

На правах рукописи

Редько Людмила Анатольевна

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
В ПРИБОРАХ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ**

**Специальность:05.11.13 - Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2004

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Кулешов Валерий Константинович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Муравьев Виталий Васильевич

доктор технических наук, профессор

Смирнов Геннадий Васильевич

Ведущая организация:

Закрытое акционерное общество “Сибкабель”, г. Томск

Защита состоится “21” декабря 2004 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу:

Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, Библиотека НИИ интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53

Автореферат разослан “__” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Винокуров Б.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Основным способом контроля качества электрической полимерной изоляции во время производства являются испытания "на проход" высоким напряжением в соответствии с ГОСТ 2990 – 78 «Кабели, провода, шнуры. Методы испытания напряжением». Данный способ испытаний относится к электроискровым способам неразрушающего контроля. Испытания происходят следующим образом: при движении кабеля по производственной линии жила кабеля заземляется, а к поверхности изоляции прикладывается высокое напряжение посредством специальных электродов. В момент прохождения дефектного места изоляции кабеля через электродный узел возникает пробой изоляции. Пробой фиксируется по возрастанию тока, протекающего через изоляцию от электродного узла на заземлённую токоведущую жилу кабеля. При этом «здоровая» изоляция не повреждается, а место с дефектной изоляцией помечается прогаром от электрического пробоя. Испытательное напряжение, как правило, находится в пределах от 1 до 50 кВ.

Контроль производится посредством приборов, которые принято называть аппаратами сухих испытаний или высоковольтными испытателями изоляции кабеля. В настоящее время на отечественном рынке приборов контроля кабельного производства представлены производители из стран западной Европы, а также России, значительно реже США. Жесткая конкуренция с ведущими западноевропейскими производителями заставляет отечественных производителей улучшать технико-экономические показатели выпускаемой продукции.

В существующих высоковольтных испытателях изоляции кабеля можно выделить следующие недостатки способов построения:

1. В соответствии с ГОСТ 2990 – 78 в течение испытания значение испытательного напряжения следует поддерживать с отклонением не более 5%. В большинстве высоковольтных испытателях изоляции измерение высокого выходного напряжения происходит по низковольтной стороне при помощи дополнительной измерительной обмотки высоковольтного трансформатора. В приборах с импульсным испытательным напряжением приходится проводить

измерения по высоковольтной стороне с помощью высоковольтных делителей напряжения. Обычное измерение напряжения по первичной низковольтной стороне приводит к существенным погрешностям, значение которых превышает установленные стандартом значения. Это происходит потому, что высоковольтный трансформатор обладает большой индуктивностью рассеяния, а импульсы напряжения высокой скоростью нарастания, вследствие чего происходит существенное отличие напряжения на первичной обмотке и пересчитанного в первичную обмотку выходного испытательного напряжения. Наличие высоковольтного делителя усложняет конструкцию испытателей за счет добавления еще одного высоковольтного узла. При испытательных напряжениях от 1 до 50 кВ такое изменение требует существенных затрат. К тому же экономически выгодно, чтобы для большинства типов испытателей применялся унифицированный корпус. В связи с этим необходимо разработать методы измерения испытательного импульсного напряжения по низковольтной стороне с уровнями погрешностей, удовлетворяющим требованиям стандарта.

2. Уровень максимального выходного тока испытателей превышает безопасный уровень, установленный ГОСТ 12.1.038-82 «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов». Снижение мощности испытателя не может быть решением проблемы, так как основной ток через изоляцию кабеля является емкостным, а при попадании человека под высокое напряжение ток имеет активный характер. Поэтому необходимо разработать способы снижения выходного активного тока высоковольтных испытателей изоляции при сохранении уровня емкостного тока.

Цель диссертационной работы.

Теоретические и экспериментальные исследования высоковольтных испытателей изоляции кабеля, создание методики их расчета и оптимизации режима работы.

Методы исследований. На разных этапах исследования применялись дифференциальное и интегральное исчисления, спектральный анализ и др. Для решения поставленных задач использовались методы оптимизации и машинно-

го моделирования. Проверка теоретических результатов осуществлялась с помощью экспериментальных исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Доказано, что измерять амплитуду испытательного напряжения в соответствии с ГОСТ 2990-78 можно по низковольтной стороне, используя цепочку, имитирующую цепь высоковольтного трансформатора и испытуемой изоляции.

- Доказано, что эффективным способом снижения погрешности измерения амплитуды испытательного напряжения в импульсных аппаратах является уменьшение скорости изменения тока через индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора $di_{L_S}(t)/dt$ за счет введения дополнительного дрос-

селя в цепь между генератором импульсов и первичной обмоткой высоковольтного трансформатора.

- Доказано, что еще одним способом измерения амплитуды испытательного напряжения по низковольтной стороне является способ вычисления испытательного напряжения по току первичной обмотки и напряжению на ней при известных значениях индуктивности намагничивания и индуктивности рассеяния, а так же межвитковой емкости вторичной обмотки высоковольтного трансформатора.

- Показано, что попадание человека под высокое выходное напряжение испытателя можно определить по смене характера нагрузки относительно зажимов первичной обмотки высоковольтного трансформатора.

- Экспериментально доказано, что при попадании эквивалента человека под напряжение (замена сопротивлением 1 кОм в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82) испытатель фиксирует это факт как пробой изоляции. В результате предложен способ, суть которого заключается в периодическом отключении, высокого напряжения при приходе активного сигнала со схемы пробоя.

На защиту выносятся следующие положения:

- Снижение погрешности измерения амплитуды испытательного напряжения в импульсных аппаратах можно достичь уменьшением скорости изменения тока через индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора за счет

введения дополнительного дросселя в цепь первичной обмотки высоковольтного трансформатора.

- Способом измерения амплитуды испытательного напряжения косвенным способом по низковольтной стороне является способ вычисления испытательного напряжения по току первичной обмотки и напряжению на ней при известных значениях электрических параметров высоковольтного трансформатора.
- Попадание человека под высокое выходное напряжение испытателя можно определить по смене характера нагрузки относительно зажимов первичной обмотки высоковольтного трансформатора.
- Обеспечение электробезопасности обслуживающего персонала при работе с высоковольтными испытателями изоляции можно с помощью периодического отключения высокого напряжения при формировании схемой пробоя активного уровня сигнала.

Достоверность и обоснованность. Все выводы, полученные в результате теоретических исследований, проверены и подтверждены путем экспериментальных исследований.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

9-ой и 10-ой Международной научно – практической конференции “Современные техника и технологии” Томск, 2003 г., 2004 г.;

8-ой Международной научно – практической конференции «Качество – стратегия XXI века», г. Томск, 2003;

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Разработан и внедрен способ обеспечения электробезопасности высоковольтных испытателей изоляции по периодическому отключению высокого напряжения. Способ внедрен на ООО «Эрмис+» г. Томск.

Разработан и внедрен способ обеспечения точности измерения амплитуды испытательного напряжения в соответствии с ГОСТ 2990-78 в импульсных испытателях путем включения дополнительного дросселя в цепь между генератором импульса и первичной обмоткой высоковольтного трансформатора. Способ внедрен на ООО «Эрмис+» г. Томск.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 4-х глав и 3 -х приложений, содержит 131 страницу, включая 43 иллюстрации, 5 таблиц и список литературы из 72 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность поиска новых принципов построения высоковольтных испытателей изоляции кабелей.

Первая глава посвящена анализу параметров приборов контроля изоляции кабельных изделий высоким напряжением методом «на проход» (которые принято называть аппаратами сухих испытаний (АСИ) или высоковольтными испытателями). Также проведен анализ методов измерения испытательного напряжения в приборах с импульсным испытательным напряжением (ИАСИ) и способов защиты от поражения электрическим током в приборах звуковой частоты (ЗАСИ).

По результатам проведенного анализа сделаны следующие выводы.

1. Контроль качества изоляции высоким напряжением, относится к электроискровым методам контроля, является основным видом контроля качества изоляции кабельных изделий и регламентирован ГОСТ 2990-78. Контроль производится с помощью приборов, называемых высоковольтными испытателями, которые позволяют контролировать кабельные изделия с параметрами изоляции, изменяющимися в широком диапазоне: $C_{из} = C_{из ном} \pm 70\%$, $R_{из} = R_{из ном} \pm 90\%$.

2. В выпускаемых в настоящее время высоковольтных испытателях изоляции «на проход» типа ИАСИ амплитуда испытательного напряжения измеряется непосредственно на выходе испытателя. Датчиком является емкостной или активно-емкостной делитель. В других типах испытателей, например ЗАСИ, ПЧ, испытательное напряжение измеряется косвенным методом, по напряжению на первичной обмотке высоковольтного трансформатора. С метрологической точки зрения этого способа достаточно для обеспечения требуемой ГОСТ точности измерения $\delta=5\%$. Измерение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора значительно упрощает конструкцию устройства за счет исключения дорогостоящего и громоздкого высоковольтного узла (делителя). В связи с этим возникает необходимость в разработке способов, позволяющих

проводить измерения высокого напряжения в испытателях типа ИАСИ так же как и в других по напряжению на первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Это позволит упростить конструкцию ИАСИ и использовать для производства нескольких типов высоковольтных испытателей унифицированную конструкцию.

3. Не все производимые в России высоковольтные испытатели изоляции кабеля методом «на проход» по уровню тока прикосновения удовлетворяют требованиям ГОСТ 12.1.038 – 82. Продаваемые в России высоковольтные испытатели изоляции ведущих мировых производителей имеют значительно меньшие уровни токов прикосновения по сравнению с российскими аналогами. Однако и они не всегда соответствуют российским стандартам. Методы достижения зарубежными производителями имеющихся показателей по безопасности не разглашаются. В этой связи возникает необходимость в разработке способов обеспечения электробезопасности персонала, работающего с высоковольтными испытателями изоляции в соответствии стандарту.

Во второй главе рассматриваются методы измерения испытательного напряжения в импульсных аппаратах сухих испытаний (ИАСИ) по первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

Во время контроля качества изоляции кабеля значение испытательного напряжения следует измерять и поддерживать с отклонением не более 5%, согласно ГОСТ 2990-78.

Схему замещения высоковольтного каскада испытателя ИАСИ можно представить в виде, изображенном на [рис. 1](#).

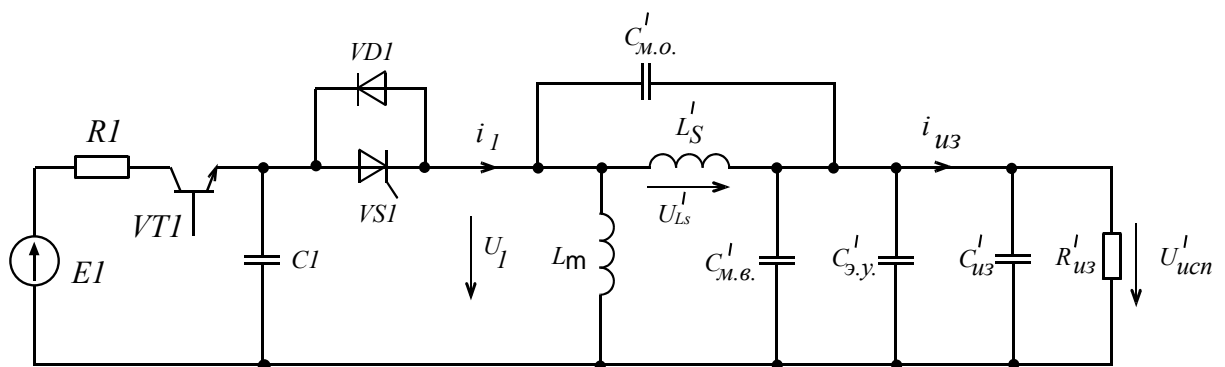


Рис. 1. Схема замещения высоковольтного каскада ИАСИ

Где: EI - источник постоянного напряжения; RI – ограничительный резистор; VTI – транзисторный ключ; C_I – накопительный конденсатор; $C'_{м.в.}$ - межвитковая емкость высоковольтного трансформатора; $C'_{м.о.}$ - межобмоточная емкость; $C'_{э.у.}$ - емкость электродного узла; $C'_{из}$ - емкость изоляции кабеля; $R'_{из}$ - сопротивление изоляции кабеля; L_μ - индуктивность намагничивания трансформатора; L'_S - индуктивность рассеяния; VSI - коммутирующий тиристор; VDI - обратный диод; U_I - напряжение на первичной обмотке; $U'_{исп}$ - испытательное напряжение.

Приведенная на рис. 1 схема является одним из вариантов схем ИАСИ, исследованных в диссертационной работе. Отличия исследованных схем заключались как правило в способе заряда и разряда накопительного конденсатора. Общим для схем являлся принцип формирования импульса испытательного напряжения, заключающийся в предварительном заряде накопительного конденсатора и последующем разряде его на первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Так же общими для исследованных схем является причина возникновения погрешности при измерениях испытательного напряжения по первичной стороне.

Перед открытием тиристора VSI конденсатор C_I заряжен до требуемого напряжения, все электрические процессы по принципиальной схеме справа от тиристора VSI (рис. 1) прекращены, испытательное напряжение равно нулю. При отпирании тиристора VSI за время равное единицам микросекунд напряжение до которого заряжен накопительный конденсатор C_I прикладывается к первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Далее происходит разряд накопительного конденсатора и ток протекает по двум контурам $C_I VSI L_\mu$ и $C_I VSI L'_S C_\Sigma R_{изол}$ (где: $C_\Sigma = C'_{м.в.} + C'_{э.у.} + C'_{из}$). Ток контура $C_I VSI L_\mu$ значительно меньше чем ток контура $C_I VSI L'_S C_\Sigma R_{изол}$, так как индуктивность намагничивания L_μ значительно больше индуктивности рассеяния L'_S высоковольтного трансформатора. Перезаряд конденсатора C_I происходит по цепям $C_I VDI L_\mu$ и $C_I VDI L'_S C_\Sigma R_{изол}$. Тиристор VSI заперт. По истечению процесса

перезаряда накопительного конденсатора CI до некоторого положительного напряжения диод VDI запирается. На данном этапе остается один контур $L_\mu L'_S C_\Sigma R_{\text{изол}}$, частота колебаний и амплитуда тока в котором значительно уменьшается по сравнению с предыдущим колебанием. Это связано с включением в цепь индуктивности намагничивания L_μ . В связи с потерями в активном сопротивлении контролируемой изоляции и во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора колебания быстро затухают. К следующему процессу разряда накопительного конденсатора CI переходные процессы в схеме полностью исчезают. При этом через зарядную цепь конденсатор CI заряжается до напряжения, требуемой амплитуды. Схема вернулась в исходное состояние. Далее при отпирании тиристора VSI процессы в схеме повторяются.

Из приведенного выше анализа видно, что при одинаковой амплитуде импульса, прикладываемого к первичной обмотке высоковольтного трансформатора, амплитуда импульса испытательного напряжения, прикладываемого к изоляции, может иметь достаточно большой разброс для различных параметров контролируемой изоляции (емкости и сопротивления). Это в свою очередь приводит к значительным погрешностям измерения амплитуды испытательного напряжения, в том случае, если измерительный сигнал будет сниматься с первичной обмотки трансформатора. Для уменьшения погрешности измерения испытательного напряжения можно ввести дополнительную цепь, показанную на [рис. 2](#).

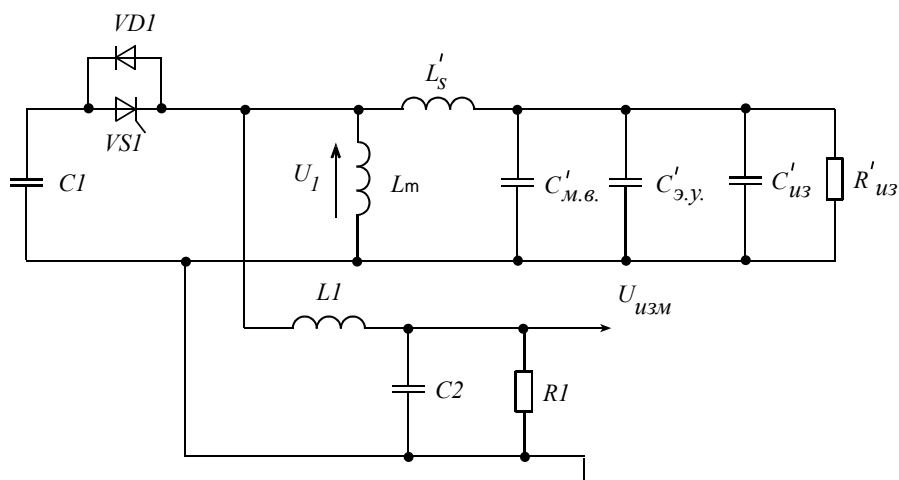


Рис. 2. Схема замещения высоковольтного каскада с корректирующей цепью

Где L_1 , C_2 , и R_1 – параметры корректирующей цепи. Параметры корректирующей цепи выбраны таким образом, что: $L_1 = L'_S$; $C_2 = C'_{м.в.} + C'_{э.у.} + C'_{из}$; $R_1 = R'_{из}$. Очевидно, что в такой схеме напряжения $U_{изм}$ и $U'_{исп}$ будут совпадать и по фазе и по амплитуде. Однако в процессе работы испытателя изменяется тип, диаметр и толщина изоляции контролируемого кабеля, а значит, меняются параметры его схемы замещения $C_{из}$ и $R_{из}$. Изменение параметров изоляции приведет к отличию $U_{изм}$ от $U'_{исп}$.

В пакете схемотехнического моделирования ORCAD, были построены зависимости $K_{мп1} = \frac{U'_{исп.ампл}}{U_{1.ампл}}$ и $K_{мп2} = \frac{U'_{исп.ампл}}{U_{изм.ампл}}$ от изменения сопротивления $R_{из}$ и емкости изоляции $C_{из}$ контролируемого кабеля для конкретного работающего испытателя со следующими параметрами: $C_1 = 8$ мкФ; $L_\mu = 16,45$ мГн; $L'_S = 0,217$ мГн; $C_{м.в.} = 87$ пФ; $C'_{м.в.} = 4$ мкФ; $C_{э.у.} = 5$ пФ; $C'_{э.у.} = 0,23$ мкФ; $C_{из} = 10$ пФ ÷ 300 пФ; $C'_{из} = 0,46 \div 13,8$ мкФ; $R_{из} = 1 \div 10$ МОм; $R'_{из} = 22 \div 220$ Ом; $W_1 = 75$ витков; $W_2 = 16000$ витков (рис. 3, рис. 4). Чтобы оценить влияние корректирующей цепи на погрешность измерения напряжения был вычислен максимальный уход от средних значений коэффициентов трансформации $K_{мп1}$ и $K_{мп2}$ при изменении активного сопротивления и емкости изоляции контролируемого кабеля. Под средним значением коэффициента трансформации понимается величина $K_{мп.ср} = \frac{K_{min} + K_{max}}{2}$, во всем диапазоне изменений параметров контролируемой изоляции. Под максимальной погрешностью передачи амплитуды испытательного напряжения принята величина $\delta = \frac{K_{ср} - K_{min}}{K_{ср}} \cdot 100\%$.

До введения цепи при изменении активного сопротивления изоляции контролируемого кабеля от 1 МОм до 10 МОм $\delta = 7,45\%$, после введения $\delta = 6,79\%$. До введения цепи при изменении емкости изоляции контролируемого кабеля от 10 пФ до 300 пФ $\delta = 40,88\%$, после введения $\delta = 34,11\%$. При сохранении передачи амплитуды испытательного напряжения с погрешностью $\delta = 5\%$, параметры изоляции могут изменяться в узком диапазоне $C_{из} = C_{из ном} \pm 10\%$, $R_{из} = R_{из ном}$

$\pm 50\%$, что недостаточно для существующих высоковольтных испытателей, рассчитанных на диапазоны изменения параметров нагрузки $C_{из} = C_{из\ ном} \pm 70\%$, $R_{из} = R_{из\ ном} \pm 90\%$.

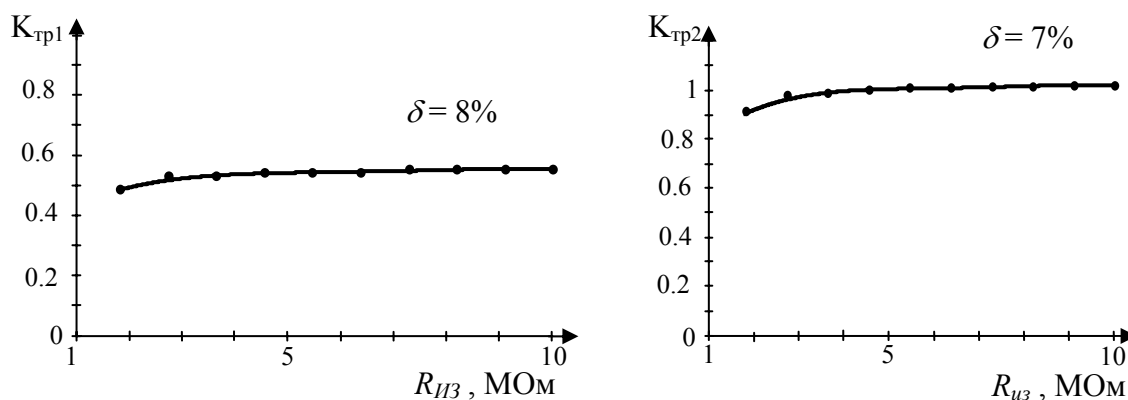


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трансформации $K_{мп1}$ и $K_{мп2}$ от изменения активного сопротивления контролируемой изоляции $R_{из}$ ($U_{исн} = const$)

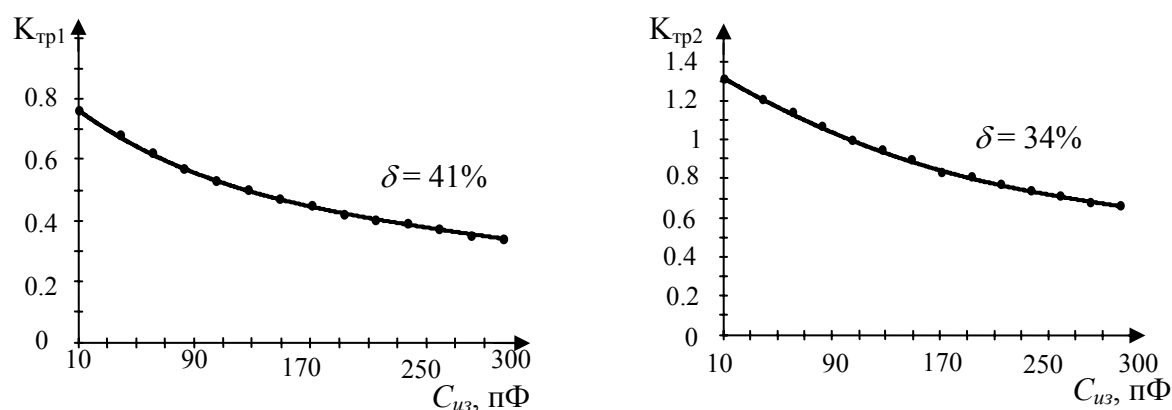


Рис. 4. Зависимости коэффициентов трансформации $K_{мп1}$ и $K_{мп2}$ от изменения емкости контролируемой изоляции $C_{из}$ ($U_{исн} = const$)

Исходя из результатов моделирования, основное влияние на погрешность оказывает изменение емкости изоляции кабеля $C_{из}$. Это вызвано тем, что модуль комплексного сопротивления емкости изоляции кабеля, как правило, на порядок ниже активного сопротивления изоляции кабеля.

Из приведенного анализа видно, что для высоковольтных испытателей с корректирующей цепью зависимость коэффициента трансформации от изменения параметров контролируемой изоляции снижается примерно с 41% до 34%, что, безусловно, является положительным эффектом.

Предложенный способ уменьшения погрешности измерения испытательного напряжения может быть использован для устройств с малой нелинейностью, где такой меры достаточно для получения погрешности меньше 5%. А так же этот способ может использоваться совместно с другими способами для повышения их эффективности.

В общем случае существенная зависимость коэффициента трансформации от изменения параметров контролируемого кабеля является следствием того, что высоковольтный трансформатор и изоляция контролируемого кабеля являются частью генератора импульсов, от которой напрямую зависят параметры генерируемого импульса (рис. 1). Это делается разработчиками испытателей намеренно для упрощения схемы устройства.

Очевидно, что зависимость коэффициента трансформации от изменения параметров контролируемого кабеля возникает из-за падения напряжения на индуктивности рассеяния высоковольтного трансформатора U'_{L_S} . Причем известно:

$$U'_{L_S}(t) = L_S \cdot di'_{L_S}(t)/dt \quad (1)$$

Отсюда можно сделать вывод, что для уменьшения U'_{L_S} , а значит и нелинейности необходимо снижать либо индуктивность рассеяния L_S , либо скорость изменения тока через индуктивность $di'_{L_S}(t)/dt$.

Уменьшить индуктивность L_S в высоковольтном трансформаторе затруднительно. Это требует изменения конструктивных параметров трансформатора. Например, сближения первичной и вторичной обмоток, т.е. улучшения магнитной связи между обмотками. При этом резко возрастут требования к изоляционным материалам и усложнится конструкция высоковольтного трансформатора, что, в свою очередь, приведет к удорожанию высоковольтного трансформатора и высоковольтного испытателя в целом, и может оказаться недостаточной мерой для получения требуемой точности.

Предлагается ввести в схему изменение, которое значительно уменьшит влияние высоковольтный трансформатора и изоляции контролируемого кабеля на частоту заполнения и на амплитуду импульса. Введение в цепь высоко-

вольтного испытателя дополнительного дросселя L_{don} , между генератором импульсов и первичной обмоткой высоковольтного трансформатора, приведет к снижению скорости изменения тока $di'_{L_S}(t)/dt$, а значит и к уменьшению $U'_{L_S}(t)$ и нелинейности. Это было подтверждено экспериментально и в ходе анализа математической модели. При соотношении $L_{don} = 10L'_S$ погрешность измерения амплитуды испытательного напряжения составляет не более $\delta = 3\%$, во всем диапазоне изменений параметров контролируемой изоляции. В результате можно сделать вывод о том, что описанный выше способ позволяет производить измерения испытательного напряжения косвенно, по низковольтной стороне при обеспечении точности измерений в соответствии со стандартом. В работе также приводится методика выбора значения индуктивности L_{don} . Однако, дроссель L_{don} обладая индуктивностью в несколько миллигенри (единицы), должен пропускать токи в несколько ампер (иногда более 10А). В тех случаях, когда необходимо уменьшить габариты дросселя L_{don} можно использовать, как дополнение, корректирующую цепь, описанную выше.

Испытательное напряжение $U'_{исн}$ повторяет напряжение на первичной обмотке с точностью до падения на индуктивности рассеяния.

На рис. 5. изображена схема замещения выходного каскада высоковольтного испытателя.

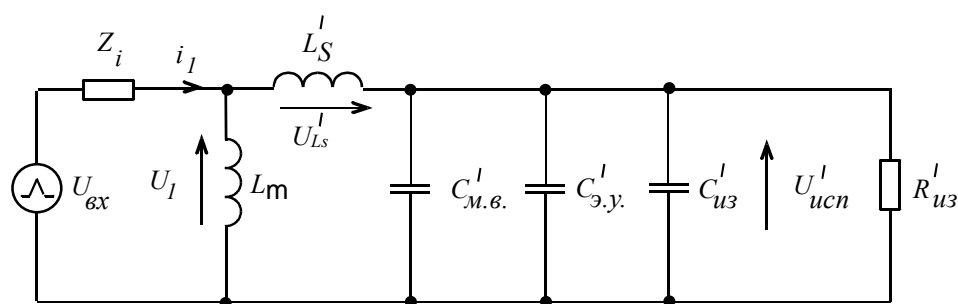


Рис. 5. Схема замещения выходной части высоковольтного испытателя

Где $U_{вх}$ - источник переменного напряжения; Z_i - внутреннее сопротивление источника изоляции; L_{don} - дополнительный дроссель; L'_{S2} индуктивности рассеяния первичной обмотки высоковольтного трансформатора; L_{μ} - индуктивность

намагничивания; $C'_{э.у.}$ - емкость электродного узла; C'_u - емкость изоляции кабеля; R'_u - активное сопротивление изоляции кабеля

Исходя из [рис.5](#) можно записать следующие уравнения:

$$U'_{исн}(t) = U_1(t) - U'_{L_S}(t) \quad (2)$$

После подстановки в формулу 3 известных из электротехники выражений напряжения и тока на индуктивности, и приведения выражения к первичной обмотке высоковольтного трансформатора получим:

$$U'_{исн}(t) = K_1 \cdot U_1(t) - K_2 \cdot di_1(t) / dt \quad (3)$$

$$\text{Где: } K_1 = \frac{W_2}{W_1} \cdot \left(1 + \frac{L_S}{L_\mu} \cdot \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 \right); \quad K_2 = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^3 \cdot L_S$$

Величины L_μ и L'_S постоянны для конкретного трансформатора. А величины $di_1(t)/dt$ и $U_1(t)$ могут быть измерены в процессе работы в/в трансформатора. Можно вычислять конечный результат измерений с помощью микропроцессорного блока измерений.

Структурная схема высоковольтного испытателя изоляции типа ИАСИ, с использованием метода вычисления поправки $U'_{L_S}(t)$ приведена на [рис. 6](#).

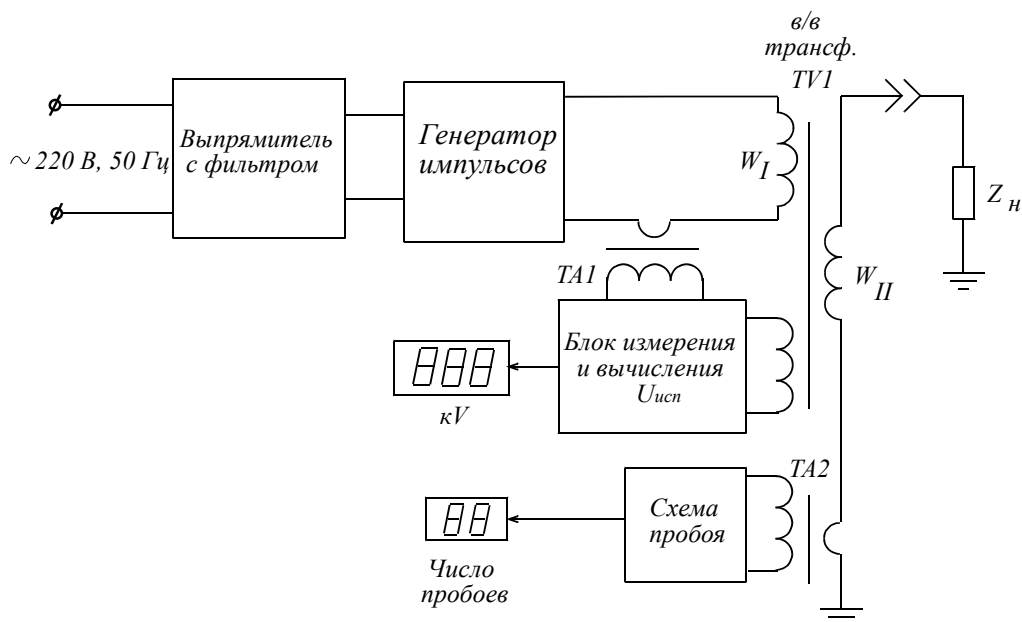


Рис. 6. Структурная схема в/в испытателя изоляции типа ИАСИ

В третьей главе рассматриваются способы обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала высоковольтных испытателей качества изоляции кабельных изделий типа ЗАСИ.

На рис. 7 приведена упрощенная схема замещения выходной части высоковольтного испытателя изоляции типа ЗАСИ.

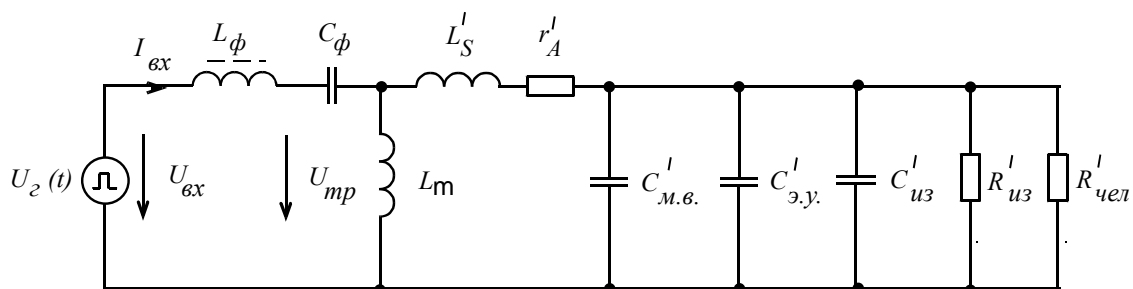


Рис. 7. Схема замещения выходной части в/в испытателя типа ЗАСИ

В ходе экспериментов и анализа схемы замещения высоковольтного испытателя в пакете схемотехнического моделирования ORCAD было выяснено, что при изменении нагрузки (емкости и активного сопротивления изоляции), а так же при пробое изменится характер тока I_{ex} . В режиме, при котором нагрузкой испытателя является изоляция кабеля ток I_{ex} носит емкостной характер. А при попадании человека под напряжение, на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора ток I_{ex} – становится индуктивным.

Индуктивный характер тока I_{ex} может быть вызван не только попаданием человека под высокое напряжение, но и пробоем изоляции испытуемого кабеля. Однако этот факт не будет являться препятствием для применения предлагаемого способа защиты, так как по существующим стандартам при пробое изоляции испытательное напряжение должно быть временно снято.

На основе вышеизложенного можно предложить следующую схему защиты обслуживающего персонала высоковольтного испытателя от поражения электрическим током (рис. 8). Где *С.О.З.Ф.* - схема определения знака фазы ; $C_{из}$ - емкость изоляции кабеля; $R_{из}$ - активное сопротивление изоляции кабеля; *ТI* - высоковольтный трансформатор; *ТАI* - трансформатор тока; W_I и W_{II} - первичная и вторичная обмотки высоковольтного трансформатора соответственно; W_u - измерительная обмотка высоковольтного трансформатора.

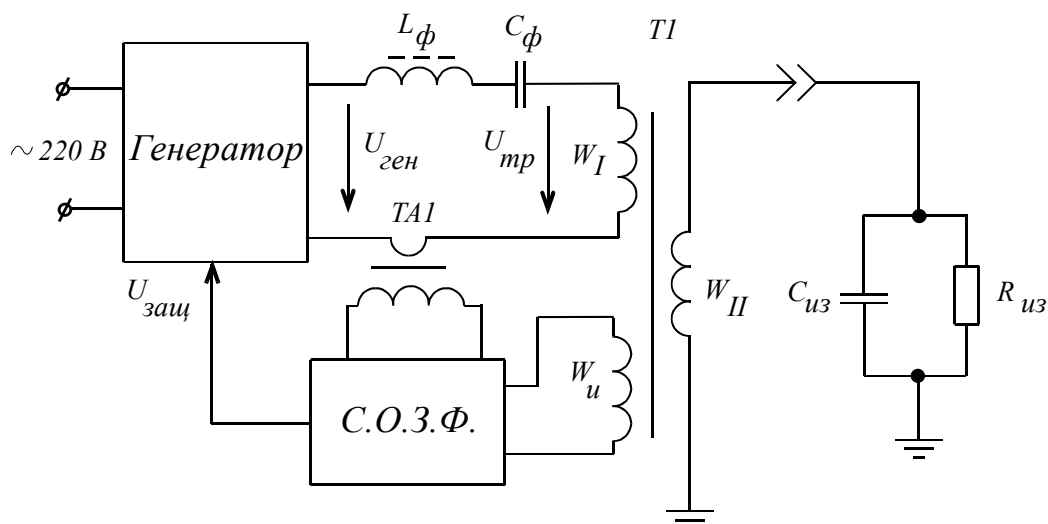


Рис. 8. Схема защиты обслуживающего персонала в/в испытателя от поражения электрическим током

При попадании человека под высокое напряжение ток первичной обмотки высоковольтного трансформатора становится индуктивным. В этом случае схема *СОФС* выдает сигналы уровня на генератор, а встроенная схема защиты, в зависимости от заданного алгоритма, либо ограничивает ток $I_{\text{вх}}$ до безопасного уровня путем снижения напряжения $U_{\text{ген}}$, либо вообще прекращает работу генератора до установления причин перегрузки.

Однако, входной ток $I_{\text{вх}}$ будет иметь активно – индуктивный характер при очень малой, и одновременно очень большой суммарной емкости $C'_{\text{из}} + C'_{\text{мв}} + C'_{\text{зв}}$. Для крайних случаев $(C'_{\text{из}} + C'_{\text{мв}} + C'_{\text{зв}}) \rightarrow 0$ и $(C'_{\text{из}} + C'_{\text{мв}} + C'_{\text{зв}}) \rightarrow \infty$, схемы замещения силовой части представлены на **рис. 9, а и б**, соответственно.

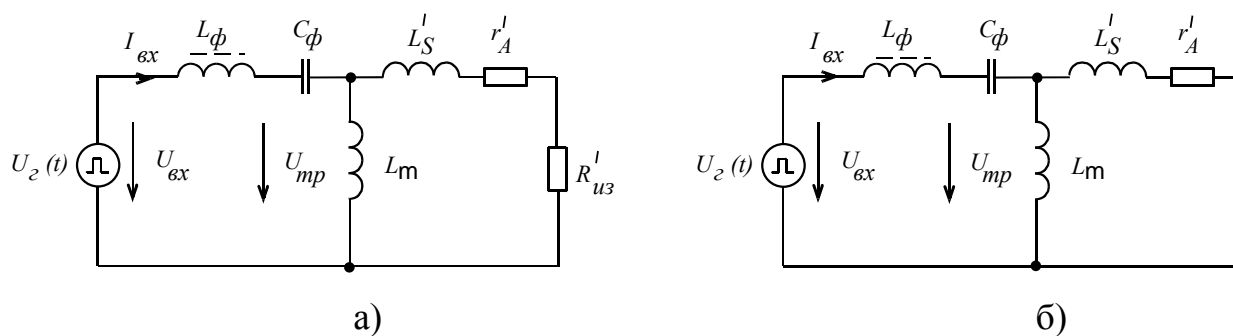


Рис. 9. Схема замещения силовой части высоковольтного испытателя для случаев: *а* - $(C'_{\text{из}} + C'_{\text{мв}} + C'_{\text{зв}}) \rightarrow 0$; *б* - $(C'_{\text{из}} + C'_{\text{мв}} + C'_{\text{зв}}) \rightarrow \infty$

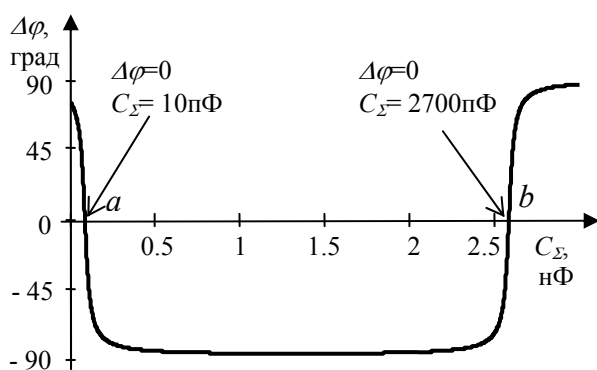


Рис. 10. Зависимость фазового сдвига между $I_{вх}$ и $U_{тр}$ от суммарной емкости ($C_{из} + C_{м.в.} + C_{э.у.}$)

На рис. 10 приведена зависимость фазового сдвига между $I_{вх}$ и $U_{тр}$ от суммарной емкости ($C_{из} + C_{м.в.} + C_{э.у.}$). Номиналы остальных элементов взяты из схемы замещения реального высоковольтного испытателя. Из рисунка видно, что на некоторых участках и без попадания человека под напряжение ток $I_{вх}$ имеет активно – индуктивный характер. Точка “а” соответствует суммарной емкости около 10 пФ. В реальном испытателе даже при отсутствии кабеля в электродном узле, т.е. $C_{из} = 0$, $R_n \rightarrow \infty$, суммарной емкости электродного узла и межвитковой ($C_{м.в.} + C_{э.у.}$) ≈ 100 пФ достаточно, чтобы ток первичной обмотки $I_{вх}$ имел активно – емкостной характер. Точка “b” на рис. 10 соответствует значению суммарной емкости ($C_{из} + C_{м.в.} + C_{э.у.}$) ≈ 2700 нФ. Эта величина в несколько раз, превышает предельно допустимое значение емкости нагрузки, значит точка “b” выходит за рабочий диапазон. Следовательно, для реальных устройств рабочий режим лежит в диапазоне между точками “a” и “b” (рис. 10).

Из приведенного анализа следует, что строить защиту человека от поражения электрическим током, предложенным выше способом, т.е. посредством анализа характера тока, возможно.

Для обеспечения защиты обслуживающего персонала, работающего с высоковольтными испытателями изоляции кабеля, от поражения электрическим током можно предложить еще один, достаточно простой, способ. Для реализации данного способа защиты необходимо чтобы схема регистрации пробоя срабатывала при попадании человека под напряжение.

Были проведены эксперименты на действующих высоковольтных испытателях изоляции кабеля, выпускаемых фирмой «Эрмис+» г. Томск. Эксперименты проводились в высоковольтной лаборатории. На рис. 11 показана схема экс-

перимента. В ходе эксперимента было осуществлено 100 опытов по прикосновению к токоведущим частям испытателя с временным интервалом 5 с (замена сопротивлением 1 кОм в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82). Индикатор пробоя высоковольтного испытателя показал 100 пробоев. Эксперимент доказал, что в существующих высоковольтных испытателях прикосновение человека к высоковольтным токоведущим цепям фиксируется внутренней схемой регистрации пробоев.

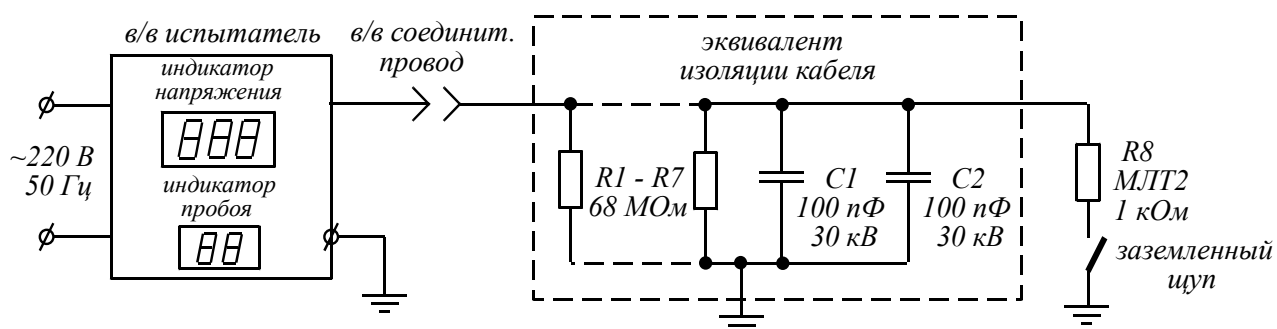


Рис. 11. Схема эксперимента по фиксированию схемой пробоя попадания человека под высокое напряжение

Ток короткого замыкания высоковольтных испытателей составляет, как правило, десятки мА. По существующим нормам для переменного напряжения частотой 400 Гц предельно допустимый уровень тока при длительности прикосновения не более 1 с составляет 100 мА. А при длительности свыше 1 с составляет 8 мА. Отсюда можно сделать вывод, что в большинстве случаев, прикосновение человека к токоведущим частям высоковольтных испытателей допустимо ограничивать только по длительности прикосновения. На основании вышеизложенного, можно предложить схему защиты от поражения электрическим током, при работе с высоковольтными испытателями, представленную на [рис. 12](#).

В существующих стандартах на нормы токов и напряжений прикосновения напряжения и токи прикосновения приведены при продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки и установлены исходя из реакции ощущения. Поэтому пауза перед последующей подачей высокого напряжения не должна быть менее 2-3 с, для отпускания токоведущих цепей или устранения касания. Однако, наличие паузы между подачей высокого напряжения, негативно влияет на

качество контроля изоляции. Схема пробоя не различает пробой изоляции и попадание человека под высокое напряжение. В обоих случаях напряжение снимается и изоляция кабеля временно не контролируется.

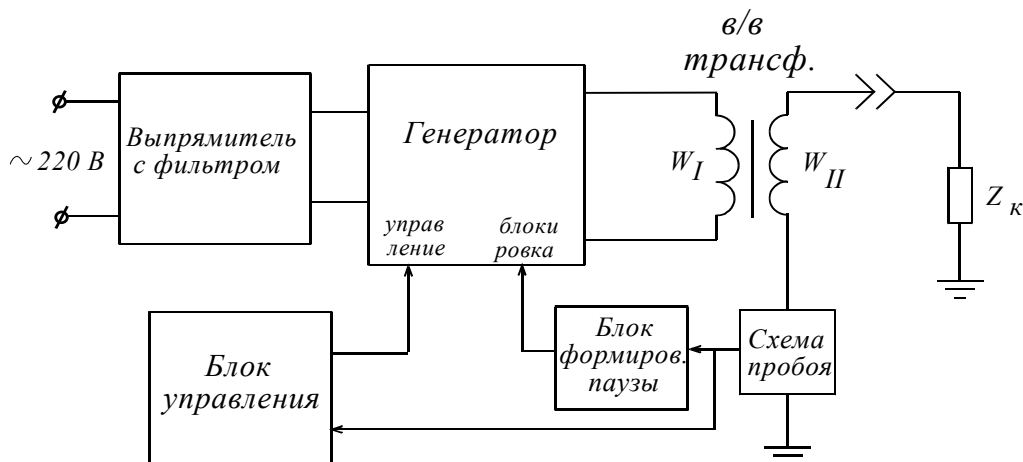


Рис. 12. Структурная схема устройства защиты от поражения электрическим током с периодическим отключением

В четвертой главе диссертационной работы дается описание реализованных технических решений, полученных по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

Приведена схема определения знака фазы (СОЗФ) и диаграммы ее работы. Задача, которую решает схема СОЗФ заключается в том, чтобы при активно-емкостном характере нагрузки относительно первичной обмотки высоковольтного трансформатора испытателя изоляции выдавать логический сигнал низкого уровня, а при активно-индуктивном характере нагрузки - выдавать логический сигнал высокого уровня. При этом схема устойчива к промышленным помехам, и выставляет сигнал, если знак фазы повторяется подряд в нескольких периодах. Показано, что задача разработки микропроцессорного блока измерений испытателя изоляции типа ИАСИ (импульсные аппараты сухих испытаний) может быть с успехом решена при помощи микроконтроллера. Измерения производятся по двум каналам, вычисления производятся по установленным ранее зависимостям и выдается результат измерения на индикацию. Приведен алгоритм программы микроконтроллера к схеме с вычислением правки. Приведена схема устройства временного отключения генерации высокого напряжения.

Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы в следующем виде:

1. Измерение амплитуды испытательного напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора значительно упрощает конструкцию устройства за счет исключения дорогостоящего и громоздкого высоковольтного узла. В аппаратах с импульсным испытательным напряжением (ИАСИ) измерения проводятся по высоковольтной стороне, так как измерения по низковольтной стороне приводят к значительным погрешностям, превышающим требования ГОСТа 2990-78. Это происходит потому, что высоковольтный трансформатор обладает большой индуктивностью рассеяния, а импульсы напряжения высокой скоростью нарастания, вследствие чего происходит существенное отличие напряжения на первичной обмотке и пересчитанного в первичную обмотку выходного испытательного напряжения. В связи с этим возникает необходимость в разработке способов, позволяющих проводить измерения высокого напряжения в испытателях типа ИАСИ так же как и в других, например ЗАСИ (звуковые аппараты сухих испытаний), ПЧ (аппараты сухих испытаний с выходным напряжением промышленной частотой), по напряжению на первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Это позволит упростить конструкцию ИАСИ и использовать для производства нескольких типов высоковольтных испытателей унифицированную конструкцию.

2. Измерять амплитуду испытательного напряжения в приборах ИАСИ, в соответствии с ГОСТом 2990-78, можно по низковольтной стороне используя цепь, имитирующую цепь высоковольтного трансформатора и испытываемой изоляции.

3. Погрешность измерения амплитуды испытательного напряжения в приборах ИАСИ возникает из-за падения напряжения на индуктивности рассеяния высоковольтного трансформатора $U_{L_S}(t) = L_S \cdot di_{L_S}(t)/dt$. Эффективным способом снижения погрешности является уменьшение скорости изменения тока через индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора $di_{L_S}(t)/dt$ за

счет введения дополнительного дросселя в цепь между накопительным конденсатором и первичной обмоткой высоковольтного трансформатора. Данный способ позволяет выполнять требование ГОСТа 2990-78 при измерениях по низковольтной стороне, обеспечивая погрешность измерения $\delta \leq 5\%$.

4. Измерение амплитуды испытательного напряжения по низковольтной стороне возможно способом вычисления испытательного напряжения по мгновенным значениям тока первичной обмотки и напряжения на ней при известных значениях индуктивности намагничивания и индуктивности рассеяния, а так же межвитковой емкости вторичной обмотки в/в трансформатора.

5. Уровень максимального выходного тока испытателей превышает безопасный уровень, установленный ГОСТ 12.1.038-82 (Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов). Снижение мощности испытателя не может быть решением проблемы, так как основной ток через изоляцию кабеля является емкостным, а при попадании человека под высокое напряжение ток имеет активный характер. Поэтому возникает необходимость разработать способы снижения выходного активного тока высоковольтных испытателей изоляции при сохранении уровня емкостного тока.

6. Попадание человека под высокое выходное напряжение испытателя можно определить по смене характера нагрузки относительно зажимов первичной обмотки высоковольтного трансформатора. В рабочем режиме, когда нагрузкой испытателя является испытываемая изоляция кабеля, характер нагрузки относительно зажимов первичной обмотки высоковольтного трансформатора является активно-емкостным, а при попадании человека под напряжение активно-индуктивным.

7. Каждый высоковольтный испытатель изоляции кабеля «на проход» имеет схему, фиксирующую пробой изоляции. Эксперименты показали, что при попадании эквивалента человека под напряжение (замена сопротивлением 1 кОм в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82) схема пробоя фиксирует это факт. В результате предложен способ, суть которого заключается в периодическом отключении высокого испытательного напряжения при приходе активного сигнала со схемы пробоя.

Публикации. Основные научные результаты отражены в опубликованных работах:

1. Л.А. Редько, В.В. Редько Способ защиты от поражения электрическим током в высоковольтных испытателях изоляции кабельных изделий// Электричество. – 2004. - №8, с. 65-67.
2. Л.А. Редько, В.В. Редько Высоковольтный испытатель изоляции кабеля методом «на проход»// Датчики и системы. – 2004. - №9, с. 43-46.
3. Л.А. Редько, В.В. Редько К вопросу об обеспечении электробезопасности обслуживающего персонала при работе с высоковольтными испытателями изоляции кабеля "на проход"// Труды IX международной научно – практической конференции “Современные техника и технологии” Том II, Томск, 2003.- с. 137 – 139.
4. Л.А. Редько, В.В. Редько Приборы контроля качества изоляции кабельных изделий// Труды X международной научно – практической конференции “Современные техника и технологии”, Том II, Томск, 2004.- с. 337 – 338.
5. Л.А. Редько «Проблемы измерения амплитуды выходного напряжения импульсных высоковольтных испытателей», сборник докладов Российской научно-технической конференции «Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения», Томск, 2004.
6. В.В. Редько, Л.А. Редько, Гладышев Ю.Г. «Высоковольтный испытатель изоляции постоянным напряжением «КОРОНА-ПН», сборник докладов Российской научно-технической конференции «Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения», Томск, 2004.
7. Л.А. Редько, В.В. Редько Высоковольтные испытатели изоляции кабеля. Схемы регистрации пробоев// Труды 4-й международной конференции «Актуальные проблемы науки», Самара 2003.- с. 20 – 22.
8. Л.А. Редько, В.В. Редько Контроль качества изоляции кабельных изделий// Материалы VIII Международной научно – практической конференции «Качество – стратегия XXI века», г. Томск, 2003.- с. 133 - 134.