

В первой части статьи («Новости ЭлектроТехники» № 4(88) 2014) были рассмотрены основные причины, по которым УЗИП необходимо защищать от сверхтоков с помощью таких устройств, как предохранители или автоматические выключатели. Были также обозначены проблемы, возникающие при совместной работе УЗИП с устройствами защиты от сверхтоков, и рассмотрена работа предохранителей при протекании импульсных токов грозовых разрядов в электрических цепях.

Во второй части статьи Алексей Леонидович Зоричев разбирает особенности работы автоматических выключателей, установленных в цепях подключения УЗИП.

ЦЕПИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ УЗИП Особенности защиты от сверхтока

При очевидных достоинствах предохранителей значительная часть электроустановок оборудуется устройствами защиты от сверхтоков (УЗСТ) многократного действия, то есть автоматическими выключателями (АВ) либо их комбинацией с УЗО. Каким образом реагируют данные устройства на импульсные токи больших амплитуд и различной длительности (формы волны), необходимо разобрать отдельно.

Вопросы применения АВ и УЗО совместно с УЗИП в полной мере не рассматриваются ни в одном из существующих отечественных или зарубежных стандартов. Приложение «Р» стандарта ИЕС 61643-12 (2008-11) [1] объясняет этот факт очень большим разнообразием технических и конструктивных решений, предлагаемых производителями данных устройств. Соответственно даже при кажущейся схожести параметров АВ из разных линеек продукции, предлагаемых одним производителем, устойчивость к импульсным токам у них будет существенно отличаться.

Необходимо отметить, что решение проблемы защиты электроустановок от сверхтоков при аварийных режимах работы УЗИП достаточно разнообразно. Обычно производители, специализирующиеся исключительно на разработке УЗИП, предлагают в качестве УЗСТ использовать плавкие вставки в соответствии с рекомендациями [1]. Производители, имеющие в линейках своей продукции как УЗИП, так и АВ, в большинстве случаев рекомендуют различные комбинации их совместного применения при воздействии стандартными волнами импульсных токов. Но при этом они не публикуют каких-либо подтверждающих результатов контрольных испытаний, что в итоге приводит к варианту выбора способа защиты электроустановки от аварийных режимов работы УЗИП либо на основе инженерной интуиции проектировщика, либо на основе доверия потребителя к рекомендациям данного конкретного производителя.

РАБОТА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Попытки разработать обобщенные рекомендации по выбору и правилам применения АВ и УЗО в схемах с УЗИП предпринимались и предпринимаются до сих пор. Материалы, описывающие различные исследования и испытания, неоднократно предлагались к обсуждению на крупнейших международных научных форумах. Примером тому является проводимая в разных странах с периодичностью раз в два года Международная конференция по молниезащите (International Conference on Lightning Protection, ICLP).

Основные вопросы, которые ставятся исследователями при проведении экспериментов по координации УЗИП и АВ:

- Каким образом происходит срабатывание АВ при прохождении импульсного тока?
- Подвергаются ли при этих токах плавлению или привариванию поверхности контактов?
- Изменяются ли переходные сопротивления контактов?
- Изменяется ли характеристика срабатывания АВ после воздействий импульсными токами разной длительности и амплитуды?
- Каким может быть значение импульсного тока молнии, вызывающее повреждение или разрушение АВ?



Алексей Зоричев,
технический директор, начальник
испытательной лаборатории
ЗАО «Хакель Рос»,
г. Санкт-Петербург

Данные вопросы – лишь видимая часть огромной исследовательской работы. Вслед за ними появляется необходимость решения прикладных задач по выбору и применению УЗСТ из всего доступного модельного ряда (предохранители, АВ и их комбинации с УЗО). Главным вопросом при этом остается вопрос селективности при одновременном применении разных существующих типов УЗСТ и их координации с УЗИП различных классов. Так же исследователями рассматриваются варианты разработки совершенно новых «интеллектуальных» устройств, способных отличать тип воздействия (импульсный ток или ток КЗ) и в зависимости от этого отключать или не отключать защищаемую цепь с УЗИП.

Часть предварительных ответов на сформулированные выше вопросы была дана в [2]. По результатам испытаний импульсными токами волны 10/350 мкс с разными амплитудными значениями моделей АВ нескольких производителей было определено, что процесс полного отключения АВ состоял из нескольких последовательных событий, укладываемых в диапазон времени около 7–8 мс. Очевидно, что этот временной интервал значительно превышает время действия стандартного импульса тока волны 10/350 мкс.

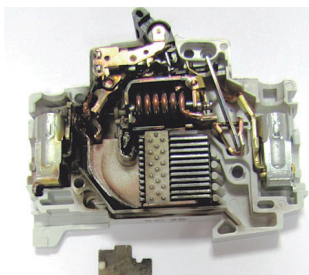
В ходе эксперимента проводилась видеосъемка и фиксация осциллограмм токов и напряжений в контрольных точках схемы испытаний. Результаты контроля показали, что при прохождении импульсного тока через контакты АВ под воздействием возникающих электромагнитных сил происходило их незначительное движение в сторону расцепления с потерей непосредственного физического соприкосновения. При этом между поверхностями контактов возникало интенсивное дугообразование и искрение, что фиксировалось видеосъемкой. Степень этого процесса напрямую зависела от амплитудных и временных значений импульсного тока, длительность данной фазы процесса составляла около 1 мс. Приблизительно через 2 мс после окончания импульса тока контакты под пружинным воздействием механизма расцепления возвращались обратно в соприкосновение, но еще через 3–4 мс после этого за счет переданной в расцепитель энергии импульса происходило его механическое срабатывание и АВ отключался.

В результате серии экспериментов было установлено, что контактные площадки АВ при воздействии импульсных токов могут оплавляться и деформироваться. Приваривания контактов друг к другу непосредственно при данных испытаниях не происходило. Результаты измерений переходного сопротивления между контактами исследованных АВ не показали его серьезного изменения ни в сторону уменьшения, ни в сторону увеличения. Времятоковые характеристики срабатывания АВ не изменялись.

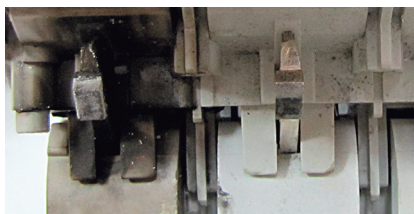
Один из главных выводов [2] заключается в том, что временной интервал фазы первичного размыкания контактов АВ при прохождении импульсного тока и последующее время, необходимое для полного отключения АВ, зависят от удельной энергии W/R поданного импульса тока и соответственно от особенностей конструкции и настройки расцепителя АВ на какое-то заранее рассчитанное значение удельной энергии. При значительном превышении энергии может произойти разрушение механизма расцепителя, корпуса и других узлов АВ непосредственно в момент протекания импульсного тока.

• Фото 1.

Автоматический выключатель после нескольких воздействий импульсным током



• Фото 2. Контакты автоматического выключателя после воздействия импульсного тока 20 кА (волны 10/350 мкс)



Характеристикой современного АВ, определяющей количество энергии, которую он способен пропустить через себя до момента отключения тока короткого замыкания, является интеграл Джоуля – I^2t , о котором уже упоминалось в первой части статьи при рассмотрении плавких вставок. Напомним, что значение интеграла Джоуля определяется по формуле:

$$I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 dt,$$

где i – амплитудное значение тока КЗ в момент времени – t ;

t_0 – время начала действия тока;

t_1 – время окончания действия тока.

Таким образом, зная основные временные, амплитудные параметры ожидаемой волны импульсного тока и его удельную энергию W/R (или предельные аналогичные параметры УЗИП), теоретически можно подобрать соответствующий по параметру I^2t АВ, который будет пропускать эти импульсные токи без срабатывания расцепителя и тем более без разрушения. Вероятно, через значение интеграла Джоуля можно решать вопросы селективности АВ и предохранителей при их совместном применении в электроустановке, а также координировать их работу с УЗИП разных классов. Тем не менее данное предположение пока еще нуждается в тщательной проверке в условиях испытательных лабораторий.

Исследования, описанные в [2], проводились в конце 90-х годов и были опубликованы на ICLP-2000. Но вплоть до момента издания стандарта [1] в 2008 году, какой-либо новой информации в стандартах МЭК по применению и выбору АВ так и не появилось. Новая редакция документа, по всей видимости, готовится к выходу в 2015 году. Будут ли там обновленные данные, пока не известно.

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ГОСТ Р МЭК 61643-12-2011 [3] координацию УЗИП с кажим-либо УЗСТ или УЗО рекомендуется выполнять так, чтобы при протекании номинального импульсного разрядного тока I_n (волны 8/20 мкс) через цепочку «УЗСТ – УЗИП – земля» это устройство не срабатывало.

Тем не менее стандартом допускается, что при токе, превышающем значение I_n , расцепитель УЗСТ может сработать. Вводимое устройство многократного действия (такое как АВ) не должно повреждаться импульсом, т.е. оно должно иметь возможность повторного включения. Благодаря тому что расцепители АВ или УЗО срабатывают только через определенное время, через них успевает пройти полностью весь импульс тока, даже если эти устройства далее отключаются.

Этот факт был подтвержден серией экспериментов, проведенных в испытательной лаборатории на генераторах импульсных токов (ГИТ) с импульсами тока волны 8/20 и 10/350 мкс. Воздействиям подвергались АВ разных моделей и производителей с времятоковыми характеристиками «В», «С» и «D», различными номинальными токами, уставками и отключающими способностями. Целью испытаний было подтверждение данных, опубликованных в [1–4], по устойчивости УЗСТ разных типов и производителей к импульсным токам.

Результаты показали, что практически все АВ модульного типа разных производителей (те, что иногда называют аппаратами бытовой серии) отключаются при прохождении импульсных токов I_{imp} волны 10/350 мкс в диапазоне от 1 до 2 кА. Значения отключающей способности I_{cu} были взяты 6, 10 и 15 кА. Состояние внутреннего механизма расцепителя подобного АВ после нескольких импульсных воздействий током волны 10/350 мкс

показано на фото 1. При этом механическая часть АВ продолжала функционировать, контактные группы при нескольких срабатываниях в роли искрового промежутка были значительно подгоревшими. Переходное сопротивление на момент выполнения данной серии тестов не проверялось.

При повышении амплитуды импульсных воздействий волной тока 10/350 мкс выше 5 кА, образцы АВ некоторых производителей подвергались разрушению с внешними повреждениями корпуса. При прохождении импульсных токов I_n волны 8/20 мкс значения токов отключения колебались в диапазоне от 12 до 35 кА в зависимости от модели АВ и их производителя.

Результаты тестов показали, что модульные (бытовые) АВ в подавляющем большинстве не могут быть использованы в электрических цепях, подверженных протеканиям импульсных токов при прямых попаданиях молнии в систему молниезащиты объекта или непосредственно во ввод электропитания, что особенно актуально для воздушного ввода в объект. Единственным допустимым вариантом их применения в качестве вводных автоматов является схема электроснабжения, в которой УЗИП соответствующего класса I или I+II включается ранее таких АВ по ходу электроэнергии. Вопрос защиты УЗИП от действия токов КЗ в данном случае должен решаться последовательным включением с ними либо плавкой вставки, либо АВ, которые устойчивы к ожидаемым импульсным токам. Как вариант, возможно решение, при котором функцию защиты УЗИП от сверхтока будет выполнять АВ, находящийся в начале линии электроснабжения и обеспечивающий защиту всей линии от токов КЗ. Такое решение допустимо для линий с очень низким током КЗ, которого не будет хватать для возникновения пожара или взрывного разрушения УЗИП, опасного для окружающего оборудования и людей.

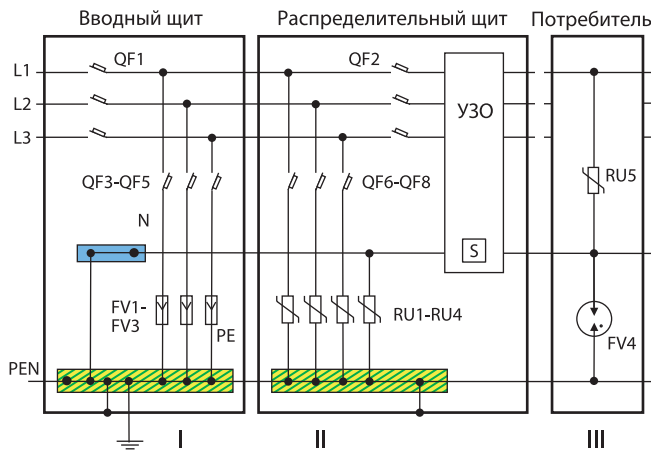
Промежуточным результатом исследований стал выбор АВ в литых корпусах, имеющих отключающую способность I_{cu} не менее 40/25 кА для сетей 230/400 В соответственно. Они лучше всего показали себя при совместных испытаниях как с УЗИП класса I+II, так и без УЗИП. Отключение не происходило при воздействии на последовательную цепь из АВ и УЗИП импульсным током I_{imp} до 20 кА (10/350 мкс) включительно, что соответствует импульсным характеристикам УЗИП класса I+II в большей части их диапазона импульсных токов.

В диапазоне импульсных токов до 25 кА (10/350 мкс) не отключались АВ с отключающей способностью $I_{cu} = 85/50$ кА соответственно для сети 230/400 В. Искрение на токах до 5 кА (волны 10/350 мкс) практически не возникало, но с повышением значений тока до 20 кА контакты таких АВ также подвергались нагреву и частичному оплавлению (фото 2).

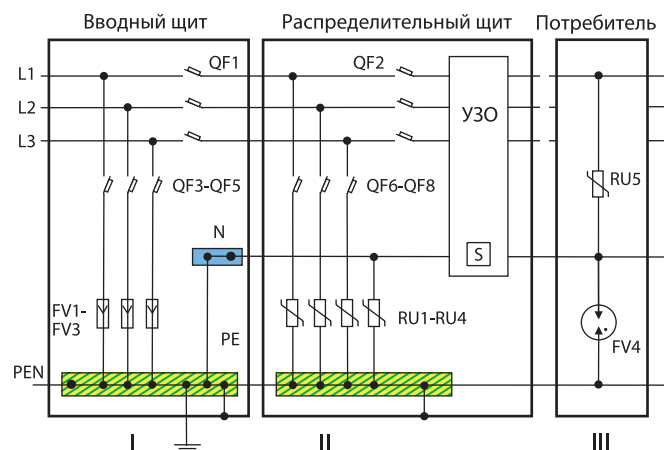
Основной вывод при исследовании возможности использования АВ в цепях подключения УЗИП состоит в том, что на их устойчивость к импульсным токам влияет прежде всего конструкция электромагнитного расцепителя и массогабаритные показатели клемм, внутренних шин и особенно контактных групп автомата. Некоторые специалисты ставят вопросы о форме контактов, которая обязательно должна быть учтена с точки зрения распределения высокочастотных импульсных токов ближе к поверхности металлических проводников (так называемого скин-эффекта). Дальнейшие вопросы, связанные с применением АВ в цепях подключения УЗИП, в настоящее время находятся в стадии изучения.

Сложность данного процесса заключается в том, что каждый производитель имеет свои конструктивные решения и ноу-хау. Испытания, как правило, проводятся для конкретного заказчика, желающего подобрать для своих проектных решений

• Рис. 1. Установка АВ и УЗИП в TN-C-S сеть 230/400 В



• Рис. 2. Альтернативный вариант установки АВ и УЗИП в TN-C-S сеть 230/400 В



► конкретные УЗИП и устройства защиты от сверхтоков, закладываемая стоимость испытаний в свои сметные расчеты. Возможно, такие испытания могут быть интересны и производителям АВ для продвижения своей продукции на рынках.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УЗО В СХЕМАХ С УЗИП

Способность УЗО противостоять импульсным токам при использовании этих устройств в сетях совместно с УЗИП не задается, за исключением УЗО типа S, которые в соответствии с ГОСТ Р 51326.1 и ГОСТ Р 51327.1 должны выдерживать импульс 3 кА волны 8/20 мкс без расцепления.

УЗИП классов I и II должны быть включены до УЗО (по ходу электроэнергии), как показано на рис. 1. Тогда их срабатывание не вызовет ложного отключения УЗО. Устройства защиты класса III могут быть установлены после УЗО (по ходу электроэнергии), если ожидаемые импульсные токи через них не превысят значения 3 кА волны 8/20 мкс.

ВЫВОДЫ

Рассмотрев разные комбинации включения автоматических выключателей и УЗО при их совместной работе с УЗИП, можно утверждать следующее:

- Срабатывание АВ или УЗО при прохождении через них импульсных токов при совместной работе с УЗИП не должно рассматриваться как отказ УЗИП, поскольку электроустановка в момент воздействия импульсного тока и напряжения остается защищенной. Но сработавший автомат или УЗО должны быть повторно включены, что является достаточно большим недостатком такого схемного решения.
- Возможные отключения вводных автоматических выключателей, включенных по аналогии с QF1 (рис. 1), вследствие прохождения импульсных токов через УЗИП, которые установлены после них по ходу электроэнергии, будут приводить к перерывам в электроснабжении потребителей. Если такие режимы работы неприемлемы для электроустановки, нужно тщательно подбирать вводный автомат по его устойчивости к импульсным токам волны 10/350 мкс, не забывая об обеспечении селективности с ним по токам короткого замыкания автоматов QF3–QF5, которые включены непосредственно в цепи УЗИП и при этом должны обладать необходимой устойчивостью к импульсным токам волны 10/350 мкс.
- Как альтернативный вариант, можно использовать специальные схемотехнические решения по включению УЗИП с автоматами QF3–QF5 до вводного автомата QF1 (рис. 2). При этом автоматы QF3–QF5 должны быть устойчивы к ожидаемому импульсному току волны 10/350 мкс и способны отключать токи КЗ данной линии электропитания в точке своей установки. Требования по импульсным токам к вводному автомату QF1 могут быть снижены до условий координации с УЗИП второй ступени, и скорее всего речь уже будет идти об устойчивости к импульсному току волны 8/20 мкс (бытовая серия АВ).

- Применяя устройства защиты от сверхтока, необходимо учитывать, что при их последовательном подключении с УЗИП коммутационного типа (разрядниками) в момент их срабатывания может возникать сопровождающий ток со значениями до нескольких кА (в зависимости от мощности источника и расчетного тока КЗ в точке установки разрядника). Сопровождающий ток будет вызывать отключение УЗСТ, если данное УЗИП не имеет конструктивного решения по самогашению дугового разряда сразу же после окончания импульсного тока. В этой ситуации необходимо четко понимать, что если производителем указана способность данного УЗИП на основе разрядника гасить сопровождающий ток больших величин таким образом, что его протекание не успеет вызвать срабатывание АВ или предохранителя номиналом 25 А, это лишь указывает на способность разрядника быстро и хорошо гасить сопровождающий ток источника питания большой мощности. Но выбор АВ с точки зрения воздействия импульсных токов придется осуществлять с учетом всех изложенных выше критериев, связанных с параметром интеграла Джоуля $-I^2t$, и каких-либо чудес от применения разрядника в данном случае ожидать не следует.

Примечание. При испытаниях, согласно требованиям ГОСТ Р 51992-2011, сопровождающий ток может инициироваться воздействием на разрядник, находящийся под напряжением U_c , импульсным током I_n волны 8/20 мкс, который на самом деле не вызывает отключения у большинства модульных АВ с номинальным током 25А. Но это совершенно не означает того, что импульсный ток при реальном грозовом воздействии (волны 10/350 мкс) не отключит, а в некоторых случаях не разрушит данный автомат или предохранитель, что было четко подтверждено испытаниями, описанными выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 61643-12 (2008-11): Low-voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Selection and application principles. Edition 2.0.
2. Meppelink J., Ehrhardt R. A contribution to the behavior of low voltage circuit breakers under lightning impulse current 10/350 μ s // Proceedings of the 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Rhodes (Greece), 2000. Pp. 736–741.
3. ГОСТ Р МЭК 61643-12-2011 Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Принципы выбора и применения.
4. Noack F., Schönau J., Reichert F. Lightning pulse current withstand of low-voltage fuses // Proceedings of the 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Cracow (Poland), 2002. Pp. 556–561. ■