***СОДЕРЖАНИЕ***

***I. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ШС ............ стр.2***

***II. КОНСТРУКЦИЯ ШС ВВ ............................... стр.3***

***III. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ШС ............................. стр.8***

***IV. ПРИМЕНЕНИЕ ШС ................................... стр.13***

***V. ВЛИЯНИЕ ШС НА ВН НА КОНТАКТАХ .................... стр.14***

***ЛИТЕРАТУРА .......................................... стр.15***

***I. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА***

***ШУНТИРУЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ***

**Большинство современных воздушных выключателей (*ВВ*) снабжено шунтирующими сопротивлениями (*ШС*), т.е. сопротивлениями, подключаемыми параллельно контактам выключателей. От *ШС* в значительной мере зависит эффективность работы выключателей.**

**По назначению *ШС* могут быть разделены на три основные группы:**

* **сопротивления, предназначенные для влияния на параметры переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении коротких замыканий;**
* **сопротивления, предназначенные для снижения коммутационных перенапряжений;**
* **сопротивления, предназначенные для распределения напряжения между разрывами.**

**Наибольшее распространение получили сопротивления первой группы. Ими снабжаются генераторные выключатели для нейтрализации высоких частот (скоростей) восстанавливающегося напряжения и увеличения тока отключения и сетевые выключатели для этих же целей, а также выключатели для успешного отключения неудалённых коротких замыканий (*ВВ* 110-330 *кВ*). Влияние этих сопротивлений в зависимости от их значения на процесс отключения может иметь место как до перехода тока через нуль, так и в процессе восстановления напряжения после перехода тока через нуль. Сопротивление, приходящееся на один разрыв выключателя, может изменяться от десятых долей *Ома* на мощных генераторных выключателях до сотен *Ом* на сетевых выключателях.**

**Поскольку проблема отключения тока через эти сопротивления становится иногда весьма сложной, в ряде случаев применяется двухступенчатое шунтирование. Как правило, в качестве сопротивлений первой группы используются линейные металлические или керамические сопротивления.**

**Не менее важное значение, особенно для выключателей сверхвысокого напряжения, имеют сопротивления второй группы. Их основное назначение – - ограничивать перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов, реакторов, синхронных компенсаторов, а также при коммутации ненагруженных линий. В отличие от сопротивлений первой группы, вводимых в действие только при отключении, сопротивления второй группы в ряде случаев вводятся при включении (предвключаемые сопротивления). Значения сопротивлений второй группы колеблются от десятков *Ом* до нескольких тысяч *Ом* на разрыв. Применяются как линейные, так и нелинейные сопротивления.**

**Сопротивления третьей группы получили в современных *ВВ* ограниченное применение ввиду интенсивного развития служащих для той же цели делительных конденсаторов. Эти сопротивления составляют обычно несколько сотен тысяч *Ом* на разрыв. В главе II рассмотрим особенности конструкций сопротивлений, а затем (глава III, IV) основные схемы их подключения и некоторые специфические вопросы, связанные с влиянием *ШС* на процесс коммутаций выключателя.**

***II. КОНСТРУКЦИЯ ШУНТИРУЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ***

***ВОЗДУШНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ***

***2.1. Общие сведения***

**Шунтируюшие сопротивления используются практически во всех современных воздушных выключателях, однако число используемых конструкций сопротивлений весьма ограничено. По роду установки шунтирующие сопротивления классифицируются на три группы: наружной установки, внутренней установки и для работы в средах с высокой электрической прочностью (например, в сжатом воздухе, SF6, масле и т.п.).**

**По конструктивному исполнению сопротивления можно разделить на две группы: сопротивления с металлическими токоведущими элементами (круглыми или плоскими) и объёмные сопротивления (линейные или нелинейные), выполненные из специальной керамики. В таблице 1 и в таблице 2 приведены необходимые для расчётов характеристики отечественных металлических и изоляционных материалов, применяемых в конструкциях сопротивлений.**

**Наиболее перспективными являются конструкции безындуктивных объёмных шунтирующих сопротивлений. В мировой практике наибольшее распространение получили керамические объёмные сопротивления фирмы «Морганайт», выпуск аналогичных элементов сопротивлений освоен также российской промышленностью. Для современных линейных объёмных сопротивлений достигнута теплоёмкость в единице объёма при адиабатном нагреве до 300 *Дж*/*см*3, удельное объёмное сопротивление может меняться в широких пределах, от 100 до 3000 *Ом*.*см*, что позволяет получать элементы с различным сопротивлением. В России применяются в качестве объёмных сопротивлений также сопротивления из бетэла с объёмной теплоёмкостью около 100 *Дж*/*см*3. На базе объёмных керамических сопротивлений выпускаются также нелинейные сопротивления, меняющие своё значение в зависимости от приложенного к ним напряжения. Такие сопротивления, как отмечалось выше, весьма эффективны для снижения коммутационных перенапряжений при отключении малых индуктивных токов.**

**Если обозначить через *i*1 и *i*2 токи, протекающие через нелинейное сопротивление соответственно при напряжениях *u*1 и *u*2, то справедливо соотношение**

***i*1/*i*2 = (*u*1/*u*2)*m*н**

**Минимальное значение *m*н для нелинейных сопротивлений обычно составляет 2, 8-4. Значение показателя *m*н для практически не зависят от температуры сопротивления.**

**Для иллюстрации эффективности применения нелинейных сопротивлений при отключении малых индуктивных токов на рис. приведена зависимость кратности перенапряжений от отношения срезанного тока к его амплитуде при нелинейном сопротивлении с характеристическим уравнением**

***i*r = 0,0025.*I*.(*u*в/*E*)5, где *I* = *E*/(ω.*L*).**

**Рассмотрим более подробно конструкции сопротивлений различных типов.**

***2.2. Сопротивления с металлическими токоведущими элементами***

**На *рис.1* приведена конструкция *ШС* наружной установки с ленточным токоведущим элементом. Согнутая зигзагообразно лента из нихрома *Х20Н80Т* со слюдопластовыми прокладками заложена в металлические коробочки, изолированные друг от друга миканитовыми прокладками и собранные в пакет, который в свою очередь помещён в фарфоровую герметизированную покрышку. Пакет сжат пружиной. Подобные сопротивления в 70 *Ом* используются для выключателей с газонаполненным отделителем для токов отключения вплоть до 31,5 *кА*. Сопротивления имеют пониженную индуктивность.**

**На *рис.3* изображено *ШС* наружной установки, которое применяющееся в отечественных *ВВ* для особо тяжёлых условий по скорости восстановления напряжения. Две параллельные ленты *3* из нихрома *ОХ23Ю5* с проложенными между сгибами миканитовыми прокладками круглой формы *4* и концевыми латунными контактами сжаты между основанием *1* и крышкой *5* посредством регулировочных болтов *7* в фарфоровой герметизированной покрышке *2*, в которую для поглощения выделяющейся из миканита при нагреве остаточной влаги вложен пакет с силикагелем *6*. Поскольку сам пакет обладает пружинящими свойствами, дополнительных сжимающих приспособлений в этом сопротивлении не требуется. Ввиду большого коэффициента заполнения фарфоровой покрышки сопротивление обладает очень высокой теплоёмкостью. Сопротивление выполняется в 4 и 5 *Ом*, его индуктивность 0,001 *мГн*.**

**На *рис.4* приведена конструкция сопротивления 150 *Ом* наружной установки со спиральным токоведущим элементом, применяемого в отечественных *ВВ* с газонаполненным отделителем. Спираль *3*, выполненная из хромелевой проволоки *ОХ23Ю5* диаметром 1,8 *мм*, заложена в керамические плитки *2* таким образом, что токи в смежных плитках направлены противоположно. *ШС* применяются в выключателях с токами отключения до 25 кА из-за относительно большой индуктивности.**

**На *рис.5* показано сопротивление с ленточным токоведущим элементом для генераторных выключателей внутренней установки. Нихромовая лента согнута зигзагообразно, между отдельными зигзагами проложены миканитовые прокладки Весь пакет заключён в текстолитовую коробку с отверстиями для охлаждения и зажат между двумя латунными скобами, являющимися выводами.**

**На *рис.6* тоже приведена конструкция шунтирующего сопротивления со спиральным токоведущим элементом для работы в сжатом воздухе, применяющаяся в отечественных воздушных выключателях с металлической гасительной камерой на высоком напряжении. Спираль *5*, выполненная из нихромовой проволоки *Х15Н60* диаметром 1,8 *мм* и предварительно изолированная шестью слоями стеклоленты, намотана на эпоксидный цилиндр *6*, после чего катушка залита эпоксидным компаундом с кварцевым песком в качестве наполнителя. При заливке пропитываются только 2 - 3 слоя стеклоленты, остальные играют роль теплового и механического буфера при прохождении тока. Эпоксидный компаунд играет также роль барьерной изоляции, поскольку всё сопротивление в отключенном положении находится под высоким напряжением по отношению к корпусу камеры. Спираль может наноситься на цилиндр как в виде одной ветви с промежутком между выводами, так и в виде двух параллельных ветвей. Сопротивление имеет две разновидности, 100 и 50 *Ом* с индуктивностью соответственно 0,2 и 0,1 *мГн*. Сопротивление при помощи приливов из того же компаунда крепится ко вводу дугогасительной камеры. Неподвижный вспомогательный контакт устанавливается непосредственно на сопротивление и крепится к контактным втулкам *1*, а соединение с другим выводом осуществляется при помощи съёмной перемычки *4*, крепящейся к армированной втулке *3* винтом *2*.**

***2.3. Сопротивления с объёмными токоведущими элементами***

**Элементы объёмных сопротивлений, как правило, выполняются в виде дисков, иногда с центральным отверстием, или цилиндров. На торцевые поверхности элементов по специальной технологии наносится слой металлизации для создания надёжного контакта с соседними элементами или контактной арматурой; необходимое контактное нажатие составляет примерно 2,1 *кг*/*см*2; боковая поверхность элементов обычно покрывается слоем жаропрочной изоляционной эмали или глазуруется.**

**Блок керамических *ШС*, применяемых в *ВВ* с металлической камерой фирмы «Рейролл» состоит из цилиндрических элементов сопротивлений, расположенных по окружности и соединенных между собой последовательно специальной экранной и контактной арматурой, с одной стороны создающей достаточную жёсткость всей конструкции, а с другой – обеспечивающей достаточную электрическую прочность блока по отношению к стенкам камеры. Блок крепится в камерах непосредственно на вводах.**

**На *рис.2* показано шунтирующее сопротивление наружной установки с бетэловым элементом, применяющееся для отечественных выключателей с газонаполненным отделителем. Бетэловый элемент (*БЭ*) представляет собой цилиндр диаметром 0,25 *м* и высотой 1 *м*, армированный по торцам стальными фланцами, приклеиваемыми специальным составом. Сопротивление элемента может быть от 10 до 1000 *Ом* с адиабатным поглощениемэнергии до 5 *МДж*, индуктивность его составляет 0,2 – 0,5 *мГн*. Бетэловый элемент помещён в герметизированную фарфоровую покрышку, закрытую по торцам фланцами.**

**На *рис.7* приведено нелинейное *ШС*, применяющееся на *ВВ* внутренней установки напряжением 35 *кВ*, предназначенном для отключения электротермических установок. Двадцать последовательно соединённых керамических дисков *1* помещены для защиты от механических повреждений в изоляционный цилиндр *2*. Цилиндр с обеих сторон закрыт фланцами *3*, с помощью которых производится крепление сопротивления к камере. Электрическая цепь керамических дисков с фланцами *3* создаётся пружиной *4* и шайбой *6*. Пространство между изоляционным цилиндром и дисками залито эластичным компаундом *5*. Сопротивление предназначено для снижения перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов.**

**На *рис.8* представлена в разрезе вспомогательная камера воздушного выключателя фирмы «Делль» с дисковыми керамическими сопротивлениями. Сопротивление находится постоянно в сжатом воздухе. К выходному концу сопротивления непосредственно прикреплён неподвижный вспомогательный контакт. Соединение дисков между собой может осуществляться без специальной арматуры, методом спекания, либо при помощи специальной соединительной арматуры, припаянной к торцевой поверхности.**

***III. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ШУНТИРУЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ***

**В зависимости от назначения щунтирующих сопротивлений в воздушных выключателях имеется довольно много разновидностей схем их включения. Эти схемы отличаются друг от друга как принципиально, по режиму протекания основного и сопровождающего тока, так и функционально, по временной координации разрывов в операции отключения и включения. Существенно также различие самих сопротивлений, которые в основном определяются режимом работы и параметрами выключателей.**

**На *рис.16* приведены три основные схемы, классифицированные по способу подсоединения шунтирующих сопротивлений; в свою очередь каждая из этих схем имеет несколько исполнений – в зависимости от временной координации.**

**В схеме *а* номинальный ток протекает по главным контактам *ГК*, а по вспомогательным *ВК1* - только ток, ограниченный сопротивлением *r*1. Может быть применено двухступенчатое шунтирование сопротивлениями *r*1 и *r*2 с контактами *ВК2* и отделителем Отд. Обязательным условием временной координации при отключении является запаздывание в размыкании вспомогательных контактов по отношению к главным на время, не меньше максимальной длительности гашения основной дуги.**

**С учётом времени гашения вспомогательной дуги наибольшее время обтекания сопротивлений током составляет 0,04 – 0,07 *сек*, что предопределяет довольно тяжёлый термический режим сопротивлений, особенно при работе в циклах. Схема позволяет во включенном положении выключателя держать вспомогательные контакты разомкнутыми, включая их только после подачи команды на отключение (до размыкания главных контактов). По данной схеме возможно также двухстороннее использование сопротивлений (при отключении и включении). При этом временная координация должна предусматривать отключение вспомогательных контактов позже главных, а включение – раньше. При наличии отделителя в этом случае он отключается последним, а включается первым.**

**Особенностью схемы при отсутствии отделителя является необходимость разомкнутого положения как главных, так и вспомогательных контактов в отключенном положении выключателя и соответствующее их выполнение с точки зрения изоляционной прочности.**

**В некоторых случаях, особенно для выключателей высоких классов напряжения, сопротивления подключают только при включении. При этом после завершения операции включения вспомогательные контакты размыкаются и остаются в отключенном положении.**

**Схема *а* распространена в воздушных выключателях на все напряжения. Сопротивление *r*1 колеблется от нескольких десятых *Ома* для генераторных выключателей на большие токи до нескольких сотен *Ом* для выключателей на высокие классы напряжения.**

**Назначение сопротивлений по этой схеме – снижение скорости восстановления напряжения при отключении и ограничение коммутационных перенапряжений при включении. В большинстве случаев применяются линейные сопротивления, однако в некоторых специальных случаях сопротивления выполняются нелинейными (для ограничения коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов и малых индуктивных токов). При этом при наличии отделителя вспомогательные контакты могут вообще отсутствовать.**

**В схеме *б* номинальный ток протекает по главным (*ГК*) и вспомогательным (*ВК*) контактам. Вспомогательный контакт рассчитан при размыкании только на пропускание и гашение сопровождающего тока. Возможно последовательное включение отделителя.**

**Обязательным условием для этой схемы, так же как и для схемы *а*, является заданное запаздывание в размыкании вспомогательного контакта. В схемах *а* и *б* аналогичны и требования к термической стойкости сопротивлений. Поскольку в этой схеме сопротивление *r*1 всегда шунтирует главные контакты, к последним в отношении изоляции предъявляются только требования, обусловленные коммутационными режимами, что для некоторых классов напряжения позволяет выполнить их конструктивно более простыми. Если не предъявлять к этой схеме требования двухсторонней работы сопротивлений, главные контакты могут быть выполнены импульсными, т.е. размыкающимися только на время отключения, однако при этом вспомогательные контакты могут быть рассчитаны на полную включающую способность. Назначение сопротивлений такое же, как и в схеме *а*. К недостаткам этой схемы по сравнению со схемой *а* следует отнести удвоение разрывов, пропускающих номинальный ток и рассчитанных на полную термическую и динамическую стойкость.**

**Схема в по виду аналогична схеме *б*, однако принципиально её отличием является конструктивное выполнение вспомогательного контакта *ВК1*, дающее ему возможность при размыкании пропускать полный ток короткого замыкания и гасить, по крайней мере, сопровождающий ток, ограниченный шунтирующим сопротивлением *r*1.**

**Естественно, что при включенном положении этот контакт должен, как и в схеме *б*, пропускать номинальный ток и сквозной ток короткого замыкания. Это даёт возможность производить одновременно замыкание главных контактов *ГК* и вспомогательных *ВК1* и тем самым существенно уменьшить время обтекания током шунтирующего сопротивления *r*1. Действительно, поскольку к моменту перехода через нуль тока в главном контакте вспомогательный контакт *ВК* уже готов к гашению, прерывание тока во вспомогательном контакте происходит при первом же переходе через нуль после гашения тока в главном контакте *ГК* и, следовательно, время протекания тока по сопротивлению *r*1 будет**

***t* = [π - arcsin(*r*1/√*x*2+*r*12)]/ω,**

**где *x* – реактивное сопротивление внешней цепи, *Ом*.**

**Поскольку обычно *r*1 >> *x*, время *t* при отключении токов *КЗ* близко к 5 *мсек*. Значительно меньшее здесь по сравнению со схемами *а* и *б* время протекания тока по шунтирующему сопротивлению позволяет выполнить его значительно более низкоомным и создать на базе этой схемы так называемые выключатели для особо тяжёлых условий по скорости восстановления напряжения. Замечательной особенностью этих выключателей является практически полная независимость восстанавливающегося на контактах напряжения при отключении *КЗ*, в том числе и неудалённых, от условий внешней цепи.**

**Обычно для простоты конструкцию вспомогательных контактов *ВК1* в схеме *в* принимают аналогичной конструкции главных *ГК*. При необходимости вспомогательные контакты *ВК1* шунтируют второй, более высокоомной, ступенью *r*2. При этом во многих случаях *КЗ* с неповышенными *СВН*, а также небольшие токи отключает вспомогательный контакт *ВК1* при первом переходе тока через нуль, и шунтирующее сопротивление *r*1 вообще током не обтекается, что также является преимуществом по сравнению со схемами *а* и *б*, где термическая нагрузка сопротивлений при отключении *КЗ* практически не зависит от его тяжести.**

**Рассмотрим эквивалентную схему (на основе *рис.12*) выключателя, питающего присоединения, в режиме, наиболее тяжёлом для вспомогательных контактов. При этом *r*в = ∞. Примем в этом расчёте, что шунтирующее сопротивление *r* имеет индуктивность *L*ш. Из очевидных соображений следует, что до размыкания вспомогательного контакта ток через сопротивление *r***

***i*c = *E*m/(√[ω.(*L* + *L*ш)]2 + *r*2).sin(ω.*t*) = (*E*m/*z*).sin(ω.*t*)**

**при напряжении источника питания *e* = *E*m.sin(ω.*t* + ϕ), где tgϕ = ω.(*L* + *L*ш)/*r***

**При отсутствии ёмкости на шинах после гашения сопровождающего тока на вспомогательных контактах скачком восстановилось бы напряжение *E*m.sinϕ, которое бы затем изменялось по синусоидальному закону. При наличии ёмкости получим следующее выражение для восстанавливающегося напряжения на вспомогательном контакте:**

***u*(*p*) = *i*c(*p*).*z*вх(*p*)**

**При этом ток**

***i*c(*p*) = *E*m.ω/[*z*вх.(*p*2 + ω2)];**

**Входное сопротивление схемы со стороны вспомогательных контактов**

***z*вх(*p*) = *r* + *p*.*L*ш + *p*.*L*/(1 + *p*2.*L*.*C*).**

**Отсюда**

***u*(*t*) ≈ *E*m[*r*.sin(ω.*t*) + ω.(*L* + *L*ш).cos(ω.*t*) - ω.*L*.cos(ω0.*t*)]/*z*,**

**где ω0 = 1/(√*L*.*C*).**

**Принимая (ω0/ω)2 – 1 ≈ (ω0/ω)2, получаем *u*(*t*) = *E*m.ω.*L*ш/z, так как при *t* = 0 ω0 >> ω, т.е. индуктивность шунтирующего сопротивления даже при наличии ёмкости создаёт скачёк напряжения на вспомогательных контактах.**

**Начальная скорость восстановления напряжения на вспомогательных контактах ( *t* = 0 )**

**(*du*/*dt*)t=0 = *E*m.ω.*r*/z = *I*c.ω.*r*,**

**т.е. практически не зависит от индуктивности шунтирующего сопротивления.**

**Таким образом, при увеличении *ШС* уменьшается сопровождающий ток и *СВН* на вспомогательном контакте, в то время как на главном контакте *СВН* увеличивается.**

***IV. ПРИМЕНЕНИЕ ШУНТИРУЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ***

***4.1. Применение ШС для ограничения коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов***

***ШС* могут быть применены для ограничения коммутационных перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов и малых индуктивных токов. Эквивалентная схема цепи при отключении ненагруженного трансформатора изображена на *рис*.*15*,*а*. Для упрощения эквивалентной схемы можно пренебречь индуктивностями *L*c, *L*1 и *L*2 по сравнению с *L*μ. Если пренебречь также потерями на гистерезис, вихревыми токами и активными сопротивлениями обмоток, то эквивалентная схема отключения ненагруженного трансформатора в принципе не будет отличаться от схемы отключения малых индуктивных токов. Наибольшие перенапряжения между контактами *ВК* и по отношению к земле возникают в этом режиме при использовании дугогасительных устройств с «жёстким» гашением, т.е. таких, где дуга сразу после размыкания контактов перемещается на дугогасительные электроды и подвергается мощному обдуву сжатым воздухом. При этом весьма вероятны обрывы тока до его естественного перехода через нулевое значение. С учётом сделанных допущений расчётная схема *рис*.*15*,*а* примет вид *рис*.*15*,*б*, где *C* = *C*1 + *C*2 – эквивалентная ёмкость, а *L* – эквивалентная индуктивность. Напряжение, возникающее на контактах выключателя при таком форсированном отключении выглядит следующим образом:**

***u*в = -*E*m.[cos(ω.*t*0) + (β0/β).sin(β.τ + ψ).*e*-ατ x**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**x √(cos(ω.*t*0) – (α/ω).sin (ω.*t*0))2 + (β2/ω2).sin2(ω.*t*0)],**

**где ψ = arctg[β/(ω.ctg(ω.*t*0) - α)] – arctg(β/-α).**

***4.2. Применение ШС для ограничения коммутационных перенапряжений при коммутации ненагруженных линий***

**Как известно, при коммутациях *ВК* ненагруженных линий опасные перенапряжения могут появиться в двух основных режимах: при отключении ненагруженной линии, сопровождающемся повторными пробоями межконтактного промежутка *ВК* и при включении *ВК* на ненагруженную линию, в том числе при *БАПВ*. Перенапряжения при отключении с повторными пробоями для современных *ВВ*, обладающих весьма высокой скоростью восстановления электрической прочности и, как правило, не дающих повторных пробоев, этот режим не является характерным.**

**Большего внимания заслуживает другой режим, наиболее важный для практики конструирования *ВК*, позволяющий оценить нужное значение предвключаемых сопротивлений. Эквивалентная однофазная схема для первой гармонической составляющей переходного режима представлена на *рис*.*14*. Хотя эта схема и не учитывает поправки, обусловленной волновыми процессами, высшими гармоническими, разбросом включения фаз, короной и т.д., однако позволяет с достаточной для практических расчётов точностью оценить влияние в этом режиме предвключаемых сопротивлений и момента включения линии. На *рис*.*14* *L*э и *C*э – эквивалентная индуктивность и ёмкость линии в Г-образной схеме замещения, а *r* – предвключаемое сопротивление *ВК*.**

***V. ВЛИЯНИЕ ШС НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНТАКТАХ***

***5.1. Влияние при отключении КЗ вблизи ВК***

**Расчётными видами *КЗ* для этого случая, определяющими наиболее жёсткие условия по параметрам восстанавливающегося напряжения (*ВН*), являются *КЗ* за *ВК* в цепи мощных трансформаторов, а также *КЗ* на шинах или в непосредственной близости от них при наличии ряда линий, отходящих от шин. С точки зрения оценки влияния значения *ШС* на процесс отключения эти два случая принципиально отличаются.**

**На *рис*.*10* представлена характерная осциллограмма *ВН* при отключении КЗ за трансформатором и параметры *ВН* (частота *f*в и коэффициент превышения амплитуды первого пика *k*а), определённые на основании обследования непосредственно в системах большого числа трансформаторов в зависимости от их установленной мощности *P* и класса напряжения *U*ном. Процесс восстановления напряжения при отключении *КЗ* за трансформаторами имеет в подавляющем большинстве случаев одночастотный характер. Зависимыми от параметров *f*в и *k*а для каждого трансформатора являются при определённых токах *КЗ* собственная ёмкость и начальная скорость *ВН*. Рекомендованная ГОСТ 687-78 испытательная схема для этого режима отражает физический процесс *ВН*, изложенный выше. Указанная схема изображена на *рис*.*11*. При анализе схемы можно без заметного влияния на точность при практических расчётах пренебречь активным сопротивлением цепи *КЗ*.**

**Математическое выражение общей зависимости коэффициента превышения амплитуды первого пика от параметров рассматриваемой схемы и значения *ШС* весьма сложно. Для иллюстрации влияния *ШС* на характер *ВН* на *рис*.*9* построены кривые кратности *ВН* *u*в по отношению к действующему значению наибольшего рабочего фазного напряжения *U*ф для одного из конкретных случаев при КЗ со стороны обмотки 110 *кВ* трансформатора при *I* = 9,2 *кА*, *C* = 5,43.10-9 *Ф*, *L* = 0,031 *Гн* и *r*1 = 854 *Ом* и значениях *ШС* от бесконечности до 1000 *Ом*, т.е. до перехода колебательного процесса в апериодический.**

***5.2. Влияние при отключении КЗ на линии (неудалённое КЗ)***

**Эквивалентная расчётная схема изображена на *рис*.*13*. Здесь *z*в – - волновое сопротивление короткозамкнутой линии. Источник напряжения в данном случае характеризует линейно нарастающее напряжение *E*m.*t* для промежутка времени от момента погасания дуги до прихода волны, отражённой от места *КЗ*, причём значение *E*m равно отклонению до этого момента напряжения на стороне линии от начального плюс добавка напряжения к этому моменту со стороны источника питания; *L*ш – индуктивность шунтирующего сопротивления, а *r* – его активное сопротивление. При расчёте *ВН* можно пренебречь ёмкостью *C* присоединённого к шинам оборудования и током, протекающим через индуктивность *L*. Для случая, когда индуктивность *ШС* *L*ш близка к нулю**

***z*(*p*) = 1/(1/(*r*в + *z*в) + 1/*r*);**

***u*в(*p*) = *E*m/[*L*.*p*2.(1/(*r*в + *z*в) + 1/*r*);**

***u*в(*t*) = (*E*m/*L*).r.(*r*в + *z*в)/(r + *r*в + *z*в).*t*;**

***du*в/*dt* = (*E*m/*L*).r.(*r*в + *z*в)/(r + *r*в + *z*в) = ω.*I*m.r.(*r*в + *z*в)/(r + *r*в + *z*в).**

**Таким образом, при неудалённом *КЗ* *ШС* уменьшает *СВН* на контактах выключателя в [1 + (*r*в + *z*в)/*r*] раз.**

***ЛИТЕРАТУРА***

**1. *В*.*В*. *Афанасьев*. *Ю*.*И*. *Вишневский*. Воздушные выключатели. Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1981. – 384 с., ил.;**

**2. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения под редакцией *В*.*В*. *Афанасьева*. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. – 544 с., ил.**