



**В. Гуревич,**  
КАНД. ТЕХН. НАУК  
Израиль

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ РЕЛЕ ЗАЩИТЫ: НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИЛИ НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ?

### 1. А РЕЛЕ ЛИ ЭТО ВООБЩЕ?

Микропроцессорные устройства релейной защиты постепенно вытесняют традиционные электромеханические и даже электронные устройства релейной защиты практически из всех областей энергетики и электротехники. Можно спорить о том, хорошо это или плохо, но такова всеобщая тенденция.

Микропроцессоры – это так называемые сверхбольшие интегральные схемы, которые предназначены для логической и математической обработки введенных в них в двоично-кодированной форме данных в соответствии с заложенным в них алгоритмом.

Микропроцессорные устройства релейной защиты являются весьма сложными устройствами со специфической терминологией и принципом действия, не имеющих ничего общего с обычными (традиционными) реле защиты. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько вообще «микропроцессорное реле» является собственно «реле». При ближайшем рассмотрении оказывается, что микропроцессорное реле – это самый настоящий компьютер,

на основе самого обычного компьютерного процессора 486 серии фирмы Intel или AMD, содержащий дополнительно плату с входными трансформаторами тока и напряжения, (согласованными по параметрам с внешними трансформаторами тока и напряжения), а также плату с набором миниатюрных выходных электромагнитных реле. Записанная в специальный чип (так называемый «software-key», фактически это постоянное запоминающее устройство – ПЗУ) программа позволяет обрабатывать входные сигналы таким образом, чтобы смоделировать действие того или иного вида защитного реле. Заменяв один такой чип на главной плате на другой, можно получить реле любого типа. Так было и на начальном этапе развития микропроцессорной техники, когда на основе универсального перепрограммируемого микрокомпьютера Электроника-60 была разработана целая серия различных реле защиты для электроэнергетики. Так организованы микропроцессорные защиты и сегодня, например, универсальна серия микропроцессорных защит RE\_316\*4, производимая ведущей в этой области компанией ABB.

Если в таком, так называемом «реле», установить входные цепи другого типа и записать в память другую программу, например, программу управляющую телескоп на определенный участок неба, то никакого «реле» уже не будет. Получается, что микропроцессор становится «реле» только в том случае, если в него заложена программа «реле». Но это выглядит довольно странно. Ведь наш персональный компьютер не становится холстом и палитрой в тот момент времени когда мы запускаем программу «Photo Shop» или «Corel Draw» и начинаем рисовать на экране картинку, хотя компьютер и выделяет нам зону для рисования (виртуальный холст) и инструмент для подбора цветов (виртуальная палитра), и целый набор различных виртуальных кистей. Как и в рассмотренном выше случае, «микропроцессорное реле» является всего лишь «виртуальным» а не настоящим реле. Можно возразить, что многие из имеющихся на рынке устройств защиты на самом деле являются узкоспециализированными устройствами, предназначенными для выполнения строго определенного и весьма ограниченного набора функций, присущих только реле конкретного вида. Да и называются такие устройства как конкретный вид реле, например, «Реле частоты».

Программирование такого реле сводится, в основном, к записи в его память требуемых порогов срабатывания, временных интервалов, выбора того или иного типа рабочей характеристики из некоторых возможных. Но и в этом случае ограничения на выполняемые функции накладываются вовсе не микропроцессором, которому совершенно все равно какие сигналы обрабатывать, а ПЗУ, в котором записана программа работы этого микропроцессора и количеством входных и выходных каналов. Если использовать в устройствах, выполняющих функции реле защиты, не постоянное запоминающее устройство – ПЗУ, с программой записанной производителем, а СППЗУ – стираемое программируемое запоминающее устройство (EPROM – Erasable Programmable Read-Only Memory) или ЭСППЗУ – электрически стираемое программируемое запоминающее устройство (EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) и портативный программатор, позволяющий записать в память любой алгоритм действия микропроцессора, то вместо нашего «Реле частоты», получим некое «Универсальное реле защиты», которое практически ничем не будет отличаться от широко применяемых сегодня универсальных Programmable Logic Controllers с цифровыми и аналоговыми вхо-

дами, например, таких, как Modicon, Siemens 7S-200, Siemens 7S-300, Siemens 7S-400 и многих других. Каждое такое устройство может иметь десятки входных модулей для преобразования входных сигналов в двоичный (Boolean) или шестнадцатеричный (hexadecimal) цифровой код, сотни виртуальных таймеров разных видов, компараторов, счетчиков с различной конфигурацией, разных типов триггеров, одновибраторов, огромное количество регистров памяти, используемых для записи промежуточных результатов, мощные выходные модули и т.д. Из этого набора виртуальных элементов с помощью компьютерной программы, работающей под Windows рисуют на экране (почти как в известных графических программах) сложнейшие системы автоматики, которые затем загружают в контроллер. Включив опцию «симуляция» можно увидеть на экране компьютера как будет работать вся эта система автоматики в режиме реального времени и или в специально смоделированных аварийных режимах.

Сегодня для работы с каждым типом такого контроллера еще используется специализированная компьютерная программа. Однако уже предпринимаются усилия по созданию единой универсальной программы, позволяющей общаться с контроллерами разных типов. Кроме того, сейчас вводится единый стандарт на протокол передачи данных с таких контроллеров, применяемых в качестве устройств релейной защиты, который обязаны будут использовать все производители этих устройств. Это позволит объединять в общую систему реле разных типов.

Конечно, существуют и устройства с более скромными возможностями, выполненные на относительно «простых» контроллерах и миниатюрных EEPROM.

«Простота» этих устройств так же относительна, как и «скромность» их параметров. Например, Инструкция компании-производителя с кратким описанием и техническими характеристиками простого микропроцессора PIC16C73B содержит 189 страниц!

Совершенно очевидно, что внутренняя архитектура и принципы работы микропроцессорных устройств имеют очень мало общего с устройствами, определенными как «электрические реле». Поэтому, по мнению автора, внутренне устройство и принцип действия микропроцессорных устройств, в том числе и реле защиты, должны рассматриваться и изучаться не специалистами по релейной защите, а специалистами в области компьютерной техники.

Однако, поскольку такие виртуальные микропроцессорные устройства широко применяются в качестве реле защиты, целесообразно рассмотреть некоторые важные аспекты, связанные с применением таких реле.

Сначала рассмотрим те многочисленные преимущества микропроцессорных реле, которые отмечаются, обычно, в рекламных проспектах производителей реле и, как правило, принимаются без особых сомнений энергетиками.

### 2. ПРЕИМУЩЕСТВА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ «РЕЛЕ»

1. Многие микропроцессорные реле позволяют записывать и потом воспроизводить для анализа аварийной ситуации режимы непосредственно предшествовавшие аварии и в течение аварии.

А что, раньше такой возможности у энергетиков не было? Разве не существует огромное количество всевозможных регистраторов аварийных режимов и регистраторов срабатываний реле? ABB, Areva, Siemens, Ametek, NextPhase, Dewetron – далеко не полный перечень ведущих мировых производителей таких регистраторов и анализаторов аварийных режимов.

2. Микропроцессорные реле позволяют с помощью подключенного компьютера изменять уставки срабатывания и переходить с одной характеристики на другую чисто программными средствами.

Это действительно удобнее, чем настраивать реле с помощью потенциометров и отвертки, но сколько раз в течение 10–20 лет приходится в реальных условиях изменять режимы настройки реле? Два? Три?

3. Микропроцессорные реле позволяют передавать всю информацию об их состоянии на удаленные диспетчерские пункты через специальные каналы связи.

А разве до микропроцессорных реле не применялись дистанционные многоканальные системы передачи данных (например, SCADA), осуществляющие передачу информации о срабатывании каждого электромеханического реле на главный диспетчерский пульт?

4. Микропроцессорные реле позволяют менять конфигурацию комплекта релейной защиты: включать или отключать отдельные функции (то есть как бы подключать или отключать отдельные реле) чисто программными средствами, с помощью подключенного внешнего компьютера.

Это действительно намного удобнее, чем устанавливать дополнительные реле и переделывать

монтаж в панелях релейной защиты. Но опять возникает тот же самый вопрос: как часто приходится прибегать к таким операциям? Один (или два в самом неблагоприятном случае) раза за весь срок службы реле (25–30 лет)!

5. Микропроцессорные реле значительно меньше, чем электромеханические подвержены влиянию пыли, повышенной влажности, агрессивных газов и паров.

Интересно, бывал ли автор этого тезиса в современных залах (или комнатах) релейной защиты на электростанциях или подстанциях? Думаю, что нет. Иначе он бы знал, что, во-первых, уже десятки лет электромеханические реле защиты (во всяком случае, реле ведущих мировых производителей) выпускаются в тяжелых герметичных оболочках из металла и стекла, очень хорошо защищенных от пыли и других неблагоприятных факторов внешней среды. Во-вторых, современные залы релейной защиты представляют собой отдельные чистые закрытые помещения, оборудованные, кондиционерами, которые поддерживают в этих залах стабильные условия в не зависимости от условий на открытом воздухе. Микропроцессорные реле устанавливают точно в таких же залах.

6. Одно небольшое по размерам микропроцессорное реле может заменить целую группу обычных электромеханических реле. Особенно это относится к сложным защитам типа дистанционных. Благодаря этому можно сэкономить дорогостоящие площади, занимаемые шкафами с релейной защитой

Действительно, сложные микропроцессорные реле занимают площади для монтажа в 5–10 раз меньшие, чем аналогичный по функциональным возможностям комплект обычных реле. Действительно, объемы, занимаемые панелями с микропроцессорными защитами в несколько раз меньше, чем традиционными. Но вот опять каверзный вопрос: какую часть площади всей электростанции или подстанции удастся сэкономить при переходе от обычных электромеханических реле к микропроцессорным? Одну стотысячную или одну миллионную?

7. Микропроцессорные реле позволяют реализовать значительно более высокую чувствительность к аварийным режимам, чем электромеханические реле.

И это чистейшая правда, как и все вышеприведенные доводы сторонников микропроцессорных реле. Вопрос в том, всегда ли нужна такая чувствительность и точность в релейной защите энергетических объектов? Яркий пример тому – микропро-

цессорные реле частоты, обеспечивающие срабатывание при отклонении частоты на 0.005 Hz, в отличие от простых аналоговых электронных реле с точностью срабатывания 0.01–0.05 Hz (для разных моделей). Интересно, есть ли где-нибудь в мире электростанция или подстанция, на которых используется реле частоты, производящее какие-либо операции в энергосистеме при отклонении частоты на 0,005 Герца от номинального значения? Во многих случаях бывает избыточной чувствительность даже обычных электромеханических или аналоговых электронных реле и их приходится искусственно загрублять. Разве в релейной защите электроэнергетических объектов стоит проблема недостаточной чувствительности реле?

8. Способность микропроцессорного реле осуществлять полную внутреннюю самодиагностику важнейших элементов.

Рекламируемый изготовителями внутренний мониторинг исправности узлов и даже отдельных важных элементов микропроцессорных защит на проверку оказывается не более, чем рекламным трюком. Например, в реле типа MiCOM P437 предусмотрен постоянный мониторинг исправности каждого из выходных электромагнитных реле (так, во всяком случае, утверждает производитель). Но кто может объяснить, каким образом (хотя-бы, чисто теоретически) можно контролировать исправность (то есть способность замкнуться при подаче тока в катушку управления) нормально открытого контакта или отсутствие залипания (сваривания) нормально закрытого контакта реле без его полного включения. При более детальном рассмотрении этого вопроса оказывается, что постоянно контролируется только целостность катушки этих реле путем пропускания через них слабых импульсов тока, не вызывающих срабатывания реле. Не много же стоит такой мониторинг! Уже упомянутые реле серии RE\_316\*4 вообще «не замечают» замены целой платы на плату другого типа и индицируют «полный порядок», хотя работать реле после такой замены не будет до тех пор, пока вручную (через компьютер) не будут внесены параметры новой платы. Что же это за самодиагностика такая?

9. Более высокая надежность статических микропроцессорных реле по сравнению с электромагнитными реле, содержащими механически перемещающиеся элементы.

Действительно, на первый взгляд кажется неоспоримым тот факт, что статическое устройство, не содержащее подвижных элементов намного надежнее в работе, чем сложный механизм со множе-

ством взаимодействующих элементов. Но это только на первый взгляд. При более тщательном рассмотрении оказывается, что все не так просто.

Во-первых, количество срабатываний (то есть перемещений подвижных элементов) электромеханических реле защиты совершенно мизерно по сравнению с их ресурсом. В личной практике автора были случаи, когда на проверку поступали реле с заводскими дефектами, которые находились в эксплуатации свыше 10 лет. Тот факт, что эти дефекты не были выявлены в течение свыше 10 лет говорит лишь о том, что в течение всего этого времени реле ни разу не сработало (а еще о том, что недопустимо проводить проверки реле так редко!). О каком механическом износе подвижных частей может идти речь в таких случаях?

Во вторых, количество элементов, из которых построено микропроцессорное реле в сотни тысяч раз больше, чем количество элементов, из которых состоит электромеханическое реле. А из теории надежности известна обратно пропорциональная зависимость между количеством элементов и надежностью сложных систем. Что касается надежности самих элементов, то и тут не все так просто. В электромеханическом реле под воздействием внешних факторов, способных вызвать повреждение, находятся лишь катушки электромагнитов и изоляция внутренних монтажных проводов. Сами по себе это очень надежные и устойчивые элементы, но если бы возникла необходимость в дальнейшем повышении надежности, то катушки можно было бы пропитать эпоксидным компаундом под вакуумом и использовать монтажные проводники во фторопластовой изоляции. В микропроцессорных реле практически все электронные элементы находятся под воздействием приложенного напряжения питания, а часть из них и под воздействием входного тока или напряжения. Часть элементов постоянно находится в режиме генерации сигналов. Некоторые компоненты (например, электролитические конденсаторы) усиленно стареют при постоянном воздействии рабочего напряжения. А что касается микросхем – основных активных элементов микропроцессорных реле – то именно они являются причиной основной части отказов реле [1].

Не удивительно поэтому, что исследования, выполненные исследовательским отделом Israel Electric Corp. [2], привели к выводу о том, что надежность микропроцессорных реле ниже, чем электромеханических и полупроводниковых статических реле, компоненты микропроцессорных реле

выходят из строя чаще, чем элементы реле других видов. При этом отмечается, что имеющийся в сложных микропроцессорных реле внутренний мониторинг исправности не спасает дело, так как, во-первых, это мониторинг только лишь основных режимов крупных функциональных блоков, а не исправности элементов, а во вторых, информация о выходе из строя какого-то блока реле поступает к персоналу уже после того, как состоялся отказ реле. То есть наличие такой внутренней самодиагностики не увеличивает надежность реле.

Тенденция глобального перехода от электромеханических и статических реле, выполненных на дискретных элементах (транзисторах) к микропроцессорным во всех случаях, независимо от сложности выполняемых реле функций приобрела в свое время характер определенной моды, служила показателем современности и высокого технического уровня разработчиков, исследователей, и даже конечных пользователей реле. При этом мало кто задумывался о том, что когда речь идет о простых реле, например таких, как реле тока с зависимой характеристикой, такой переход, который не сопровождается никакими другими изменениями параметров и характеристик реле, кроме ухудшения их надежности и резкого снижения ремонтпригодности выглядит довольно странно.

Это были так называемые «преимущества» микропроцессорных реле защиты. Рассмотрим далее их недостатки.

### 3. НЕДОСТАТКИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ «РЕЛЕ»

1. Влияние на работу реле электромагнитных возмущений со стороны питающей сети:

◀ Внезапная потеря оперативного питания (blackout) во время работы реле, вызванная перегрузкой или коротким замыканием в сети, срабатыванием автоматических выключателей в цепи оперативного питания, попаданиями молнии в линии электропередач, обрывами проводов, автомобильными катастрофами и повреждениями опор линий электропередач, землетрясениями и др. Такие повреждения могут привести к прерыванию текущей работы RAM и кэша, зависанию микропроцессора а иногда и к полной потере данных, сохраняемых в ROM в том случае, если не приняты специальные меры по организации бесперебойного питания реле.

◀ Электромагнитные шумы (noises) или помехи (Electromagnetic Interferences and Radiofrequency Interferences) в цепях питания и во входных цепях реле. Такие помехи могут быть вызваны

различными факторами и явлениями, например, коммутационными или атмосферными перенапряжениями, излучениями передатчиков или мощного промышленного оборудования, несинусоидальностью напряжения. Из практики эксплуатации микропроцессорных реле известны случаи, когда источником такого излучения, нарушившего нормальную работу микропроцессорного реле, был обычный телефон сотовой связи. Электромагнитные шумы приводят к сбоям и ошибкам в исполняемых программах и базах данных.

◀ Несимметричные режимы в сети и режимы, связанные с провалами напряжения (sags) и с длительным (в течение нескольких секунд и более) понижением уровня напряжения. Такие режимы возникают при включении мощной однофазной нагрузки, при пусках мощных электродвигателей компрессоров, лифтов и др., а также при дефиците мощности в энергосистеме в часы пик. Сложные микропроцессорные реле обычно снабжаются сложными и дорогими источниками питания, способными обеспечить необходимый уровень напряжения на элементах схемы даже при глубоких провалах напряжения питания. Однако в более простых реле, такие режимы приводят к нарушению их правильной работы. Причем такие нарушения иногда приводят к очень тяжелым авариям в сети, так как работа микропроцессора при пониженном уровне напряжения питания становится совершенно непредсказуемой.

◀ Перенапряжения в сетях (surges), вызванные сбросом нагрузки или импульсные коммутационные перенапряжения (spike), которые могут проникнуть в реле через питающую сеть, входные цепи или цепи коммуникации могут привести к повреждениям внутренних элементов реле и его полному отказу.

Конечно, существуют международные стандарты, в которых изложены требования по защите реле от всех этих воздействий и разработчики реле принимают специальные меры для защиты реле, в частности от импульсных перенапряжений. Например, входные логические цепи выполняются обычно в виде оптронов и снабжаются варисторами. Однако, практика автора показывает, что далеко не всегда это спасает от повреждений даже реле ведущих фирм мира.

В литературе описано много случаев сбоев и даже повреждения микропроцессоров от перенапряжений. Известны, например, случаи массовых отказов микропроцессорных реле времени, установленных на атомных электростанциях США. В информационном бюллетене, посвященном этой проблеме [3], описаны случаи повреждения микропро-

цессорных реле времени от перенапряжений, возникших при отключении катушек промежуточных электромагнитных реле.

Как было показано выше, качество питания микропроцессорной релейной защиты имеет существенное значение. Поэтому на энергетических объектах за рубежом питание таких реле осуществляется, как правило, от мощных аккумуляторных батарей с постоянно включенным зарядным устройством или от источника бесперебойного питания (uninterrupted power system UPS), существенно смягчающим негативное воздействие вышеперечисленных факторов. Однако, от той же системы питаются часто и приводы мощных выключателей и масса других устройств, создающих импульсные перенапряжения. Кроме того, ряд исследований систем UPS показал [4], что существует ряд условий, при которых по цепям заземления на микропроцессоры проникают импульсные помехи и высшие гармоники (intersystem ground noise), от которых не спасают ни UPS, ни фильтры. Кроме того, UPS имеют собственное время переключения. Обычно, в технической информации производителя UPS указывается время переключения 3–5 мс, однако в действительности при определенных условиях это время может увеличиваться более чем в 10 раз [5].

В этой связи интересен еще один аспект проблемы: зависания и сбои в работе собственного микропроцессора системы UPS при аварийных режимах в сетях высокого напряжения. При сбоях управляющего микропроцессора возможны нарушения правильного чередования отпирания мощных полупроводниковых ключевых элементов инвертора и образование контура короткого замыкания в силовой цепи с последующим автоматическим отключением входного автоматического выключателя UPS. То же самое может происходить и с автоматическими зарядными устройствами, даже когда его собственный микропроцессор питается от внешнего вспомогательного UPS. Такие случаи нередко имеют место на практике, но никто не занимался серьезным анализом их причин [6].

2. Микропроцессорные системы релейной защиты, особенно сложные, например такие как дистанционные, не всегда адекватно ведут себя при сложных авариях и далеко не всегда могут правильно и своевременно отследить переходные процессы. На практике довольно часто наблюдаются случаи сбоев и неправильной работы сложных микропроцессорных защит в реальных условиях эксплуатации. Причем, если проверять такое реле на обычном ла-

бораторном стенде, при стандартных сигналах на его входах, то оно будет работать четко и надежно. Проблема заключается в том, что на таком стенде невозможно заранее симитировать все возможные комбинации и искажения сигналов, которые могут произойти в реальной ситуации. Невозможно заранее предусмотреть такие ситуации и при разработке реле. Эта ситуация чем-то напоминает проблемы с персональным компьютером, когда совершенно исправная мощная машина, снабженная неповрежденной мощной программной оболочкой Windows, неожиданно зависает при определенном наборе команд или при одновременном запуске нескольких программ. В большинстве случаев такие ситуации невозможно заранее предусмотреть и предупредить. В электромеханических реле такие ситуации просто невозможны. Однако, проблему нужно было решать. И вот, в энергокомпании Bonneville Power Administration (США) в 1990 году была построена первая установка для моделирования переходных процессов, использующая для моделирования накопленные характеристики реальных переходных процессов [7]. Стоимость этой установки 450 тыс долларов, ее обслуживают несколько техников. Другая подобная установка была создана для исследовательской корпорации Eseecco, USA. Сейчас на рынке существуют более простые и дешевые (около 50–60 тыс долл) компьютеризированные комплексы для проверки реле, например, фирмы DOBLE, Omron, которые позволяют посылать на входы реле токи и напряжения, записанные в реальных переходных режимах. Будущее покажет, насколько такие испытания микропроцессорных реле помогут в их совершенствовании.

3. Имеет место довольно странная, на первый взгляд, ситуация, при которой быстродействующие микропроцессорные защиты реагируют на аварийный режим гораздо медленнее, чем электромеханические. В некоторых энергосистемах для повышения надежности на параллельную работу включены и микропроцессорное и электромеханическое реле. При разборе аварийных ситуаций неоднократно оказывалось, что электромеханическое реле срабатывало и отключало выключатель до того, как успевало отреагировать микропроцессорное реле. В общем случае, если для срабатывания электромеханического или электронного реле мгновенного действия достаточно 5–15 мс, то для микропроцессорного реле уже необходимо 30–40 мс (по данным производителя). В реальных условиях часто оказывается, что заявленное производителем в рекламном каталоге быстродействие микропроцессорно-

го реле не обеспечивается и доходит до 80–100 мс. Это связано с тем, что в отличие от электромеханического или аналогового электронного реле микропроцессорное реле работает со входными величинами дискретно. Оно «захватывает» текущие значения входных величин, запоминает их в буфер, затем захватывает еще один комплект входных величин через определенный промежуток времени и сравнивает его с помещенным в буфер. Если второй комплект окажется идентичным первому, входные величины отправляются в микропроцессор для обработки. В аварийных переходных режимах микропроцессору приходится обрабатывать большие массивы информации в режиме реального времени, сопровождающегося быстрыми и значительными изменениями входных сигналов, и для этого ему необходимо определенное время (иногда сотни миллисекунд). Более того, если уже после запуска микропроцессора ситуация изменилась (например, замыкание на землю одной фазы перешло в двухфазное, а затем и трехфазное), то запущенный процесс вычисления прерывается и все измерения начинаются сначала.

4. Имеются существенные отличия в поведении электромеханических и микропроцессорных реле, обусловленные их различной восприимчивостью к гармоникам в измеряемых токах и напряжениях, насыщениям трансформаторов тока и другим искажениям синусоидальности входных сигналов.

Известно, что при больших кратностях токов коротких замыканий трансформаторы тока сильно искажают кривую выходного тока, поступающего на реле. Проблема снижения точности работы имеет значение для реле всех видов, включая электромеханические. Но механический момент, производимый последними пропорционален квадрату магнитного потока, созданного рабочим током. Такие реле реагируют на среднеквадратичное значение тока ( $\text{root-mean-square}$ , RMS), которое включает также и гармоники, содержащиеся в токе. Большинство же микропроцессорных реле использует цифровые фильтры для быстрого разложения кривой входного тока в ряд Фурье и извлечения только основной гармоники [8]. Этот процесс основан на так называемом «быстром преобразовании Фурье» (Fast Fourier Transformation – FFT). Как показано в [9], при таком принципе действия оказываются попросту не учтенными высшие гармонические токи (напряжения), составляющие значительную часть общего тока (напряжения) в переходных режимах, при авариях, при включении мощных трансформаторов и т. п. В результате, микропроцессорные реле

дифференциальной защиты и дистанционные реле реагируют на входные сигналы иначе, чем электромеханические реле. А поскольку состав гармоник и их амплитуды являются случайными величинами, зависящими от места и вида короткого замыкания, режима работы сети и других факторов то использование фильтров, основанных на FFT оказывается не достаточно эффективным.

5. Существенное усложнение эксплуатации реле защиты.

Совершенно очевидно, что для проверки и настройки микропроцессорных защит с помощью компьютера (или даже без него) требуется совершенно иной уровень подготовки специалистов и значительно большие затраты времени (имеется в виду, что технику или инженеру не приходится каждый день настраивать одно и то же реле, а придется сначала изучить его и разобраться с методами проверки). Для того, чтобы понять это достаточно лишь взглянуть на Инструкции к этим реле, которые по объему не уступают хорошей книге. А что касается поиска повреждений и ремонта таких устройств, то это вообще дело маловозможное в условиях эксплуатации.

В статье [10] отмечаются проблемы, возникающие при испытаниях микропроцессорных реле. Приемочные испытания микропроцессорного реле – это набор последовательных шагов, описанных в Инструкции по эксплуатации, с помощью которых проверяется функционирование важнейших элементов реле: измерительных, элементов выдержки времени, контактных выходов и соответствие характеристик реле (получаемых путем инъекции в реле соответствующих токов и напряжений) спецификации производителя. Но это не является полной калибровкой реле, которая возможна только на предприятии-изготовителе. В процессе стандартных приемочных испытаний можно проследить функционирование лишь небольшой части функций и проверить небольшое количество параметров реле. Приемочные испытания микропроцессорных реле не дают полной картины об этом реле и его поведении в реальных условиях эксплуатации. Отмечаются частые ошибки персонала при проверке сложных микропроцессорных реле и необходимость значительных затрат времени на изучение всего комплекса вопросов, связанных с правильным программированием и правильным тестированием таких реле. Наличие многих взаимосвязанных функций и параметров, контролируемых одним микропроцессорным реле приводит к необходимости искусственного загромождения или даже пол-

ного блокирования одних функций для проверки других. После проверки нужно не забыть вернуть обратно прежние уставки реле. В электромеханических реле таких проблем не было. В инструкциях ко многим микропроцессорным реле отмечается, что настройки реле могут нарушиться в процессе проверки реле и поэтому после проверки их нужно тщательно проверять.

### 6. Информационная избыточность.

Многие реле имеют среди параметров для уставок множество таких, которые не являются однозначно необходимыми и только загромождают и без того сложную процедуру настройки реле. Особенно это касается реле со сложными функциями, таких как дистанционные, с их сотней уставок. Речь идет о таких уставках как степень яркости экрана, цвет свечения экрана, цвет информационных сообщений, выводимых на экран, время сохранения данных на экране после их вывода на экран, многочисленные варианты назначения функций каждого из полутора десятков светодиодов, расположенных на передней панели реле и т.д. Для выбора уставок реле в программе, приданной к реле (firmware), имеются чуть ли не десятки вариантов каждого параметра, которые могут быть выбраны из библиотеки параметров. Часто, эти варианты также избыточны. Например, в микропроцессорном реле MiCOM P437 (AREVA) только контроль целостности предохранителя в цепи трансформатора напряжения может быть выбран по четырем разным алгоритмам! Такая явная избыточность приводит к тому, что общее количество вариантов уставок переваливает за тысячу для реле со сложными функциями. Это, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию вероятности ошибки и увеличения веса так называемого «человеческого фактора». Проблемы, связанные с человеческим фактором возрастают многократно, если одной и той же группе людей приходится обслуживать реле разных производителей, имеющих различные программы с разными интерфейсами, разные принципы выбора уставок, порой, даже разные названия и обозначения одних и тех же параметров

7. Конструктивная несовместимость по некоторым важнейшим параметрам с мощным электроэнергетическим оборудованием.

Обычно в качестве выходных исполнительных элементов микропроцессорных устройств защиты используются миниатюрные электромагнитные реле или оптронные полупроводниковые реле, или даже гибридные реле. Выполненные автором исследования [11, 12] показывают, что часто параме-

тры этих выходных реле совершенно не соответствуют заявленным (и обязательным, в соответствии с требованиями международных стандартов) параметрам микропроцессорного реле в части выдерживаемых испытательных напряжений и коммутируемых токов. В частности, коммутационная способность таких реле на постоянном токе напряжением 220 В значительно ниже, чем требуемая для непосредственного (то есть без дополнительных промежуточных реле, как это и предусмотрено инструкцией изготовителя) управления отключающими катушками выключателей. При этом производитель микропроцессорных устройств обычно утверждает, что он «... проверял и убедился в том, что фактически эти реле выдерживают заявленные испытательные напряжения и кратковременно выдерживают достаточно большие токи». То, что эти значения не разрешены производителем миниатюрных электромагнитных или полупроводниковых реле, мало волнует производителей микропроцессорных устройств, тем более, что потребитель обычно не вникает в такие тонкости и не проверяет внутренние элементы из которых построено микропроцессорное устройство. Автор наблюдал такую ситуацию с современными микропроцессорными устройствами разных типов, произведенных ведущими международными концернами в разных странах.

8. Возможность преднамеренных дистанционных воздействий на микропроцессорную релейную защиту с целью нарушения ее нормальной работы (Electromagnetic Weapons, Electromagnetic Terrorism) [13, 14].

Сегодня интенсивные исследования в области электромагнитного оружия ведутся в России, США, Англии, Германии, Китае. В США разработками такого оружия занимаются крупнейшие компании военно-промышленного комплекса, такие как TWR, Raytheon, Lockheed Martin, Los Alamos National Laboratory, Air Force Research Laboratory, а также многие гражданские организации и университеты. В последние годы многие разработки прошлых лет, например, такие как компактные (весом 200–300 кг) сверхмощные импульсные источники направленного электромагнитного излучения мощностью до 1 ГВт были рассекречены и теперь свободно предлагаются к продаже как на Западе, так и в России [15]. Известная Американская корпорация Raytheon сообщила недавно о создании компактного (ручного) переносного источника мощного направленного электромагнитного излучения, работающего на частоте 95 ГГц. Этот «бластер»



начнет поступать на вооружение некоторых родов войск уже в 2008 году. Современные взрывные источники мощного электромагнитного излучения могут быть размещены также в небольшом чемодане. Такой чемодан (с радиусом сплошного поражения электронной аппаратуры около 500 метров) можно сегодня приобрести за довольно умеренную плату в 100 тыс. долларов. Утечки военных технологий и доступность старого списанного военного оборудования вроде радаров, свободная продажа мощных направленных источников электромагнитного излучения, их компактность и доступность делают их страшным оружием в руках террористов.

Вопросы «электромагнитного терроризма» способного вызвать техногенные аварии национального масштаба (подобные той, которая произошла в Нью-Йорке в августе 2003 года), были сформулированы в статье Мануэля Вика [16]. В этой статье, в частности отмечается, что электронные компоненты, такие как микропроцессоры, работающие на высоких частотах при низких уровнях напряжений особенно подвержены воздействию внешних преднамеренных электромагнитных излучений. Однако, лишь совсем недавно в ряде организаций начаты серьезные практические исследования воздействий таких излучений на электронную аппаратуру электроэнергетических систем. Эти исследования возглавляются и координируются в США КЕМА и Sandia National Laboratory.

Однако, даже без специальных исследований совершенно очевидно, что микропроцессорные реле гораздо менее устойчивы к таким воздействиям, чем электромеханические а даже аналоговые электронные. Кроме того, оказывается, что «электромагнитный терроризм» не единственный вид современного дистанционного терроризма, которому подвержены микропроцессорные реле. Существует еще и такой вид электронных интервенций, как «кибер-атаки».

В наше время хакерские атаки через компьютерные сети, телефонные линии, Интернет все чаще становятся оружием террористов. Реальные случаи террористических атак такого рода обычно не афишируются, но некоторые из них уже стали известными. Известна, например, попытка нарушения работы энергосистемы Израиля с помощью хакерской атаки, которая предпринималась спецслужбами Ирана на протяжении нескольких месяцев в 2003 году. К счастью, силами собственной службы безопасности Электрической компании удалось вовремя заблокировать эти атаки. В связи с учащением случаев атак такого рода на главные националь-

ные компьютерные системы Израиля, в рамках Израильской службы безопасности (ШАВАК) было создано даже специальное подразделение для противодействия таким атакам.

Это проблема не только Израиля. Соответствующие подразделения для противодействия таким атакам созданы в ФБР и других спецслужбах США. В России этими вопросами занимается Федеральное агентство правительственной связи и информации (ФАПСИ), Научно-технический центр «Атлас» при ФСБ России.

#### 4. НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

1. Итак, привнесли ли микропроцессорные реле какие-то новые функции в релейную защиту, которые не были известны ранее, или были не реализуемы с помощью традиционных реле? При ближайшем рассмотрении оказывается, что нет. В микропроцессорных реле всего лишь объединили функции отдельных реле, добавив функции, выполняемые ранее регистрирующими приборами.

2. Обеспечили ли микропроцессорные реле более высокий уровень надежности электроснабжения? Нет!

3. Облегчили ли микропроцессорные реле работу обслуживающего персонала? Однозначно нет.

4. Так есть ли вообще хоть какие-то неоспоримые преимущества у микропроцессорных реле? Оказывается так ставить вопрос вообще нельзя! Как отмечается в уже упомянутом выше исследовании, выполненном в Israel Electric Corporation... микропроцессорные реле возникли как результат прогресса в области электроники и в развитии статических электронных реле. Свойства конвенциональных реле защиты были отличными». Так зачем же потребовалось усложнять себе жизнь и вводить в эксплуатацию сложные микропроцессорные реле, с одной стороны, не имеющих никаких существенных преимуществ перед традиционными, а с другой, обладающих целым веером собственных не решенных проблем? Оказывается, на это есть одна очень существенная причина. Но она лежит не в сфере электроэнергетики, которую мы рассматривали до сих пор, а в сфере... производства реле. Оказывается, производить микропроцессорные реле несравненно более выгодно, чем электромеханические и даже аналоговые электронные. Это объясняется возможностью полной автоматизации всех технологических процессов и производства и контроля параметров микропроцессорных реле. Здесь вполне уместно задать вопрос: какое отношение имеют проблемы произ-

водителей к выработке правильной технической политики в области электроэнергетики? А такое, что крупнейшие международные концерны, такие как ABB, General Electric, Siemens, Alstom уже давно стали «законодателями моды» в области электроэнергетики и именно ими определяются сегодня магистральные пути развития не только релейной защиты, но и всей электроэнергетики. И если через несколько лет эти компании полностью прекратят производство всех других видов реле, кроме микропроцессорных (а к этому все идет), то это еще никак не подтверждает абсолютные и неоспоримые преимущества таких реле с точки зрения интересов электроэнергетических компаний и всего общества.

5. Несмотря на отмеченные недостатки и проблемы, связанные с микропроцессорными реле, тенденции развития релейной защиты таковы, что широкое и все возрастающее применение микропроцессорных реле защиты неизбежно. В связи с этим, энергетические компании должны четко представлять те трудности и проблемы с которыми им придется столкнуться и заблаговременно принять все необходимые меры. В частности, заблаговременно должны быть приняты меры по нейтрализации возможности преднамеренного дистанционного воздействия на такие реле террористами и криминальными элементами.

Для этого необходимо полностью заменить все электрические провода, подключенные к микропроцессорному реле (за исключением питания, разумеется) на оптоволоконные кабели и использовать оптоэлектронные трансформаторы тока и напряжения вместо традиционных электромагнитных. Цепи питания микропроцессорных реле должны иметь полную гальваническую изоляцию от электрической сети, например, за счет использования системы: мотор-генератор. Если по экономическим причинам это невозможно, должны быть использованы мощные высокочастотные фильтры и ограничители напряжений во всех ступенях цепей питания, цепей тока и напряжения. Реле должны быть установлены в полностью металлических шкафах, изготовленных по специальной высокочастотной технологии (с использованием электропроводных резиновых прокладок и смазок и т.п.), необходимо принять специальные меры по снижению сопротивления цепей заземления, разделению цепей заземления высокочувствительной электронной аппаратуры и силовой высоковольтной.

Это та необходимая цена, которую приходится платить за прогресс в области релейной защиты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Matsuda T., Kovayashi J., Itoh H., Tanigushi T., Seo K., Hatata M., Andow F. *Experience with Maintenance and Improvement in Reliability of Microprocessor-Based Digital Protection Equipment for Power Transmission Systems. Report 34-104. SIGRE Session, 30 August – 5 September 1992, Paris.*
2. *Aspects of Digital Protective Relaying. Report RE-626. Research and Development Division of Israel Electric Corp., 1991.*
3. *Information Notice No. 94–20: Common-cause Failures Due to Inadequate Design Control and Dedication. -Nuclear Regulatory Commission, March 17, 1994*
4. *The Power Protection Handbook. – APC, 1994.*
5. Жохов Б.Д. *Особенности электроснабжения технических средств вычислительных сетей. – Промышленная энергетика, 1996, N 2, с. 17–24.*
6. Гуревич В.И. *Автоматическое повторное включение промышленных электроустановок. – Пром. энергетика, 2005, N. 8, с. 8–10.*
7. Reason J. *Realistic relay tests need fault reconstruction. – «Electr. World», 1991, v. 205, N 5, pp. 41–42.*
8. Zocholl S.E. and Benmouyal G. *How Microprocessor Relays Respond to Harmonics, Saturation, and Other Wave Distortions. – Neta World, Summer 2003.*
9. Nene O.O., Onbilgin G., Kocaman C. *Transformer Protection Using the Wavelet Transform. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol.13, No.1, 2005.*
10. Horak J. *Pitfalls and Benefits of Commissioning Numerical Relays. – Neta World, Summer 2003.*
11. Gurevich V. *Nonconformance in Electromechanical Output Relays of Microprocessor-Based Protection Devices under Actual Operating Conditions. – Electrical Engineering & Electromechanics, 2006. № 1*
12. Гуревич В.И. *О проблеме несоответствия выходных реле микропроцессорных устройств релейной защиты западного производства реальным условиям эксплуатации. – Пром. энергетика, 2005, N. 12.*
13. Gurevich V. *The Hazards of Electromagnetic Terrorism. – Public Utilities Fortnightly, June 2005.*
14. Gurevich V. *Electrical Relays: Principles and Applications. CRC Press, USA, 2005, 728 p.*
15. Gurevich V. *Electromagnetic Terrorism: New Hazards. – Electrical Engineering & Electromechanics, 2005, No. 12*
16. Wik M.W. *Electromagnetic Terrorism – What are the Risks? What can be Done? – International Product Compliance Magazine, 1997.*