

при токе нагрузки 0,2 А процесс поглощения помехи растягивается до 1,3 с. При этом увеличивается количество пачек импульсов тока коллектора СМ.

Рабочая частота релейного стабилизатора ограничена частотными свойствами СМ и определяется индуктивностью дросселя  $L$  и суммарной ёмкостью  $C_{\Sigma}$ . Дроссель  $L$  намотан медной шиной на торе из диэлектрика. При использовании СМ с диодом, например модуля серии МТКИД, диод VD2 из схемы исключается, поскольку он входит в состав модуля [4]. Мощность защищаемой нагрузки определяется типом используемого модуля и датчика Холла.

На рис. 5 приведены осциллограммы растянутой во времени первой пачки импульсов тока  $I_k$  и напряжения  $U_{к.э}$  силового модуля. Временные интервалы  $t_0-t_1$ , указанные на рис. 3–5, соответствуют друг другу.

Таким образом, предлагаемое устройство защиты радиоэлектронной аппаратуры от импульсных коммутационных помех большой энергии обеспечивает непрерывность питания, защищает потребителя от всплесков и провалов напряжения бортовой сети, причём энергия мощных импульсных помех не рассеивается в дополнительное тепло, а передаётся в нагрузку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51317.4.5–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 1999. – 42 с.
2. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств: Справочник. – М.: Издательский дом "Технологии", 2001. – 401 с.
3. Большанин В.П., Козлов К.В., Жаркова С.В. Способ защиты РЭА от импульсных перенапряжений // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства: Сб. науч. трудов НПО «Полюс» / Под ред. П.В. Голубева и А.И. Чернышева. – Томск, 1992. – Т. 1. Аппаратура управления и преобразования энергии. – С. 163–166.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

УДК 621.384.001.63

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ АППАРАТАХ СУХИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

В.В. Редько, Л.А. Редько

Томский политехнический университет. ООО "ЭРМИС+"  
E-mail: ultratone@mail2000.ru

*Предложен способ косвенного измерения амплитуды выходного импульсного напряжения в высоковольтных испытателях изоляции. Проанализированы причины возникновения погрешностей. Даны рекомендации по выбору параметров элементов испытателей, обеспечивающих требуемую точность измерений.*

При производстве кабельных изделий на различных этапах необходимо контролировать качество электрической изоляции [1–3]. Основным способом контроля являются испытания "на проход" высоким напряжением в соответствии с ГОСТ 2990-78. Испытания происходят следующим образом: при движении кабеля по экструзионной линии или при перебухтовке жила кабеля заземляется, а к поверхности изоляции прикладывается высокое напряжение посредством специальных электродов. В зависимости от требований контроля испытательное напряжение выбирается постоянным, переменным синусоидальным или импульсным. Для импульсных аппаратов амплитуда испытательного напряжения, как правило, находится в пределах от 1 до 50 кВ, частота следования импульсов 50...100 Гц, длительность 0,1...1 мс. На рис. 1 приведены осциллограммы испытательного напряжения.

В соответствии с ГОСТ 2990-78 в течение испытания значение испытательного напряжения следует поддерживать с отклонением не более 5 % во всем рабочем диапазоне.

Наиболее распространенный способ измерения амплитуды импульса – это измерение с помощью высоковольтного емкостного или активно-емкостного делителей [1, 2]. Однако высоковольтный делитель усложняет конструкцию испытателей. Для испытательных напряжений от 1 до 50 кВ такой способ измерения требует существенных затрат. При построении высоковольтных устройств стремятся свести к минимуму количество и протяженность высоковольтных узлов, т.к. их наличие приводит либо к существенному увеличению размеров устройства, либо, при сохранении размеров, к увеличению емкостных токов утечки. Увеличение емкостных токов утечки ведет, в свою очередь, к увеличению потребляемой мощности высоковольтным испытателем и к более быстрому старению его изоляционных материалов, а также к изменению передаточных характеристик высоковольтного узла испытателя. Поэтому измерять амплитуду испытательного напряжения более выгодно косвенно, на низковольтной стороне, как это осуществляется в других типах испытателей, таких как «ЗА-

СИ» (звуковые аппараты сухих испытаний) [3]. Отметим, для большинства типов испытателей применяют унифицированный корпус [4, 5], что снижает затраты на производство.

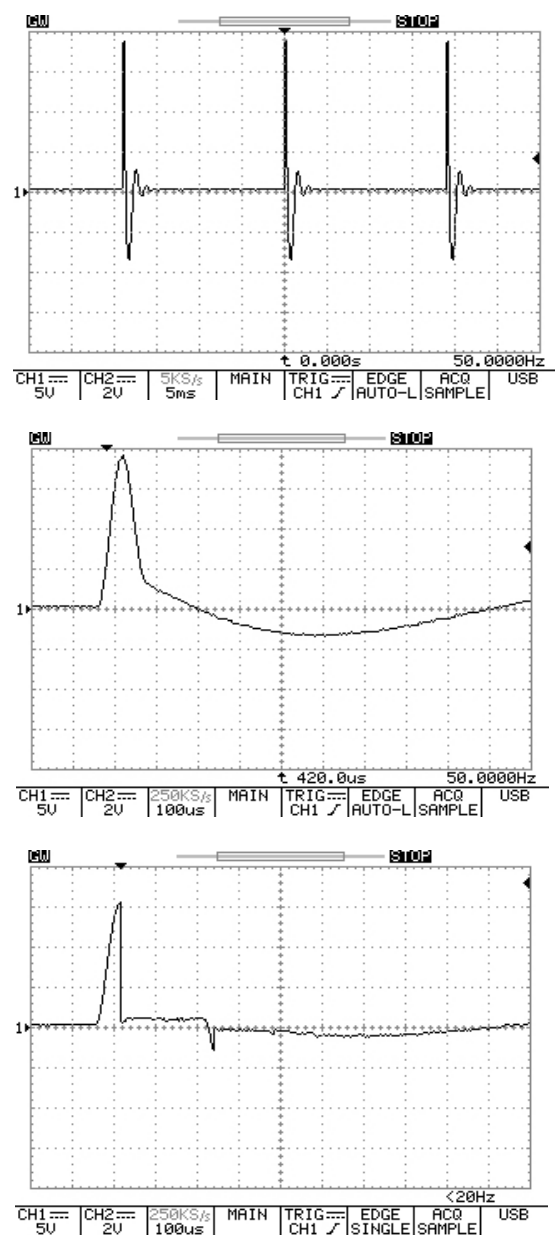


Рис. 1. Осциллограммы испытательного напряжения после делителя 1000:1: а) на нескольких периодах, б) на одном периоде, в) на одном периоде при пробое изоляции

Ниже приведен способ измерения высокого испытательного напряжения по первичной, низковольтной стороне высоковольтного трансформатора, при обеспечении требуемой стандартом ГОСТ 2990-78 точности в импульсных испытателях изоляции кабеля.

На рис. 2, а и б, приведены примеры принципиальных схем силовой части высоковольтных испытателей ИАСИ (импульсные аппараты сухих испытаний) [6–8].

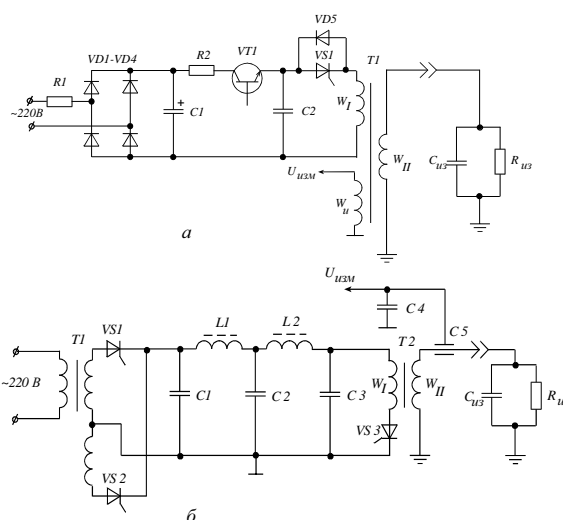


Рис. 2. Принципиальные схемы силовой части высоковольтных испытателей типа ИАСИ

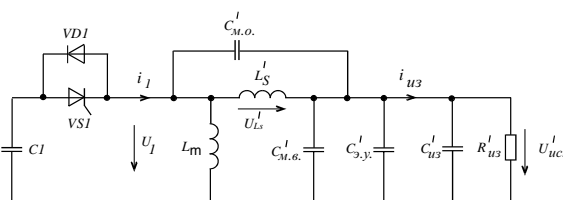


Рис. 3. Схема замещения высоковольтного каскада ИАСИ

На первый взгляд схемы силовых узлов заметно отличаются. Однако, принцип формирования импульса одинаков. Заключается он в предварительном заряде конденсатора до определенного значения напряжения, а затем его разряде на первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Так же одинакова для обеих схем причина возникновения погрешности измерения на низковольтной стороне, о которой будет рассказано далее.

Для анализа процессов, происходящих в схемах, необходимо привести схему замещения высоковольтного каскада аппаратов ИАСИ, рис. 3:  $C_1$  – накопительный конденсатор,  $C'_{м.о.}$  – межвитковая емкость высоковольтного трансформатора,  $C'_{м.в.}$  – межобмоточная емкость высоковольтного трансформатора,  $C'_{э.у.}$  – емкость электродного узла,  $C'_{из}$  – емкость изоляции кабеля,  $R'_{из}$  – сопротивление изоляции кабеля,  $L_m$  – индуктивность намагничивания высоковольтного трансформатора,  $L'_S$  – индуктивность рассеяния,  $VS1$  – коммутирующий тиристор,  $VD1$  – обратный диод,  $U_1$  – напряжение на первичной обмотке,  $U'_{исп}$  – испытательное напряжение,  $i_1$  – ток первичной обмотки трансформатора,  $i_{из}$  – ток через изоляцию.

Работа высоковольтного каскада испытателя во время разряда накопительного конденсатора  $C_1$  на первичную обмотку высоковольтного трансформатора разряда заключается в следующем. Перед открытием тиристора  $VS1$  конденсатор  $C_1$  заряжен до требуемого напряжения (например, 100 В), все электрические процессы по принципиальной схеме справа от ти-

ристора  $VS1$  (рис. 3) прекращены, испытательное напряжение равно нулю. При отпирании тиристора  $VS1$  напряжение, до которого заряжен накопительный конденсатор  $C1$ , прикладывается к первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Далее происходит разряд накопительного конденсатора, и ток протекает по двум контурам  $C1 VS1 L_{\mu}$  и  $C1 VS1 L'_S C'_{\Sigma} R'_{изол}$  (где  $C'_{\Sigma} = C'_{м.б.} + C'_{э.л.} + C'_{из}$ ). Причем ток контура  $C1 VS1 L_{\mu}$  значительно меньше, чем ток контура  $C1 VS1 L'_S C'_{\Sigma} R'_{изол}$ . Это связано с тем, что индуктивность намагничивания  $L_{\mu}$  значительно больше индуктивности рассеяния  $L'_S$  высоковольтного трансформатора. Перезаряд конденсатора  $C1$  происходит по цепям  $C1 VD1 L_{\mu}$  и  $C1 VD1 L'_S C'_{\Sigma} R'_{изол}$ . Тиристор  $VS1$  заперт.

По истечении процесса перезаряда накопительного конденсатора  $C1$  до некоторого положительного напряжения диод  $VD1$  запирается. На данном этапе остается один контур  $L_{\mu} L'_S C'_{\Sigma} R'_{изол}$ , скорость изменения и амплитуда тока в котором значительно уменьшается по сравнению с предыдущим полупериодом. Это связано, прежде всего, с включением в цепь индуктивности намагничивания  $L_{\mu}$ . В связи с потерями в активном сопротивлении контролируемой изоляции и во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора колебания быстро затухают. К следующему процессу разряда накопительного конденсатора  $C1$  переходные процессы в схеме полностью прекращаются. При этом через зарядную цепь конденсатор  $C1$  заряжается до напряжения требуемой амплитуды. Схема вернулась в исходное состояние. При отпирании тиристора  $VS1$  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. Это в свою очередь приводит к значительным погрешностям измерения амплитуды испытательного напряжения в том случае, если измерительный сигнал будет сниматься с первичной обмотки высоковольтного трансформатора.

В свою очередь, зависимость коэффициента трансформации от изменения нагрузки вызвана тем, что при изменении, в основном, емкости изоляции испытуемого кабеля изменяется скорость изменения тока  $i_1$  и его амплитуда. Соответственно изменения такого рода происходят и в индуктивности рассеяния  $L_S$ . Тогда,  $U_1(t) = U'_{L_S}(t) + U'_{учн}(t)$ . Влияние межобмоточной емкости на погрешность измерения значительно меньше, чем влияние индуктивности рассеяния, а падение напряжения на ин-

дуктивности рассеяния:  $U'_{L_S}(t) = L'_S \cdot \frac{di'_{L_S}(t)}{dt}$ . Ток  $i'_{L_S}(t)$  в свою очередь зависит от нагрузки  $C'_{из}$  и  $R'_{из}$ , как по амплитуде, так и по скорости нарастания.

Поэтому необходимо снизить влияние индуктивности рассеяния на погрешность измерения испытательного напряжения. Это можно осуществить за счет уменьшения скорости изменения тока первичной обмотки высоковольтного трансформатора путем введения дополнительного дросселя в первичную обмотку [9].

Существенная зависимость коэффициента трансформации от изменения параметров контролируемого кабеля является следствием того, что высоковольтный трансформатор используется не по прямому назначению. Особенность работы высоковольтного испытателя изоляции с импульсным выходным напряжением заключается в том, что высоковольтный трансформатор и изоляция контролируемого кабеля являются частью генератора импульсов, от которой напрямую зависят параметры генерируемого импульса (рис. 2, 3). Это делается разработчиками испытателей намеренно для упрощения схемы устройства. Однако высоковольтный трансформатор должен только передавать напряжение, а изоляция контролируемого кабеля должна лишь потреблять энергию и никак не влиять на параметры формируемых импульсов (скорость изменения, амплитуду).

Качественное решение проблемы измерений заключается в том, чтобы изменить идеологию работы генератора импульсов высоковольтного испытателя изоляции. Однако разработанные на сегодняшний день схемы испытателей работают по принципу, при котором высоковольтный трансформатор и изоляция кабеля являются частью генератора импульсов и поэтому необходимы способы измерения амплитуды испытательного напряжения на первичной низковольтной стороне именно для испытателей такого типа. Предлагается ввести в схему изменения, которые хоть и не исключат высоковольтный трансформатор и изоляцию контролируемого кабеля из цепи формирования импульса, но при этом значительно уменьшат их влияние как на скорость изменения, так и на амплитуду импульса и позволят измерять амплитуду импульса с погрешностью менее 5%.

На рис. 4 приведена схема включения дросселя  $L_{дон}$  в цепь высоковольтного испытателя.

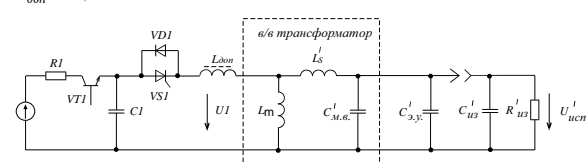


Рис. 4. Схема включения дросселя в цепь высоковольтного испытателя

Введение в схему дополнительного дросселя  $L_{дон}$  приведет к снижению скорости изменения тока  $i'_{L_S}(t)$ , а значит и к уменьшению  $U'_{L_S}(t)$  и погрешности измерений  $\delta$ . Для конкретного источника, рис. 5, видно, что наличие дополнительного дросселя действительно уменьшает скорость изменения тока через индуктивность рассеяния. Под относи-

тельным коэффициентом трансформации понимается величина

$$K_{mp}^* = \frac{K_{mp}}{K_{mp} \text{ (при } C_{из} = C_{из.ном} \text{)}},$$

где  $C_{из.ном} = \frac{C_{из.мах} + C_{из.мин}}{2}$ .

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что описанный способ снижения погрешности измерения амплитуды импульсов испытательного напряжения эффективен.

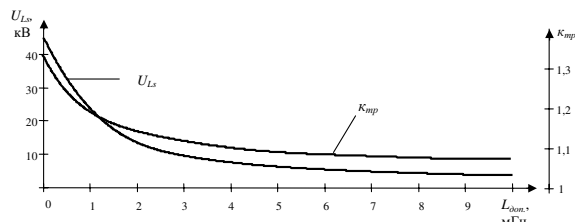


Рис. 5. Зависимости падения напряжения на индуктивности рассеяния и относительного коэффициента трансформации от индуктивности дополнительного дросселя

Вывод формулы  $L_{дон} = f(\delta, C1, L_S, L_{\mu}, C_{из}, C_{м.в.}, C_{э.у.}, R_{из})$  является задачей сложной, которая может быть решена с применением современных математических пакетов только в численном виде. Попытки получить величину в общем виде приводят к громоздким выражениям уже на начальном этапе решения задачи, поэтому такой подход практически непригоден для инженерных расчетов. По этой причине эффективным будет способ выбора значения индуктивности  $L_{дон}$  путем моделирования работы выходного каскада высоковольтного испытателя изоляции в пакетах схемотехнического моделирования (например, ORCAD). При моделировании рекомендуется использовать схему, указанную на рис. 3. Начальными данными при моделировании будут являться  $U_1, C1, L_{\mu}, L'_S, C'_{м.в.}, C'_{э.у.}, C'_{из}, R'_{из}, U'_{исп}, \delta$ , а выходными —  $L_{дон}$  и ток  $I_{L_{дон.мах}}$ . Величина тока  $I_{L_{дон.мах}}$  необходима для конструктивного расчета дросселя  $L_{дон}$ .

Описанный способ косвенного измерения испытательного напряжения используется в импульсных высоковольтных испытателях изоляции, выпускаемых ООО «Эрмис+», г. Томск.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1973. – 232 с.
2. Холодный С.Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации прибора «Корона ЗАСИ-30/30». – Томск: ООО «Эрмис+», 2002. – 55 с.
4. Редько Л.А. Проблемы измерения амплитуды выходного напряжения импульсных высоковольтных испытателей // Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: Докл. Росс. научно-техн. конф. – Томск, 2004. – С. 55–57.
5. <http://www.ermis.tomsk.ru>
6. Верижников В.Г., Шмейлин З.И. Импульсный аппарат для контроля герметичности защитного шланга // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1977. – Вып. 9(151). – С. 15–16.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации прибора «Корона И». – Томск: ООО «Эрмис+», 2001. – 48 с.
8. Турикова Т.П., Черневский И.Н. Методы испытаний кабелей, проводов и шнуров напряжением // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1979. – Вып. 11(177). – С. 7–8.
9. Свид. на ПМ 45834 РФ. МПК<sup>7</sup> G01R 31/14. Устройство для испытания полимерной изоляции кабеля / В.В. Редько, Л.А. Редько. Заявлено 27.12.2004; Опубл. 27.05.2005, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.

УДК 621.317.53.08

**ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВУХПОЛЮСНИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА**

В.И. Туев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: tvi@tv2.tomsk.ru

Предложен метод измерения полных сопротивлений двухполюсников, включающий измерение модуля комплексного сопротивления (погрешность  $\pm 7\%$ ) и его действительной части (погрешность  $\pm 3\%$ ) с применением импульсного сигнала. Предложена структурная схема устройства, даны рекомендации по выбору значения частоты генератора сигналов и параметров измерительной цепи.

**1. Введение и постановка задачи**

Необходимость измерения комплексных сопротивлений двухполюсных электрических цепей сопутствует решению задач проектирования и эксплуатации технологических датчиков [1, 2], элементов устройств систем связи и управления [3], в

радиотехнических измерениях [4] и т.д. Измерения производятся на конечном ряде частот, включая ее нулевое значение, т.е. на постоянном токе. Измеряемое сопротивление  $Z_x$  на конкретной частоте представляется в виде эквивалентной цепи, содержащей активную часть  $R$  и реактивную составляющую