисление и другие химические реакции с агрессивными компонентами окружающей среды, которым благоприятствуют наличие влаги и повышенная температура. Под воздействием нагрева, вызванного внешними причинами и диэлектрическими потерями, возникает износ, сопровождаемый распадом вещества, появлением хрупкости материала, снижением его электрической прочности.

К основным явлениям старения, обусловленного причинами электрического характера, относятся физические и химические изменения органических изоляционных материалов, вызванные ионизационными процессами (частичными разрядами).

Механические воздействия, вызывая нарушения целостности материала (разрывы, расслоения), снижают электрическую прочность изоляционной конструкции.

Изоляционное масло, являясь одним из элементов изоляционной конструкции, выполняет еще роль теплоотводящей и защитной среды. При старении масло окисляется, что приводит к образованию органических кислот, растворимых в масле или создающих осадки (шлам). Увлажнение снижает его электрическую прочность. Термические воздействия приводят к крекингу.

Старение масла приводит к снижению надежности всей изоляционной конструкции, так как повышенная кислотность способствует старению твердой изоляции, а осаждение шлама увеличивает диэлектрические потери и ухудшает отвод тепла. Влага из масла, переходя в твердый диэлектрик, усиливает в нем процессы разрушения. Наличие в масле пузырьков газа способствует развитию частичных разрядов.

Конечным результатом воздействия перечисленных факторов на изоляционную конструкцию является изменение структуры диэлектриков, их свойств, появление повреждений (дефектов).

К наиболее часто встречающимся причинам повреждения внутренней изоляции оборудования высокого напряжения относятся увлажнение и частичные разряды [3].

Характер последующего развития дефекта при увлажнении изоляции может быть разным: снижение электрической прочности с последующим пробоем, возникновение частичных разрядов, разрушающих твердую изоляцию, тепловой пробой из-за увеличения диэлектрических потерь, перекрытие вследствие перераспределения напряжений и т. п.

Возникновение частичных разрядов не обязательно связано с увлажнением; достаточно наличие местного увеличения напряженности электрического поля. В условиях эксплуатации одной из причин, вызывающих частичные разряды, является появление в толще изоляции газовых пузырей из-за плохой вакуумировки масла, наличия местных перегревов, вызывающих его разложение, и т. п.

Другая группа причин ухудшения органической изоляции связана с тепловыми воздействиями. Процесс разрушения существенно ускоряется при наличии увлажнения. Перегревы изоляции приводят к резкому снижению ее механической прочности, что создает условия для развития повреждений.

В настоящее время нет эксплуатационно-пригодных прямых методов определения влажности и степени старения твердой изоляции. Как правило, применяются косвенные методы контроля. Для этого используется ряд параметров изоляции, значения которых определяют процессы, происходящие в диэлектриках: поляризация, абсорбция, ионизация, проводимость. Для диагностирования используются также зависимости их от температуры, приложенного напряжения, времени и т. п. Значительное количество дефектов выявляется по изменению физико-химических свойств изоляционного масла и наличию в нем продуктов разложения материалов конструкции. Основные контролируемые явления в изоляции и соответствующие им диагностические параметры приведены в табл. 1.2.

К другой группе нарушений работоспособности оборудования относятся отказы функционирования, а также недопустимые нагревы токоведущих частей.

Отказы функционирования, вызванные механическими дефектами элементов конструкции, характерны для коммутационных аппаратов (выключателей, отделителей, разъединителей и т. п.), а также для устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов.

Таблица 1.2. Контролируемые явления и диагностические параметры изоляционных конструкций

Контролируемое явление	Диагностический параметр
Изменение диэлектрических характеристик	Ток через изоляцию, комплексная проводимость изоляции, диэлектрические потери, емкость
Возникновение частичных разрядов	Импульс напряжения на объекте, ток переходного процесса, импульс давления
Изменение распределения напряжения	Разность потенциалов между элементами, потенциал относительно земли, интенсивность поверхностных разрядов
Изменение физико-химических характеристик изоляционного масла	Электрическая прочность, диэлектрические потери, прозрачность (цвет), содержание механических примесей, температура вспышки, содержание водорастворимых кислот и щелочей, кислотное число, газосодержание, влагосодержание
Образование продуктов разложения изоляции	Горючесть газов в газовом реле (в газовой подушке), состав газов в газовом реле (в газовой подушке), горючесть газов, растворенных в масле, и состав газов, растворенных в масле

Таблица 1.3. Основные методы диагностирования и выявляемые дефекты силовых и измерительных трансформаторов

Метод диагностирования	Выявляемые дефекты
Измерение сопротивления изоляции	Сильное увлажнение, загрязнение
Измерение комплексной проводимости, диэлектрических потерь и емкости изоляции	Увлажнение, местное разрушение разрядами, ухудшение характеристик масла
Измерение абсорбционных характеристик изоляции	Увлажнение
Определение физико-химических характеристик масла	Увлажнение, старение, перегревы, загрязнение, термическое разложение материалов
Анализ газов, растворенных в масле	Термическое и электрическое разрушение элементов конструкции
Измерение частичных разрядов	Местные дефекты (включения), изменение распределения напряжения по конструкции, электрическое разрушение
Измерение сопротивления постоянному току токоведущих частей	Повреждения соединений токоведущих элементов и переключателей устройств регулирования напряжения
Измерение потерь холостого хода	Нарушения изоляции элементов магнитопровода
Измерение напряжения короткого замыкания	Деформации обмоток
Измерение частотных характеристик обмоток	Деформации обмоток

**Таблица 1.4.. Основные методы диагностирования и выявляемые дефекты коммутационных аппаратов**

Метод диагностирования	Выявляемые дефекты
Измерение сопротивления постоянному току	Ослабление контактного давления, повреждение или загрязнение контактных поверхностей, ослабление болтовой затяжки соединений токоведущих частей
	Повреждения активных делителей напряжения дугогасящих устройств
	Повреждения обмоток электромагнитов управления
Измерение тока и напряжения срабатывания механических приводов	Повышенное трение в узлах объекта, разрегулировка
Измерение скоростных характеристик масляных выключателей	Разрегулировка контактной системы и повышенное трение
Определение временных характеристик работы контактной системы воздушных выключателей	Разрегулировка контактной системы, повышенное трение, поломка пружин
Измерение сопротивления изоляции и ее диэлектрических характеристик	Загрязнение, увлажнение, ухудшение свойств изоляционного масла
Измерение температуры токоведущих частей	Перегревы токоведущих частей

Основным способом оценки работоспособности и выявления дефектов коммутационных аппаратов является комплексное опробование, при котором производятся проверки и измерения, характеризующие готовность оборудования к нормальной работе.

При опробовании выключателя производятся измерения времен включения и отключения, а также одновременности замыкания размыкания контактов, проверка работы приводов (напряжение срабатывания электромагнитов, работоспособность при нижнем пределе давления воздуха и т. п.). О правильной регулировке и функционировании узлов судят по осциллограмме выполнения рабочих циклов.

Ненормально высокие нагревы токоведущих частей обычно являются следствием дефектов контактных соединений и обнаруживаются путем контроля их температуры.

Разработано значительное количество методов диагностирования, ориентированных на выявление определенных дефектов (табл. 1.3 и 1.4)<sup>1</sup>. Некоторые методы дополняют или даже дублируют друг друга. Для более полного диагностирования целесообразно использование всех возможных методов. При этом совпадение результатов, полученных разными методами, позволяет более уверенно идентифицировать дефект.

<sup>1</sup> Не рассматриваются методы разрушающих испытаний (например, приложением испытательного напряжения), так как они не соответствуют принципам диагностики

## Глава вторая

# ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 2.1. КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Рассматриваются характеристики изоляционных конструкций, определяемые процессами в диэлектриках - проводимостью и поляризацией [4-6].

Электропроводность технических диэлектриков определяется наличием в них свободных ионов и характеризуется удельным объемным сопротивлением  $\rho_v$ . При приложении к изоляционной конструкции напряжения через нее протекает ток проводимости. Состояние изоляции характеризуется значением этого тока или обратной ему величиной - сопротивлением изоляции. Процесс поляризации возникает в диэлектрике при помещении его в электрическом поле. При этом на поверхности диэлектрика и в его объеме образуются связанные электрические заряды, изменяющие поле внутри вещества.

Одной из важнейших характеристик изоляции является диэлектрическая проницаемость, которая определяется степенью поляризации диэлектрика. Для изоляционной конструкции вместо диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  удобнее рассматривать пропорциональную ей емкость между электродами  $C$ .

При поляризации происходит перемещение электрических зарядов, на это затрачивается энергия поля. Некоторые процессы поляризации сопровождаются рассеиванием части этой энергии в объеме диэлектрика, т. е. диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери и особенно их изменение характеризуют состояние диэлектрика.

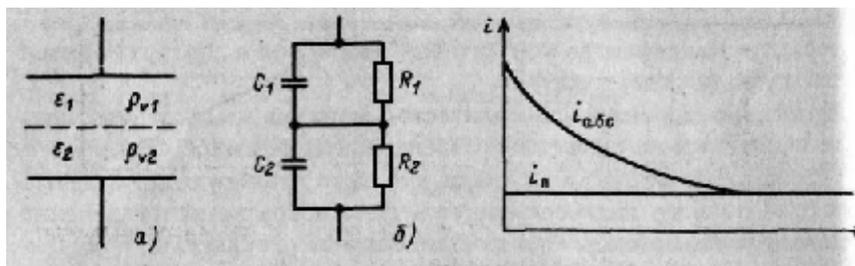


Рис. 2.1. Конденсатор с двухслойной изоляцией:

а — конденсатор; б — схема замещения

Рис. 2.2. Изменение во времени тока через неоднородную изоляцию:

$i_{абс}$  — ток абсорбции;  $i_n$  — ток проводимости

Известны несколько видов поляризации: электронная, ионная, дипольная, междуслойная (миграционная) и ряд других. Виды поляризации различаются по времени, необходимому для ее установления, которое иногда называют временем релаксации диэлектрика. К быстрым видам поляризации относятся электронная, ионная и дипольная, которые завершаются за очень малое время ( $10^{-10} \dots 10^{-15}$  с).

Междуслойная поляризация, относящаяся к медленным видам поляризации, может иметь время релаксации, соизмеримое с периодом промышленной частоты или даже значительно превышающее его. Междуслойная поляризация характерна для изоляционных конструкций высокого напряжения, в которых, как правило, используются диэлектрики с разными характеристиками. При междуслойной поляризации на поверхности раздела слоев разнородных диэлектриков происходит накопление свободных зарядов, называемых зарядами абсорбции. Перемещение этих зарядов создает ток абсорбции.

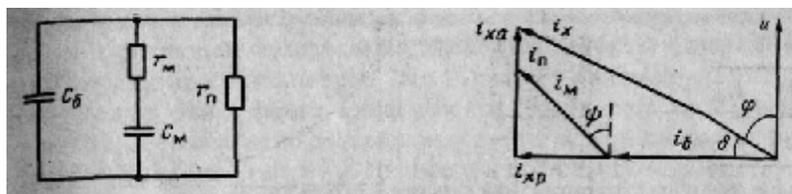


Рис. 2.3. Упрощенная схема замещения конденсатора с диэлектриком, имеющим потери

Рис. 2.4. Векторная диаграмма тока через диэлектрик с потерями

Рассмотрим конденсатор (рис. 2.1) с двухслойной изоляцией: характеристики диэлектрика первого слоя —  $\rho_{01}$  и  $\epsilon_1$ , а второго —  $\rho_{02}$  и  $\epsilon_2$ . Условие неоднородности изоляции  $\epsilon_1 \rho_{01} \neq \epsilon_2 \rho_{02}$  или  $\epsilon_1 \rho_{01} > \epsilon_2 \rho_{02}$  переходя к характеристикам схемы замещения,  $C_1 R_1 \neq C_2 R_2$ . При подключении такого конденсатора к достаточно мощному источнику постоянного напряжения происходит заряд его емкости, причем напряжение по слоям изоляции распределяется в соответствии с их емкостями. Затем происходит перераспределение зарядов, ибо конечное распределение напряжения по слоям определяется их сопротивлениями. При этом на границе раздела слоев накапливается заряд абсорбции.

Переходный процесс сопровождается протеканием тока абсорбции (рис. 2.2). В рассматриваемом случае ток абсорбции изменяется по экспоненциальному закону, постоянная времени его определяется процессом междуслойной поляризации. Реально в изоляции число неоднородных слоев больше двух, и ток абсорбции представляет собой сумму токов с различными амплитудами и постоянными времени.

В момент включения к источнику постоянного напряжения  $U$  на электродах конденсатора появляется заряд  $q_0 = C_0 U$ . Емкость  $C_0$  называется безынерционной (геометрической) и состоит из суммы емкости вакуумного конденсатора, имеющего аналогичные электроды, и емкости, определяемой процессами быстрых видов поляризации, которые устанавливаются практически безынерционно.

По мере развития медленных процессов поляризации заряд на электродах конденсатора будет увеличиваться до значения  $q = q_0 + q_m = (C_0 + C_m) U$ , где  $C_m$  - емкость, определяемая процессами медленной поляризации (абсорбционная емкость).

Упрощенная схема замещения для описанного процесса приведена на рис. 2.3. Постоянная времени  $\tau = r_m C_m$  цепи, моделирующей медленную поляризацию, должна быть равна постоянной времени установления этого процесса. Сопротивление  $r_n$  определяет значение тока проводимости. Строго говоря, каждому виду поляризации должна соответствовать своя цепочка  $r_m$  и  $C_m$ , однако, учитывая, что в реальных конструкциях преобладает один вид медленной поляризации - междуслойная, для качественного рассмотрения можно ограничиться схемой замещения.

Интенсивность и длительность абсорбционных процессов в изоляционной конструкции определяются диэлектрическими характеристиками неоднородных слоев. Дефекты изоляции, изменяющие степень неоднородности изоляции (увлажнение, расслоение), изменяют ход процесса междуслойной поляризации и, следовательно, характеристики тока абсорбции. Поэтому абсорбционные характеристики изоляции могут быть использованы в качестве диагностических. Контролируемые параметры — ток абсорбции и абсорбционная емкость.

Скорость изменения тока абсорбции зависит от соотношения параметров неповрежденной и поврежденной частей изоляции. Измеряя ток абсорбции в заданные моменты времени, можно получить данные, характеризующие определенные виды дефектов.

Один из наиболее часто применяемых диагностических параметров - коэффициент абсорбции, определяемый как отношение результатов измерения сопротивления изоляции, проведенных через 60 и 15 с после начала измерения, т. е.

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{abc\ 15} + i_{\pi}}{i_{abc\ 60} + i_{\pi}} \approx \frac{i_{abc\ 15}}{i_{abc\ 60}}$$

Предложен еще один параметр, основанный на учете изменения тока абсорбции, - коэффициент состояния:

$$K_c = \frac{d i_{abc} / dt}{q_6},$$

где  $q_6$  - заряд геометрической емкости объекта.

Скорость изменения тока абсорбции следует определять через 0,1 с после начала его протекания [7]. Практически скорость изменения тока определяется по результатам двукратного измерения его через небольшой промежуток времени после заколачивания предварительно заряженного объекта. Отнесение скорости изменения тока к заряду упрощает нормирование, исключая влияние емкости объекта  $I$  напряжения измерительной установки.

Емкостные методы измерений основаны на определении зависимости абсорбционной емкости объекта от времени и ряда других факторов (частоты, температуры). Производится интегрирование тока абсорбции в течение заданного промежутка времени. Полученное таким образом значение заряда, пропорциональное соответствующему значению абсорбционной емкости, относится к значению, соответствующему геометрической емкости. Диагностические параметры:  $\Delta C / C_{50}$  и  $(C_2 - C_{50}) / C_{50}$ , где  $\Delta C$  - изменение емкости, вызванное абсорбционными процессами (абсорбционная емкость),  $C_{50}$  - геометрическая емкость (значение, соответствующее измеренному при частоте 50 Гц).

Применяется еще один параметр - дисперсия, определяемый как отношение геометрической емкости  $C_6$  к абсорбционной  $C_M$ :

$$D = C_6 / C_M.$$

При переменном напряжении ток  $i_x$  в цепи эквивалентного конденсатора (см. рис. 2.3) содержит следующие составляющие: практически безынерционный ток смещения  $i_6$ , связанный с протеканием заряда  $q_6$  и состоящий из тока смещения в вакууме и тока смещения, определяемого процессами быстрой поляризации; релаксационный ток смещения  $i_m$ , связанный с протеканием заряда  $q_m$  и определяемый процессами медленной поляризации; ток сквозной проводимости  $i_n$ , определяемый сопротивлением изоляции (рис. 2.4).

В рассматриваемых изоляционных конструкциях высокого напряжения, где преобладают процессы междуслойной поляризации, ток  $i_m$  является абсорбционным током.

Виды медленной поляризации, время установления которых сопоставимо с периодом приложенного напряжения или больше его, не успевают развиться полностью. Это вызывает уменьшение поляризации, находящейся в фазе с вектором напряженности поля внешнего источника, и появление составляющей, отстающей по фазе от напряженности поля на угол  $\pi / 2$ . Первое обстоятельство приводит к снижению емкости, а второе вызывает потери энергии.

Вследствие запаздывания медленной поляризации ток  $i_m$ , связанный с ее изменением, будет опережать напряжение по фазе не на угол  $\pi / 2$ , а только на угол  $\varphi$ . Реактивную составляющую суммарного тока  $i_{xp}$  образуют ток быстрых видов поляризации  $i_6$  и находящаяся с ним в фазе составляющая тока медленной поляризации  $i_m$ . Активную составляющую суммарного тока  $i_{xa}$  образуют ток сквозной проводимости  $i_n$  и находящаяся с ним в фазе составляющая тока  $i_m$ . Из-за наличия активной составляющей тока, вызванной потерями, ток  $i_x$  опережает по фазе приложенное напряжение на угол, меньший чем  $\pi / 2$ .

Диэлектрическими потерями называется суммарная мощность  $P_d$ , рассеиваемая в диэлектрике при приложении к нему переменного напряжения,

$$P_x = U I_x \cos \psi$$

или же с учетом рис. 2.4

$$P_d = U I_{xa} = U I_{xp} \operatorname{tg} \delta,$$

где  $U$  и  $I_x$  - действующие значения напряжения и тока. Угол  $\delta$ , дополняющий угол  $\varphi$  до

$\pi/2$ , называется углом диэлектрических потерь.

Мощность потерь зависит не только от характеристик диэлектрика и частоты приложенного к нему напряжения, но и от объема изоляции. Поэтому для оценки состояния изоляции обычно используется тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_{\text{д}}}{U I_{\text{р}}} = \frac{I_{\text{а}}}{I_{\text{р}}} \quad (2.1)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь почти не зависит от размеров изоляционной конструкции, так как при их изменении пропорционально изменяются активная и реактивная составляющие тока, протекающего через диэлектрик.

В практике значение  $\operatorname{tg} \delta$  выражается иногда в процентах  $\operatorname{tg} \delta_{\%} = 100 \operatorname{tg} \delta$ .

Упрощенную схему замещения конденсатора с потерями можно построить исходя из равенства диэлектрических потерь в реальном конденсаторе и его эквивалентной схеме. Применяются две схемы замещения: параллельная (рис. 2.5, а) и последовательная (рис. 2.5, б).

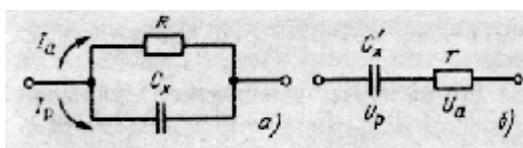


Рис. 2.5. Схемы замещения конденсатора с потерями

Для параллельной схемы

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{а}} &= U/R; \\ I_{\text{р}} &= \omega C_x U; \\ \operatorname{tg} \delta &= I_{\text{а}}/I_{\text{р}} = 1/(\omega C_x R); \\ P_{\text{д}} &= \omega C_x U^2 \operatorname{tg} \delta. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Для последовательной схемы

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{а}} &= I_x r; \\ U_{\text{р}} &= I_x / (\omega C_x'); \\ \operatorname{tg} \delta &= U_{\text{а}}/U_{\text{р}} = \omega C_x' r; \\ P_{\text{д}} &= I_x^2 r = \frac{\omega C_x' U^2 \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Приравняв выражения для  $P_{\text{д}}$  и  $\operatorname{tg} \delta$  в разных схемах замещения получим

$$C_x = \frac{C_x'}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \text{ и } R = r \left( 1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right).$$

Поскольку обычно  $\operatorname{tg}^2 \delta \ll 1$ , то  $C_x = C_x'$ , а  $R \gg r$ .

Ни одна из рассмотренных схем замещения не отражает полностью все процессы, происходящие в диэлектрике; схему выбирают исходя из цепей проводимых расчетов.

Для измерения и расчета диэлектрических характеристик изоляции высокого напряжения лучше использовать параллельную схему замещения, хотя ввиду малости угла  $\delta$  вполне пригодна и последовательная схема.

Для оценки связи диэлектрических потерь изоляции с ее состоянием используем схему замещения рис. 2.3. Для этой схемы емкость  $C_x$  и  $\operatorname{tg} \delta$  на переменном токе с частотой  $\omega$  (влиянием сопротивления проводимости  $r_{\text{п}}$  пренебрегаем):

$$C_x = C_{\text{б}} + \frac{C_{\text{м}}}{1 + \omega^2 \tau_{\text{м}}^2};$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega \tau_{\text{м}} C_{\text{м}}}{C_{\text{б}}(1 + \omega^2 \tau_{\text{м}}^2) + C_{\text{м}}}.$$

Емкость и  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции зависят как от абсорбционной составляющей емкости, и от времени релаксации. При изменении частоты и или постоянной  $\tau_{\text{н}}$  значение  $\operatorname{tg} \delta$  проходит через максимум. Обычно этот максимум имеет место в областях инфранизких частот.

Увеличение степени увлажнения приводит к росту  $C_{\text{м}}$  что вызывает рост  $\operatorname{tg} \delta$ . С ростом температуры значение  $\tau_{\text{м}}$  уменьшается, что вызывает увеличение  $\operatorname{tg} \delta$  (максимум  $\operatorname{tg} \delta$  сдвигается в область промышленной

частоты). Одновременно растут и потери от тока проводимости, не учтенные нами в расчете.

В реальном объекте, где применены различные диэлектрики, одновременно протекают процессы, вызванные всей совокупностью причин. Поэтому указанные выше простые зависимости проявляются совместно, усложняя картину явления. Однако основные закономерности (рост  $\operatorname{tg} \delta$  с повышением температуры или степени увлажнения) остаются. Зависимость потерь от температуры и увлажнения для разных изоляционных конструкций неодинакова.

Величина  $\operatorname{tg} \delta$  дает усредненную объемную характеристику состояния диэлектрика, поскольку активная составляющая тока, вызванная диэлектрическими потерями в местном дефекте, при измерении относится к общему емкостному току объекта. Как правило, измерение  $\operatorname{tg} \delta$  позволяет обнаружить общее (т. е. охватывающее большую часть объема) ухудшение изоляции. Местные дефекты, т. е. дефекты, охватившие сравнительно небольшую часть объема диэлектрика, а также сосредоточенные дефекты плохо обнаруживаются измерением  $\operatorname{tg} \delta$ , причем тем хуже, чем больше объем изоляции объекта.

Изменение емкости изоляции, кроме информации об изменении структуры диэлектрика, вызвавшем изменение процессов поляризации (абсорбции), позволяет обнаружить и местные грубые дефекты (пробой части изоляции). Степень выявляемости дефектов также зависит от соотношения между объемами поврежденной и неповрежденной частей изоляции.

Если зона изоляции, имеющей дефект, включена параллельно остальной части изоляции, то из равенства общих потерь и суммы потерь в рассматриваемых зонах следует

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_{\text{д}} \operatorname{tg} \delta_{\text{д}} + C_{\text{о}} \operatorname{tg} \delta_{\text{о}}}{C_{\text{д}} + C_{\text{о}}} = \frac{C_{\text{д}} \operatorname{tg} \delta_{\text{д}} + C_{\text{п}} \operatorname{tg} \delta_{\text{о}}}{C_{\text{з}}}$$

где  $C_{\text{д}}$  и  $\operatorname{tg} \delta_{\text{д}}$  - характеристики зоны с дефектом;  $C_{\text{о}}$  и  $\operatorname{tg} \delta_{\text{о}}$  - характеристики остальной части изоляции.

Для ориентировки можно принять, что емкость зоны изоляции пропорциональна занимаемому ею объему. Для местного дефекта  $V_{\text{д}} \ll V_{\text{о}} \approx V$ . Поэтому измеренное значение

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{V_{\text{п}}}{V} \operatorname{tg} \delta_{\text{д}} + \operatorname{tg} \delta_{\text{о}} \quad (2.4)$$

Аналогичное соотношение может быть получено и для случая последовательного расположения зон. Из (2.4) следует, что даже значительное увеличение потерь в небольшом объеме изоляции дает малое приращение значения  $\operatorname{tg} \delta$  объекта.

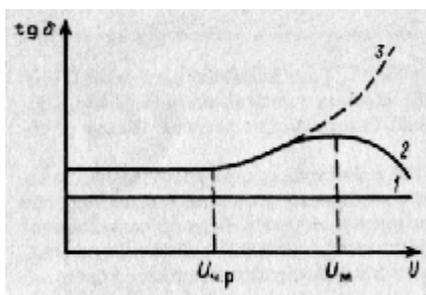


Рис. 2.6. Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от напряжения:  
1 — при отсутствии частичных разрядов;  
2 и 3 — при частичных разрядах в изоляции.

Тангенс угла диэлектрических потерь от напряжения практически не зависит. Однако это справедливо лишь при отсутствии частичных разрядов в изоляции; при наличии разрядов появляется зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от напряжения (рис. 2.6).

Диэлектрические потери зависят от квадрата напряжения:  $P_{\text{д}} = k_1 U^2$ ; потери, связанные с частичными разрядами,  $P_{\text{ч.р.}} = k_2 (U - U_{\text{ч.р.}})$ , следовательно,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k_1 U^2 + k_2 (U - U_{\text{ч.р.}})}{\omega C_{\text{з}} U^2}$$

Полученная зависимость имеет максимум при  $U_{\text{м}} = 2 U_{\text{ч.р.}}$ . В практике встречаются случаи, когда из-за развития дефекта при росте приложенного напряжения интенсивность разрядов увеличивается вплоть до пробоя (кривая 3). Возможно также более резкое

снижение потерь, чем показано на рис. 2.6. Это происходит при затухании процесса разрядов, вызванном увеличением проводимости поверхности включения.

## 2.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**Установка для измерения** характеристик изоляции электрооборудования в общем случае состоит из средства измерения (измерительного устройства), источника измерительного (испытательного) напряжения и шин (проводов), соединяющих их с объектом контроля.

Источник напряжения может быть конструктивно объединен со средством измерения. При высоком напряжении или при большой мощности источника целесообразна раздельная компоновка элементов измерительной установки. В случае контроля оборудования без вывода из эксплуатации измерительным напряжением является рабочее напряжение на объекте. Схемы измерений при рабочем напряжении будут рассмотрены в следующей главе.

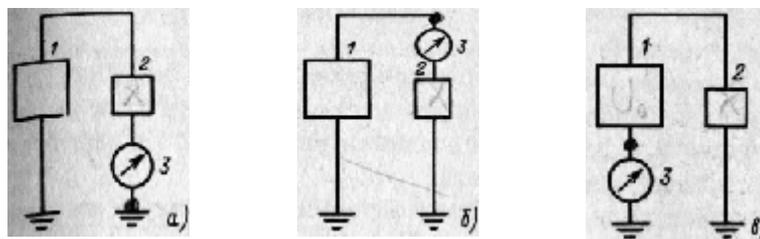


Рис. 2.. Схемы измерительных установок:

а — прямая; б — перевернутая; в — обратная; 1 — источник напряжения; 2 — объект контроля; 3 — средство измерений

По месту средства измерения (СИ) в цепи измерительной установки различают прямую, перевернутую и обратную схемы включения (рис. 2.7).

Прямой схемой включения называется схема, в которой СИ расположено между низкопотенциальным выводом изоляции объекта и заземлением. В этой схеме СИ находится под небольшим потенциалом относительно земли. Прямая схема включения обладает наибольшей помехозащищенностью и применяется во всех случаях, когда имеется возможность доступа к обоим выводам объекта (при контроле оборудования, имеющего специальные измерительные выводы, в лабораторных условиях и т. п.).

Перевернутой называется схема, в которой СИ включено в цепь высокого напряжения между источником и объектом. Эта схема позволяет производить измерения на объектах, у которых один из выводов не может быть отключен от заземления. Недостатком перевернутой схемы является то, что СИ находится под высоким напряжением относительно земли. Это усложняет его конструкцию и затрудняет производство измерений.

Обратная схема отличается тем, что СИ включается в цепь заземления источника напряжения. Обратная схема включения, как и перевернутая, позволяет производить измерения на объектах с одним заземленным выводом. Однако конструкция измерительной установки в этом случае существенно усложняется. Широкого распространения обратная схема не получила.

Характеристики элементов измерительной установки определяются исходя из решаемых ею задач. Применяются источники напряжения постоянного или переменного тока и соответствующие контролируемым параметрам средства измерений.

Рассмотрим схемы измерений, наиболее часто применяемые в практике эксплуатационного контроля изоляции электрооборудования.

## Измерение сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции определяется по значению тока через нее при приложении постоянного напряжения. При напряжениях до нескольких киловольт применяются мегаомметры. При более высоких напряжениях используются источники выпрямленного напряжения и измеряется ток проводимости.

**Мегаомметр** (рис. 2.8) состоит из источника напряжения постоянного тока  $U$ , образцового резистора  $R_0$  и вольтметра  $V$ , измеряющего падение напряжения  $U_0$  на нем от тока  $I_x$  через изоляцию объекта. Объект с сопротивлением изоляции  $R_x$  и емкостью  $C_x$  присоединяется к зажимам "r<sub>x</sub>" и "-" - мегаомметра. Зажим "Э" предназначен для присоединения цепей экранирования (их сопротивление обозначено резистором  $R_{II}$ ). Схемы включения мегаомметра - прямая и перевернутая (соответственно заземляются выводы "Э" или "-" - ).

Для исключения необходимости в измерении напряжения на объекте используется стабилизированный источник напряжения или же мегаомметр калибруется перед применением (путем регулировки напряжения источника или чувствительности вольтметра). Иногда применяются специальные приборы - логометры, показания которых пропорциональны отношению  $U/I_x$ , что исключает необходимость в калибровке.

Измеряется напряжение  $U_0 = R_0 (U - U_0) / R_x \approx R_0 U / R_x = k_{III} / R_x$  (так как  $U_0 \ll U$ ). Шкала прибора градуируется в значениях сопротивления  $R_x$ . Для изменения пределов измерения служит резистор  $R_0$  (множитель шкалы  $k_{III} = R_0 U$ ).

Шкала мегаомметра зависит от характеристик измерительного преобразователя и показывающего прибора, входящих в вольтметр, измеряющий напряжение  $U_0$ . При линейном образовании показание прибора  $\alpha = k'_{III} / R_x$ ; шкала  $R_x$  прибора — гиперболическая. Такая шкала неудобна для отсчета показаний и имеет сравнительно малый диапазон значений измеряемой величины. Более удобна логарифмическая шкала:  $\alpha = \log U_0 = \log k'_{III} - \log R_x$ . В этом случае диапазон значений измеряемой величины может охватывать несколько порядков.

Одним из основных диагностических показателей при контроле электрооборудования по сопротивлению изоляции является его изменение. Поэтому точность контроля определяется относительной погрешностью измерения.

Относительная погрешность измерения при линейном преобразовании  $\Delta R_x / R_x = - \Delta \alpha / \alpha$ , а при логарифмическом преобразовании  $\Delta R_x / R_x = - \Delta \alpha$ . При стрелочном показывающем приборе, у которого относительная погрешность зависит от значения измеряемой величины, точность измерения в начале шкалы прибора очень мала. Следовательно, при линейном преобразовании в случае измерения значений  $R_x$ , близких к предельным на данной шкале, будет получена большая относительная погрешность. При логарифмическом преобразовании относительная погрешность измерения от значения  $R_x$  не зависит.

В ряде конструкций мегаомметров последовательно с образцовым резистором  $R_0$  включают ограничивающий резистор  $R_{ог}$ , защищающий источник напряжения от перегрузки. Это создает высокое выходное сопротивление мегаомметра, что является причиной пониженного по сравнению с номинальным значения напряжения на объекте (рис. 2.9).

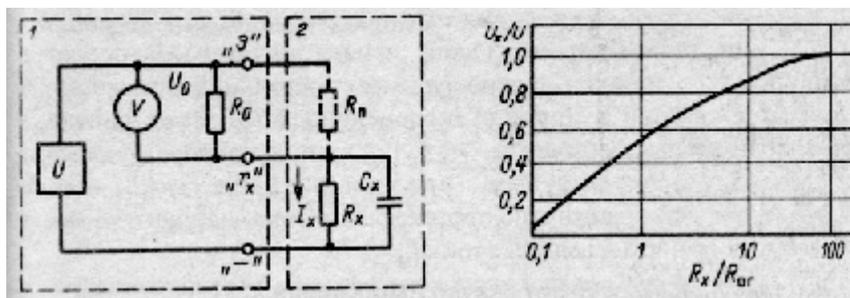


Рис. 2.8. Схема измерения мегаомметром: 1- мегаомметр; 2 — объект контроля

Рис. 2.9. Зависимость напряжения на объекте от его сопротивления

Высокое выходное сопротивление мегаомметра может внести погрешности в результаты измерения коэффициента абсорбции (отношения  $R_{60} / R_{15}$ ). В начале измерения, когда токи абсорбции еще велики, эквивалентное сопротивление объекта мало. При этом напряжение на объекте будет ниже нормированного. С ростом этого сопротивления напряжение на объекте увеличивается, что приводит к дополнительному заряду абсорбционной емкости и последующему изменению сопротивления. Как следствие, результаты измерений мегаомметрами, имеющими разное выходное сопротивление, не совпадут.

Возможности снижения напряжения на объекте следует учитывать также и в случае, когда производится испытание изоляции приложенным напряжением, источником которого является мегаомметр.

Еще одна погрешность измерения сопротивления изоляции, определяемая абсорбционными процессами, может возникнуть из-за остаточного заряда емкости объекта. Поэтому перед повторным измерением сопротивления изоляции необходимо не менее чем на 5 мин соединить выводы объекта, создав путь для стекания абсорбированного заряда.

В мегаомметрах без стабилизации выходного напряжения (например, со встроенным генератором) возможно протекание зарядных токов емкости объекта, искажающих результаты измерений. Эти токи возникают при изменении напряжения.

При мгновенном увеличении напряжения на объекте через резистор  $R_0$  (см. рис. 2.8) будет протекать импульс зарядного тока емкости  $I_{зар} = I_M e^{-t/\tau}$ , где  $I_M = \Delta U / R_0$ ,  $\Delta U$  — амплитуда скачка напряжения, а  $\tau = C_x R_0$  — постоянная времени цепи заряда (влиянием  $R_x$  пренебрегаем). Отсчетное устройство прибора имеет постоянную времени установления показаний  $\tau$  (принят экспоненциальный закон движения стрелки). Поскольку обычно  $\tau_y \gg \tau$ , показания прибора будут пропорциональны заряду импульса. При этом  $I_{ЭК} = I_M \tau / \tau_y$ , где  $I_{ЭК}$  — эквивалентное значение длительно протекающего тока, дающего то же показание прибора, что и импульс тока  $I_M$ .

Погрешность измерения от скачка напряжения:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{I_{ЭК}}{I_x} = \frac{\tau I_M}{\tau_y I_x} = \frac{\tau_x}{\tau_y} \frac{\Delta U}{U},$$

где  $\tau_x = C_x R_x$ .

При контроле объектов с большой емкостью, когда  $\tau_x$  — десятки секунд, а  $\tau_y$  — секунды, погрешность может быть недопустимой.

Не все типы выпускаемых мегаомметров имеют достаточную защиту от токов промышленной частоты, стекающих с объекта (токов влияния). При этом появляется погрешность из-за нелинейности или перегрузки измерительных элементов. Уменьшение указанной погрешности в условиях эксплуатации достигается только путем снижения уровня помех.

### Измерение абсорбционных характеристик

Измерение производится при приложении к изоляции напряжения постоянного тока. Измеряются ток абсорбции или значение заряда абсорбционной емкости.

**Схема измерения** тока абсорбции (рис. 2.10, а) содержит источник постоянного напряжения, коммутатор и измерительный прибор. Заряженная источником емкость объекта коммутатором SA включается на вход прибора, который в заданные моменты времени измеряет падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_0$ . При малом значении этого сопротивления измеряемое напряжение будет пропорционально току абсорбции. Кроме того, в момент начала разряда определяется значение заряда  $q_6$  геометрической емкости объекта.

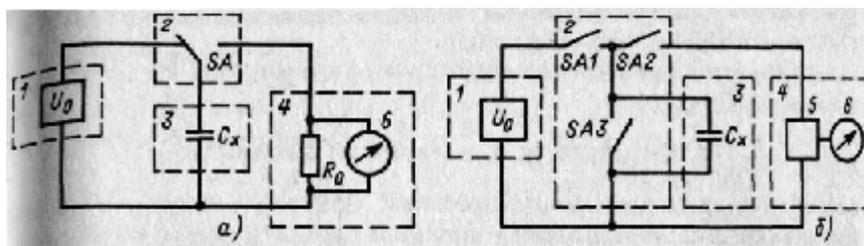


Рис 2.10. Схемы измерения абсорбционных характеристик изоляции:

а — измерение тока абсорбции; б — измерение абсорбционной составляющей емкости; 1 — источник напряжения; 2 — коммутатор; 3 — объект контроля; 4 — измерительный прибор; 5 — интегратор; 6 — показывающий прибор

Для определения коэффициента состояния измеряются значения тока через 0,06 и 0,1 с после переключения коммутатора SA ( $i_{0,06}$  и  $i_{0,1}$ ).

Значение коэффициента состояния рассчитывается по формуле

$$K_c = \frac{\Delta i}{\Delta t q_5} = \frac{i_{0,06} - i_{0,1}}{0,04 q_5}$$

Для определения абсорбционной емкости измеряется соответствующий ей заряд, причем измерение (интегрирование тока абсорбции) производится в течение заданных промежутков времени.

Схема измерений (рис. 2.10, б) содержит источник постоянного напряжения, коммутатор и измерительный прибор. Измерение производится при циклах заряда и разряда емкости объекта. Определяемые параметры - отношение абсорбционной составляющей емкости изоляции к геометрической.

При замкнутом контакте переключателя SA1 производится заряд емкости объекта. После отключения SA1 кратковременным замыканием контакта SA2 объект разряжается на интегратор; показания индикатора при этом будут соответствовать геометрической емкости изоляции. Если после заряда объект кратковременно замкнется контактом SA3, а затем замкнет контакт SA2, то показания индикатора будут соответствовать абсорбционной емкости изоляции.

Приборами, получившими наибольшее распространение, определяются значения  $\Delta C / C_{50}$  и  $(C_2 - C_{50}) / C_{50}$ , где  $\Delta C$  - абсорбционная емкость,  $C_{50}$  - геометрическая емкость (соответствует значению, измеренному при 50 Гц),  $C_2$  - часть абсорбционной емкости (соответствует значению, измеренному при 2 Гц).

Условия измерения: Определяемый параметр	Условия измерения:		
	$C_{50}$	$C_2 - C_{50}$	$\Delta C$
Время интегрирования, мс	10	250	$2 \cdot 10^3$
Предварительный разряд геометрической емкости	Нет	Есть	Есть

Дисперсия определяется путем заряда емкости объекта прямоугольным импульсом напряжения  $U_0$  длительностью  $\tau_1$  и измерения напряжения на нем  $U_B$  через интервал  $\tau_2 \gg \tau_1$  когда введенный заряд  $U_0$  распределится между геометрической  $C_6$  и абсорбционной  $C_M$  составляющими емкости изоляции. Учитывая, что  $q_0 = C_6 U_0 = (C_6 + C_M) U_B$ , получим  $D = C_6 / C_M = U_B / (U_0 - U_B)$ .

Применяются приборы со следующими параметрами:  $U_0 = 30$  В;  $\tau_1 = 3$  мс;  $\tau = 300$  мс.

### Измерение tg $\delta$ и емкости изоляции

Наиболее широкое распространение получила схема с мостом Шеринга. Используются также различные варианты схем с компаратором тока, с ваттметром или векторметром.

**Мостовая схема** (рис. 2.11) состоит из контролируемого объекта параметрами  $C_x$  и tg  $\delta$

(плечо  $Z_1$ ), образцового конденсатора  $C_0$  (плечо  $Z_2$ ) и цепей уравнивания [плечи  $Z_3, Z_4$  и указатель равновесия (УР)]. Измерительным элементом схемы (первичным преобразователем), через который протекает ток объекта, является плечо  $Z_3$  (резистор  $R_3$ ).

Мост может использоваться при прямой, перевернутой и обратной схемах включения. При прямой схеме заземляется точка 2 моста; при перевернутой схеме - точка 1, а при обратной - точка 3. Обратная схема включения иногда называется схемой с заземленной диагональю.

Особенностью рассматриваемой схемы является то, что сопротивление плеч  $Z_1$  и  $Z_2$  во много раз превышает сопротивление плеч  $Z_3$  и  $Z_4$ . Поэтому с достаточной для практических целей точностью можно считать, что токи в плечах  $Z_3$  и  $Z_4$  зависят только от параметров объекта и образцового конденсатора. Рассмотрение процесса уравнивания моста целесообразно провести, предположив, что сопротивление указателя равновесия велико и разность потенциалов между точками 3 и 4 схемы определяется лишь параметрами плеч  $Z_3$  и  $Z_4$  моста.

Ток  $I_0$  образцового конденсатора, не имеющего потерь, опережает приложенное напряжение  $U$  точно на  $90^\circ$  (рис. 2.12). Ток  $I_x$  опережает напряжение на меньший угол. Разность фаз этих токов - угол  $\delta$ , тангенс которого и следует определить. Уравнивание моста заключается в изменении значений параметров плеч  $Z_3$  и  $Z_4$  с целью создания равенства падений напряжения на них. В начале уравнивания  $C_4 = 0$  и напряжение  $U_4'$  на плече  $Z_4$  совпадает по фазе с током  $I_0$  (рис. 2.12, а, точка а). Изменяя значение  $R_3$  и тем самым изменяя по модулю напряжение  $U_3$ , добиваются минимального значения напряжения в диагонали  $U_{Д'} = U_4' - U_3'$  (точка б). Очевидно, что это будет в случае, когда вектор  $U_{Д'}$  станет перпендикулярным вектору  $U_4'$ . На втором этапе уравнивания, изменяя значение  $C_4$ , изменяют фазу напряжения  $U_4$  до получения минимального значения напряжения в диагонали. При этом конец вектора  $U_4$  будет перемещаться по кривой ас. Второй этап уравнивания закончится по совпадении фаз напряжений  $U_4'$  и  $U_3'$ . При этом напряжение на диагонали равно  $U_{Д''}$ . Остается, вновь изменяя  $R_3$ , свести его к нулю (рис. 2.12,5).

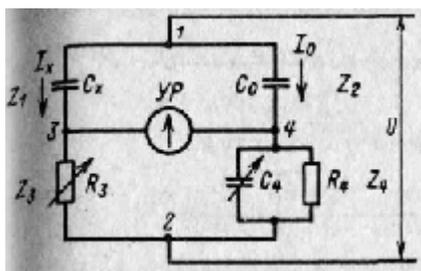


Рис. 2.11. Схема моста Шеринга

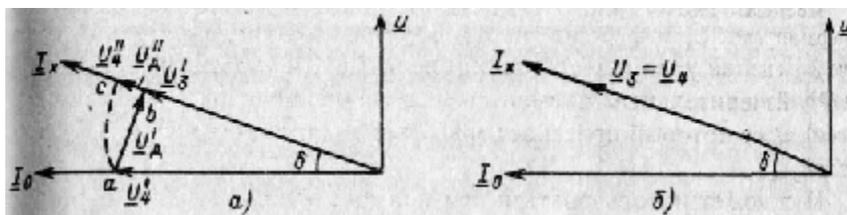


Рис. 2.12. Векторные диаграммы токов и напряжений в мостовой схеме: а - процесс уравнивания моста; б - токи и напряжения уравновешенного моста

Обычно сопротивление указателя равновесия невелико и ток, проходящий в диагонали, несколько изменяет потенциалы точек 3 и 4 моста. Кроме того, начальные циклы уравнивания проводятся при малой чувствительности указателя. Поэтому полное уравнивание моста потребует еще нескольких циклов, последовательно приближающих мост к равновесию.

При равновесии моста выполняется условие  $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ . В рассматриваемой схеме определяются параметры последовательной схемы замещения объекта, поэтому

$$Z_1 = r + \frac{1}{j\omega C_x}, \quad \text{а } \text{tg } \delta = \omega r C_x$$

Параметры остальных плеч моста:

$$Z_2 = \frac{i}{j\omega C_0}; \quad Z_3 = R_3; \quad Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

Подставив полученные данные в уравнение равновесия моста и выделив действительную и мнимую части, получим

$$\text{tg } \delta = \omega C_4 R_4; \tag{2.5}$$

$$C_x = C_0 R_0 / R_3. \tag{2.6}$$

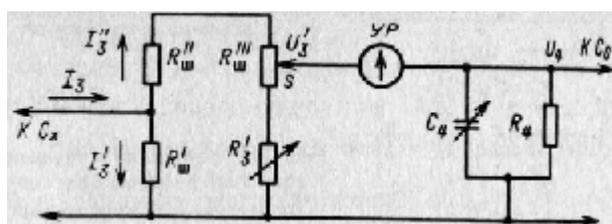


Рис. 2.13. Схема включения шунта плеча  $Z_3$  моста

Для упрощения расчетов сопротивление  $R_4$  выбирается равным  $10^n / \pi$ , где  $n$  — целое число. Тогда при промышленной частоте  $\omega = 2\pi f = 100\pi$  и  $\text{tg } \delta = 10^{n+2} C_4$ . Если значение  $C_4$  выразить в микрофарадах, то значение измеренного  $\text{tg } \delta$  определится следующими соотношениями:

$R_4$ , Ом	$100/\pi$	$1000/\pi$	$10\,000/\pi$
$\text{tg } \delta$	$0,01 C_4$	$0,1 C_4$	$C_4$
$\text{tg } \delta$ , %	$C_4$	$10 C_4$	$100 C_4$

Для расширения пределов измерения емкости в плечо  $Z_3$  мост вводится шунт (рис. 2.13). Часть шунта  $R'_ш$  включается в цепь тока объекта. Остальная часть шунта вместе с резистором  $R'_3$  создает делитель напряжения, обеспечивающий уравнивание схемы (изменение напряжения  $U'_3$ ). Плавное уравнивание обеспечивается реохордом  $R''_ш$ , часть которого  $s$  включается в плечо  $R_3$ .

Из равенства напряжений плеч  $U'_3$  и  $U'_4$ , следует

$$\left. \begin{aligned} C_x &= C_0 \frac{R_4}{R'_ш} \left( \frac{R_ш - s}{R_3} + 1 \right); \\ \text{tg } \delta &= \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_0 \left( \frac{R_ш - s - R'_ш}{R_3} \right), \end{aligned} \right\} \tag{2.7}$$

где  $R_ш = R'_ш + R''_ш + R'''_ш - s$ , а  $R_3 = R'_3 + s$ .

Поскольку  $C_4 \gg C_0$  и, как правило,  $R_3 > R_ш$ , с достаточной для практики точностью можно и при наличии шунта рассчитывать  $\text{tg } \delta$  по формуле (2.5).

Сопротивление шунта  $R'_ш$  выбирают так, чтобы уравнивание моста производилось не менее чем тремя декадами магазина сопротивлений  $R_3$ .

При наличии помех (тока влияний) возможны случаи, когда ток  $I_0$  отстает по фазе от тока, протекающего по плечу  $Z_3$  моста и являющегося суммой тока  $I_x$  и тока влияния. В этих случаях для измерения так называемого отрицательного  $\text{tg } \delta$  конденсатор  $C_4$  приходится включать параллельно резистору  $R_3$ . При этом

$$\text{tg } \delta_{(-)} = - \text{tg } \delta = - \omega C_4 R_3. \tag{2.8}$$

Если шкала магазина  $C_4$  моста отградуирована в значениях тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta_{шк}$ , то

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \operatorname{tg} \delta_{\text{нр}} \frac{R_3}{R_4} = - \operatorname{tg} \delta_{\text{нр}} \frac{C_0}{C_x}$$

При включенном шунте плеча  $Z_3$  моста

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \omega C_4 R_3 \frac{R_{\text{ш}} - s}{R_3 + R_{\text{ш}} - s} \approx - \omega C_4 R_3 \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_3} \quad (2.9)$$

Чувствительность мостовой схемы определяет наименьшие выявляемые значения изменений измеряемых параметров. Из (2.5) и (2.6) следует

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \omega R_4 \Delta C_4; \quad \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\Delta C_4}{C_4} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

Приведенные соотношения указывают на достаточно простой способ определения чувствительности моста при измерениях. Для этого после уравнивания схемы следует изменить по очереди значения  $C_4$  и  $R_3$  до появления отчетливых показаний указателя равновесия. Полученные значения  $\Delta C_4$  и  $\Delta R_3$  определяют реальную чувствительность.

При избыточной чувствительности указателя равновесия, усложняющей уравнивание схемы, можно, определив указанным способом, что точность измерения достаточна, не добиваться равновесия моста при наибольшей чувствительности указателя.

При рассмотрении процесса уравнивания принималось, что в момент равновесия схемы напряжение  $U_{\text{д}}$  в диагонали моста равно нулю. Реальные указатели равновесия имеют ограниченную чувствительность, т. е. всегда есть такие напряжение  $\Delta U_{\text{д}}$  или ток  $\Delta I_{\text{д}}$ , которые не могут быть обнаружены прибором (напряжение или ток нечувствительности указателя равновесия).

В случае небаланса по фазе (рис. 2.14, а)

$$\Delta \operatorname{tg} \delta \approx \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U_4} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_1 R_4} \quad (2.10)$$

При небалансе по напряжению (рис. 2.14, б)

$$\Delta R_3 = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{I_3} \approx \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_x}$$

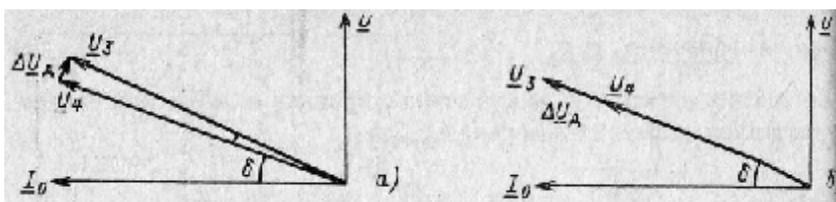


Рис. 2.14. К расчету погрешностей из-за нечувствительности указателя равновесия: а — мост не уравновешен по фазе; б — мост не уравновешен по напряжению

Погрешность в определении  $R_3$  вызовет погрешность расчета  $C_x$ . Поскольку  $\Delta C_x / C_x = \Delta R_3 / R_3$ , то

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_x R_3} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_0 R_4} \quad (2.11)$$

Из сравнения (2.10) и (2.11) следует, что  $\Delta \operatorname{tg} \delta = \Delta C_x / C_x$ , т. е. абсолютная погрешность определения  $\operatorname{tg} \delta$  равна относительной погрешности определения  $C_x$ .

Обычно указатели равновесия имеют низкое входное сопротивление и нормируется ток нечувствительности  $\Delta I_{\text{д}}$ . Напряжение небаланса

$$\Delta U_{\text{д}} = \Delta I_{\text{д}} (Z_3 + Z_4 + Z_{\text{н}}) \approx \Delta I_{\text{д}} (R_3 + R_4 + R_{\text{н}}),$$

где  $R_{\text{н}}$  — сопротивление указателя равновесия.

С учетом этого формула для определения погрешности измерения примет вид

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta I_{\text{д}}}{U} \frac{R_3 + R_4 + R_{\text{н}}}{\omega C_0 R_4}$$

Для того чтобы чувствительность моста мало менялась при изменении  $R_4$ , необходимо иметь  $R_{\text{н}} \ll R_4$ .

Обычно так и бывает. Это обеспечивает возможность изменения шкал  $\operatorname{tg} \delta$  моста путем изменения значения  $R_4$ .

**Схемы с компаратором тока** - трансформатором с тесной индуктивной связью между обмотками - обеспечивают высокую точность сравнения токов объекта и образцового конденсатора и имеют повышенную чувствительность и помехоустойчивость.

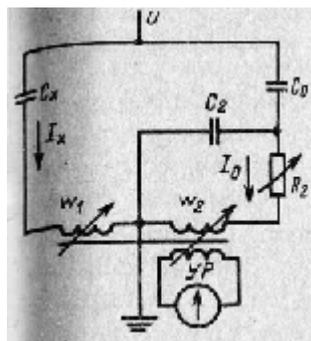


Рис. 2.15. Схема моста с компаратором тока

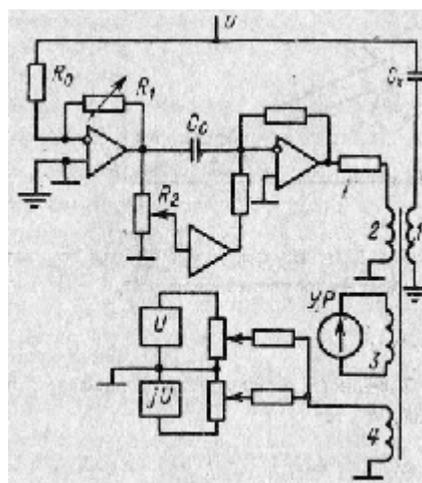


Рис. 2.16. Схема моста с операционными усилителями в ветви сравнения

Мост с компаратором тока (рис. 2.15) уравнивается путем изменения числа витков в обмотках [8]. При балансе схемы поток в магнитопроводе трансформатора равен нулю и показания указателя равновесия отсутствуют. При этом  $w_1 I_x = w_2 I_0$ , откуда

$$C_x = \frac{w_2}{w_1} C_0 \text{ и } \operatorname{tg} \delta = \omega C_0 R_2.$$

С целью упрощения конструкции компаратора цепи уравнивания могут быть выполнены с использованием операционных усилителей (рис. 2.16).

Ток  $I_x$  через обмотку 1 компаратора компенсируется током образцового конденсатора  $I_0$ , протекающим по обмотке 2. Баланс схемы фиксируется указателем равновесия по отсутствию напряжения в обмотке 3. Уравнивание токов производится активным делителем  $R_1$  (уравнивание по модулю) и резистором  $R_2$  (баланс по фазе). Применен образцовый конденсатор  $C_0$  на низкое напряжение, а в цепи высокого напряжения включен резистор  $R_0$ . Предусмотрена возможность компенсации помех током в обмотке 4, полученным от двух источников напряжения  $U$  и  $jU$ .

**Ваттметровая схема измерений** (рис. 2.17) состоит из ваттметра, амперметра и вольтметра. Значения измеренных параметров определяются по показаниям этих приборов по формулам

$$\operatorname{tg} \delta \approx \cos \varphi = \frac{P}{U_0 I_x} \text{ и } C_x = \frac{I_x}{\omega U},$$

где  $P$  - показания ваттметра;  $I_x$  - ток через объект измерения;  $U_0$  - напряжение, приведенное к ваттметру.

В диапазоне углов  $\delta$  до  $15^\circ$  ( $\operatorname{tg} \delta < 0,25$ ) значения  $\cos \varphi$  и  $\operatorname{tg} \delta$  совпадают с достаточной точностью. При больших углах значение  $\operatorname{tg} \delta$  определяется по данным измерения  $\cos \varphi$  с помощью тригонометрических таблиц.

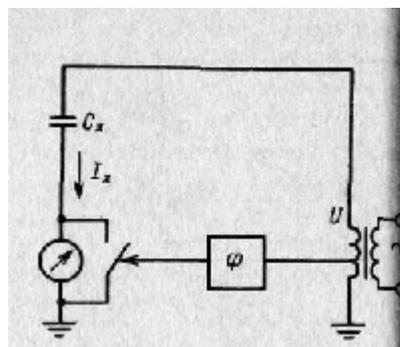
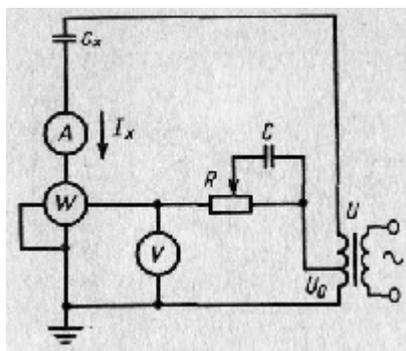


Рис. 2.17. Схема ваттметровой установки  
Рис. 2.18. Структурная схема векторметра

Применяются специальные ваттметры, предназначенные для измерений в цепях с небольшим  $\cos \varphi$  (так называемые малокосинусные ваттметры).

При построении схемы ваттметровой установки особое внимание следует уделять цепям питания обмотки напряжения ваттметра так как они могут быть источником существенных погрешностей измерения.

Схема ваттметровой установки (см. рис. 2.17), в которой цепи напряжения питаются от специальной измерительной отпайки испытательного трансформатора, обеспечивает наибольшую точность измерений, так как при измерении автоматически поддерживается постоянство отношения напряжения на вольтметре и ваттметре к испытательному напряжению и, кроме того, фазы этих напряжений мало отличаются друг от друга. В качестве источника напряжения  $U_0$  для ваттметра может быть использован также трансформатор напряжения, первичная обмотка которого подключена к объекту.

Погрешность коэффициента трансформации этого трансформатора влечет за собой ошибку в измерении емкости объекта. Фазовая погрешность, получающаяся в результате сдвига фаз между напряжением, подаваемым на объект, и током, протекающим через обмотку напряжения ваттметра, вызывает погрешность в измерении угла потерь. Для устранения фазовых погрешностей ваттметровая установка может быть снабжена компенсирующим устройством, устраняющим сдвиг фаз. Компенсирующее устройство выполняется, например, в виде конденсатора, шунтирующего часть или все добавочное сопротивление обмотки напряжения ваттметра. Компенсацию фазового сдвига можно произвести при контроле образцового конденсатора. Компенсирующая емкость (или шунтируемая часть добавочного сопротивления ваттметра) при этом подбирается с таким расчетом, чтобы отклонение ваттметра было равно нулю.

**Векторметр** является устройством, измеряющим составляющую вектора тока, находящуюся в фазе с управляющим напряжением. прибор работает по принципу синхронного выпрямления: измеряемый ток выпрямляется при помощи специальной ключевой схемы, управляемой напряжением той же частоты (рис. 2.18).

Если синхронный выпрямитель будет управляться напряжением, находящимся в фазе с напряжением на объекте, то показания прибора, измеряющего среднее значение тока, будут пропорциональны активной составляющей тока через объект:  $I_p = k I_x \cos \varphi$ . При сдвиге фазы управляющего напряжения на  $90^\circ$  относительно напряжения на объекте показания прибора будут соответствовать реактивной составляющей:  $I_p = k I_x \cos 90^\circ - \varphi = k I_x \sin \varphi$ . Отношение этих величин и есть подлежащий измерению тангенс угла диэлектрических потерь изоляции:  $I_a / I_p = \operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{tg} \delta$ .

При измерении реактивной составляющей тока показания прибора будут пропорциональны емкости объекта.

### 2.3. ПАРАЗИТНЫЕ ТОКИ И ИХ ИСКЛЮЧЕНИЕ

**Паразитные токи в схеме измерений.** Источником паразитных токов является напряжение измерительной установки. Они протекают от вывода источника напряжения и соединенных с ним проводов на заземленные или имеющие низкий потенциал элементы схемы.

Характерные пути протекания паразитных токов в схеме измерений и соответствующие им проводимости паразитных связей приведены на рис. 2.19. В установках постоянного тока пути протекания паразитных токов определяются сопротивлениями конструктивных элементов и наличием короны. В установках переменного тока паразитные токи имеют, как правило, емкостный характер; активная составляющая их вызвана проводимостью и диэлектрическими потерями по пути протекания.

От шин (проводов), соединенных с выводом источника напряжения, текут токи  $I_{п1}$ ,  $I_{п2}$  (на землю) и  $I_{п3}$  (на низкопотенциальный вывод объекта). Внутри источника напряжения имеется несколько путей протекания паразитных токов от измерительного напряжения и напряжения сети питания; они определяют суммарный ток  $I_{п4}$ .

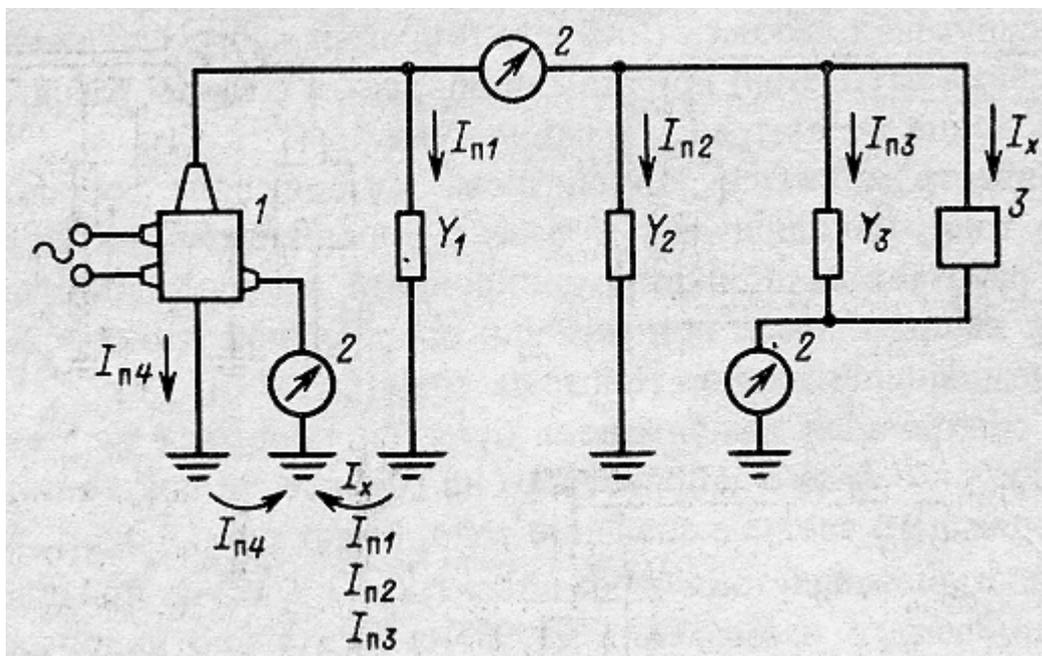


Рис. 2.19. Паразитные токи в схеме измерений:  
1 — источник напряжения; 2 — средство измерений; 3 — объект контроля

Устранение погрешностей измерения, связанных с паразитными токами, производится экранированием элементов схем измерения или введением расчетных поправок в полученные результаты. Экранирование является основным методом исключения паразитных токов. Введение поправок допустимо лишь в случае, если полное экранирование схемы произвести невозможно.

В зависимости от схемы включения в СИ протекают разные составляющие суммарного паразитного тока. В соответствии с этим используются разные способы экранирования.

В прямой схеме включения СИ через его измерительный элемент протекает ток  $I_{п3}$ , обусловленный проводимостью между проводом, подключенным к источнику напряжения, и проводом от низкопотенциального вывода объекта к СИ. Остальные паразитные токи замыкаются помимо СИ и погрешности в результаты измерений не внося. Исключить ток  $I_{п3}$  можно, заключив в заземленный экран Э измерительный элемент СИ, низкопотенциальный вывод объекта и соединяющий их провод (рис. 2.20, а).

В перевернутой схеме включения СИ через его измерительный элемент протекают токи

$I_{п2}$  и  $I_{п3}$ . Остальные паразитные токи замыкают $\leq$  помимо СИ. Ток  $I_{п2}$  проходит через СИ лишь той его частью, которая обусловлена проводимостью на землю измерительного элемента участка провода между ним и объектом (включая и вывод объекта). Исключить ток  $I_{п2}$  можно, заключив указанные элементы в экран, присоединенный к соответствующему выводу источника напряжения (рис. 2.20, б). При этом исключается и ток  $I_{п3}$ .

В обратной схеме включения СИ через его измерительный элемент протекают все указанные паразитные токи.

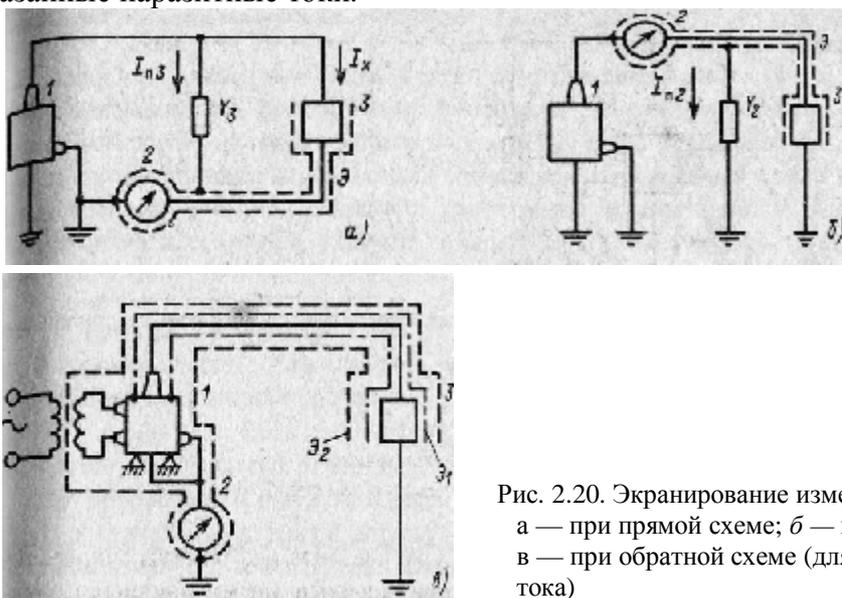


Рис. 2.20. Экранирование измерительных устройств:  
 а — при прямой схеме; б — при перевернутой схеме;  
 в — при обратной схеме (для устройств переменного тока)

Полное экранирование в обратной схеме (рис. 2.20, в) обеспечивается двумя экранами. Экран  $\mathcal{E}_2$  охватывает провод, идущий от источника измерительного напряжения, и сам источник. В качестве экрана источника напряжения обычно используется его кожух. Изоляция экрана  $\mathcal{E}_1$  от провода должна выдерживать полное напряжение источника. Кроме того, в установках переменного тока необходимо обеспечивать экранирование по цепям питания. Для этого источник измерительного напряжения должен иметь специальную конструкцию или, как на рис. 2.20 в, разделительный экранированный трансформатор. Наружный экран  $\mathcal{E}_2$  заземляется.

В измерительных устройствах обычно имеются внутренние экраны, обеспечивающие защиту от паразитных токов. К зажимам этих экранов следует присоединять и наружные экраны схемы измерений. Кроме решения основной задачи - отделения паразитных токов - экранирование обеспечивает также снижение уровня токов влияния, протекающих через измерительный элемент СИ.

В правильно сконструированной измерительной установке погрешности от паразитных токов обычно ниже допустимых. В тех случаях, когда полное экранирование осуществить сложно (например, при обратной схеме включения), погрешность можно исключить расчетным путем. Для этого измерения проводят дважды: сначала измеряют сумму тока объекта и паразитных токов; затем только паразитные ток (объект отключен).

Расчетное исключение погрешности возможно только при аддитивной помехе, т. е. когда измерение суммы токов производится в области линейности СИ. В измерительных установках постоянного тон результат измерения вычисляется как разность данных, полученных при первом и втором измерениях. В установках переменного тока необходимо учитывать не только модули, но и фазы измеряемых токов.

Для случая измерения диэлектрических потерь и емкости изоляции действительные значения

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C'_x \operatorname{tg} \delta' - C_n \operatorname{tg} \delta_n}{C'_x - C_n};$$

$$C_x = C'_x - C_n;$$

где  $C'_x$  и  $\operatorname{tg} \delta$  — результаты измерений объекта при наличии помех;  $C_n$  и  $\operatorname{tg} \delta_n$  — результаты измерений только помех.

При больших паразитных токах расчетное исключение погрешности будет очень не точным, так как действительное значение параметра будет определено как разность двух больших значений, погрешность измерения которых сопоставима с определяемым значением параметра. Так, при измерении  $\operatorname{tg} \delta$  введением расчетной поправки можно пользоваться при условии, что  $C_n \operatorname{tg} \delta_n < 0,15 C'_x \operatorname{tg} \delta'$ , а  $C_n \leq 0,3 C'_x$ .

До сих пор рассматривались паразитные токи, причиной появления которых является электрическое поле. В установках переменного тока паразитные токи могут возникать и при воздействии электр магнитных полей. Токи, индуцированные в измерительных цепях, складываются с измеряемыми и являются источниками погрешностей.

Обычно при конструировании СИ площадь контуров, в которых могут индуцироваться паразитные токи, делают минимальной и при необходимости ставят электромагнитные экраны. Поэтому в условиях эксплуатации возможны лишь остаточные погрешности из-за не удачного взаимного расположения СИ и элементов установки, имеющих большие внешние электромагнитные поля (регуляторы, трансформаторы).

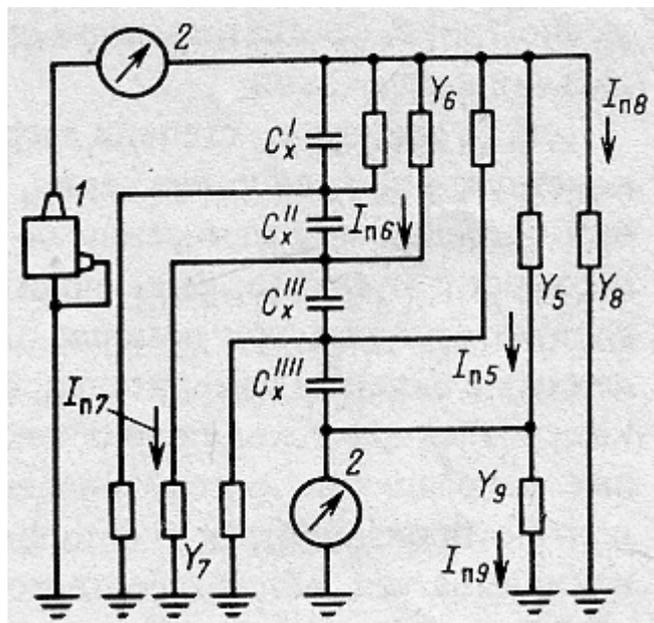
Наиболее подвержены электромагнитным влияниям высокочувствительные узлы СИ, имеющие в своем составе трансформаторы, дроссели и т. п.

Влияние электромагнитных наводок целесообразно исключать изменением взаимного расположения элементов установки (путем удаления СИ от влияющих аппаратов). Остаточная погрешность исключается расчетом по результатам двух измерений, проведенных с изменением направления тока в узле, подверженном влиянию. Так, например, в мостах переменного тока наиболее подвержен электромагнитным влияниям указатель равновесия. Проведя два измерения, причем второе с переменной полярности его включения в диагональ моста, можно исключить погрешность, приняв за результат измерения полусумму полученных данных.

Рис. 2.21. Схема замещения и паразитные связи объекта контроля

**Паразитные связи объекта измерений.** Погрешности измерений могут быть также следствием паразитных связей объекта измерений с окружающими его предметами. Кроме того, погрешности измерений могут появиться из-за ряда конструктивных особенностей объекта (наличие обмоток, шунтирования измерительных элементов и т. п.).

На схеме замещения (рис. 2.21) емкость  $C_x$  объекта представлена в виде цепочки из нескольких последовательно соединенных конденсаторов. Такое представление ближе к реальному объекту, так как в большинстве случаев изоляция оборудования высокого напряжения выполняется в виде ряда последовательно включенных секций (аппаратная изоляция



конденсаторного типа и т. п.). Пути паразитных токов показаны включением соответствующих проводимостей.

Паразитный ток  $I_{п5}$  вызывается в основном утечками по поверхности контролируемого объекта между его электродами, а также током короны на проводах схемы измерений. Токи  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  протекают по частичным емкостям изоляционной конструкции объекта относительно деталей, находящихся под напряжением измерительной установки, или заземленным. Паразитный ток  $I_{п8}$  обусловлен емкостью и проводимостью деталей объекта, связанных с источником напряжения. В ряде случаев ток  $I_{п8}$  может протекать по частям изоляции объекта, включенным параллельно области, параметры которой надо измерить. Ток  $I_{п9}$  протекает по емкостям и проводимостям, шунтирующим измерительный элемент СИ.

Токи  $I_{п5}$ ,  $I_{п9}$  и частично  $I_{п8}$  создают погрешности при измерениях «а постоянном и переменном токе; токи  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  - только при переменном токе. Соответственно в дальнейшем будут рассмотрены и методы их исключения.

Ток  $I_{п5}$  зависит от степени загрязнения поверхности изоляционной конструкции, от ее увлажнения. Поэтому основным способом снижения погрешностей измерения по этой причине является очистка поверхности. В случае, если очистка не помогла, то паразитные токи следует отводить при помощи охранных электродов (колец), соединенных с экраном измерительной схемы. Охранные кольца могут исказить электрическое поле объекта, вызвав тем самым дополнительные погрешности, рассматриваемые ниже. Поэтому экранирование должно производиться с осторожностью. Охранные кольца должны накладываться вблизи соответствующих электродов объекта так, чтобы осуществить полное прилегание кольца ко всей поверхности изолятора.

Погрешности измерения, вносимые токами  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  также нередко связаны с состоянием поверхности объекта. Пути для этих токов могут быть образованы, например, емкостью между обкладками ввода с конденсаторной изоляцией и проводящими загрязнениями на поверхности фарфоровой крышки или неправильно установленными охранными электродами. Паразитные токи  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  замыкаются и через отложения на внутренней поверхности фарфоровой крышки объекта, которые вызваны старением и разложением масла. Существенные погрешности измерения могут быть обусловлены близким расположением к объекту посторонних предметов (например, при попытках контроля ввода в транспортной таре, из-за забытой лестницы, при помощи которой собирали схему измерений, и т. п.). Изменение измеренных значений параметров объекта на месте его установки по сравнению с результатами контроля до монтажа нередко вызвано изменением путей протекания рассматриваемых токов.

Паразитный ток  $I_{п6}$ , так же как и ток  $I_{п5}$ , увеличивает по сравнению с действительным измеренное значение  $\operatorname{tg} \delta$ . При измерении при прямой схеме включения СИ наличие тока  $I_{п7}$  приводит к снижению измеренного значения  $\operatorname{tg} \delta$ . Поэтому существует реальная опасность, что ухудшение состояния изоляции может быть замаскировано паразитными связями объекта.

На рис. 2.22 приведены расчетная схема и векторная диаграмма для этого случая. Эквивалентная паразитная емкость  $C_{п}$  включена между двумя емкостями  $C'$  и  $C''$ , составляющими емкость объекта. Для упрощения пренебрегаем диэлектрическими потерями в изоляции объекта.

На векторной диаграмме  $I''$  - измеряемый ток через объект. Напряжение  $U''$  - падение напряжения от тока  $I''$  на емкости  $C''$  — отстает по фазе от тока на  $90^\circ$  (емкость  $C''$  без потерь). Паразитный ток  $I_{п}$ , вызванный этим же напряжением, имеет активную составляющую и, следовательно, опережает напряжение на угол  $90^\circ - \delta_{п}$ , где  $\delta_{п} = \operatorname{arctg} \omega C_{п} R_{п}$ .

Суммарный ток  $I = I' + I_{п}$ , протекая по емкости  $C'$ , вызовет падение напряжения  $U'$ , сдвинутое относительно тока на  $90^\circ$  (емкость  $C'$  без потерь). Сумма напряжений  $U'$  и  $U''$  и есть испытательное напряжение  $U$ , относительно которого будет измерена фаза тока  $I''$ . На векторной диаграмме видно, что этот ток опережает напряжение  $U$  на угол  $90^\circ + \delta'$ , т. е. будет измерено отрицательное значение угла диэлектрических потерь. Напомним, что при построении диаграммы предполагалось отсутствие потерь в изоляции объекта. В реальном случае вместо действительного значения  $\operatorname{tg} \delta$  будет измерено уменьшенное

значение  $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = \operatorname{tg} (\delta - \delta')$ .

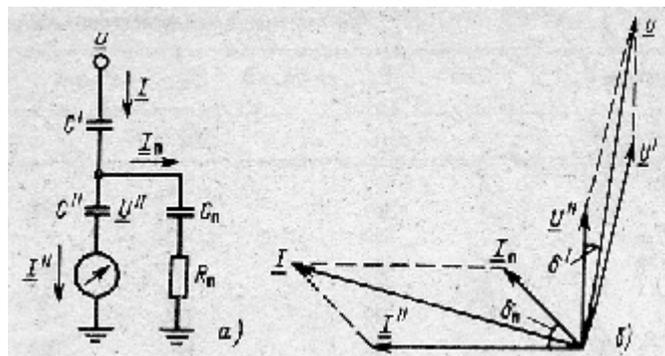


Рис. 2.22. К расчету погрешности от паразитных связей при прямой схеме включения средства измерения: а — схема замещения; б — векторная диаграмма

Учитывая малость углов, можем принять  $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} \approx \operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \delta'$

Расчет показал, что при  $\operatorname{tg} \delta_{\text{п}} < 1$ :

$$\operatorname{tg} \delta' \approx \frac{m}{m+1} \frac{n}{n+1} \operatorname{tg} \delta_{\text{п}},$$

где  $m = C'/C''$ , а  $n = C_{\text{п}}/C''$

В качестве примера приведем результаты измерений ввода 110 кВ, в котором паразитные связи имитировались путем установки под шестым ребром крышки бандажа из гибкого провода. Загрязнения с поверхности ввода не удалялись. Измерения проводились в сухую погоду при прямой схеме включения моста. Получены следующие данные:

	$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{X}}, \text{пФ}$
Бандаж отсутствует	0,5	190
Бандаж соединен с проводом ВН схемы	1,1	197
Бандаж заземлен	0,0	184

Опыт показал, что паразитная емкость, примерно равная 3% емкости изоляции объекта, полностью обесценила результаты измерений.

При испытаниях вводов, установленных на силовых трансформаторах, паразитный ток  $I_{\text{п6}}$  частично протекает через емкостные связи с обмоткой ВН трансформатора [9]. Значение и фаза паразитного тока определяются распределением напряжения вдоль обмотки. Обмотка ВН соединена с источником измерительного напряжения, и по ней протекает ток, вызванный емкостью обмотки относительно заземленных частей трансформатора. Ввиду наличия потерь в сердечнике трансформатора из-за потока намагничивания падение напряжения на обмотке будет иметь активную составляющую. Поэтому паразитный ток между обкладками ввода и обмоткой внесет в результаты измерения  $\operatorname{tg} \delta$  ввода значительную погрешность.

Таблица 2.1. Измеренные значения  $\operatorname{tg} \delta$ , вводов силовых трансформаторов

Тип трансформатора	Фаза	$U_{\text{ном}}$ ввода, кВ	Схема А		Схема Б		Схема В	
			$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{X}}, \text{пФ}$	$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{X}}, \text{пФ}$	$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{X}}, \text{пФ}$
ТДЦ-206000/500	А	500	0,8	632	0,5	634	—	—
	В	500	1,2	640	0,45	645	—	—
	С	500	0,75	593	0,45	595	—	—
ТДЦГ-360000/220	А	220	1,8	560	0,4	560	—	—
	В	220	2,3	565	0,45	565	—	—
	С	220	1,1	543	0,45	543	—	—
АОДЦТН-167000/500	—	500	0,7	600	0,4	600	0,4	600
ТДЦ-360000/220	В	220	—	—	0,6	555	0,7	555
АОДЦТ-135000/500	А	500	1,63	—	0,23	—	—	—
ОДЦГ-135000/500	С	500	1,0	—	—	—	0,4	—

Примечание. Схемы: А — все обмотки раскорочены; Б — все обмотки закорочены; В — закорочена только обмотка НН.

Исключение этой погрешности возможно лишь путем устранения вызвавшей ее причины - потока намагничивания в сердечнике трансформатора. Для этого необходимо закоротить все выводы обмоток, В табл. 2.1 приведены результаты измерений, подтверждающие эту рекомендацию.

Закорачивание обмоток необходимо и при измерении диэлектрических потерь их изоляции. Ток, протекающий через обмотку по ее частичным емкостям относительно заземленных элементов трансформатора, возбуждает, как уже указывалось, магнитный поток в сердечнике. Следовательно, в ток через обмотку будет внесен фазовый сдвиг, определяемый потерями в железе. Именно этот ток и измеряется при контроле обмоток трансформатора, причем фазовый сдвиг, внесенный потерями в сердечнике, может привести к полной утере информации о состоянии изоляции обмотки.

Паразитный ток  $I_{п8}$  вносит погрешности измерения при перевернутой схеме включения СИ. Основной способ исключения этих погрешностей - уменьшение тока  $I_{п8}$  путем изменения схемы измерений или подачи на части объекта, мешающие измерению, потенциала экрана схемы.

Так, например, при испытании вводов некоторых выключателей паразитный ток  $I_{п8}$  протекает с гасительных камер на бак. Для уменьшения его влияния следует опустить бак или слить масло из выключателя.

При контроле наружных слоев изоляции вводов и трансформаторов тока (рис. 2.23) значение тока  $I_{п8}$  определяется тем, куда будет присоединен вывод ВН объекта. При заземлении этого вывода будут измерены характеристики соединенных параллельно емкостей  $C_1$  и  $C_3$ . Если вывод ВН никуда не присоединен, возникает неопределенность, так как результат измерения зависит от сопротивления изоляции этого вывода (особенно в случае, когда шины от объекта не отключены). Если же на вывод ВН подать потенциал экрана схемы, то ток  $I_{п8}$  не возникнет, поскольку отсутствует вызывающая его разность потенциалов между выводами ВН и И объекта.

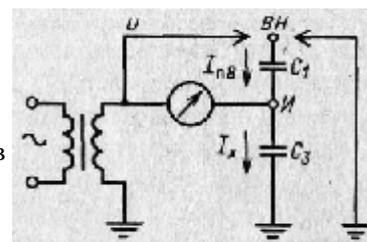


Рис. 2.23. Схема измерения  $\text{tg } \delta$  наружных слоев изоляции:  
 $C_1$  — емкость основной изоляции;  $C_3$  — емкость наружных слоев изоляции; ВН — вывод высокого напряжения; И — измерительный вывод

В ряде конструкций аппаратов высокого напряжения имеются два вывода от обкладок изоляционного остова: от предпоследней (специальный) и последней (измерительный). Специальный вывод предназначен для присоединения устройств измерения напряжения (ПИН), а измерительный вывод — для контроля изоляции. У таких объектов измерение  $\text{tg } \delta$  изоляции при подключении прибора к измерительному выводу из-за снижения изоляции специального вывода может привести к существенным ошибкам, аналогичным рассмотренным выше.

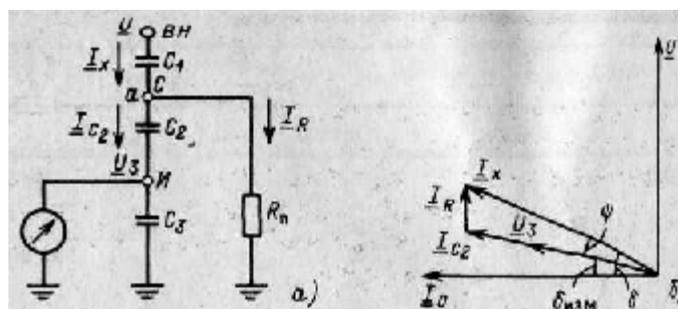


Рис. 2.24. Измерение  $\text{tg } \delta$  изоляции ввода с ПИН:

$a$  — схема замещения;  $b$  — векторная диаграмма;  $C_1$  — емкость основной изоляции  $C_2$  — емкость изоляции конденсатора ПИН;  $C_3$  — емкость наружных слоев изоляции  $R_n$  - сопротивление изоляции специального вывода; ВН — вывод высокого напряжения; С — специальный вывод; И — измерительный вывод

На рис. 2.24 приведены схема замещения и векторная диаграмма для такого случая. Ток  $I_x$  через объект в точке а разветвляется на две составляющие: ток  $I_{C2}$ , проходящий по емкости  $C_2$  обкладки ПИН, и ток  $I_R$ , проходящий по сопротивлению  $R_{\Pi}$  изоляции специального вывода (принято, что емкость  $C_2$  не имеет потерь). Измеряется падение напряжения  $U_3$  на сопротивлении  $R_3$  моста от тока  $I_{C2}$ , практически совпадающее по фазе с этим током ( $R_3 \ll 1/\omega C_2$ ). Из векторной диаграммы следует, что  $\delta_{\text{изм}} = \delta - \varphi$  или с учетом малости углов  $\text{tg } \delta_{\text{изм}} = \text{tg } \delta - \text{tg } \varphi$ . Следовательно,  $\text{tg } \delta = 1/\omega C_2 R_2$  определяет погрешность, измерения потерь ввода из-за сниженной изоляции специального вывода.

Оценим возможную погрешность при измерении объекта емкостью 600 пФ с помощью измерительного вывода. Величина  $C_2 = 30 C_1 \approx 30 \cdot 600 = 18\,000$  пФ. Примем  $R_1 = 10$  МОм тогда,  $\Delta \text{tg } \delta = \text{tg } \varphi = 1,4 \cdot 10^{-2}$ . Очевидно, что при хорошей изоляции ввода в результате может быть измерено даже отрицательное значение  $\text{tg } \delta$ .

Как видно из примера, если использовать измерительный вывод, даже при достаточно высоком значении сопротивления изоляции специального вывода результат измерения практически не будет связан с состоянием основной изоляции. Поэтому во всех случаях контроля диэлектрических потерь таких объектов измерение при прямой схеме измерительной установки надо вести, используя специальный вывод, соединив его с измерительным. Это соединение необходимо для исключения другой погрешности - от шунтирования измерительного элемента. Вопросы, связанные с исключением погрешностей от такого шунтирования, будут рассмотрены в следующем параграфе.

**Шунтирование входа средства измерений.** Под входом СИ понимается его измерительный элемент (первичный преобразователь), по которому протекает измеряемый ток. Шунтирование входа СИ в схеме измерений проводимостью  $Y_{\text{ш}}$  (см. рис. 2.21) может привести к недопустимым погрешностям измерений.

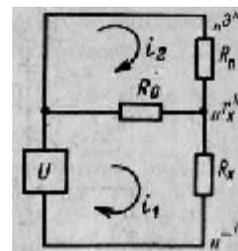


Рис. 2.25. К расчету погрешности измерения мегаомметром

При измерении мегаомметром и использовании цепей экранирования для исключения паразитных токов параллельно измерительному элементу  $R_0$  (рис. 2.25) включается сопротивление  $R_{\Pi}$ , эквивалентное сопротивлению путей протекания этих токов. Уравнения контурных токов в схеме:

$$i_1(R_0 + R_X) - i_2 R_0 = U;$$

$$i_2(R_0 + R_{\Pi}) - i_1 R_0 = 0;$$

Будет измерено значение  $R'_X = U / (i_1 - i_2)$ ; действительное значение  $R_X$ . Решение приведенных уравнений дало выражение для погрешности измерения

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} = \frac{R'_X - R_X}{R_X} = \frac{R_0}{R_X} + \frac{R_0}{R_{\Pi}}$$

Погрешность, определяемая отношением  $R_0/R_X$ , пренебрежимо мала. Для обеспечения допустимой погрешности измерения  $R_X$  сопротивление  $R_{\Pi}$  не должно быть ниже определенного значения. Если принять, что дополнительная относительная погрешность, вызванная шунтированием, не должна превышать 2%, то предельное (нижнее) значение  $R_{\Pi} = 50 R_0$ .

При измерении мостовой схемой шунтирующими элементами могут быть емкость  $C_{\Pi}$  и сопротивление  $R_{\Pi}$  между проводами схемы и экранами. При контроле ряда аппаратов в схему измерений входит значительная емкость между выводом, к которому присоединяется плечо  $Z_3$  моста, и заземленными частями конструкции. Сопротивление  $R_{\Pi}$  вносит погрешность в измеренную емкость объекта, а емкость  $C_{\Pi}$  - в значение измеренного  $\text{tg } \delta$  изоляции.

Из-за шунтирования сопротивлением  $R_{\Pi}$  при балансе мостовой схемы будет получено значение  $R_3$  отличающееся от действительного на  $\Delta R_3$ . Допустимое значение  $\Delta R_3$

определяется допустимой погрешностью определения емкости.

Так как  $R_3$  и  $R_{\Pi}$  соединены параллельно, то:

$$\left( \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)_{\text{доп}} = \frac{R_3}{R_3 + R_{\Pi}} \approx \frac{R_3}{R_{\Pi}} \ll \left( \frac{\Delta C_x}{C_x} \right)_{\text{доп}}$$

Наличие емкости  $C_{\Pi}$  приводит к изменению фазы напряжения  $U_3$  на плече  $Z_3$  моста. Погрешность измерения определяется фазовым углом плеча  $Z_3$ .

Наличие шунтирующей емкости увеличивает измеренное значение  $\text{tg } \delta$ . С учетом (2.5) и (2.6) эта погрешность

$$(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}} = \omega R_3 C_{\Pi} = \omega R_4 C_0 C_{\Pi} / C_x.$$

Примем допустимые погрешности измерения  $\Delta C_x / C_x = 1\%$  и  $\Delta \text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-3}$ . При этом  $\Delta R_3 / R_3 \approx R_3 / R_{\Pi} \leq 0,01$ , а  $\omega R_4 C_0 C_{\Pi} / C_x \leq 0,001$ . Для моста P5026 наибольшее значение  $R_3 = 20$  кОм;  $R_4 = 10000/\pi$  Ом и  $C_0 = 50$  пФ. При этих данных предельные значения шунтирующих элементов:  $R_{\Pi} \geq 100 R_3 = 2$  МОм, а  $C_{\Pi} \leq 20 C_x$ .

В трансформаторе тока ТФНКД-500 (ТФЗМ 500) емкость главной изоляции  $C_x = 100$  пФ, а емкость относительно заземленного фланца внутреннего экрана с присоединенный вторичными обмотками  $C_{\Pi} = 14000$  пФ. В данном случае  $C_{\Pi} / C_x = 140$ , а  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}} = 7 \cdot 10^{-3}$ . При вводе в эксплуатацию такие трансформаторы тока имеют  $\text{tg } \delta = (4 \dots 6) \cdot 10^{-3}$ . Следовательно, без исключения погрешности измерения информация о состоянии изоляции будет утеряна.

У вводов со специальным выводом (вывод ПИН)  $C_{\Pi} / C_x = C_2 / C_x > 20$ . При их контроле также необходимо исключение погрешности измерения  $\text{tg } \delta$ .

Расчетный способ исключения погрешности заключается в вычитании из результата измерений поправки, равной  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}}$ . Для объектов, типовое значение шунтирующей емкости которых известно, поправка может быть рассчитана заранее; при этом измерение  $C_{\Pi}$  не потребуется.

Для моста P5025 (при  $R_4 = 10000/\pi$ ) эта поправка при контроле вводов с ПИН равна

Номинальное напряжение ввода, кВ	$C_{\Pi} / C_x$	$\Delta \text{tg } \delta$
150	22	$1,1 \cdot 10^{-3}$
220	33	$1,6 \cdot 10^{-3}$
330	48	$2,4 \cdot 10^{-3}$
500	72	$3,6 \cdot 10^{-3}$
750	120	$6,0 \cdot 10^{-3}$

Для мостовой схемы известен способ исключения погрешности, требующий измерения  $C_{\Pi}$ . По этому способу измерение  $\text{tg } \delta$  производится в 2 раза при различных значениях  $R_4$  ( $R''_4 = k R_4$ ), а погрешность исключается расчетом.

Пусть первое измерение проведено при значении  $R'_4$ . Результат измерения  $\text{tg } \delta' = \text{tg } \delta + \Delta \text{tg } \delta'$ , где  $\text{tg } \delta$  - действительная величина;  $\Delta \text{tg } \delta' = \omega C_{\Pi} R'_3$  - погрешность за счет  $C_{\Pi}$  при  $R'_4$ ;  $\text{tg } \delta'$  - значение, полученное при первом измерении.

Второе измерение проведено при значении  $R''_4$ . При этом  $\text{tg } \delta'' = \text{tg } \delta + \Delta \text{tg } \delta''$ , где  $\Delta \text{tg } \delta'' = \omega C_{\Pi} R''_3$  - погрешность при втором измерении;  $\text{tg } \delta''$  - значение, полученное при втором измерении.

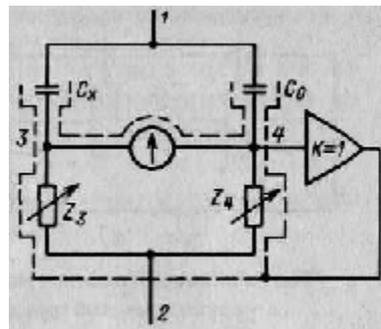
Поскольку  $R''_4 = k R'_4$ , то  $R''_3 = k R'_3$  и  $\Delta \text{tg } \delta'' = k \Delta \text{tg } \delta'$ .

Рис. 2.26. Схема моста с устройством защитного потенциала

Совместное решение полученных уравнений дает

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta'' - k \text{tg } \delta'}{1 - k};$$

при  $k = 0,5$   $\text{tg } \delta = 2 \text{tg } \delta'' - \text{tg } \delta'$ .



В большинстве встречающихся в эксплуатации случаев нет необходимости в расчетном исключении рассматриваемой погрешности. Проще снизить значение  $R_4$  так, чтобы погрешность  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}}$  стала меньше допустимой. Практически достаточно значение  $R_4 = 1000/\pi$  Ом. При этом указанные выше погрешности измерения  $\text{tg } \delta$  изоляции вводов станут в 10 раз меньше и могут не учитываться из-за своей малости.

В мостовой схеме шунтирование емкостью плеча  $Z_4$  также приводит к погрешности измерения. При этом  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}} = \omega R_4 C_{\text{п}}$ , а измеренное значение  $\text{tg } \delta$  будет меньше действительного. Поэтому нельзя существенно увеличивать длину экранированного провода к образцовому конденсатору сверх имеющейся в комплектующем мост кабеле; емкость этого кабеля учитывается при конструировании моста.

Если необходима высокая точность измерений, значимой становится погрешность из-за емкости между диагональю моста и его экраном. Учет этой погрешности необходим, например, при контроле изоляционного масла.

Одним из способов устранения такой погрешности является уменьшение разности потенциалов между указателем равновесия и экраном моста. Паразитный ток, вызывающий рассматриваемую погрешность, станет пренебрежимо малым. Один из вариантов моста приведен на рис. 2.26. Усилитель (повторитель напряжения) с коэффициентом передачи  $k = 1$  включен между узлом 4 моста и его экраном, что обеспечивает автоматическое выравнивание потенциалов этих точек. В устройствах с компараторами тока, ввиду того что сопротивление  $I_x$  измерительного элемента (входной обмотки компаратора) очень мало, погрешности от шунтирования практически отсутствуют.

**Измерение параметров изоляции по зонам.** Для диагностирования целесообразно иметь данные о параметрах отдельных областей (зон) объекта. При этом улучшается выявляемость дефекта (из-за уменьшения объема контролируемой изоляции) и облегчается определение его местонахождения.

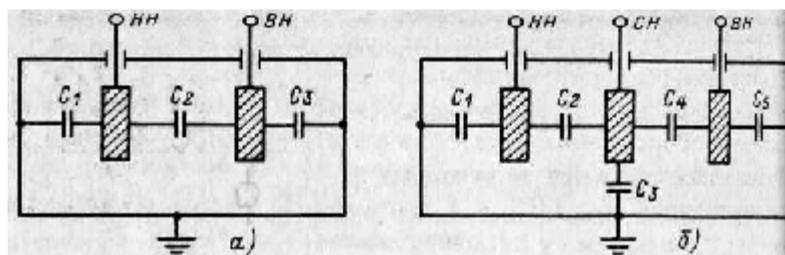


Рис. 2.27. Схемы замещения главной изоляции трансформаторов: а — двухобмоточный трансформатор; б — трехобмоточный трансформатор

Измерение характеристик изоляции объекта по зонам производится путем подачи потенциала экрана в соответствующие точки схемы. Тем самым от измерительного элемента СИ отводятся токи, проходящие через остальную часть изоляции.

Ранее был рассмотрен случай измерения характеристик наружных слоев изоляции ввода. Для исключения погрешности от тока через главную изоляцию вывод ВН ввода при этом соединяется с точкой экрана схемы (см. рис. 2.23).

Наибольшее применение получила оценка состояния изоляции зонам при контроле силовых трансформаторов, проводимая с целью выявления участка с повышенными потерями. На рис. 2.27 приведена схема замещения трансформатора, в которой емкости  $C_1 - C_5$  эквивалентны соответствующим зонам изоляции. В табл. 2.2 приведены данные о схемах, позволяющих измерить характеристики изоляции в не, ограниченной указанными электродами.

Обычно при эксплуатационном контроле производятся не все измерения согласно табл. 2.2; измеряются характеристики изоляции одной обмотки относительно бака и соединенных с ним других обмоток. Измерение ведется по перевернутой схеме.

Таблица 2.2. Схемы измерения при контроле силовых трансформаторов

Тип трансформатора	Измеряемая зона (рис. 2.27)	Схема включения измерительного устройства	Подключение электродов объекта	
			к измерительной схеме	к экрану
Двухобмоточный	$C_1$	Перевернутая	НН	ВН
	$C_2$	Прямая	ВН и НН	Бак
	$C_3$	Перевернутая	ВН	НН
Трехобмоточный	$C_1$	Перевернутая	НК	СН, ВН
	$C_2$	Прямая	СН и НН	Бак, ВН
	$C_3$	Перевернутая	СН	ВН, НН
	$C_4$	Прямая	ВН и СН	Бак, НН
	$C_5$	Перевернутая	ВН	СН, НН

При контроле обмотки ВН двухобмоточного трансформатора в этом случае будут получены следующие значения:

$$\operatorname{tg} \delta_B = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_2 + C_3 \operatorname{tg} \delta_3}{C_2 + C_3}; \quad C_B = C_2 + C_3.$$

При контроле обмотки НН будет получено

$$\operatorname{tg} \delta_H = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}; \quad C_H = C_1 + C_2.$$

Поскольку у двухобмоточного трансформатора производится еще одно измерение - обе соединенные обмотки относительно бака, - то по результатам трех измерений можно с достаточной точностью вычислить  $\operatorname{tg} \delta$  и емкость изоляции основных зон. Дополнительное измерение обеих обмоток относительно корпуса дает

$$\operatorname{tg} \delta_{(B+H)} = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_3 \operatorname{tg} \delta_3}{C_1 + C_3}; \quad C_{(B+H)} = C_1 + C_3.$$

Решая совместно полученные уравнения, можно определить интересующие значения  $\operatorname{tg} \delta$  и емкости зон:

$$C_1 = \frac{C_H - C_B + C_{(B+H)}}{2};$$

$$C_2 = \frac{C_B + C_H - C_{(B+H)}}{2};$$

$$C_3 = \frac{C_{(B+H)} + C_B - C_H}{2};$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{C_H \operatorname{tg} \delta_H - C_B \operatorname{tg} \delta_B + C_{(B+H)} \operatorname{tg} \delta_{(B+H)}}{C_H - C_B + C_{(B+H)}};$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{C_H \operatorname{tg} \delta_H + C_B \operatorname{tg} \delta_B - C_{(B+H)} \operatorname{tg} \delta_{(B+H)}}{C_H + C_B - C_{(B+H)}};$$

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{C_B \operatorname{tg} \delta_B + C_{(B+H)} \operatorname{tg} \delta_{(B+H)} - C_H \operatorname{tg} \delta_H}{C_B + C_{(B+H)} - C_H}.$$

В случае трехобмоточного трансформатора необходимо произвести пять измерений. При измерении по зонам можно, например, оценить причину повышенных потерь изоляции трансформатора.

В ряде случаев измерение  $\operatorname{tg} \delta$  по зонам дает возможность выявления таких сосредоточенных дефектов изоляции, как науглероженные следы частичных (ползущих) разрядов. Для этого необходимо сравнить результаты измерения  $\operatorname{tg} \delta$  разных зон и, если это возможно, одинаковых зон разных фаз.

## 2.4. ТОКИ ВЛИЯНИЯ И ИХ ИСКЛЮЧЕНИЕ

Напряжение и ток рабочего режима устройства, в котором находится контролируемое оборудование, являются источниками токов помех промышленной частоты - токов влияния. Эти токи вызваны электрическим полем, созданным рабочим напряжением, а также магнитным полем тока, протекающего по токоведущим частям.

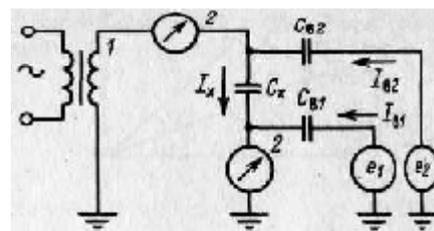
Ток рабочего режима индуцирует в замкнутых контурах схем измерений ток электромагнитных влияний. Наиболее чувствительным элементом схемы при этом является СИ, где влияниям подвержены трансформаторы измерительной цепи. При конструировании СИ это учитывается; обычно оно имеет соответствующую защиту. Кроме того, всегда можно изменить положение СИ в пространстве, уменьшив при этом индуктивную связь с влияющим элементом. Поэтому практически возникает необходимость исключения лишь небольших осевых токов от электромагнитного влияния.

Помехи в схеме измерений, вызванные обоими влияющими факторами, имеют одинаковый характер; методы их исключения из результатов измерений различны не имеют. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены лишь влияния электрического поля, как основные.

### Токи влияния

Токи влияния электрического поля протекают по емкостным связям объекта контроля с находящимися под рабочим напряжением элементами распределительного устройства (оборудованием, системой шин и т. п.). Некоторая часть тока влияния определяется короной на этих элементах. Источниками токов влияния являются фазные напряжения сети.

Рис. 2.28. Схема замещения для учета



Частичных емкостей, создающих пути для токов влияния, много. Они определяются конструкцией оборудования и его расположением относительно других элементов распределительного устройства. Токи, протекающие по каждому из этих путей, имеют различные значения и фазу. Поэтому суммарный ток влияния, протекающий через данную точку схемы измерений, имеет случайное значение модуля и фазы. На схеме замещения источник суммарного тока влияния может быть представлен в виде источника ЭДС и эквивалентной емкости влияния [9]. Эта емкость мала по сравнению с емкостью остальных элементов схемы измерений, и поэтому источник влияния может рассматриваться как источник тока.

Будем рассматривать два пути протекания суммарных токов влияния (рис. 2.28); один - на низкопотенциальный вывод объекта ( $I_{B1}$ ), второй - на его вывод ВН ( $I_{B2}$ ). В действительности частичные токи влияния протекают через всю поверхность объекта, а указанные электроды есть лишь точки объекта, через которые суммарные токи влияния стекают в схему измерения. При прямой схеме включения измерительного устройства определяющим является ток  $I_{B1}$ ; при перевернутой - ток  $I_{B2}$ . Необходимость одновременного рассмотрения обоих токов будет оговорена особо.

Строго говоря, часть тока влияния будет протекать через емкость объекта, минуя измерительное устройство. Но таким малым изменением можно пренебречь. В дальнейшем рассматривается лишь ток, который влияет на результаты измерений.

Протекая через измерительный элемент схемы и складываясь с подлежащим контролю током через изоляцию объекта, ток влияния является источником погрешностей измерения.

Погрешности измерения от токов влияния существенны лишь для измерительных установок переменного тока промышленной частоты. В дальнейшем будут рассматриваться лишь эти установки. В других случаях (например, при измерениях на постоянном токе) погрешности появляются лишь тогда, когда токи влияния создают нелинейный режим измерительного устройства или же выпрямляются каким-либо образом в процессе измерения.

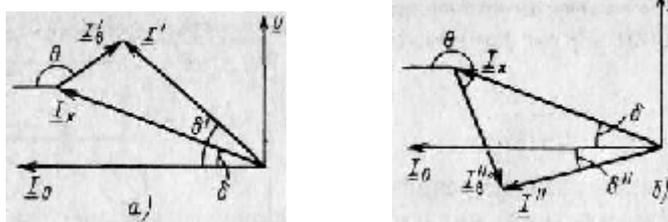


Рис. 2.29. К расчету погрешностей от тока влияния:  
 а — измеренный угол потерь больше действительного;  
 б — измеренный угол потерь меньше действительного

Протекая по входным цепям мегаомметра, токи влияния, превышающие определенное значение, выпрямляются устройствами его защиты от перегрузок. Это создает недопустимые погрешности измерений, например, при применении мегаомметра Ф4100. Возможно выпрямление токов влияния при коммутациях, проводимых для измерения абсорбционных характеристик.

На векторной диаграмме (рис. 2.29, а) ток  $I'_в$ , протекающий через измерительный элемент схемы, показан как сумма тока объекта  $I'_х$  и тока влияния  $I'_в$ . Действительный угол потерь  $\delta$ ; измеряется угол  $\delta'$ . Фаза тока влияния (угол  $\theta$ ) может быть любой, поэтому измеренное значение  $\text{tg } \delta$  может быть больше или меньше действительного. Возможно отрицательное значение ("отрицательный"  $\text{tg } \delta$  при суммарном токе  $I''$  и угле  $\delta''$ , рис. 2.29, б).

Активная составляющая тока  $I'$

$$I'_a = I_x \sin \delta + I_b \sin \theta ;$$

реактивная составляющая

$$I'_p = I_x \cos \delta + I_b \cos \theta .$$

Следовательно, измеренные значения

$$\text{tg } \delta' = \frac{I_x \sin \delta + I_b \sin \theta}{I_x \cos \delta + I_b \cos \theta} \quad \text{и} \quad C'_x = k_C (I_x \cos \delta + I_b \cos \theta),$$

где  $k_C$  - коэффициент, определяемый чувствительностью измерительного устройства.

Введем коэффициент  $k_B$ , равный отношению модулей токов влияния и объекта (коэффициент влияния)<sup>1</sup>. При этом

$$\text{tg } \delta' = \frac{\sin \delta + k_B \sin \theta}{\cos \delta + k_B \cos \theta} \tag{2.12}$$

$$C'_x = k_C I_x (\cos \delta + k_B \cos \theta) . \tag{2.13}$$

<sup>1</sup> В [9] коэффициентом влияния названо отношение модуля тока влияния к реактивной составляющей тока объекта. Принятое нами определение представляется методически более верным.

Погрешности измерения:

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta' - \operatorname{tg} \delta = \frac{k_B (\sin \theta - \operatorname{tg} \delta \cos \theta)}{\cos \delta + k_B \cos \theta} \quad (2.14)$$

и

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{C_x' - C_x}{C_x} = k_B \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \quad (2.15)$$

Наибольшая погрешность измерения  $\operatorname{tg} \delta$  соответствует случаю, когда ток влияния близок по фазе к активной составляющей тока объекта ( $\theta \approx 90^\circ$ ); при этом с учетом малости угла  $\delta$   $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{нб}} \approx k_B$ . Заметим, что погрешность отсутствует при  $\theta = \delta$ . Наибольшая погрешность измерения емкости  $(\Delta C_x / C_x)_{\text{нб}} \approx k_B$  будет при  $\theta = 0^\circ$ .

Ток влияния определяется габаритами контролируемого объекта, его расположением и номинальным напряжением установки. При прочих равных условиях коэффициент влияния и, следовательно, погрешность измерения будут обратно пропорциональны емкости объекта. Наибольшие погрешности создают токи влияния при контроле вводов и трансформаторов тока.

Обычно ток влияния, протекающий в прямой схеме включения измерительного устройства, много меньше тока влияния при перевернутой схеме включения.

В табл. 2.3 приведены статистические данные о реальных уровнях влияния, измеренных при контроле вводов и трансформаторов тока Распределительных устройствах, а также прогнозируемые предельные значения коэффициентов влияния [10]. Прогноз сделан по распределению наибольших членов выборки.

Эти данные подтверждают, что по помехозащищенности прямая схема измерений является наилучшей. Однако наибольшее возможное значение погрешности измерения, которое, как показано выше, близко к значению  $k_B$ , так велико, что результаты измерений в целях диагностирования изоляции использовать нельзя. Необходимо исключение погрешности измерений, вызванной токами влияния.

Таблица 2.3. Уровни влияния в схемах эксплуатационных измерений

Тип аппарата	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$C_x$ , пФ	Схема измерения	$k_{\text{в.нб}}$ , %	$k_{\text{в.пр}}$ , %
Вводы трансформаторов силовых	110	160-200	Прямая	0,26	0,9
	220	530-615	“	0,11	0,5
	330	530-630	“	0,3	1,2
	500	615-665	“	0,27	1,1
Трансформаторы тока	110	100-150	Перевернутая	5,77	40,0
	110	160-260	“	7,26	52,0
	220	160-260	“	16,08	76,0
	330	640-1000	Прямая	1,64	7,2
	500	270-400	Перевернутая <sup>1</sup>	12,05	58,0
Вводы выключателей	110	200-320	Перевернутая	2,37	13,0
	110	250-500	Прямая	0,45	2,3
	220	230-260	“	1,42	4,2
	220	320-640	Перевернутая	6,0	21,4

<sup>1</sup> ТФНКД-500, два элемента соединены параллельно.

Примечания:

<sup>1</sup>: Измерения проводились при напряжении 10 кВ.

<sup>2</sup>.  $k_{\text{в.нб}}$  - наибольшее измеренное значение;  $k_{\text{в.пр}}$  - наибольшее расчетное (предельное) значение, полученное исходя из статистики наибольших значений.

### Исключение погрешностей измерения

Получить достоверные результаты измерений можно следующими способами: уменьшением до приемлемого значения тока влияния, компенсацией этого тока в

измерительной схеме, применением помехоустойчивого измерительного устройства или исключением погрешности из результатов измерения.

**Уменьшение тока влияния** может быть получено путем выбора соответствующей схемы измерений (см. табл. 2.3). Дальнейшее снижение этого тока дает отключение соседних с контролируемым объектом элементов распределительного устройства. К снижению погрешности за счет уменьшения коэффициента влияния приводит повышение напряжения измерительной установки. Однако все эти мероприятия, улучшая условия измерений, достаточное исключен погрешностей не обеспечивают.

Устранить ток влияния можно экранированием. Для этого контролируемый объект надо окружить заземленным проводящим экраном, например, из проволочной сетки. Для эксплуатационных измерений этот метод неприемлем.

**Компенсация токов влияния** в схеме измерений производится от специального источника, синхронного с напряжением влияющей сети. Компенсацию можно обеспечить, подав на вход СИ ток, равный по модулю току влияния и обратный ему по фазе (см. рис. 2.16).

**Защита от помех** обеспечивается применением специального помехоустойчивого СИ. Такой способ измерений наиболее удобен в эксплуатации и обеспечивает необходимую точность.

Применяется частотное разделение контролируемого тока и тока помех (влияния). Частота напряжения измерительной установки выбирается отличающейся от промышленной, а СИ защищается от тока влияния соответствующим фильтром. В практике энергосистем применяются установки с частотой 25 и 100 Гц.

Указатель равновесия мостового устройства является селективным прибором; частотная характеристика его фильтра (рис. 2.30) предусматривает необходимое подавление помех с частотой, отличающейся от частоты измерительного напряжения  $\omega_n$ . Ввиду неидеальности фильтра ток влияния  $I_B$  с частотой  $\omega_B$  вызовет показания, эквивалентные протеканию тока рабочей частоты моста  $I_{ЭК} = I_B / K_{\omega B}$  ( $K_{\omega B}$  – коэффициент подавления фильтра; принято, что на рабочей частоте моста  $K_{\omega} = 1$ ). Это приведет к погрешности измерения. Наибольшая возможная погрешность от тока влияний  $\Delta \text{tg } \delta$  или  $\Delta C_X / C_X$  равна  $k_B$ . С учетом характеристики фильтра

$$\Delta \text{tg } \delta = \frac{\Delta C_X}{C_X} = \frac{k_B}{K_{\omega B}}$$

Определяющим является случай измерения  $\text{tg } \delta$ . Следовательно, помехозащищенность СИ будет обеспечена, если

$$K_{\omega B} \geq k_B / (\Delta \text{tg } \delta)_{\text{доп}}$$

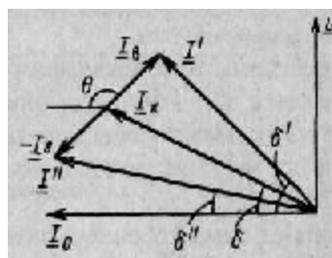
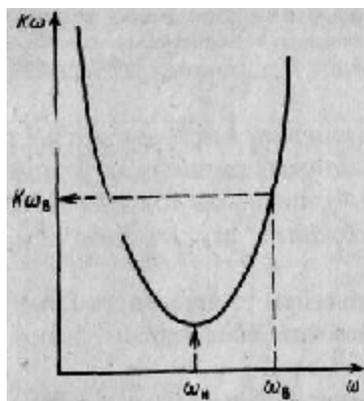


Рис. 2.31. К расчету формул исключения погрешностей от тока влияния

Рис. 2.30. Частотная характеристика фильтра указателя равновесия

Примем допустимое значение погрешности измерения  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{доп}} = 1 \cdot 10^{-3}$ , а наибольшее

возможное значение  $k_b = 0,7$  (см. табл. 2.3). При этом необходимое подавление фильтром  $K_{\text{об}} = 700$ .

Высокой помехоустойчивостью обладает векторметр. Она обеспечивается синхронным выпрямлением с последующим выделением постоянной составляющей выпрямленного тока. При синхронном выпрямлении равно нулю среднее значение токов, несинхронных с управляющим напряжением или имеющих частоту, кратную его четным гармоникам. Поэтому, если измерять при частоте 25 Гц, помехи от токов влияния промышленной частоты погрешности не дадут.

Недостатками методов измерения с фильтрацией токов влияния являются необходимость в специальной измерительной установке с мощным источником напряжения при частоте, отличающейся от промышленной, а также трудность установления пересчетных коэффициентов для приведения полученных данных к нормированным при промышленной частоте.

**Расчетный метод** получил наиболее широкое применение. Исключение погрешностей от токов влияния, протекающих через измерительное устройство, производится путем обработки результатов измерений, проведенных при фазах напряжения испытательной установки, различающихся на  $180^\circ$  (метод двух измерений).

На векторной диаграмме (рис. 2.31) для упрощения показано в изменение на  $180^\circ$  тока через объект, а эквивалентное ему изменен» тока влияния. При первом измерении будут определены значения  $\text{tg } \delta'$  и  $C'_x$ , а при втором -  $\text{tg } \delta''$  и  $C''_x$ . Из векторной диаграммы следует:

$$\begin{aligned} \text{tg } \delta' &= \frac{I_x \sin \delta + I_B \sin \theta}{I_x \cos \delta + I_B \cos \theta}; \\ \text{tg } \delta'' &= \frac{I_x \sin \delta + I_B \sin (180^\circ + \theta)}{I_x \cos \delta + I_B \cos (180^\circ + \theta)}; \\ C'_x &= k_C (I_x \cos \delta + I_B \cos \theta); \\ C''_x &= k_C [I_x \cos \delta + I_B \cos (180^\circ + \theta)]; \quad C_x = k_C I_x \cos \delta. \end{aligned}$$

Совместное решение этих уравнений дает

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta' C'_x + \text{tg } \delta'' C_x}{C'_x + C''_x} \quad (2.16)$$

и

$$C_x = \frac{C'_x + C''_x}{2}. \quad (2.17) \quad \begin{array}{l} \text{В} \\ \text{фор} \\ \text{мулу} \end{array}$$

(2.16) значения  $\text{tg } \delta'$  и  $\text{tg } \delta''$  подставляются с тем знаком, с каким они были получены при измерениях. Для случая измерений мостовой схемой

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta' R_3^I + \text{tg } \delta'' R_3^{II}}{R_3^I + R_3^{II}} \quad \text{и} \quad C_x = \frac{C_0 R_4}{2} \left( \frac{1}{R_3^I} + \frac{1}{R_3^{II}} \right).$$

Часто в качестве результата измерения  $\text{tg } \delta$  принимается полусумма данных:  $\text{tg } \delta = 0,5 (\text{tg } \delta' + \text{tg } \delta'')$ .

При этом вносится погрешность:

$$\Delta \text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta' C'_x + \text{tg } \delta'' C''_x}{C'_x + C''_x} - \frac{\text{tg } \delta' + \text{tg } \delta''}{2} = (\text{tg } \delta' - \text{tg } \delta'') \frac{C'_x - C''_x}{C_x}.$$

Если результаты обоих измерений емкости не различаются более чем на 10%, то погрешность расчета по упрощенной формуле будет допустимой. При больших различиях полученных данных следует пользоваться формулой (2.16).

Полученные расчетные формулы принципиально пригодны для исключения любого тока влияния. Однако на практике невозможно обеспечить измерение без погрешностей и при

больших токах влияния расчетное значение  $\operatorname{tg} \delta$ , определенное как разность больших величин, может иметь недопустимое отклонение от действительного.

Расчетное исключение погрешностей целесообразно использовать в случаях, когда оба измеренных значения  $\operatorname{tg} \delta$  положительны. При получении отрицательного значения  $\operatorname{tg} \delta$  можно предварительно снизить погрешность подбором фазы питания измерительного устройства (при этом изменяется угол  $\theta$ ) и лиц, потом производить исключение остаточной погрешности расчетом. При наличии соответствующей испытательной установки целесообразно сразу перейти на измерения методом совмещения фаз (см. далее).

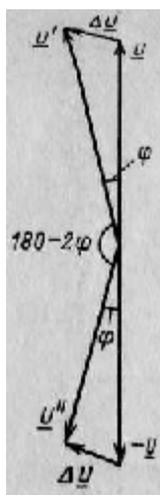


Рис. 2.32. К расчету погрешности от изменения фазы напряжения питания моста

При применении методов исключения погрешностей от токов влияния, основанных на двух измерениях, поворот фазы напряжения при втором измерении на угол, отличающийся от  $180^\circ$ , ведет к существенным ошибкам в определении  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции. Ошибка в определении емкости не так значима. Изменение фазы напряжения не строго на  $180^\circ$  может быть следствием нечеткой фиксации выбранной фазы в фазорегуляторе или же из-за большого тока влияния, протекающего через источник напряжения измерительной установки.

При прямой схеме включения СИ через источник напряжения измерительной установки проходит ток влияния, стекающий с вывода высокого напряжения объекта (ток  $I_{B2}$  - см. рис. 2.28). Падение напряжения от этого тока на сопротивлении  $z_k$  источника образует часть напряжения на объекте, не изменяющуюся на  $180^\circ$  при изменении фазы напряжения питания [10]. Падение напряжения на источнике  $\Delta U = z_k I_{B2}$ , а наибольшая определяемая им разность фаз  $2\varphi \approx 2\Delta U/U$  (рис. 2.32).

Следовательно, вместо напряжения  $\underline{U}$  к объекту будет приложено напряжение  $\underline{U}'$  а сдвиг фаз при изменении фазы питания будет не  $180^\circ$ , а  $\varphi = 180^\circ - 2\varphi$ .

Примем для упрощения, что у объекта  $\operatorname{tg} \theta = 0$ . При измерениях в условиях влияния (коэффициент влияния  $k_{B1}$  и при сдвиге фазы напряжения питания на  $\varphi$  с учетом (2.12) получим

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{k_{B1} \sin(\theta + \varphi)}{1 + k_{B1} \cos(\theta + \varphi)}$$

При втором измерении

$$\operatorname{tg} \delta'' = \frac{k_{B1} \sin(\theta + \varphi + \psi)}{1 + k_{B1} \cos(\theta + \varphi + \psi)} = \frac{-k_{B1} \sin(\theta - \varphi)}{1 - k_{B1} \cos(\theta - \varphi)}$$

Поскольку принято, что действительное значение  $\operatorname{tg} \delta = 0$ , то измеренные значения и есть погрешности от изменения фазы напряжения. Эта погрешность при расчете среднего значения результатов измерения с учетом того, что  $k_{B1} < 1$ :

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2} (\operatorname{tg} \delta' + \operatorname{tg} \delta'') \approx \frac{k_{B1}}{2} [\sin(\theta + \varphi) - \sin(\theta - \varphi)] \approx k_{B1} \cos \theta \sin \varphi$$

Наибольшее значение погрешности  $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{нб}} \approx k_{B1} \sin \varphi$ .

Для малых углов

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta U}{U} = \frac{I_{B2} z_k}{U}$$

следовательно,

$$(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{нб}} \approx k_{B1} \frac{I_{B2} z_k}{U}$$

При допустимой погрешности  $\Delta \operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-3}$  и  $k_{B1} = 0,1$  наибольшая допускаемая ошибка в изменении фазы  $2\varphi \approx 2,5^\circ$ .

Можно принять, что для измерительной установки с источником питания НОМ-10 и фазорегулятором  $z_K \approx 100$  кОм (приведено к стороне 10 кВ), тогда

$$K_{в1} I_{в2} < 0,1(\Delta t g \delta)_{доп.}$$

При измерении  $t g \delta$  изоляции вводов и трансформаторов тока обычно стараются не отключать шины. Рассмотренная погрешность определяет предел допустимости такой схемы измерений. Практически отключение шин необходимо при  $k_{в1} I_{в2} \geq 2 \cdot 10^{-4}$  (принято, что  $\Delta t g \delta \leq 2 \cdot 10^{-3}$ ). По данным табл. 2.3, при прямой схеме измерения наибольшее прогнозируемое значение  $k_{в1} \approx 7 \cdot 10^{-2}$ , следовательно, наибольший допускаемый при этом ток влияния  $I_{в2} \approx 3$  мА.

**Метод совмещения фаз** токов объекта и влияния обеспечивает исключение погрешности от токов влияния, протекающих через измерительное устройство, путем выбора соответствующего угла  $\Theta$  [9]. Из (2.14) и (2.15) следует, что погрешность измерения отсутствует при  $\Theta_1 = \delta$  и  $\Theta_2 = 180^\circ + \delta$ , а погрешность измерения емкости - при  $\Theta = \pm 90^\circ$ . Метод заключается в том, что перед измерениями, изменяя фазу напряжения измерительной установки, обеспечивают необходимую фазу тока через объект. Измерительная установка должна для этого иметь фазовращатель в цепи питания источника напряжения.

Высокая точность измерения необходима в первую очередь при определении  $t g \delta$ . Поэтому добиваются совмещения фазы тока через изоляцию объекта с фазой тока влияния. Признаком того, что фаза напряжения на объекте выбрана правильно, является совпадение результатов двух измерений (одно - при выбранной фазе, другое - при изменении ее на  $180^\circ$ ).

Рассмотрим процесс измерения при применении мостовой схемы. Выбор фазы напряжения питания моста производится методом последовательных приближений следующим образом:

на шкале моста устанавливается значение  $t g \delta = 0$  или (для ускорения процесса выбора фазы) ожидаемое значение  $t g \delta$  изоляции объекта;

на мост подается напряжение и производится его уравнивание путем регулировки резистора  $R_3$  и изменения фазы напряжения фазорегулятором;

напряжение моста изменяется по фазе на  $180^\circ$  и при неизменном положении фазорегулятора мост уравнивается обычным способом;

на шкале моста устанавливается полусумма первоначального и измеренного значений  $t g \delta$  и производится коррекция фазы напряжения путем уравнивания моста резистором  $R_3$  и фазорегулятором

фаза напряжения моста изменяется на  $180^\circ$  и производится его уравнивание обычным способом. Если полученное значение  $t g \delta$  существенно отличается от предыдущего, то на шкале устанавливается их полусумма и опять производится коррекция фазы напряжения моста. Циклы коррекции повторяются до практического совпадения значений  $t g \delta$ , измеренных при отличающихся на  $180^\circ$  фазах напряжения моста ( $t g \delta' \approx t g \delta''$ ). Обычно достаточно двух, трех приближений.

В качестве результата измерения принимается полусумма значений  $t g \delta$  и  $C_X$ , полученных при последних двух уравниваниях моста. В практике наиболее приемлемо совместное применение метода совмещения фаз и расчетного метода исключения остаточной погрешности. При этом коррекция фазы напряжения моста фазорегулятором заканчивается при получении положительных значений  $t g \delta$  при двух последовательных измерениях (одного при выбранной фазе, второго - при фазе напряжения питания, измененной на  $180^\circ$ ). Остаточная погрешность исключается расчетом.

Метод совмещения фаз может применяться при токах влияния не превышающих ток объекта ( $k_b < 1$ ). Сравнение с данными табл. 2.3 показывает, что ограничений для его использования в практике энергосистем не имеется.

Результаты двух измерений, отличающихся по фазе напряжения питания на  $180^\circ$ , позволяют вычислить коэффициент влияния.

Примем, что при первом измерении активная и реактивная составляющие измеренного тока были равны суммам соответствующих составляющих токов объекта и влияния. Тогда при втором измерении, после изменения фазы напряжения на  $180^\circ$ , они будут определяться их разностью.

По определению

$$k_{\text{в}} = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{х}}} = \left[ \frac{I_{\text{в.а}}^2 + I_{\text{в.р}}^2}{I_{\text{х.а}}^2 + I_{\text{х.р}}^2} \right]^{1/2},$$

Принято, что

$$I_{\text{в.а}} = 0,5 (I'_{\text{а}} - I''_{\text{а}}); \quad I_{\text{в.р}} = 0,5 (I'_{\text{р}} - I''_{\text{р}});$$

$$I_{\text{х.а}} = 0,5 (I'_{\text{а}} + I''_{\text{а}}); \quad I_{\text{х.р}} = 0,5 (I'_{\text{р}} + I''_{\text{р}});$$

где индексы в и х соответственно относятся к токам влияния и объекта, а индексы а и р - к активным и реактивным составляющим токов; одним штрихом отмечены результаты первого измерения, двумя штрихами - результаты второго.

Совместное решение приведенных соотношений с учетом того, что  $I_{\text{ха}} = \omega C_x U \operatorname{tg} \delta$ , а  $I_{\text{хр}} = \omega C_x U$ , дало

$$k_{\text{в}} = \left[ \frac{(\operatorname{tg} \delta^I C_x^I - \operatorname{tg} \delta^{II} C_x^{II})^2 + (C_x^I - C_x^{II})^2}{(\operatorname{tg} \delta^I C_x^I + \operatorname{tg} \delta^{II} C_x^{II})^2 + (C_x^I + C_x^{II})^2} \right]^{1/2}.$$

Для мостовой схемы

$$k_{\text{в}} = \left[ \frac{(\operatorname{tg} \delta^I R_3^{II} - \operatorname{tg} \delta^{II} R_3^I)^2 + (R_3^I - R_3^{II})^2}{(\operatorname{tg} \delta^I R_3^{II} + \operatorname{tg} \delta^{II} R_3^I)^2 + (R_3^I + R_3^{II})^2} \right]^{1/2}.$$

Для случая, когда  $\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta$  (при этом  $\Theta \approx \delta$ ),

$$k_{\text{в}} \approx \frac{C_x^I - C_x^{II}}{C_x^I + C_x^{II}} = \frac{R_3^I - R_3^{II}}{R_3^I + R_3^{II}}.$$

Ток влияния может быть измерен и непосредственно. При этом надо учитывать, что погрешность измерения определяется током первой гармоники и измерительный прибор (миллиамперметр) должен быть селективным. Для измерения может быть использован предварительно градуированный указатель равновесия моста

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бажанов С.А.** Причины повреждения маслонаполненных вводов 110-500 кВ // Электрические станции. 1974. № 7. С. 53-55.
2. **Локшин М.В.** К анализу профилактических испытаний бумажно-масляной изоляции аппаратов высокого напряжения // Электричество. 1978. № 6. С. 75—78.
3. **Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.** Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов / Под общ. ред. Г.С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Вайда Д.** Исследование повреждений изоляции. М.: Энергия, 1968.
5. **Теория диэлектриков** / И.П. Богородицкий, Ю.М. Волокобинский, А.А. Воробьев, Б.М. Тареев. М.: Энергия, 1965.
6. **Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С.** Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / Под общ. ред. В.П. Ларионова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. **Иерусалимов М.Е., Ильенко О.С.** Абсорбционные явления в неоднородной изоляции: Учебное пособие. — Киев: Киевский политехн. ин-т, 1986.
8. **Шваб А.** Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. - 2-е изд., перераб. и доп.: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983.
9. **Локшин М.Л., Сви П.М.** Измерение диэлектрических потерь высоковольтной изоляции. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1973.
10. **Локшищев М.В.** Влияние постороннего электрического поля на погрешность при определении диэлектрических характеристик высоковольтной изоляции // Электричество. 1976. № 1. С. 36-43.
11. **Сви П.М.** Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988.
12. **Кучеренко В.Г.** Система контроля электрооборудования под рабочим напряжением на подстанции 750 кВ "Винницкая" // Энергетика и электрификация. 1981. № 3. С. 9—10.
13. **Опыт эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений ПО и 220 кВ** / В.Д. Катсон, А.Г. Константинов, В.Н. Осотов и др. // Электрические станции. 1985. № 2. С. 66-67.
14. **Зайцев К.А.** Градуировка схем для измерения характеристик частичных разрядов // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1978. Вып. 5 (85). С. 5—7.
15. **Сви П.М.** Измерение частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем. М.: Энергия, 1977.
16. **Гурин В.В., Сви П.М.** Испытание силовых трансформаторов на частичные разряды в условиях эксплуатации // Электрические станции. 1975. № 5. С. 67-70.
17. **Кучинский Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979.
18. **Кудратиллаев А.С.** Методы и устройства контроля состояния изоляции оборудования и линий высокого напряжения. Ташкент: Фан, 1988.
19. **Миклебаст Р., Хеллман П.** Техника измерений для оценки частичных разрядов при испытании трансформаторов и реакторов напряжением промышленной частоты // Трансформаторы: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-74) / Под ред. СИ. Рабиновича. М.: Энергия, 1978. С. 43-59.
20. **Липштейн Р.А., Шахнович М.И.** Трансформаторное масло. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.
21. **Лизунов С.Д.** Сушка и дегазация изоляции трансформаторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1971.
22. **Гречко О.Н., Горчакова Л.А.,** Взаимосвязь характеристик трансформаторного масла в процессе эксплуатационного старения // Исследование старения и срока службы внутренней изоляции электрооборудования высокого напряжения (Сб. научных трудов НИИПТ) Л.: Энергоатомиздат, 1985. С. 40-45.
23. **Вильпут, Рандокс.** Результаты контрольных испытаний изоляционных масел, применяемых в силовых трансформаторах // Трансформаторы: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / Под ред. С.Д. Лизунова. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 61-72.
24. **Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов.** М.: СПО Союзтехэнерго, 1989.
25. **Степанчук К.Ф., Климович Г.С.** Контроль состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов путем определения количества горючих газов в пространстве над маслом // Изв. вузов. Сер. Энергетика. 1978. № 1. С. 20-25.
26. **Обнаружение повреждений в силовых трансформаторах посредством анализа растворенных в масле газов** / М.А. Смирнов, Г.К. Колобаев, Т.Е. Касаткина и др. // Электротехническая промышленность. Сер.

Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1975. Вып. 7 (51). С. 20-24.

27. **Аракелян В.Г., Сенкевич Е.Д.** Ранняя диагностика поврежденной изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения. Обзорная информация. 1986. Вып. 3 (7).

28. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике. М.: Энергия, 1980.

29. **Дубнова Г.С., Гречко О.Н.** Метод калибровки хроматографа по одному газу // Энергетик, 1982. № 8. С. 31-32.

30. **Методические** указания по обнаружению повреждений в силовых трансформаторах с помощью анализа растворенных в масле газов. М.: СПО Союзтехэнерго, 1979.

31. **Выявление** повреждения и определение места его возникновения в трансформаторе / Тибо-Карбалеяра, Аллэр, Делайе и др. // Трансформаторы: Перевод докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-82) / Под ред. С.Д. Лизунова. М.: Энергоатомиздат. 1984. С. 14-23.

32. **Перспективы** тепловизионных методов контроля в энергетике / Б.Д. Козицкий, Н.А. Гнатюк, Л.Д. Буць и др. // Электрические станции. 1981. № 3. С. 72-73.

33. **О тепловизионном** контроле электротехнического оборудования / Д.С. Масленников, А.Г. Константинов, В.Н. Осотов и др. // Электрические станции. 1985. № 11. С. 73-75.

34. **Об опыте** использования средств тепловизионной техники в энергетике. Инф, письмо № 13-87/СПО Союзтехэнерго, 1987.

35. **Дроздов В.А., Сухарев В.И.** Термография в строительстве. М.: Стройиздат, 1987.

36. **Жуков А.Г., Горюнов А.Н., Кальфа А.А.** Тепловизионные приборы и их применение / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Радио и связь, 1983.

37. Соколов В.В. Повышение эффективности диагностики состояния мощных силовых трансформаторов // Энергетика и электрификация. Сер. Эксплуатация и ремонт электростанций. (Информэнерго). 1985. Вып. 3.

38. **Анализ** растворенных в масле газов и его использование при обслуживании трансформаторов / Кавамура, Кавада, Андо и др. // Трансформаторы: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / Под ред. С.Д. Лизунова. М.: Энергоатомиздат. 1988. С. 46-54.

39. **Усовершенствование** методов теплового расчета трансформаторов и контроля их состояния / Бартон, Грехем, Холл и др. // Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляции: Перевод докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-84) / Под ред. С.Д. Лизунова. М.: Энергоатомиздат. 1986. С. 112-127.

40. **Левит А.Г., Поляков В.С., Шмерлинг Л.А.** Из опыта измерений частичных разрядов силовых трансформаторов в эксплуатации // Из опыта работы высоковольтных сетей Ленэнерго. Л.: Энергоатомиздат. 1986. С. 101-111.

41. **Баранник Е.Я., Ковтун А.Ю.** Определение влагосодержания масла трансформатора с помощью влагочувствительного элемента на основе кабельной бумаги // Вестник Киевского политехнического института. Электроэнергетика. 1988. Вып. 25. С. 55—56.

42. **Повышение** эффективности традиционных методов контроля изоляции трансформаторов / Б.В. Ванин, Ф.Я. Левин, В.В. Соколов и др. // Электрические станции. 1983. № 8. С. 52-56.

43. **Абрамов В.Б.** Контроль за влагосодержанием маслобарьерной изоляции // Энергетика и электрификация. 1985. № 1. С. 30-32.

44. **Конов Ю.С., Короленко Б.В., Федорова В.П.** Обнаружение повреждений трансформаторов при коротких замыканиях // Электрические станции. 1980. № 7. С. 46-48.

45. **Определение** деформаций обмоток крупных силовых трансформаторов / В.В. Соколов, С.В. Цурпал, Ю.С. Конов и др. // Электрические станции. 1988. № 6. С. 52-56.

46. **Трунин Е.С., Хасанов Р.А.** Диагностика вибрационного состояния силовых трансформаторов в условиях электростанций // Электрические станции. 1987. № 6. С. 66—68.

47. **Опыт** эксплуатации высоковольтных маслонаполненных вводов / Е.М. Вида, Ю.К. Ефимов, А.Г. Константинов и др. // Электрические станции. 1989. № 3. С. 57—59.

48. **Влияние** увлажнения на электрические характеристики бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа при переменном напряжении промышленной частоты / Г.С. Кучинский, Г.Г. Лысаковский, Ю.В. Берзин и др. // Электричество. 1969. № 10. С. 69-72.

49. **Айзетраутс Э.В., Апинис Г.А.** Об опыте эксплуатации трансформаторов тока ТФКН-330 // Электрические станции. 1980. № 4. С. 61-65.

50. **Поляков В.С., Аристов Е.В.** О причинах повреждений и способах выявления развивающихся дефектов в изоляции трансформаторов тока типа ТФУМ-330А-VI (ТФКН-330) // Из опыта работы высоковольтных сетей Ленэнерго. Л.: Энергоатомиздат, 1986. С. 111—127.

51. **Зайцев К.А., Шарлот С.А.** Частичные разряды как фактор контроля изоляции электрооборудования в эксплуатации // Электротехника. 1983. № 4. С. 29—30.

52. **Носулько Д.Р., Соколов В.В., Назаров А.И.** Опыт эксплуатации герметичных маслонаполненных вводов силовых трансформаторов // Электрические станции. 1987. № 8. С. 54-58.

53. **Бочаров В.И., Вольпов К.Д.** Повышение эффективности контроля состояния бумажно-

конденсаторной изоляции трансформаторов тока // Энергетика и электрификация. Сер. Эксплуатация и ремонт электрических сетей (Информэнерго). 1985. Вып. 9.

54. **Малевски, Дувиль, Беланже.** Система диагностики изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения в эксплуатации // Трансформаторы: Переводы докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-88) / Под ред. С.Д. Лизунова. М.: Энергоатомиздат. 1988. С. 7-20.

55. **Bargigia A., Stevanato F.** Metodi per la diagnosi in esercizio di scaricatori ad ossido di zinco // L'energia elettrica. 1985. N 10. P. 437-446.

56. **Harrold R.T.** The relationship between ultrasonic and electrical measurements of under oil corona sources // Conf. Diagn. Test. High Voltage Power Appar. Serv. 1973. Part 1. London. 1973. P. 59-64.

57. **Kruger M.** Prufung der dielektrischen Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten // OZE. 1987. Jg40. N5. S. 116-189.

58. **Wolff R.F.** New technique pinpoints fault locations // Electr. World. 1981. V. 195. N 5. P. 119-121.

59. **Kuszke H.** Pomiaru termowizyjne temperatur w energetyce / Bui. Energopomiar, 1974. N 5/6. S.33-36 // Energetika. 1974, N 12.

60. **Bosetto D.e.a.** Tecniche di diagnosi per la valutazione, dello stato dei Trasformatori di grande potenza // L'Energia Elettrica. 1985. N 10. P. 399-410.

61. **Kamata Y.** Diagnostic Methods For Power Transformer Insulation // IEEE Trans. On Electric Insulation. 1986. V. EI-21. N 6. P. 1045-1048.

62. **Dick E.P., Erven C.C.** Transformer diagnostic testing by frequency response analysis // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1978. V.PAS-97. N 6. P. 2144-2153.

63. **Train D., Mercier A., Thorne D.** The detection of partial discharges in high voltage potential transformers in service // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1974. V. 93. N 6. P. 1909—1915.

64. **Saily J.** Multiple explosions of current transformers due to poor quality of materials used and inadequate acceptance tests. CIGRE Symposium. Vienna. 1987. N 1020-01.

65. **Aquet M.** Mesures dielectriques preventives sur des transformateurs de mesure a haute tension en site propre // Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. 1982. V. 73, N 7. P. 300-305.

66. **Webb M.** Anticipating failures by dissolved—gas monitoring // Power Engineer Journal. 1987. V. 1. N 5. P. 295-299.