

Продолжение. Начало в № 2 '2010

Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 2

Владимир ГУРЕВИЧ,
к. т. н.
vladimir.gurevich@gmx.net

Объекты электроэнергетики являются мощными источниками электромагнитных излучений, буквально пронизывающих все прилегающее к ним пространство. Но объекты электроэнергетики и сами подвергаются воздействию мощных внешних электромагнитных излучений. Еще каких-то 15–20 лет назад эти проблемы волновали лишь узкий круг теоретиков. Сегодня, в связи с все расширяющимся применением в электроэнергетике высокочувствительных микроэлектронных и микропроцессорных устройств, требуется, чтобы все специалисты, работающие в электроэнергетике, а особенно специалисты в области релейной защиты и автоматики обладали знанием хотя бы базовых вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС).

Отдельные вопросы воздействия электромагнитных излучений на микропроцессорные реле защиты (МУРЗ) и проблемы ЭМС уже неоднократно поднимались различными авторами на страницах нашего журнала. Автор попытался в этой статье создать более полную картину проблемы электромагнитных воздействий на МУРЗ, а также приводит в ней новые данные, позволяющие специалистам-релейщикам лучше понять механизм таких воздействий и лучше осознать существующие проблемы и опасности. Статья состоит из трех частей. В данной части рассматриваются проблемы экранирования контрольных кабелей и искажения сигналов трансформаторами тока.

Проблемы экранирования контрольных кабелей

Основным средством защиты контрольных кабелей от наведенных напряжений является их экранирование, а также выбор правильного способа прокладки с учетом максимально возможного удаления от молниеотводов и силовых кабелей, использование специальных кабельных лотков. Существует несколько типов таких лотков: пластмассовые со вставками из алюминия, пластмассовые с напылением металла, алюминиевые.

В общем случае эффективность металлического экрана (то есть степень ослабления электромагнитного поля) обусловлена двумя его свойствами: поглощением энергии при прохождении электромагнитной волны через проводящую среду и отражением волны на границе раздела двух сред. Оба эти яв-

ления зависят как от частоты электромагнитной волны, так и от материала экрана. Лучшее поглощение электромагнитной энергии обеспечивают ферромагнитные материалы (железо, пермендюр, пермаллой), а лучшее отражение электромагнитной волны обеспечивается диамагнитными материалами (медь, алюминий). Эффективность экранирующих свойств ферромагнитных материалов снижается с увеличением напряженности поля из-за насыщения, а эффективность диамагнитных экранов снижается с ростом частоты из-за роста сопротивления. По ряду причин технического и экономического порядка наибольшее распространение получили экраны в виде медной сетки (оплетки) и различных профилей из алюминия.

Поскольку глубина проникновения электромагнитной волны в металл зависит обратно пропорционально от частоты этой волны, то очевидно, что чем толще экранирующая металлическая оболочка, тем для более широкого частотного диапазона она будет эффективно ослаблять электромагнитное поле. Например, если для эффективного экранирования на частоте 500 кГц достаточной является толщина медного экрана около 0,6 мм, то для промышленной частоты 50 Гц необходим медный экран с толщиной стенок уже около 6 см (для ферромагнитного экрана достаточна стенка в 5 мм).

Исходя из изложенного, ясно, что наименьшим экранирующим эффектом обладают пластмассовые лотки с металлическим напылением, широко используемые для прокладки контрольных кабелей. Такая конструкция начинает работать эффективно лишь на ча-

стотах 600 МГц и выше. На частотах ниже 200 МГц она вообще не работает. Наводки на контрольные кабели на подстанциях имеют обычно значительно более низкую частоту, чем указанные 200 МГц, поэтому применение пластмассовых лотков с напылением вообще бессмысленно. Вместе с тем алюминиевые лотки и медная оплетка на кабелях все еще способны ослабить наводимые напряжения в десятки раз, и поэтому они нашли широкое применение. Наибольшее ослабление наводок в широком диапазоне частот может обеспечить прокладка контрольных кабелей в стальных водопроводных трубах.

Для успешного функционирования экранированных оболочек необходимо обеспечить стекание наведенного на них заряда в «землю». В идеальном случае потенциал по всей длине экрана должен быть равным потенциалу «земли», поэтому иногда в особо чувствительных высокочастотных электронных цепях применяют многократное заземление экрана кабеля через каждые $0,2\lambda$ (λ — длина волны электромагнитного поля). При прокладке экранированных кабелей на подстанциях можно использовать такое дополнительное решение, как прокладка параллельно трассе кабелей медной шины выравнивания потенциалов, заземленной с двух сторон. Однако чаще используется простое заземление экрана с одной или с двух сторон (рис. 11).

Часто приходится слышать мнение релейщиков о целесообразности заземления экранов контрольных кабелей лишь с одной стороны. По-видимому, это мнение возникло под влиянием двух известных релейщикам фактов: заземления токовых цепей

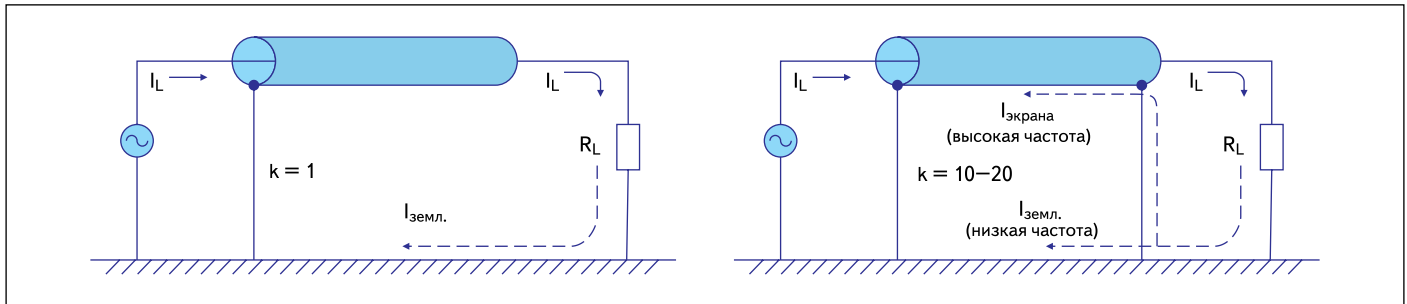


Рис. 11. Работа экрана, заземленного с одной и с двух сторон

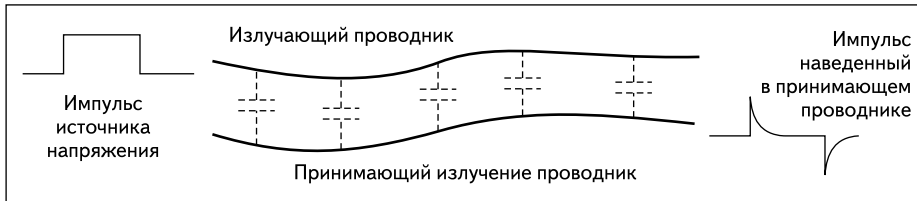


Рис. 12. Импульсная наводка через емкостную связь между проводниками

лишь с одной стороны, а также заземления экранов силовых высоковольтных кабелей с одной стороны. Эти известные факты иногда принимают во внимание при заземлении экранов контрольных кабелей без учета того, что заземление в этих примерах является средством обеспечения электробезопасности, а не защиты от помех.

В действительности заземление экрана контрольного кабеля с одной стороны является эффективным лишь против емкостных наводок (рис. 12) (так называемая электростатическая защита) и совершенно неэффективной мерой (коэффициент ослабления помехи $k = 1$) для индуктированных наводок, поскольку этот экран не обеспечивает цепи для замыкания тока помехи.

При заземлении экрана с двух сторон появляется дополнительная цепь (экран), обладающая значительно меньшим импедансом для высокочастотного сигнала, чем «земля». В результате рабочий сигнал делится на две части, одна из которых (низкочастотная) по-прежнему возвращается через «землю», а вторая (высокочастотная) — через экран кабеля. Таким образом, для высокочастотной составляющей ток в экране равен току в центральной жиле, направленному встречно, и компенсируется благодаря электромагнитной связи между экраном и центральной жилой. Так обеспечивается защита от высокочастотного излучения с центральной жилы во внешнее пространство (то есть на соседние кабели) с коэффициентом ослабления помехи $k = 3-20$. Эта система работает так же эффективно и при внешнем электромагнитном воздействии на экран, при котором наведенный в экране высокочастотный сигнал замыкается через «землю». При выполнении присоединения экрана к земляной шине следует иметь в виду, что никакие «накрутки» соединительного провода на экран недопусти-

мы, как недопустимо и свертывание в кольца длинного соединительного провода между экраном и земляной шиной. Каждый дополнительный виток этого провода увеличивает импеданс системы заземления на высоких частотах и резко снижает ее эффективность.

Мощным источником помех на подстанциях иногда выступают источники, совершенно не явные и не очевидные. Например, на одной из российских подстанций были зафиксированы случаи ложных отключений одного из высоковольтных выключателей при подаче команды на отключающую катушку другого выключателя. Контрольные кабели, идущие к отключающим катушкам обоих выключателей, были не экранированы и проходили в общем лотке на протяжении примерно 25 м. Эксперименты с осциллографированием напряжений, выполненные на этой подстанции (рис. 13), показали, что

на катушке ложно сработавшего выключателя могут наводиться импульсы с амплитудой 500–728 В при подаче управляющего напряжения 220 В на катушку второго выключателя. Длительность этого наведенного импульса иногда бывает такой, что приводит к ложному срабатыванию выключателя (рис. 13а). Возникновение столь мощной импульсной помехи в цепях управления вызывает у специалистов некоторое недоумение и даже замешательство. Все становится понятным, если вспомнить, что катушка отключения выключателя снабжена ферромагнитным сердечником и имеет довольно значительную индуктивность, а выключатель снабжен блок-контактом, разрывающим ток в этой катушке при срабатывании выключателя. Как известно, энергия, выделяемая при разрыве цепи тока с индуктивностью, может быть весьма значительной. После заземления с двух сторон экрана контрольного кабеля одного из выключателей мощность индуктированного импульса помехи на втором кабеле значительно уменьшилась (рис. 13б), и случаи ложных срабатываний второго выключателя полностью прекратились.

Проблема с двусторонним заземлением экрана может возникнуть лишь при постоянном протекании через центральный проводник значительных по величине переменных

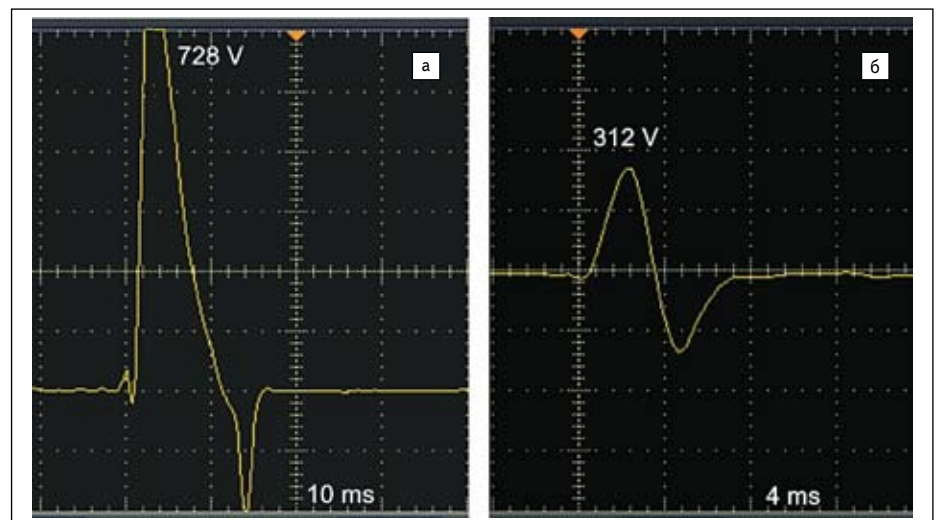


Рис. 13. Индуктированные наводки одного контрольного кабеля на другой: а) неэкранированные кабели; б) один кабель экранирован с двух сторон

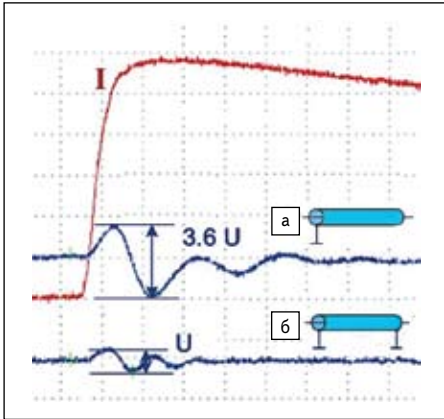


Рис. 14. Наводки напряжения на контрольные кабели с односторонним (а) и двусторонним (б) заземлением экрана при протекании импульса тока (I) молнии через заземлитель

токов (обычно токов промышленной частоты), вызывающих в экране значительные индуктированные токи, приводящие к его сильному нагреву. В результате приходится применять провода большего сечения (чтобы уменьшить нагрев изоляции проводов) или заземлять один из концов экрана через конденсатор. Конденсатор обладает большим сопротивлением для токов промышленной частоты и очень малым сопротивлением для высокочастотной помехи.

В некоторых случаях может возникнуть ситуация, когда через заземленный с двух сторон экран протекает значительный импульсный ток помехи, вызывающий наводку в центральной жиле. Такое может произойти, например, под действием значительного тока молнии, протекающего в близко расположенных от контрольных кабелей элементах системы заземления или под действием тока близкого короткого замыкания (рис. 14). Как показано в [14], при токе молнии в заземлителе 100 кА, даже при заземлении экрана кабеля с двух сторон, пиковое значение напряжения помехи на центральной жиле кабеля может достигать до 8,2 кВ, что значительно превосходит уровень устойчивости МУРЗ.

В этих случаях необходимо либо изменить трассу пролегания контрольных кабелей (удалить их от силовых коммутационных аппаратов, молниеотводов, разрядников), либо уменьшить разность потенциалов между за-

земленными концами экрана кабеля при воздействии на него мощной импульсной помехи. Последнее решается путем прокладки вдоль кабелей медной шины, заземленной с двух сторон, которая так и называется — «шина уравнивания потенциалов». Ее действие обусловлено тем, что импеданс медной шины на высоких частотах значительно меньше импеданса «земли» (и даже импеданса экрана), и поэтому основная часть высокочастотного тока импульсной помехи будет протекать через эту шину, а не через экран. Применение этих мер совместно с широким использованием варисторов, рассмотренных выше, позволит надежно защитить МУРЗ. Разумеется, эти меры будут наиболее эффективными, если их принимать на стадии проектирования и строительства новой подстанции, а не при «латании дыр» на старой подстанции.

Противоположным эффектом обладает фильтр на основе ферромагнитного кольца (цилиндра), одеваемого на провод (рис. 15). Импеданс катушки, образованной одним или двумя витками контрольного кабеля, пропущенного через ферритовое кольцо, очень мал для низкочастотных рабочих сигналов и переменного тока промышленной частоты и очень велик для высокочастотных (импульсных) сигналов в определенном диапазоне частот, зависящем от количества витков и материала кольца.

В результате импульсные и высокочастотные помехи, попавшие в такой кабель, будут существенно ослаблены. В релейной защите такие фильтры можно использовать повсеместно: и в цепях питания, и в цепях передачи логических сигналов, и во вторичных цепях трансформаторов тока и напряжения (рис. 16).

Влияние дифференциальных помех на неэкранированный контрольный кабель (возникающих из-за разности наведенных потенциалов на прямом и обратном проводе) можно также уменьшить, путем такого расположения проводников в кабеле, при котором в них индуцируются равные, но противоположные по знаку напряжения помехи. Это достигается скручиванием двух проводников (прямого и обратного), по которым протекает переменный ток. Такой метод эффективен на частотах до 5 кГц, и его эффективность зависит от равномерности и плотности скручивания проводов.

Искажения сигналов в цепях трансформаторов тока

Для обсуждения вопроса об искажениях, вносимых трансформаторами тока в сигнал, контролируемый реле защиты (ТТ), рассмотрим типовую конструкцию и характеристику традиционных ТТ.

Высоковольтные ТТ, предназначенные для установки в электрических сетях (рис. 17), имеют первичный проводник (виток) 7, включаемый в разрыв высоковольтной линии, и несколько независимых вторичных обмоток, каждая из которых снабжена собственным сердечником (кernом) 8. Основная изоляция в таких трансформаторах выполняется обычно путем обвивки первичного витка несколькими слоями специальной бумажной ленты, чередующейся с тонкой алюминиевой фольгой, с последующей заливкой всего свободного объема жидким трансформаторным маслом (рис. 17).

Поскольку все вторичные обмотки полностью независимы одна от другой и имеют отдельные сердечники, то их правильнее было бы называть внутренними трансформаторами тока. Эти трансформаторы выполняются, как правило, с разными электрическими и магнитными характеристиками и имеют разную мощность, точность и др. Маломощные высокоточные обмотки предназначены для подключения измерительных приборов, а более мощные, но менее точные — для подключения реле защиты.

Как и в любом другом техническом устройстве, в ТТ имеют место потери. Вследствие потерь не весь первичный ток трансформируется во вторичную цепь. Эти потери обуславливают токовую погрешность ТТ. Кроме того, ток во вторичной цепи несколько сдвигается по фазе относительно первичного тока, что обуславливает угловую погрешность ТТ. Потери в ТТ зависят в значительной степени от состояния его магнитной цепи. Пока железо магнитопровода не насыщено, сохраняется прямо пропорциональная зависимость между первичным и вторичным токами. С увеличением первичного тока увеличивается степень насыщения железа магнитопровода, соответствующая характеристика начинает изменяться (рис. 18). Причем с увеличением нагрузки вторичной цепи ТТ (то есть при увеличении импеданса нагруз-

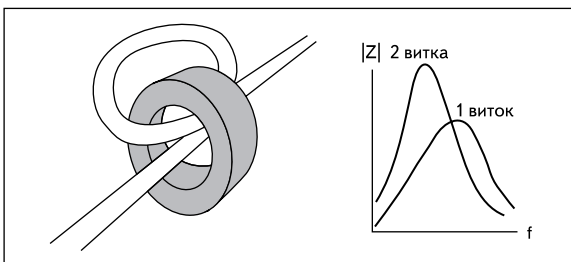


Рис. 15. Фильтр на основе ферритового кольца и его частотная характеристика

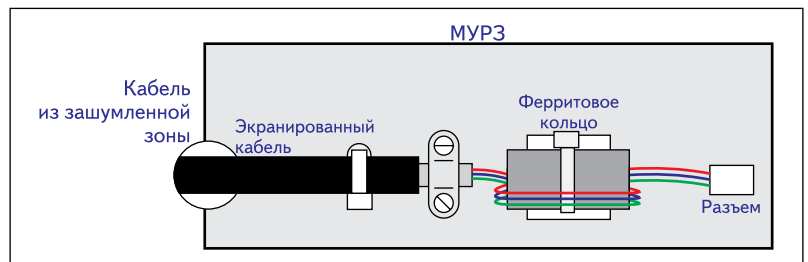


Рис. 16. Установка фильтра на основе ферритового кольца на контрольном кабеле, входящем в МУРЗ

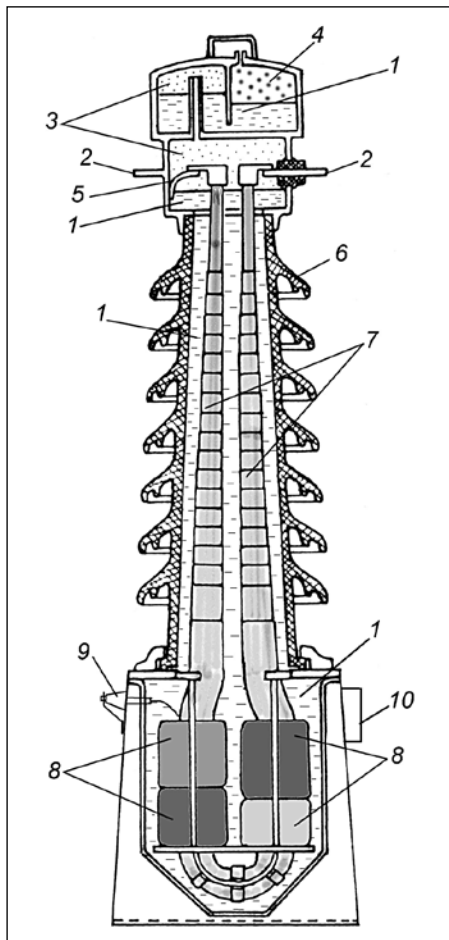


Рис. 17. Одна из распространенных конструкций высоковольтного трансформатора тока (160 кВ) с бумажно-масляной изоляцией:
 1 — масло;
 2 — медные пластины для включения в контролируемую цепь тока;
 3 — емкости, заполненные азотом;
 4 — воздух;
 5 — внутренняя перемычка, соединяющая один из выводов с металлическим корпусом верхнего резервуара;
 6 — фарфоровый изолятор;
 7 — изолированный первичный проводник (первичный виток);
 8 — четыре независимых вторичных обмотки с собственным магнитопроводом каждая;
 9 — изолятор на внешней стенке бака с выводом, присоединенным к баку;
 10 — клеммная коробка с выводами вторичных обмоток

ки) степень изменения характеристики возрастает (поскольку снижается размагничивающее действие вторичного тока).

Для оценки состояния железа ТТ снимают его вольт-амперную характеристику, подавая плавно увеличивающийся переменный ток во вторичную обмотку и измеряя при этом напряжение на зажимах этой обмотки, а затем сравнивают ее с заводской характеристикой (рис. 19).

Следует иметь в виду, что эти характеристики получены для искусственных условий при испытании ТТ и не отражают реальных соотношений между токами и напряжениями при нормальной работе ТТ, но позволяют обнаруживать многие неисправности ТТ

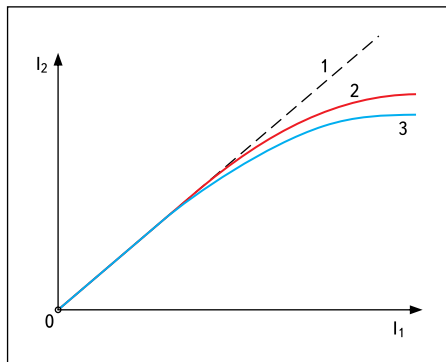


Рис. 18. Зависимость вторичного тока (I_2) от первичного (I_1) в трансформаторе тока:
 1 — идеальная кривая;
 2 — реальная кривая для номинальной нагрузки вторичной цепи $Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}$;
 3 — реальная кривая для большой нагрузки вторичной цепи $Z_2 > Z_{2\text{ном}}$

и поэтому снимаются с ТТ практически всегда при вводе в эксплуатацию нового оборудования или при периодических проверках.

Трансформаторы тока, предназначенные для целей измерения, работают в пределах их номинальных токов на прямолинейном участке характеристики, поэтому для них могут быть достигнуты высокие степени точности. Измерительные ТТ выпускаются в классах точности 0,2; 0,5; 1; 3; 5 (номер класса соответствует погрешности в %).

Трансформаторы тока, используемые для подключения защитных реле, работают в аварийных режимах, при токах, значи-

тельно превышающих номинальные, то есть на криволинейном участке кривой намагничивания, и их вторичный ток может быть искажен (рис. 20). Поэтому в обозначения классов ТТ для релейной защиты входит предельная кратность первичного тока по отношению к его номинальному значению, при которой еще сохраняется указанная погрешность. Например, обозначение 5Р20 означает, что погрешность данного ТТ не превышает 5% при первичных токах, превышающих номинальное значение до 20 раз.

При прочих равных условиях для обеспечения заданной погрешности мощность нагрузки, подключаемой ко вторичной цепи ТТ, не должна превышать номинальной мощности ТТ. При заданном номинальном токе, скажем, 5 А, мощность нагрузки будет определяться ее сопротивлением:

$$P = Z_2 \times I_2^2,$$

где Z_2 — сопротивление нагрузки; I_2 — вторичный ток.

Поэтому можно говорить, что чем меньше сопротивление внешней цепи, подключенной к ТТ (то есть реле), тем меньше степень нагрузки ТТ и его погрешность. Существенно влияет на погрешность ТТ также характер нагрузки: увеличение индуктивной составляющей нагрузки приводит к возрастанию токовой погрешности и к уменьшению угловой погрешности.

Казалось бы, что приведенные выше сведения об устройстве и основных характери-

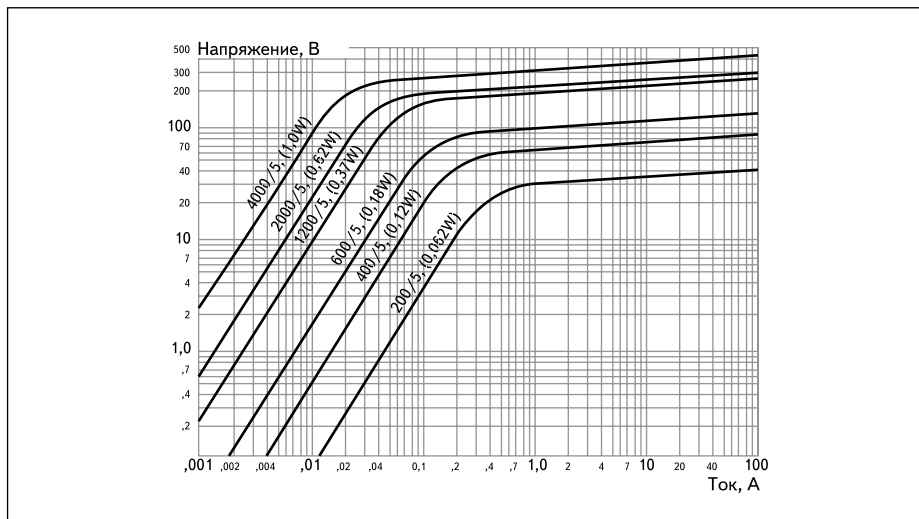


Рис. 19. Реальные вольт-амперные характеристики трансформаторов тока с различными коэффициентами трансформации, которые приводятся в документации компании-производителя

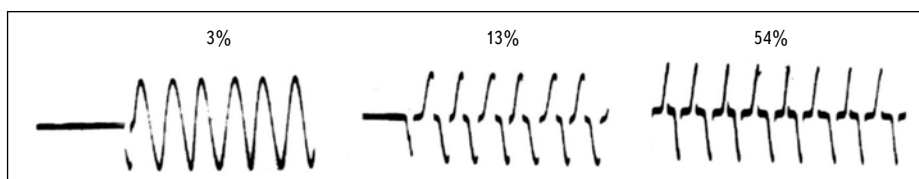


Рис. 20. Форма вторичного тока ТТ при аварийных режимах (сверхтоки). В процентах указана погрешность ТТ

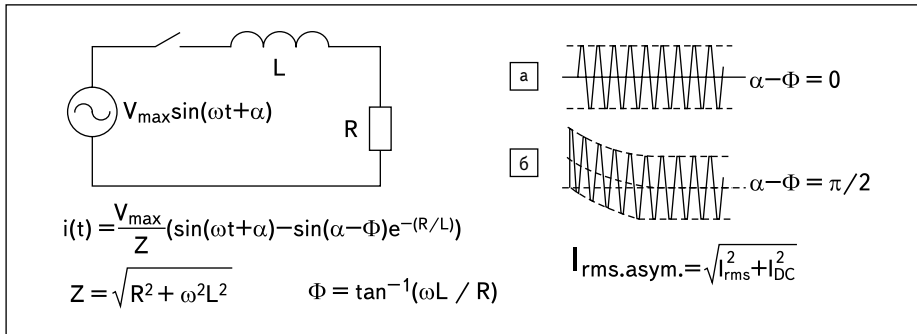


Рис. 21. Переходный процесс при включении под напряжение линии электропередач

ной составляющей. При этом насыщение сердечника возникает при очень больших кратностях первичного тока (рис. 23).

В мощных энергосистемах с большими кратностями токов короткого замыкания и значительной постоянной времени $L/R = 0,1$ с (рис. 21) фактическая погрешность ТТ может достигать очень больших значений (рис. 24), а вторичный ток приобретает вид острых импульсов. Снижение нагрузки ТТ и другие меры мало влияют на эту погрешность. Единственное, что могло бы уменьшить ее, — это значительное увеличение сечения и массы железа магнитопровода ТТ. Однако расчеты показывают, что при этом размеры ТТ достигли бы совершенно неприемлемых значений [16].

Наиболее простым способом снижения погрешности ТТ в переходных режимах является применение трансформаторов тока с первичным номинальным током, превышающим значение, полученное при типовых расчетах. При этом в уставки МУРЗ должен быть занесен реальный коэффициент трансформации выбранного ТТ.

Как известно [17], входные цепи МУРЗ содержат фильтр и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (рис. 25).

Фильтр подавляет высокочастотные сигналы, а поскольку искаженная кривая вторичного тока ТТ содержит значительную высокочастотную составляющую, то, следовательно, этот фильтр уменьшает амплитуду сигнала. Далее вступает в действие АЦП, дискретно измеряющий периодический сигнал с определенными интервалами времени t (рис. 26).

Поскольку АЦП работают путем выборки входных значений через фиксированные промежутки времени, то совершенно очевидно, что при этом нет никакой возможности определить величину входного сигнала в интервалах между этими выборками (участки 1–6 на рис. 26а).

При наличии сильно искаженной кривой вторичного тока эта погрешность значительно возрастает (рис. 27). В результате сигнал,

как ТТ являются базовыми, и их знание обязательно для любого релейщика. Каково же было наше удивление, когда оказалось, что в некоторых сетях релейную защиту подключают к измерительным ТТ и при этом сетуют на отказы релейной защиты. В одном из докладов, представленных на Всероссийской научно-технической конференции по релейной защите, проводимой под эгидой ФСК ЕЭС [15], со всей серьезностью сообщается, что по результатам выполненных исследований оказалось, что измерительные керны трансформаторов тока при больших кратностях первичного тока выдают сильно искаженную кривую вторичного тока, и поэтому реле защиты не рекомендуется подключать к этим кернам. Автор доклада также рекомендует «проведение исследований в этом вопросе». Хотелось бы надеяться, что таких горелейщиков в России осталось не так много.

В действительности уже давно проведено множество исследований на тему об искажениях, вносимых ТТ. Известно, что при включении под напряжение линии электропередач возникает переходный процесс (рис. 21).

Как известно, ток переходного процесса $i(t)$ в общем случае при включении цепи зависит от периодической и аperiodической составляющей. Последняя зависит от параметров цепи. При чисто активной нагрузке аperiodическая составляющая равна нулю,

и ток в нагрузке имеет чисто синусоидальный характер (рис. 21а). Реальная линия электропередач обладает определенной индуктивностью L , и поэтому аperiodическая составляющая не равна нулю.

Эта составляющая приводит к смещению синусоиды тока относительно нуля (рис. 21б) в первый момент времени после включения линии (или резкого увеличения тока при коротком замыкании) и до момента затухания этой составляющей. Эта смещенная синусоида может быть математически представлена как сумма двух составляющих: обычной синусоиды I_{rms} и постоянной компоненты I_{DC} представляющей собой постоянный ток.

Трансформаторы с нелинейными характеристиками намагничивания (то есть обычные ТТ) плохо приспособлены для работы в переходных режимах со значительной аperiodической составляющей. Протекание постоянного тока через первичную обмотку трансформатора тока приводит к быстрому насыщению его сердечника и существенному искажению формы периодической составляющей, а следовательно, и вторичного тока (рис. 22). Аналогичный вид имеет и кривая вторичного тока ТТ при воздействии на него пускового тока намагничивания при включении мощного силового трансформатора.

Значительные искажения вторичного тока ТТ имеют место и при отсутствии постоян-

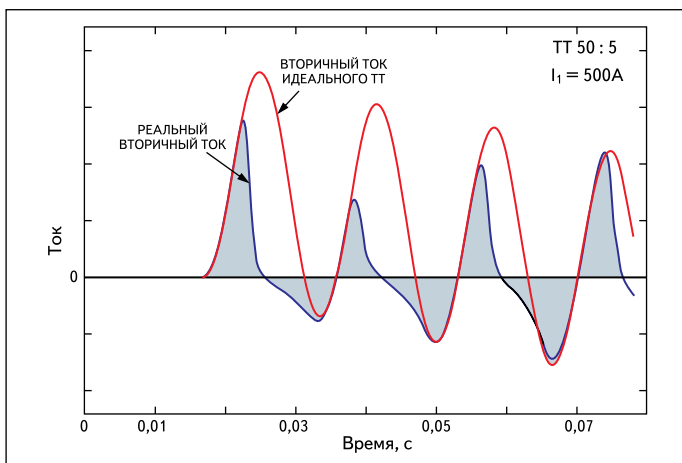


Рис. 22. Искажение тока во вторичной обмотке ТТ под действием постоянной составляющей тока короткого замыкания

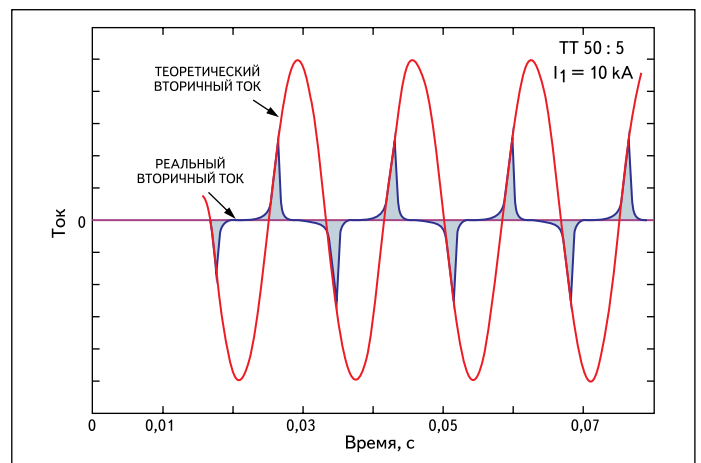


Рис. 23. Искажение тока во вторичной обмотке ТТ под действием его насыщения при большой кратности первичного тока

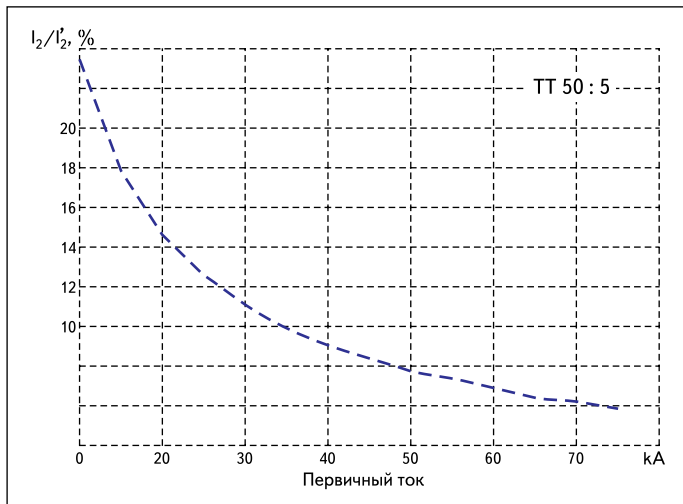


Рис. 24. Амплитудное значение реального вторичного тока (I_2) ТТ в процентах от идеального теоретического (I_2) в зависимости от первичного тока

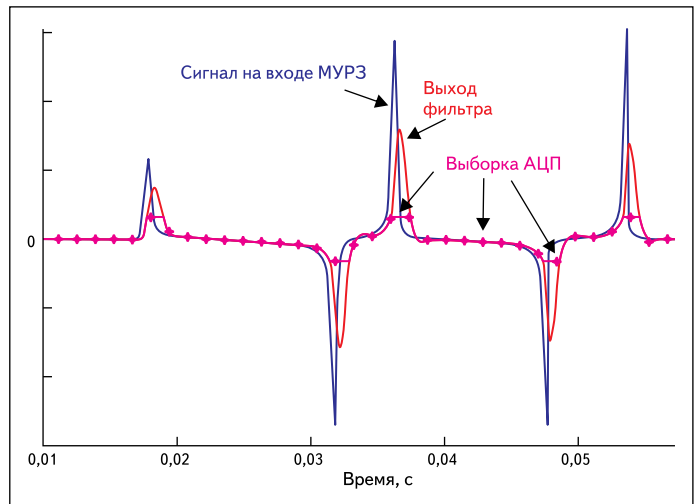


Рис. 27. Преобразование вторичного тока ТТ входными цепями МУРЗ

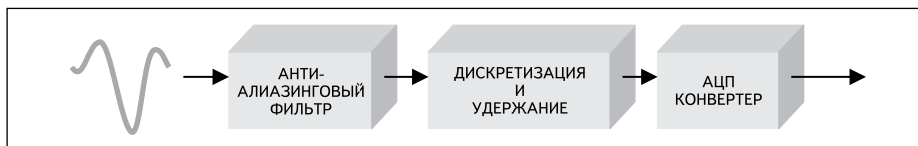


Рис. 25. Входная цепь МУРЗ для аналогового сигнала (ток, напряжение)

15. Стольников М. И. Отказы устройств РЗ при использовании трансформаторов тока с низкой характеристикой намагничивания в устройствах релейной защиты // Тезисы доклада. XVII научно-техническая конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем». Москва, ФСК ЕЭС, 16–19 мая 2006 г.
16. Афанасьев В. В., Адоньев Н. М., Жалалис Л. В. и др. Трансформаторы тока. Л.: Энергия, 1980.
17. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты. Как они устроены? // Электротехнический рынок. 2009. № 4.
18. Benmoulay G., Zocholl S. E. The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection. 29th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, WA. October 22–24, 2002.
19. Zisman L, Gurevich V. Fast over Current Microprocessor Protective Relay: Theory and Practice. Thesis on International Scientific-Technical Conference "Electricity 2007", SEEEL. Israel, Eilat, 2007.

образующийся на выходе АЦП, имеет мало общего с реальным током. Время-токовые характеристики МУРЗ не выдерживаются, зоны в дистанционной защите определяются неверно и т. д.

Для компенсации этой погрешности приходится существенно усложнять входные цепи МУРЗ, вводя новые функциональные блоки (рис. 28) [18].

Существуют также конкретные конструкции МУРЗ, основанные на быстрых вычислениях первой и второй производных тока

и использовании полученного значения для корректировки порога срабатывания при наличии в токе значительной апериодической составляющей [19].

Литература

14. Кузнецов М. Б., Кунгуров Д. А., Матвеев М. В., Тарасов В. Н. Проблемы защиты входных цепей аппаратуры РЗА от мощных импульсных перенапряжений. Москва — Чебоксары. 10–12 сентября 2007 г.

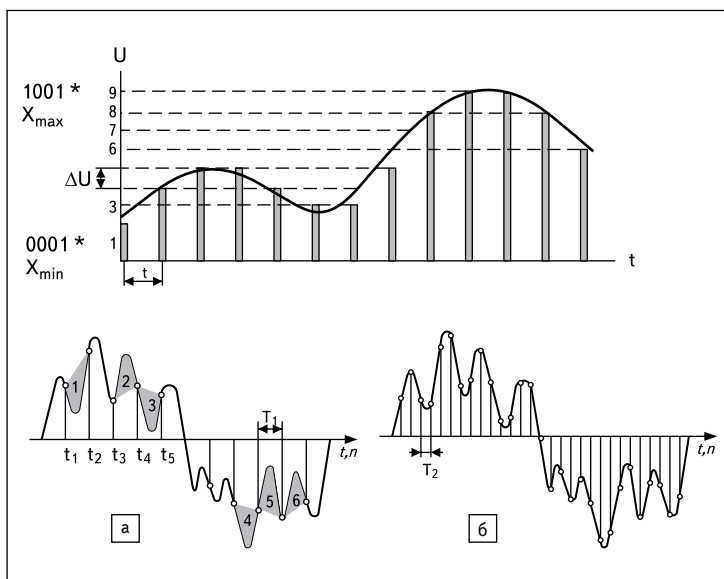


Рис. 26. Принцип работы АЦП и искажения, возникающие во время преобразования (дискретизации) сигнала

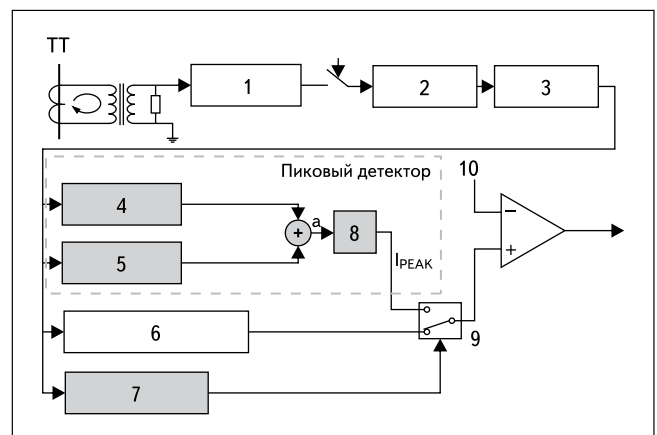


Рис. 28. Структура входных цепей МУРЗ с компенсацией погрешности от насыщения ТТ: 1 — фильтр; 2 — АЦП; 3 — накопитель 16 последних квантованных значений; 4 — детектор максимального значения амплитуды; 5 — детектор минимального значения амплитуды; 6 — измеритель амплитуды сигнала основной частоты с традиционным фильтром; 7 — детектор искаженного насыщением сигнала; 8 — пиковый детектор; 9 — амплитудный дискриминатор; 10 — сигнал от элемента токовой отсечки