

Микропроцессорные реле защиты

Устройство, проблемы, перспективы



Владимир Гуревич



«Инфра-Инженерия»

ВЕДУЩАЯ ГАЗЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТРАСЛИ

**ЭНЕРГЕТИКА
И ПРОМЫШЛЕННОСТЬ
РОССИИ**

Газета «Энергетика и промышленность России» —

общероссийское издание о топливно-энергетическом комплексе, энергостроении, электротехнике и других отраслях, связанных с энергетикой. Издание широко распространяется на всероссийских и региональных выставках и конференциях.

Наши читатели – руководители и технические специалисты энергокомпаний, производственных, инжиниринговых и других организаций, обслуживающих энергетику государственных учреждений, саморегулируемых организаций, учебных заведений и научных институтов отрасли.

Подписной индекс
по каталогам «Роспечати» 14263

Формат А3 Тираж 24 800 экз.
Объем более 50 полос
Выходит 2 раза в месяц
Издается с 2000 года

Тел.: (812) 346-50-15, 346-50-16

Факс (812) 325-20-99

e-mail: office@energeticsrussia.com

Подписка: podpiska@eprussia.ru | Реклама: ev@eprussia.ru

УДК 621.316.925(075.8)
ББК 31.27-05
Г95

Гуревич В.И.

Г 95 Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. - М.: Инфра-Инженерия, 2011. - 336 с.

ISBN 978-5-9729-0043-5

В книге рассмотрены устройство и принцип действия микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) на примерах конкретных типов современных МУРЗ ведущих мировых производителей. Для облегчения понимания текста энергетиками, работающими с МУРЗ, но не являющимися специалистами в области электроники, приведено подробное описание элементной базы МУРЗ, устройства и принципов действия транзисторов, тиристоров, оптронов, реле.

Рассматриваются конкретные проблемы надежности отдельных функциональных узлов МУРЗ, а также вопросы, касающиеся методики оценки надежности и эффективности МУРЗ. Подробно рассмотрены вопросы электромагнитных воздействий на МУРЗ как естественных, так и преднамеренных, кибербезопасности.

Книга рассчитана на инженеров и техников, занимающихся эксплуатацией релейной защиты, а также может быть полезна конструкторам, занимающимся разработкой МУРЗ, преподавателям и студентам соответствующих специальностей средних и высших учебных заведений.

© Гуревич В.И., 2011
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2011

ISBN 978-5-9729-0043-5

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы



Владимир Игоревич Гуревич родился в г. Харькове (Украина) в 1956 г.

В 1978 г. окончил факультет электрификации Харьковского национального технического университета им. П. Василенко по специальности «Электроснабжение с.х.». С 1980 по 1983 г. учился в аспирантуре.

В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электрические аппараты».

Работал преподавателем, и.о. доцента Харьковского национального технического университета им. П. Василенко, главным инженером и директором Научно-технического предприятия «Инвентор» (г. Харьков). Руководил несколькими проектами по разработке новых видов аппаратуры, выполняемых по заказам Министерств оборонных отраслей промышленности СССР, после распада СССР занимался разработкой и организацией производства устройств автоматики для электроэнергетики. В настоящее время работает в Электрической компании Израйла в должности инженера-специалиста, начальника сектора Центральной электрической лаборатории.

С 2006 г. Почетный профессор Харьковского национального технического университета им. П. Василенко. С 2007 г. эксперт комитета ТС-94 Международной электротехнической комиссии (МЭК).

В. Гуревич автор 6 книг, свыше 120 изобретений и 140 научно-технических статей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наш мир становится все более «электронным». Без электроники уже не может функционировать ни энергетика, ни промышленное производство, ни транспорт, ни связь, ни медицина, ни банковская система...

Вся наша жизнь буквально пронизана электронными системами автоматического управления, защиты, сигнализации и связи, как живой организм пронизан кровеносными сосудами. Что бывает с живым организмом, когда повреждаются важные кровеносные сосуды, мы хорошо знаем. Увы, в наш «электронный» век нам довелось узнать также, что происходит и при повреждении важных электронных систем. Техногенные катастрофы, крупнейшие аварии в энергосистемах, связанные с колоссальными убытками, а часто и с человеческими жертвами (США: 1965, 1977, 2003 г.; Франция: 1978 г.; Канада: 1982, 2003 г.; Италия: 2003 г.; Швеция: 1983, 2003 г.), падения огромных воздушных лайнеров (последним из них был Airbus A330-200, вылетевший 1 июня 2009 г. рейсом AF-447 из Рио-де-Жанейро в Париж), свидетелями которых мы стали за последние 20 – 30 лет – все это расплата человечества за его безмятежность. Сегодня люди вынуждены доверять свои жизни электронным системам, компьютерам и программам, подверженным атакам хакеров и вирусов. Какой же ненадежной стала наша жизнь, порой зависящая от маленькой ошибки, допущенной каким-то неизвестным нам программистом из далекой страны!

Релейная защита энергетических объектов занимает важное место в иерархии этого нового «электронного» мира. Вот уже более сотни лет электрические сети и системы защищают от аварийных режимов электро-механические реле защиты, отлично справляясь с возложенными на них обязанностями. За многие десятилетия конструкции электро-механических реле достигли совершенства и среди них появились настоящие шедевры, вроде реле дистанционной защиты типа LZ31 компании ABB. Однако прогресс в развитии электро-механических реле был полностью остановлен 30–35 лет тому назад в связи с тем, что все усилия разработчиков были направлены на создание электронных, а затем и микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ). Совершенно очевидно, что при наличии высокопроизводительного полностью автоматического оборудования, производство печатных плат, из которых и состоит МУРЗ, приносит производителям баснословные прибыли по сравнению с производством механических реле с их ручной сборкой и регулировкой. Сегодня на мировом рынке уже просто не существует электро-механических реле защиты, разработанных с использованием современных материалов и технологий, поскольку все ведущие мировые производители реле защиты полностью перешли на производство исключительно МУРЗ. Однако не следует забывать, что МУРЗ – это очень сложные электронные устройства, основанные на использовании специальных программ и сложных алгоритмов, и этим уст-

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы

ройствам, как и любым другим сложным электронным устройствам, присущи и недостатки. Совершенно очевидно, что такие сложные устройства даже чисто теоретически не могут не иметь технических проблем. Тем не менее, сегодня почти невозможно найти в технической литературе материалы, в которых рассматривались бы проблемы и недостатки микропроцессорных устройств релейной защиты. В многочисленных статьях и книгах обсуждаются лишь их преимущества и те новые возможности, которые открываются с их применением. Действительно, МУРЗ открыли новые, ранее не известные перспективы в области релейной защиты и сегодня им уже нет альтернативы. Однако появление МУРЗ с их новыми возможностями сопровождается, как это обычно бывает в технике, и появлением новых проблем, не известных ранее в релейной защите. Замалчивание этих проблем, имеющее место сегодня, отнюдь не способствует их успешному преодолению и наоборот, знание и понимание проблем современных МУРЗ позволит быстрее преодолеть существующие недостатки и повысить их надежность. Именно это побудило автора к написанию данной книги.

Не менее важным является и знание путей решения проблем. Поэтому описание технических проблем сопровождается и предложениями по их решению.

Попутно автор попытался решить еще одну проблему: преодоление информационной пропасти между разработчиками микропроцессорной техники и специалистами в области релейной защиты, которые, в большинстве своем, не являются специалистами в области микропроцессорной техники. Незнание специалистами в области релейной защиты элементной базы современной электроники и особенностей конструкции и принципов работы МУРЗ существенно затрудняет их повседневную работу и приводит к серьезным проблемам, как на стадии выбора и закупки нового оборудования, так и во время его эксплуатации. Эту задачу автор попытался решить путем описания в первых двух главах книги основ электроники, элементной базы, а также устройства и принципа действия МУРЗ.

Насколько автору удалось решить поставленные задачи – судить читателю.

Отзывы на книгу просьба направлять автору по адресу: vladimir.gurevich@gmail.com.

Глава I. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

1.1. Полупроводниковые материалы и приборы

Как известно, все вещества в природе по электропроводности делятся на три большие группы: проводники (обычно металлы) с сопротивлением $10^{-6} - 10^{-3}$ Ом · см; диэлектрики с сопротивлением $10^9 - 10^{20}$ Ом · см и полупроводники (многие природные и искусственные кристаллы), занимающие огромный промежуточный диапазон значений удельного сопротивления.

Главной особенностью кристаллических веществ является характерная упорядоченная упаковка их атомов в своеобразные кубики — кристаллы. Каждый кристалл имеет несколько плоских симметричных поверхностей, а его внутреннее строение определяется закономерным взаимным расположением атомов, которое носит название кристаллической решетки. Как по своему внешнему виду, так и по внутреннему строению любой кристалл подобен всем другим кристаллам этого вещества. Кристаллы разных веществ различны. Например, кристалл поваренной соли имеет форму куба. Одиночный кристалл может быть как весьма большим по своим размерам, так и настолько малым, что его можно увидеть только в микроскоп. Вещества, не имеющие кристаллической структуры, называются аморфными. Например, стекло является аморфным, в отличие от кварца, который имеет кристаллическую структуру.

Из числа полупроводников, имеющих практическое применение в современной электронике, следует назвать германий, кремний, селен, окись меди, сульфид меди, сульфид кадмия, арсенид галлия, карборунд. Для изготовления полупроводниковых приборов, применяющихся в электронных реле, используются главным образом два первых элемента: германий и кремний.

Для того чтобы понять процессы, происходящие в полупроводниковых приборах, необходимо рассмотреть явления, происходящие в кристаллической структуре полупроводниковых материалов, которая обусловлена тем, что их атомы удерживаются в строго определенном взаимном положении друг относительно друга благодаря слабо связанным электронам, находящимся на их внешних оболочках. Эти электроны вместе с такими же электронами сосед-

них атомов образуют валентные связи между атомами. Электроны, участвующие в этих связях, называются валентными. В абсолютно чистом германии или кремнии при очень низких температурах нет свободных электронов, способных создать электрический ток, так как в этих условиях все четыре валентных электрона внешних оболочек каждого атома, которые могут участвовать в процессе переноса зарядов, прочно удерживаются валентными связями. Поэтому такое вещество является изолятором (диэлектриком) в полном смысле этого слова — оно совершенно не пропускает электрического тока.

При повышении температуры благодаря тепловому движению некоторые валентные электроны отрываются от своих связей и могут перемещаться по кристаллической решетке. Такие электроны называются свободными. Валентная связь, от которой оторван электрон, называется дыркой. Она обладает свойствами положительного электрического заряда, в противоположность электрону, имеющему отрицательный электрический заряд. Чем выше температура, тем больше количество освобожденных электронов, способных перемещаться по кристаллической решетке, тем больше проводимость вещества.

Перемещаясь по кристаллической решетке, свободные электроны могут встретить дырки — валентные связи, в которых не хватает электронов, — и заполнить эти связи. Это явление носит название рекомбинации. При нормальной температуре в массе полупроводникового материала непрерывно появляются свободные электроны и происходят рекомбинации электронов и дырок.

Если кусок полупроводникового материала поместить в электрическое поле, например, приложив положительный и отрицательный потенциалы к его концам, то электроны будут двигаться через кристаллическую решетку к положительному электроду, а дырки — к отрицательному. Проводимость полупроводника можно значительно улучшить путем введения в него специально подобранных примесей, металлических или неметаллических. В кристаллической решетке атомы этих примесей будут замещать некоторое количество атомов полупроводников. Напомним, что внешние оболочки атомов германия и кремния содержат по четыре валентных электрона, а электроны могут быть вырваны только из внешней оболочки атома. В свою очередь, добавление электронов может происхо-

дить тоже только на внешнюю оболочку, причем максимально возможное число электронов на внешней оболочке равно восьми.

Если атом примеси имеет большее число валентных электронов, чем это требуется для образования валентных связей с соседними атомами полупроводника, то в кристаллической решетке появляются дополнительные свободные электроны, которые могут по ней перемещаться. В результате электропроводность полупроводника улучшается. Такие примеси называются донорными, поскольку они «отдают» электроны полупроводнику. Так как германий и кремний являются элементами четвертой группы периодической таблицы химических элементов, то для них донорными примесями могут быть элементы пятой группы, у которых на внешней оболочке атомов находится по пять электронов. К таким донорным примесям относятся фосфор, мышьяк, сурьма.

Если же атомы примеси имеют меньшее число электронов, чем это необходимо для образования валентных связей с окружающими его атомами полупроводника, то некоторые из этих связей окажутся незаполненными, в них образуются дырки. Примеси такого рода называются акцепторными, поскольку они поглощают свободные электроны. Для германия и кремния акцепторными примесями являются элементы третьей группы периодической таблицы химических элементов, у которых внешние оболочки атомов содержат по три валентных электрона. К акцепторным примесям относятся бор, алюминий, галлий и индий.

В кристаллической структуре чистого полупроводника все валентные связи соседних атомов оказываются полностью заполненными, и появление свободных электронов и дырок возможно только благодаря деформации кристаллической решетки, возникающей под действием теплового или иного излучения. Вследствие этого при нормальных условиях проводимость чистого полупроводника весьма мала.

В случае введения даже небольшого количества донорной примеси четыре электрона атома примеси совместно с таким же количеством электронов соседних атомов полупроводника образуют с последними заполненные валентные связи. Пятый электрон каждого атома примеси оказывается «избыточным», «лишним», вследствие чего может свободно перемещаться по кристаллической решетке.

При введении акцепторной примеси между каждым атомом примеси и соседними атомами полупроводника получаются только три заполненные валентные связи. Для заполнения четвертой связи не хватает одного электрона. Эта валентная связь оказывается свободной. В результате образуется дырка. Дырки могут перемещаться по кристаллической решетке как положительные заряды. Правда, при этом происходит перемещение не самого атома примеси, который имеет фиксированное и неизменное положение в кристаллической структуре полупроводника, а незаполненной валентной связи. Происходит это следующим образом. Как известно, элементарным носителем электрического заряда является электрон. Под действием различных причин электрон может вырваться из заполненной валентной связи, оставив дырку, которая представляет собой незаполненную валентную связь и проявляет себя как положительный заряд, численно равный отрицательному заряду электрона. Электрон другого атома вблизи этой дырки под действием силы притяжения ее положительного заряда может «впрыгнуть» в дырку. При этом происходит рекомбинация дырки и электрона, когда их заряды взаимно нейтрализуются и валентная связь заполняется. Дырка в данном месте кристаллической решетки полупроводника перестает существовать. В свою очередь, новая дырка, возникшая в той валентной связи, откуда вырвался электрон, может быть заполнена каким-либо другим электроном, также оставившим после себя дырку. Таким образом, перемещение электронов в кристаллической решетке полупроводника с акцепторной примесью и рекомбинацию их с дырками можно рассматривать как перемещение дырок. Для наглядности можно представить себе концертный зал, в котором по какой-то причине оказалось незаполненными несколько мест в первом ряду. И вот, зрители со второго ряда перемещаются на свободные места в первом ряду. Соответственно, их места занимают зрители третьего ряда и т.д. При этом можно сказать, что свободные места как бы перемещаются к концу зрительного зала, хотя физически все кресла остаются привинченными к полу. Движение дырок в кристалле очень похоже на движение этих свободных мест.

Полупроводники, электропроводность которых улучшилась благодаря образованию избытка свободных электронов при введении примеси, называются полупроводниками с электронной проводимостью, или сокращенно полупроводниками *n* типа.

Полупроводники, электропроводность которых обуславливается в основном движением дырок, называются полупроводниками с дырочной проводимостью, или сокращенно полупроводниками p типа.

Практически не существует полупроводников с чисто электронной или чисто дырочной проводимостью. В полупроводнике n типа электрический ток частично обуславливается движением дырок, возникающих в его кристаллической решетке вследствие выхода электронов из некоторых валентных связей, а в полупроводниках p типа ток частично создается движением электронов. Вследствие этого полупроводники n типа более правильно характеризовать как полупроводники, в которых основными носителями тока являются электроны, а полупроводники p типа — как полупроводники, в которых основными носителями тока являются дырки. Следовательно, полупроводник относится к тому или другому типу в зависимости от того, какой вид носителя тока является в нем основным. Исходя из этого, противоположный носитель заряда для полупроводника данного вида является неосновным носителем.

Следует иметь в виду, что любой полупроводник можно сделать полупроводником n или p типа путем добавления в него соответствующих примесей. Причем для получения необходимой проводимости достаточно ввести чрезвычайно малое количество примеси, примерно один атом примеси на 10 млн. атомов полупроводника. Все это налагает особые требования на чистоту очистки исходного полупроводникового материала и точность дозировки введения примеси. Следует учесть, что скорость движения носителей тока в полупроводнике меньше, чем в проводнике. Движение электронов замедляется встречающимися на их пути препятствиями в виде неоднородностей в кристалле. Движение дырок примерно вдвое медленнее, поскольку их перемещение связано с перескоком электронов в незаполненные валентные связи. Подвижность электронов и дырок в полупроводнике повышается с ростом температуры, что приводит к улучшению проводимости полупроводника.

В основе принципа действия подавляющего большинства полупроводниковых приборов лежат процессы, происходящие в переходном слое, образованном в полупроводнике на границе двух зон с проводимостями различного типа, p и n типа. Для простоты эту границу принято называть p - n переходом, или электронно-дырочным

переходом, что характеризует вид основных носителей зарядов в двух примыкающих друг к другу зонах полупроводника.

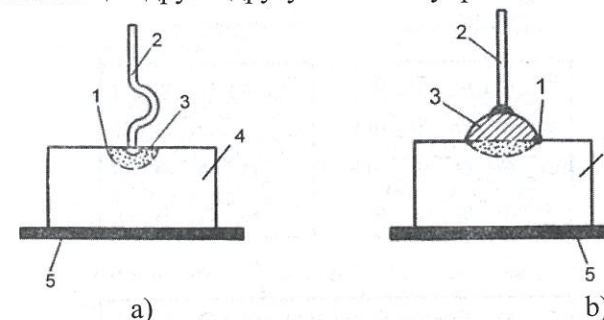


Рис. 1.1. Устройство точечного (а) и плоскостного (б) p - n переходов диода: 1 — p - n -переход; 2 — проволочный вывод; 3 — p -область; 4 — кристалл n -типа; 5 — металлическая основа

Различают два вида p - n переходов: плоскостной и точечный, схематическое условное изображение которых показано соответственно на рис. 1.1. Плоскостной переход получается путем помещения кусочка примеси, например, индия на поверхность германия n типа и последующего нагревания до расплава примеси. При поддержании определенной температуры в течение определенного времени происходит диффузия части атомов примеси в пластинку полупроводника на небольшую глубину. Создается зона с проводимостью, противоположной проводимости исходного полупроводника, в данном случае p типа для n германия.

Точечный переход получается в результате установления плотного электрического контакта тонкого проводника, имеющего, как известно, электронную проводимость, с поверхностью полупроводника p типа. Именно на этом принципе действовали первые кристаллические детекторы. Для уменьшения зависимости свойств диода от положения заостренного конца проволоки на поверхности полупроводника и чистоты его поверхности в настоящее время точечные переходы получают путем сплавления конца тонкой металлической проволоки в поверхность полупроводника n типа. Всплавление осуществляется в момент подачи кратковременного мощного импульса электрического тока. Под действием тепла, которое образуется за этот короткий промежуток времени, часть элек-

тронов вырывается из атомов полупроводника, находящихся вблизи точечного контакта, оставляя после себя дырки.

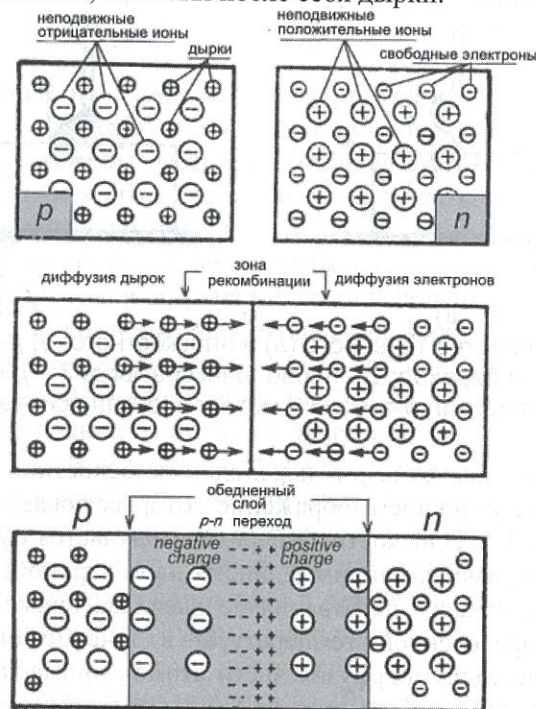


Рис. 1.2. Образование запирающего слоя при соединении полупроводников с разным типом проводимости

В результате этого небольшой объем полупроводника n типа в непосредственной близости от контакта превращается в полупроводник p типа (область 3 на рис. 1.1).

Каждая часть полупроводникового материала в отдельности (то есть до контактирования между собой) была нейтральной, так как имело место равновесие свободных и связанных зарядов (рис. 1.2). При этом в области n -типа концентрация свободных электронов велика, а дырок – мала. В области p -типа, наоборот, велика концентрация дырок и мала концентрация электронов. Соединение полупроводников с разной концентрацией основных носителей тока вместе вызывает диффузию этих основных носителей через место

соединения двух материалов: основные носители полупроводника p -типа – дырки-диффундируют в область n -типа, поскольку в ней концентрация дырок очень мала. И наоборот, электроны из полупроводника n -типа с высокой их концентрацией диффундируют в область p -типа, где их мало (рис. 1.2). При этом на границе раздела двух полупроводников с каждой стороны образуется тонкая зона с проводимостью, противоположной проводимости исходного полупроводника. В результате, на границе (которая называется p - n -переходом) возникает пространственный заряд, создающий электрическое поле (так называемый потенциальный барьер), препятствующий протеканию основных носителей тока после достижения состояния равновесия.

Характерной особенностью p - n перехода является резко выраженная зависимость его электрической проводимости от полярности приложенного к нему внешнего напряжения, чего никогда не наблюдается в полупроводнике одной проводимости. Если приложенное извне напряжение создает электрическое поле, совпадающее с диффузионным, то переход будет оставаться в запертом положении и ток через него протекать не будет. Более того, при этом усиливается движение неосновных носителей, что ведет к расширению запирающего слоя и повышению потенциального барьера для основных носителей. В этом случае говорят, что переход смещен в обратном направлении. Движение неосновных носителей приводит к возникновению небольшого тока через запертый переход. Это так называемый обратный ток диода или ток утечки. Чем он меньше, тем диод лучше. При изменении полярности приложенного к переходу напряжения растет число основных носителей заряда в зоне перехода, которые нейтрализуют пространственный заряд запирающего слоя, уменьшая его ширину и снижая потенциальный барьер, который препятствовал движению основных носителей тока через переход. При этом говорят, что переход смещен в прямом направлении. Напряжение, необходимое для преодоления потенциального барьера в прямом направлении, составляет для германиевых диодов около 0.2 В, а для кремниевых 0.6 – 0.7 В.

Для преодоления потенциального барьера в обратном направлении требуются десятки, а иногда и тысячи вольт. Если этот барьер будет преодолен, происходит необратимое разрушение перехода, его пробой.



Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика одиночного p - n -перехода (диода)

Поэтому обычно для переходов того или иного прибора указывается предельное значение обратного напряжения, а также прямого тока.

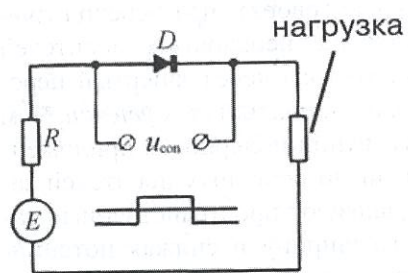


Рис. 1.4. Диодный коммутатор сигналов и изменение положения рабочей точки диода на статической вольт-амперной характеристике в процессе работы

На рис. 1.3 приведена примерная вольт-амперная характеристика одиночного p - n перехода, то есть зависимость тока через него

от полярности и величины внешнего напряжения, которое прикладывается к переходу. Величины токов в прямом и обратном направлении (до области пробоя) отличаются между собой в десятки — сотни раз. Как правило, плоскостные переходы выдерживают большие напряжения и токи, чем точечные.

1.2. Принцип действия транзистора

Идея об использовании полупроводников была выдвинута еще перед второй мировой войной, но знания о том, как они работали, был весьма скудным, и процесс производства чистых полупроводников был очень сложным.

В 1945 г. вице-президентом известной корпорации Bell Laboratories была создана группа исследователей, которой было поручено исследование возможностей применения полупроводников в электронике. Группу в составе Уолтера Браттэйна, Джона Бардина и других физиков, работавших в области квантовой теории в твердых телах, возглавил Уильям Шокли.

В 1947 г. Уильям Шокли с коллегами Джоном Бардином и Уолтером Браттэйном сделали первое успешное устройство из полупроводника для усиления электрического сигнала. Они назвали его *транзистором* (производное от «**транс**форматора» и «**резист**ора»). Дальнейшее развитие этого устройства и технологии его производства привело и созданию кремниевого чипа, без которого сегодня немыслимо существование многих областей техники. За создание транзистора Шокли, Бардин и Браттэйн были удостоены в 1956 г. Нобелевской премии.

Из рис. 1.5 видно, что транзистор представляет собой, по существу, два полупроводниковых диода, включенных встречно и имеющих общую область. Крайние два слоя полупроводника (один из них называется «эмиттером» а другой «коллектором») имеют проводимость p -типа с высокой концентрацией дырок, а средний слой (называемый «базой») — проводимость n -типа со слабой концентрацией электронов.

В электрических схемах к первому (эмиттерному) p - n переходу приложено небольшое напряжение, поскольку этот переход включен в прямом (пропускном) направлении, а ко второму (коллектор-

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы
 ному) n - p переходу приложено значительно большее напряжение в обратном (запорном) направлении.



Рис. 1.5. Схема включения и принцип действия транзистора

Коллекторный переход остается запертым до тех пор, пока нет тока в цепи эмиттер – база. При этом сопротивление всего кристалла (от эмиттера до коллектора) очень высоко. Но как только входная цепь (рис. 1.5) будет замкнута, дырки из эмиттера как бы впрыскиваются («эмиттируют») в базу, быстро насыщая ее (включая область, прилегающую к коллектору). Поскольку концентрация дырок в эмиттере намного больше, чем концентрация электронов в базе, после рекомбинации в области базы остается еще очень много свободных дырок, которые под действием высокого напряжения (единицы – десятки вольт), приложенного между базой и коллектором, свободно преодолевают запирающий слой между базой и коллектором. Повышенная концентрация дырок в запертом коллекторном переходе приводит к тому, что сопротивление этого перехода резко падает и он начинает проводить ток в обратном направлении. Высокая напряженность электрического поля в переходе «база-коллектор» обуславливает очень высокую чувствительность сопротивления этого перехода в обратном (запертом) состоянии к концентрации в нем дырок. Поэтому даже очень незначительное количество дырок, инжектированных с эмиттера под действием слабого входного тока, приводит к резким изменениям проводимости всей структуры и появлению значительного тока в цепи коллектора. Отношение тока коллектора к току базы называется коэффициентом усиления транзистора. У маломощных транзисторов этот коэффициент имеет значения десятков – сотен, а у мощных транзисторов единиц – десятков.

«РЗА СИСТЕМЗ», являясь производителем широко признанных и эффективных устройств РЗА, сочетающих высокую функциональность и доступные цены, в продолжение программы разработки современных устройств РЗА, освоила выпуск новых моделей.



Более совершенный, более удобный в эксплуатации аналог изделий ведущих мировых производителей – устройство релейной защиты и автоматики PC83-AB2.

Устройство релейной защиты и автоматики по току и напряжению PC83-AB2 является базовым в линейке микропроцессорных устройств РЗА серии PC83, отвечает самым высоким требованиям по функциональности, компактности, помехоустойчивости, надежности, удобству в эксплуатации.

Сочетание максимальной функциональности и доступной цены способствует расширению спроса на данные устройства.

PC83-AB2 предназначено для работы в схемах релейной защиты и автоматики электрических сетей 6-110 кВ.

Устройство выпускается в 3-х исполнениях по габаритам и ряде исполнений по функциональному наполнению. Все они снабжены 16-разрядным ЖК дисплеем, двухцветными светодиодными индикаторами сигнализации срабатывания ступеней, кнопками управления, а также интерфейсами RS-485 и USB для обмена информацией с верхним уровнем. Предусмотрены регистраторы событий и аварий, цифровой осциллограф, индикация текущих и аварийных параметров, местное и дистанционное управление ВВ, возможно дешунтирование цепей электромагнитов отключения и питание устройства от токовых цепей.

Устройства выгодно отличаются от аналогов малыми габаритами, низким потреблением (3 ВА + 0,25 ВА на одно сработавшее реле), точностью контроля параметров, удобством выбора режимов и уставок из меню.

■ Основные функции устройства:

- 4-х ступенчатая 3-х фазная направленная МТЗ с независимой и разными видами зависимых ампер-секундных характеристик, блокировкой от броска намагничивающего тока (БНТ) и ускорением при включении выключателя;
- 2-х ступенчатая направленная ЗНЗ по расчетному или измеренному $3I_0$ (выбор для каждой ступени отдельно) с пуском по $3U_0$;
- 2-х ступенчатая защита от несимметричной нагрузки или обрыва фаз по току обратной последовательности;
- функции ЛЗШ, УРОВ, АПВ;
- трехфазная 2-х ступенчатая защита минимального напряжения (ЗМН) с выбором логики «И»/«ИЛИ» и работы по фазным или линейным напряжениям;
- 2-е группы уставок с переключением, в том числе, по направлению мощности;
- 8/13/18 дискретных входов, в т. ч. 3/8/13 программируемые; 8/12/16 выходных реле, в т. ч. 5/9/13 программируемые.
- постоянное измерение фазных токов и индикация фактических действующих значений тока;
- запоминание параметров срабатывания защиты и автоматики в журнале аварий для 100 событий (с фиксацией вида защиты, значения тока и времени срабатывания);
- запоминание параметров изменения конфигурации в журнале событий для 200 событий;
- цифровое осциллографирование с общим временем записи 60с;
- светодиодная индикация исправности устройства, срабатывания защит и состояния дискретных входов;
- самодиагностика устройства.



Устройство релейной защиты и автоматики по току PC83-A2.0 – облегченная версия устройства PC83-A2 для массового применения.

Версия приспособлена для использования в схемах РЗА отходящих линий, где нужна меньшая функциональность, не требуется полного набора защит и сервисов, предлагаемых в PC83-A2 и позволяет получить существенную экономию средств при комплексной реконструкции или новом строительстве подстанций.

Будучи более доступным по стоимости, PC83-A2.0 является современным высокофункциональным устройством со следующими **основными функциями**:

- 3-х ступенчатая 2-х фазная МТЗ с выдержкой времени и ускорением;
- 2-х ступенчатая ЗНЗ по току нулевой последовательности;
- местное или дистанционное управление выключателем, в т. ч. по RS-485;
- функции ЛЗШ, УРОВ, АПВ;
- измерение и индикация токов фаз А, С и тока нулевой последовательности;
- резервное питание от токовых цепей; дешунтирование токовых расцепителей выключателя с контролем электромагнитов;
- запоминание параметров срабатывания защит в журнале аварий (до 100); параметров изменения конфигурации в журнале событий для 200 событий; управление и передача информации по RS-485
- 6/11 дискретных входов, в т. ч. 1/6 программируемые; 8/12 выходных реле, в т. ч. 0/4 программируемые.



Устройство дифференциальной защиты по току PC83-DT2.

Общие характеристики и исполнения микропроцессорного устройства PC83-DT2 аналогичны характеристикам микропроцессорного устройства релейной защиты и автоматики PC83-AВ2.

Данное устройство предназначено для дифференциальной защиты двухобмоточных трансформаторов, синхронных компенсаторов, электродвигателей, генераторов.

■ Основные функции устройства:

- 2-х ступенчатая дифзащита. Первая ступень – дифференциальная отсечка (ДО), вторая ступень – чувствительная дифференциальная защита с торможением (ДТЗ);
- 4-х ступенчатая максимально-токовая защита (МТЗ) с независимой выдержкой времени.
- Функция МТЗ для каждой ступени независимо подключается к трансформаторам тока стороны ВН или НН силового трансформатора по выбору;
- для любой ступени МТЗ, ДО и ДТЗ возможен режим с блокировкой от броска намагничивающего тока (БНТ);
- для любой ступени ДО и ДТЗ возможен режим с блокировкой от перевозбуждения;
- 2-х ступенчатая защита от несимметричной нагрузки или обрыва фаз по току обратной последовательности с выбором стороны ВН или НН независимо для каждой ступени;
- 2-х ступенчатая направленная защита от замыканий на землю (ЗНЗ) по измеренному или расчетному (независимо для каждой ступени) току нулевой последовательности $3I_0$ с пуском по $3U_0$; расчетный ток получается путем векторного суммирования трех фазных токов стороны ВН.

«РЗА СИСТЕМЗ» продолжает совершенствовать линейку своих самых массовых электронных реле PC80М, являющихся одним из лучших малобюджетных решений для эффективной реконструкции присоединений 6-35 кВ.

■ Основные функции реле для различных модификаций:

- токовая отсечка (ТО) с выдержкой времени 70-100 мс или 150-200 мс по выбору с передней панели;
- МТЗ с независимой и двумя зависимыми характеристиками срабатывания;
- возможность блокировки ТО с передней панели или дистанционно;
- шунтирование-дешунтирование управляемой цепи.
 - защита от замыканий на землю – ЗНЗ;
 - хранение заданных с передней панели уставок и характеристик во встроенной ФЛЭШ-памяти;
 - функции АПВ и ЧАПВ;
 - отключение от АЧР;
 - светодиодная индикация срабатывания, обеспечивающая, в том числе, индикацию в течение 12 часов после пропадания оперативного питания (исполнение «i») и др.



В соответствии с пожеланиями наших потребителей проведена модификация 3-х фазных реле тока PC80M3 (введены новые типоразмеры PC80M3М-7...9).

Данная модификация позволяет использовать эти устройства в схемах с дешунтированием и дистанционной блокировкой отсечки. Реле имеют дополнительный выход (сухой контакт), позволяющий им корректно работать с блоком управления выключателя ВВ/TEL.

С мая 2011г модифицированные устройства доступны в заказе.

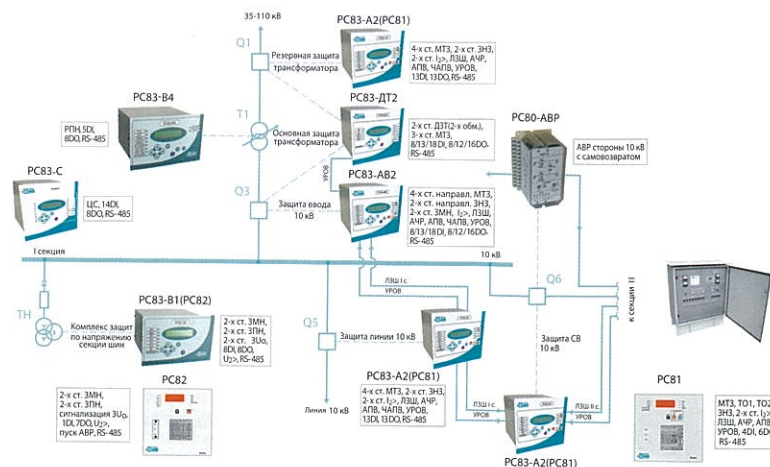
Краткую информацию смотрите на нашем сайте в рубрике PC80М раздела «Продукция», более подробно – ТО в разделе «Библиотека».

Комплексные решения на базе собственных микропроцессорных устройств защиты, такие как шкафы релейной защиты и автоматики серии ШЗА.

В качестве удачного технического решения мы предлагаем сочетание наших энергоэффективных устройств релейной защиты и системы постоянного оперативного тока, организованной с помощью компактного и недорогого изделия ШОТ1М с необслуживаемыми аккумуляторными батареями небольшой емкости. Такое решение сейчас особенно актуально в связи с массовым применением вакуумных выключателей, также не требующих аккумуляторных батарей большой емкости.



Выпускаемые микропроцессорные устройства защиты серии PC83 комплексно обеспечивают защиту электроподстанций 35/10/6 кВ.



Устройства серии PC83 соответствуют требованиям ГОСТ Р 51317.6.5-2006 (IEC 61000-6-5:2001) «Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях».

Наши обязательства по гарантийному обслуживанию не ограничиваются стандартными сроками в условиях контрактов. На протяжении всего эксплуатационного периода, мы ведем техническую поддержку и модернизацию наших устройств, совершенствуем программное обеспечение, которое доступно для бесплатной загрузки с нашего сайта.

Мы всегда готовы реализовать предложения по совершенствованию наших изделий, расширению их номенклатуры и функциональных возможностей, а также модернизации под Ваши потребности.



РЗА СИСТЕМЗ

Приглашаем Вас на наш сайт

<http://www.rzasystems.ru>

чтобы узнать подробнее о нашей продукции и новинках.

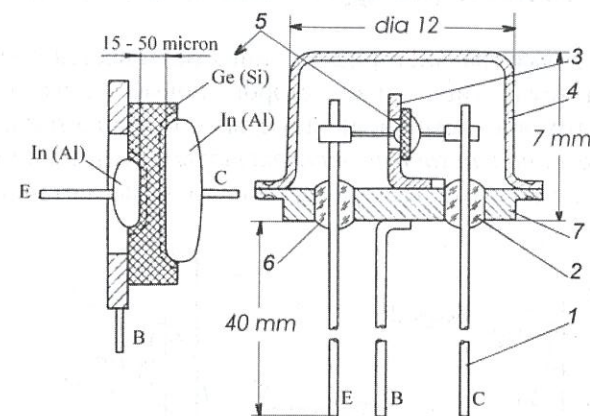
Российская Федерация

140070, Московская обл., п. Томилино, ул. Гаршина, д. 11

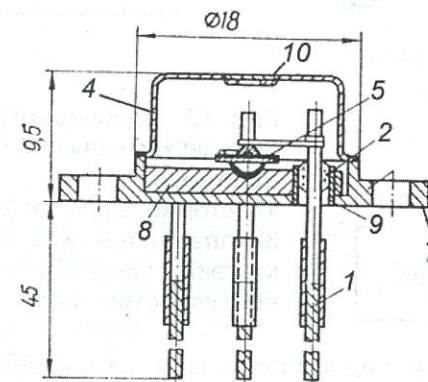
тел/факс: +7 (495) 721-49-51

тел: +7 (495) 232-12-35

e-mail: commerce@rzasystems.ru



а)



б)

Рис. 1.6. Транзисторы производства 70-х годов:

а) маломощный; б) мощный:

- 1 – выводы; 2 и 6 – стеклянные изоляторы; 3 – кристаллодержатель; 4 – защитный колпачок; 5 – кристалл кремния (германия); 7 – фланец; 8 – медный теплоотвод; 9 – коваровая втулка; 10 – отверстие для удаления газов после сварки корпуса и диск для герметизации

1.3. Некоторые другие типы транзисторов

В 70-х годах транзисторная техника развивается очень бурно. Появляются сотни типов транзисторов, новые их разновидности, (рис. 1.6), в том числе и с проводимостью обратного типа, то есть *n-p-n*, а также *однопереходные транзисторы* (из-за наличия только одного перехода такой транзистор иногда называют *двухбазовым диодом*), (рис. 1.7).

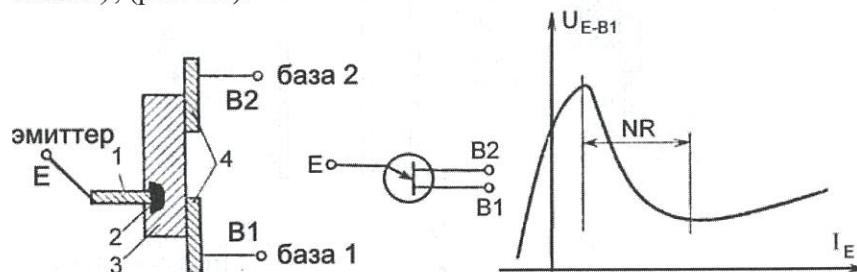


Рис. 1.7. Однопереходной транзистор (или двухбазовый диод) и схема его включения:

1 – стержень *p*-типа; 2 – *p-n*-переход; 3 – пластина *n*-типа; 4 – омические контакты; NR – область отрицательного сопротивления

Это транзистор с одним переходом, созданный путем вплавления стерженька из *p*-материала в монокристаллическую пластинку из материала *n*-типа (кремний). К пластинке присоединены два вывода, играющие роль баз. Стерженек, расположенный несимметрично относительно баз, называется эмиттером. Сопротивление между базами составляет около нескольких тысяч Ом. Обычно база B_2 смещена в положительную сторону относительно базы B_1 . При подведении к эмиттеру соответствующего положительного напряжения протекает большой ток эмиттера (при небольшом падении напряжения между эмиттером E и базой B_1). При этом на эмиттерной характеристике транзистора наблюдается область отрицатель-

ного сопротивления (NR на рис. 1.7), в которой транзистор очень быстро скачком отпирается, то есть работает как реле. Современные транзисторы, рис. 1.8, характеризуются таким разнообразием, что описать их все в рамках данной книги, посвященной реле, просто невозможно. Придется ограничиться описанием только нескольких самых распространенных типов современных полупроводниковых приборов и реле на их основе.

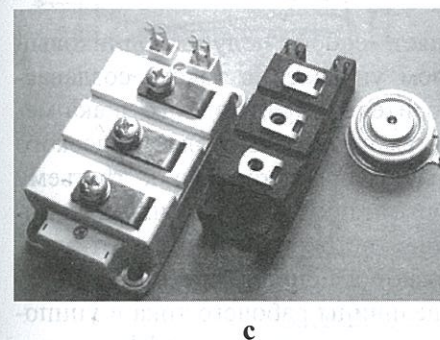
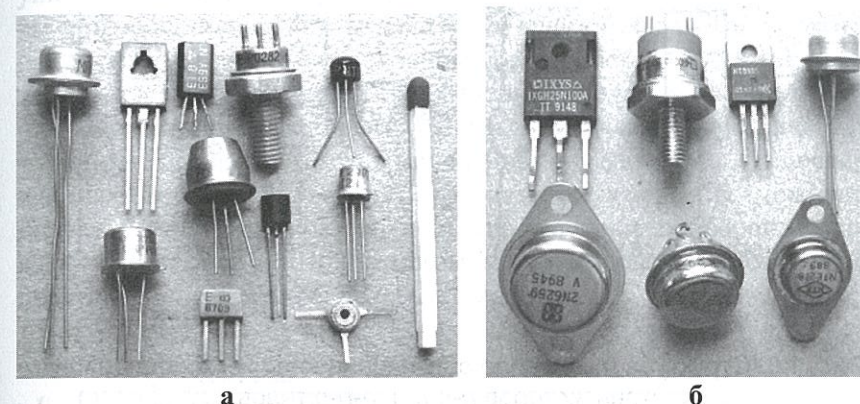


Рис. 1.8. Так выглядят современные транзисторы малой (а), средней (б) и большой (с) мощности

Помимо описанных выше транзисторов, называемых *биполярными* (рис. 1.9), большое распространение получили в последнее время так называемые *Field Effect Transistors (FET) – полевые транзисторы*, (рис. 1.10). Первую попытку изготовления мало-мощного полевого транзистора предпринял все тот же Уильям Шокли еще в 1948 г. Но потребовались годы дополнительных ис-

следований для того, чтобы в 1952 г. создать работающий FET с управляющим p - n переходом, который назывался в то время "unitron" (Unipolar Transistor).

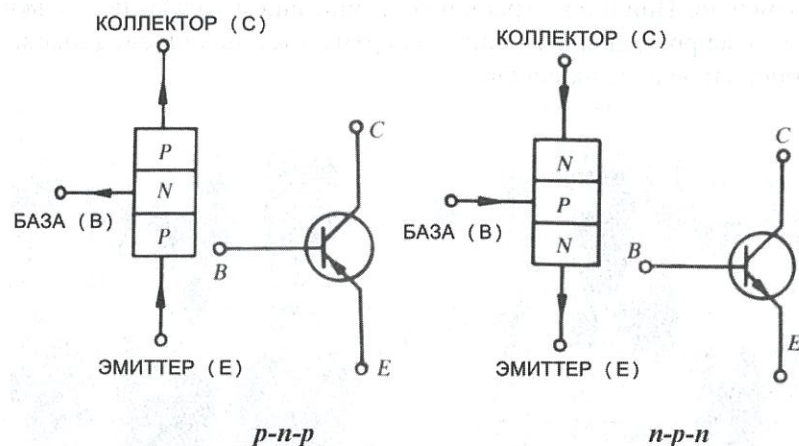


Рис. 1.9. Структура и условное обозначение на схемах биполярных транзисторов p - n - p и n - p - n типов

Такой транзистор представляет собой полупроводниковый трехэлектродный прибор, в котором управление током, создаваемым направленным движением носителей заряда одного знака между двумя электродами, достигается с помощью электрического поля (отсюда и название «полевые»), приложенного к третьему электроду. Электроды, между которыми протекает рабочий ток, носят название *истока* и *стока*, причем истоком считается тот электрод, через который носители втекают в прибор. Третий электрод называется *затвором*. Изменение величины рабочего тока в униполярном транзисторе осуществляется путем изменения эффективного сопротивления токопроводящего участка, полупроводникового материала между истоком и стоками, называемого *каналом*. Это изменение производится путем уменьшения или увеличения области 5, (рис. 1.10). Увеличение напряжения начального смещения перехода приводит к расширению области обедненного слоя. В результате этого оставшаяся площадь сечения электропроводного канала в кремнии уменьшается и транзистор запирается. И, наоборот,

при уменьшении величины запирающего напряжения на затворе область 5, обедненная носителями тока, сжимается, превращаясь в острый клин. При этом увеличивается сечение электропроводного канала и транзистор отпирается.

В зависимости от типа проводимости полупроводникового материала канала различаются униполярные транзисторы с p и n каналом. То обстоятельство, что управление величиной рабочего тока униполярных транзисторов осуществляется с помощью канала, дало им второе наименование — *канальные транзисторы*. Третье название того же самого полупроводникового прибора — *полевой транзистор* характеризует то, что управление рабочим током осуществляется электрическим полем (напряжением), а не электрическим током, как это имеет место в биполярном транзисторе. Эта последняя особенность униполярных транзисторов, дающая возможность получать очень высокое входное сопротивление приборов, исчисляемое десятками и сотнями мегом, и определила их основное распространенное название: *полевые транзисторы*.

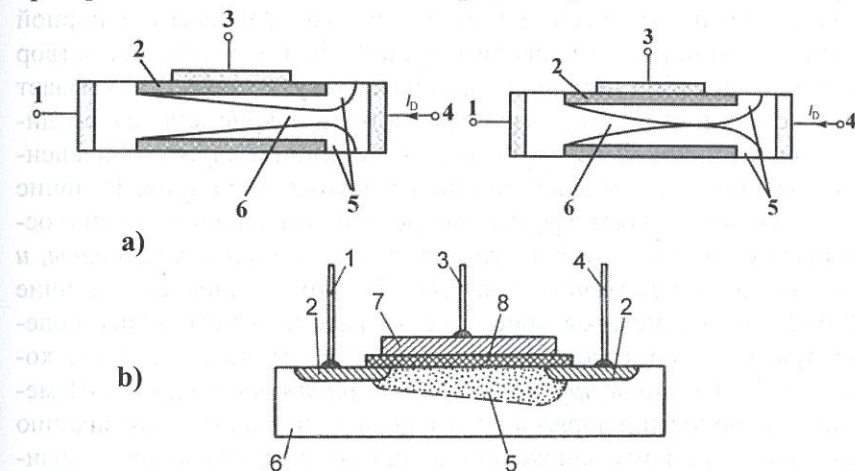


Рис. 1.10. Упрощенная структура FET (a) and MOSFET (b) транзисторов. 1 — «исток»; 2 — примесь n -типа; 3 — «gate»; 4 — «сток»; 5 — область, обедненная носителями тока; 6 — проводящий канал в кремнии p -типа; 7 — металл; 8 — двуокись кремния.

Следует отметить, что кроме полевых транзисторов с p - n переходом между затвором и каналом (FET) существуют и полевые

транзисторы с изолированным затвором: Metal Oxide Semiconductor Transistor (MOSFET). Последние были предложены в 1963 г. S. Hofstein F. и Heiman. Полевые транзисторы с изолированным затвором появились в результате поиска путей и средств дальнейшего повышения входного сопротивления и расширения частотного диапазона полевых транзисторов с $p-n$ переходом. От своих предшественников такие полевые транзисторы отличаются главным образом тем, что в них смещенный в обратном направлении переход заменен управляющей структурой металл — окисел — полупроводник, сокращенно MOSFET - структурой. Согласно рис. 1.10 основу прибора составляет монокристалл кремния, в данном случае p типа. Области истока и стока имеют проводимость, противоположную остальному кристаллу, то есть n типа. Расстояние между истоком и стоком очень мало, обычно около 1 мк. Область полупроводника, расположенная между истоком и стоком и при определенных условиях способная проводить ток, называется, как и в предыдущем случае, каналом. По существу, канал представляет собой область n типа, полученную путем диффузии малого количества донорной примеси в кристалл с проводимостью p типа. Собственно, затвор представляет собой металлическую пластинку, которая перекрывает зоны истока и стока. Она изолируется от монокристалла слоем диэлектрика толщиной всего 0,1 мк. Диэлектриком служит выращенная при высокой температуре пленка двуокиси кремния. Наличие этой пленки позволяет эффективно регулировать концентрацию основных носителей в области канала путем изменения и величины, и полярности напряжения затвора. В этом основное отличие MOSFET - транзисторов, (рис. 1.12) от рассмотренных ранее полевых транзисторов, (рис. 1.11), с $p-n$ переходом, которые могут хорошо работать лишь при запирающем напряжении затвора. Изменение полярности напряжения смещения приводит к отпираанию перехода и резкому снижению входного сопротивления транзистора.

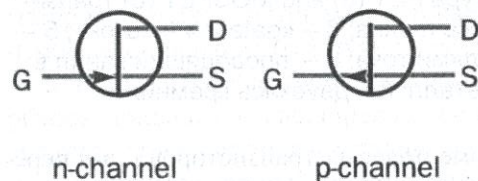


Рис. 1.11. Условное обозначение на схемах FET транзисторов n - и p -канальных:
G — затвор (gate); S — исток (source); D — сток (drain)

Основные преимущества MOSFET-транзисторов: во-первых, наличие изолированного затвора, позволяющего увеличить входное сопротивление, по крайней мере, в 1000 раз по сравнению с входным сопротивлением полевого транзистора с $p-n$ переходом, доведя его до миллиарда мегом; во-вторых, емкости затвора и стока становятся значительно меньше и обычно не превышают 1—2 пф; в-третьих, предельная частота MOSFET-транзисторов может достигать величины $f_T = 700—1000$ МГц, то есть, по крайней мере, в 10 раз выше, чем у обычных полевых транзисторов.

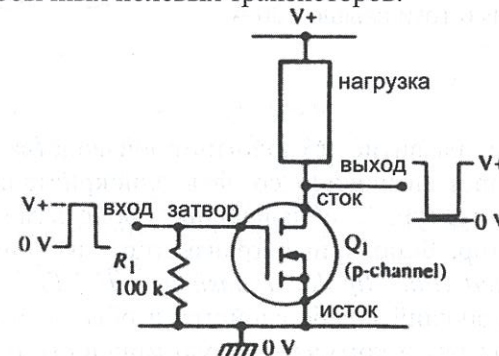


Рис. 1.12. Условное обозначение и схема включения MOSFET-транзистора.

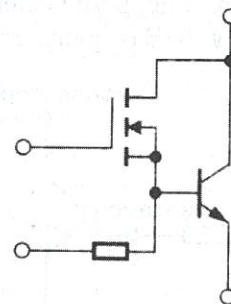
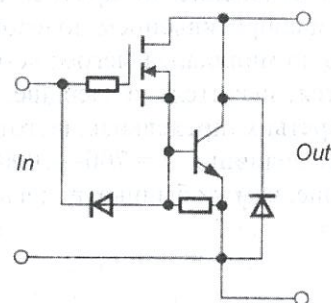


Рис. 1.13. Составная структура — "pobistor"

Стремление объединить в одном коммутационном устройстве положительные качества биполярного и полевого транзистора привели к созданию в 1978 г. некоторой составной структуры, названной "pobistor", (рис. 1.13). Идея модульного соединения кристаллов биполярного и полевого транзисторов в общем корпусе была ис-

пользована фирмой "Mitsubishi Electric" для создания мощного коммутационного полупроводникового модуля, (рис. 1.14).

Рис. 1.14. Схема мощного ключевого модуля CASCADE-CD компании "Mitsubishi Electric" на рабочее напряжение 1000 В и токи свыше 100 А



Дальнейшее развитие технологии производства полупроводниковых приборов позволило создать однокристалльный прибор со сложной структурой, обладающий свойствами "pobistora": IGBT- транзистор. Биполярный транзистор с изолированным затвором (*Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT*) – электронный прибор, совмещающий в себе свойства и обычного биполярного транзистора (высокую коммутируемую мощность и высокое быстродействие), и полевого транзистора с изолированным затвором (управление напряжением). Иными словами, его выходные характеристики (переход коллектор-эмиттер) подобны характеристикам обычных биполярных транзисторов, а цепь управления такая же, как у MOSFET. Схема включения IGBT-транзистора приведена на рис. 1.15.

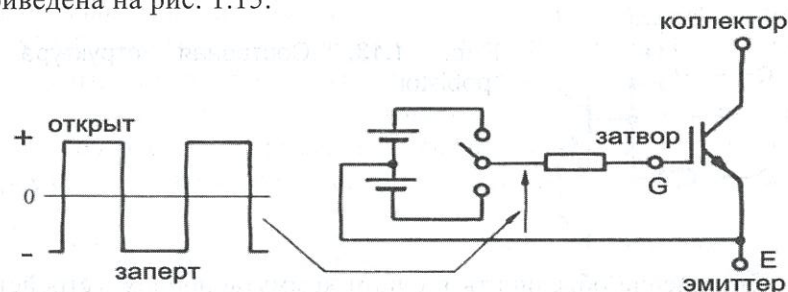


Рис. 1.15. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

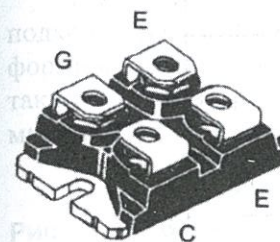
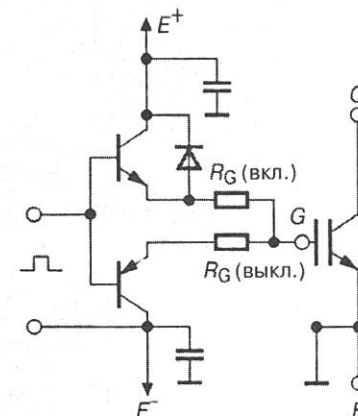


Рис. 1.16. IGBT-транзистор типа IXDN-75N120A фирмы IXYS с коммутируемым током до 120 А и максимальном напряжении до 1200 В (рассеиваемая на коллекторе мощность 630 Вт). При таких высоких параметрах прибор имеет небольшие размеры: 38 x 25 x 12 мм

Рис. 1.17. Типовая схема управления IGBT транзистором, обеспечивающая разнополярные импульсы на управляющем электроде (затворе), необходимые для надежного отпирания и запираания транзистора



Такой транзистор, рис. 1.16, имеет большую коммутируемую мощность, чем FET и биполярный транзисторы, а по быстродействию, занимает промежуточное положение между FET и биполярным транзистором.

В отличие от биполярных транзисторов, IGBT-транзистор плохо работает в усилительном режиме и предназначен для использования исключительно в ключевом (релейном) режиме, в качестве мощного быстродействующего переключателя. Отпирается IGBT-транзистор сигналом положительной (относительно эмиттера) полярности с напряжением не более 20 В. Запираться он может, при нулевом потенциале на управляющем электроде (затворе). Однако, при некоторых типах нагрузки для надежного запираания может потребоваться сигнал отрицательной полярности, (рис. 1.17). Многие компании выпускают специальные устройства управления IGBT-транзисторами, выполненные в виде отдельных интегральных схем или готовых печатных плат, так называемые *Drivers*, (рис. 1.18).

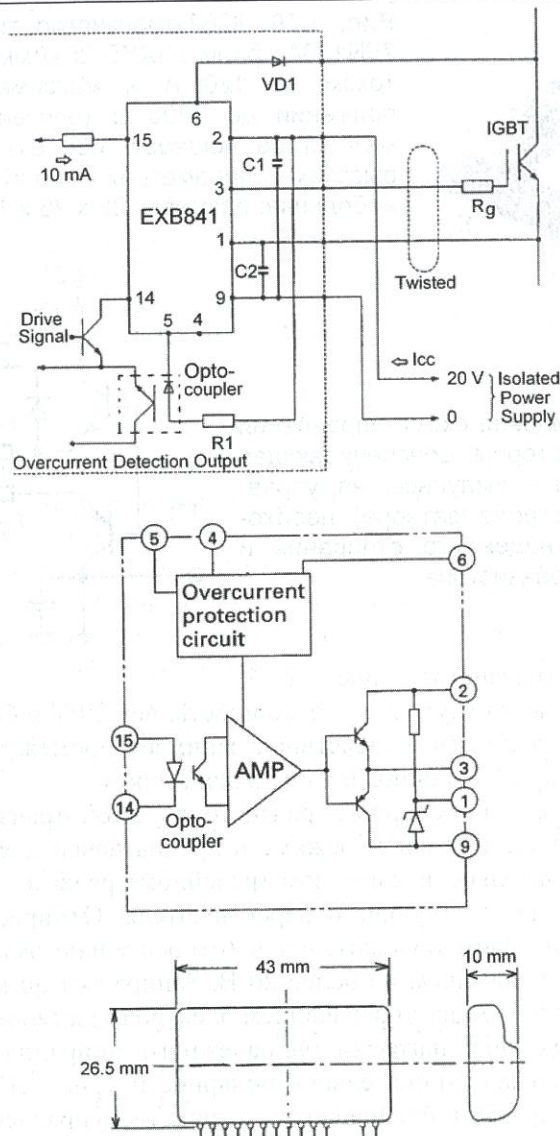


Рис. 1.18 а. Гибридная интегральная схема драйвера типа EXB841 (Fuji Electric) для мощных IGBT-транзисторов

Такие драйверы являются, как правило, универсальными и подходят для любых типов мощных IGBT-транзисторов. Кроме формирования управляющих сигналов требуемого уровня и формы, такие устройства часто обеспечивают защиту IGBT от коротких замыканий.

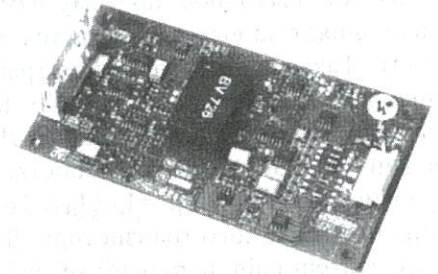


Рис. 1.18 б. Универсальный так называемый «умный» драйвер типа SKHI-10 (Semicron) для единичного мощного IGBT-модуля.

1.4. Основные режимы работы транзисторов

В качестве элемента электрической цепи транзистор обычно используется так, что один из его электродов является входным, другой - выходным, а третий - общий относительно и входа, и выхода (транзистор включается во внешнюю цепь по схеме четырехполюсника). В цепь входного электрода включается источник входного сигнала, требующий усиления, а в цепь выходного - нагрузка, на которой выделяется мощность усиленного сигнала. В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, различают три базовые схемы включения транзисторов (рис. 1.19).

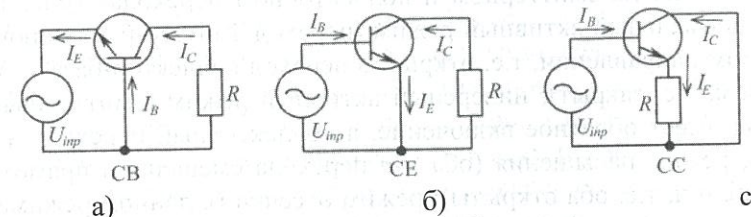


Рис. 1.19. Основные схемы включения биполярных транзисторов: а) с общей базой (CB); б) с общим эмиттером (CE); в) с общим коллектором (CC)

I_E - ток эмиттера; I_B - ток базы; I_C - коллекторный ток; R - нагрузка

В схеме СВ I_E является входным сигналом, а I_C – выходным. Коэффициент усиления по току (он еще называется коэффициентом передачи) транзистора при таком включении будет равен $\alpha = I_C / I_E \approx 1$. Схема может иметь низкое входное сопротивление и высокое выходное, поэтому изменение сопротивления нагрузки мало влияет на выходной ток (схема работает в режиме источника тока). Такая схема включения транзисторов используется на практике довольно редко. Схема СЕ используется наиболее часто в качестве усилительного каскада. Для этой схемы коэффициент передачи по току близок к собственному коэффициенту передачи транзистора и равен $\beta = I_C / I_B \approx 10 - 200$ и более, в зависимости от типа применяемого транзистора. Для постоянного тока $\beta = h_{FE}$. (h_{FE} – DC current gain, parameter specified by manufacturer of transistors). Эта схема обладает довольно высоким входным сопротивлением (то есть не шунтирует и не ослабляет входной сигнал) и малым выходным сопротивлением.

Схема СС используется довольно часто, в тех случаях, когда требуется каскад с очень высоким входным сопротивлением. Коэффициент передачи схемы по току близок к схеме СЕ, однако основным применением этой схемы является работа в режиме усиления напряжения, а не тока, поскольку именно в этом режиме удастся наиболее полно реализовать особенность схемы – ее очень высокое входное сопротивление. В режиме усиления напряжения схема имеет коэффициент передачи близкий к единице.

Вне зависимости от схемы включения транзистора он может работать в четырех основных режимах, определяемых полярностью напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах (рис. 1.20). Это нормальный активный режим (переход эмиттер-база включен в прямом направлении, т.е. открыт, а переход коллектор-база — в обратном, т.е. закрыт); инверсный активный режим (эмиттерный переход имеет обратное включение, а коллекторный переход — прямое); режим насыщения (оба $p-n$ перехода смещены в прямом направлении, т.е. оба открыты); режим отсечки (в данном режиме оба $p-n$ перехода прибора смещены в обратном направлении, т.е. оба закрыты).

С увеличением или уменьшением базового тока рабочая точка транзистора перемещается выше или ниже по линии нагрузки (рис. 1.21).

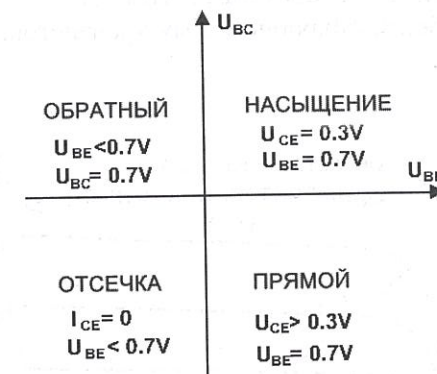


Рис. 1.20. Возможные режимы работы биполярного транзистора

Если базовый ток I_B увеличится слишком сильно, рабочая точка транзистора сместится в режим насыщения. В этом режиме транзистор полностью открыт и величина коллекторного тока I_C определяется практически полностью сопротивлением нагрузки R_L , так как падение напряжения на транзисторе V_{CE} в этом режиме близко к нулю.

В режиме отсечки транзистор полностью заперт и его коллекторный ток I_C близок к нулю. Все напряжение источника питания падает на транзисторе и напряжение на нагрузке R_L близко к нулю.

Однако, биполярные транзисторы не ограничиваются лишь этими двумя крайними состояниями. Плавное изменение базового тока приводит к плавному изменению тока коллектора в пределах от нуля до максимума подобно тому, как дроссельная заслонка меняет подачу топлива в топку или в мотор. Такой режим работы транзистора называется нормальным активным режимом.

Линия нагрузки транзистора представляет собой зависимость изменения напряжения на коллектор-эмиттерном переходе транзистора от тока базы.

Связь между током и напряжением коллектора при наличии нагрузки представляет собой выходную нагрузочную характеристику транзистора, называемую еще статической характеристикой.

Точки пересечения линии нагрузки с выходными нагрузочными характеристиками являются реальными рабочими точками транзистора для конкретных значений базового тока.

Рассмотрим более подробно схему транзисторного каскада СЕ типа (рис. 1.21).

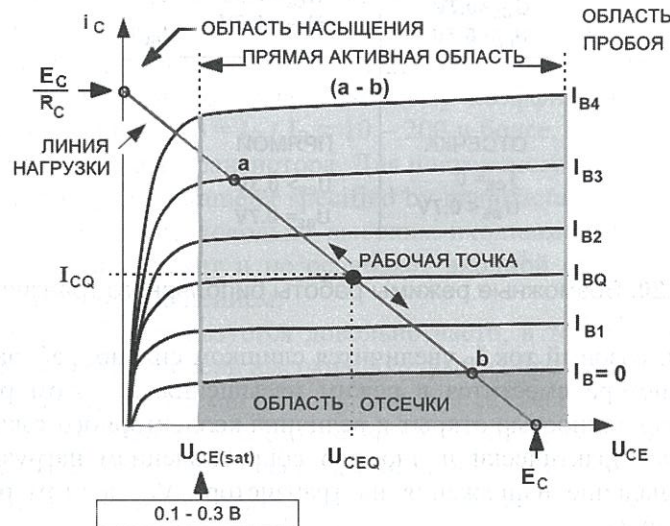


Рис. 1.21. Выходная динамическая характеристика биполярного транзистора

Линия нагрузки строится на семействе статических вольт-амперных характеристик транзистора (эти характеристики — справочный параметр, задаваемый изготовителем) по двум точкам пересечения с осями, соответствующим режиму холостого хода и короткого замыкания. Для первого из них: $I_C = 0$, $U_{CE} = E_C$ (точка на оси абсцисс); для второго: $U_{CE} = 0$, $I_C = E_C / R_C$ (точка на оси ординат). Точки пересечения линии нагрузки с любой из статических характеристик называются рабочими точками, соответствующими определенным значениям выходного тока и выходного напряжения.

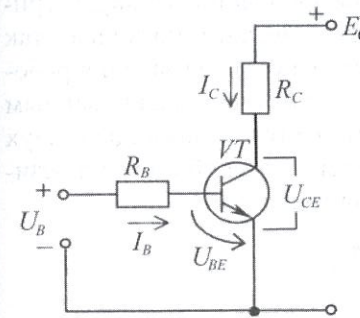


Рис. 1.22. Транзисторный каскад в режиме с общим эмиттером

Основные соотношения для этой схемы:

$$I_B = \frac{U_B - U_{BE}}{R_B}, \quad I_C = \beta I_B, \quad U_{CE} = E_C - I_C R_C.$$

Когда рабочая точка лежит в пределах отрезка а-в, транзистор работает в активном режиме (режим усиления). Работа транзисторного каскада в усилительном режиме характеризуется так называемой «точкой покоя». Эта точка располагается на линии нагрузки (рис. 1.21). Для усилителя класса А (широко используемого в простых устройствах автоматики) точка покоя располагается в средней части линии нагрузки.

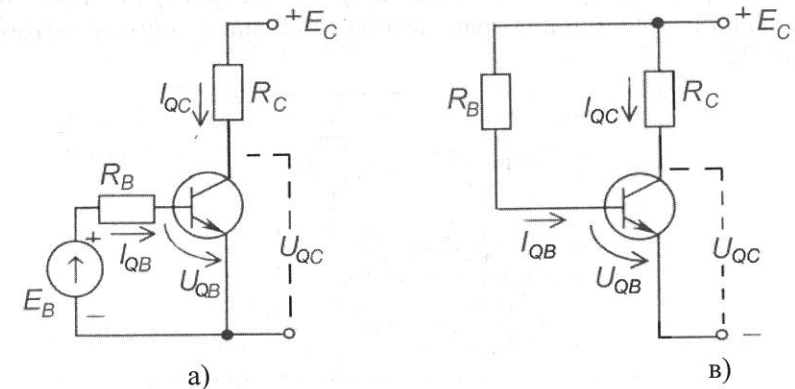


Рис. 1.23. Схемы задания рабочей точки покоя транзисторов фиксированным током

Рабочая точка покоя транзистора, выбранная по его характеристике (рис. 1.21) должна быть задана практически с помощью, так называемой цепи смещения. Существует два способа задания рабочей точки транзистора: фиксированным током или фиксированным напряжением. Первый из них осуществляется с помощью двух схем, рис. 1.23. В схеме рис. 1.23а цепь смещения образована резистором R_B который рассчитывается по формуле:

$$R_B = \frac{E_B - U_{QB}}{I_{QB}},$$

где $U_{BE} \approx 0.7 - 0.9 \text{ V}$ - прямое смещение база-эмиттерного перехода; I_{QB} - ток покоя базы (из выходной динамической характеристики) (рис. 1.21).

При наличии только одного источника смещения, как показано на рис. 1.23 в, режим покоя обеспечивается напряжением источника питания E_C и резистором R_B :

$$R_B = \frac{E_C - U_{QB}}{I_{QB}}$$

Способ задания смещения фиксированным напряжением показан на рис. 1.24. Это наиболее широко распространенный способ задания точки покоя транзистора с помощью двух резисторов $R1$ и $R2$.

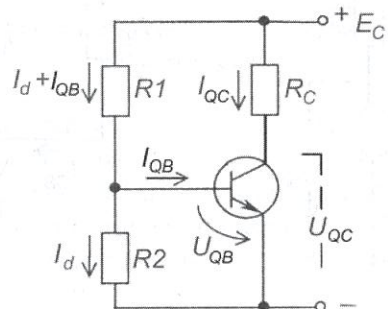


Рис. 1.24. Схема транзисторного каскада со смещением фиксированным напряжением

Для этой схемы справедливы следующие соотношения:

$$R_1 = \frac{E_C - U_{QB}}{I_{QB} + I_d}, \quad R_2 = \frac{U_{QB}}{I_d}, \quad I_d = (2-5)I_{QB}$$

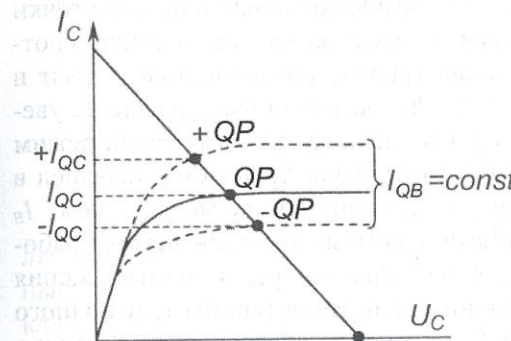


Рис. 1.25. Изменение точки покоя транзистора при постоянном токе смещения I_{QB} под действием температуры

Поскольку при изменении температуры окружающей среды коэффициент передачи транзистора по току (β) изменяется (увеличивается при возрастании температуры и уменьшается - при ее снижении), то и положение точки покоя будет изменяться (рис. 1.25).

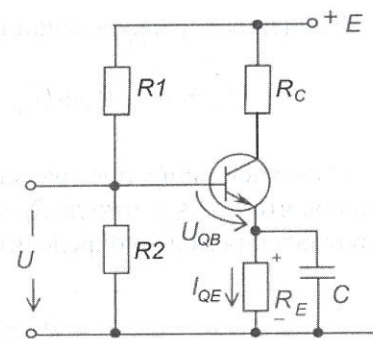


Рис. 1.26. Усилительный каскад с термостабилизацией рабочей точки

В этой схеме сопротивление дополнительного резистора R_E в цепи эмиттера выбирают из условия: $R_E = (0.1 - 0.2) R_C$, а емкость конденсатора C из уравнения:

$$\frac{1}{\omega C_E} \ll R_E,$$

где ω - минимальная частота усиливаемого сигнала.

Благодаря шунтирующему свойству этого конденсатора, на переменном токе мы получаем схему с общим эмиттером (СЕ), а на постоянном - схему усилительного каскада с отрицательной обратной связью.

При смещении рабочей точки выше точки «а» или ниже точки «в», транзистор переходит в режим насыщения или отсечки, соответственно. В режиме насыщения транзистор полностью открыт и через него протекает ток $I_{SAT} = E_C / R_C$, который уже больше не увеличивается с увеличением входного сигнала (поэтому такой режим называется «насыщением»). Для того, чтобы транзистор перешел в режим насыщения его базовый ток должен быть не меньше, чем: $I_B = I_{C(SAT)} / \beta$. Во многих устройствах автоматики транзисторы работают в режиме ключа, то есть в двух крайних режимах: насыщения и отсечки. Условия для надежного запираания (cutoff) или полного отпираания (то есть насыщения) транзистора обеспечивается, как и в рассмотренном выше случае, выбором сопротивлений смещения R_B и R_C .

Уравнения для напряжений в базовой цепи:

$$U_B = -I_{C0}R_B + U_{BE} \text{ или } U_{BE} = U_B + I_{C0}R_B$$

Надежное запираание транзистора (cutoff) обеспечивается при условии, что $U_{BE} \leq 0$, откуда $R_B \leq U_B / I_{C0}$. Тогда величину базового сопротивления можно определить по формуле:

$$R_B \leq \frac{U_B}{I_{C0max}},$$

где I_{C0max} - максимальное значение обратного тока коллектора (паспортное значение транзистора).

В схеме (рис. 1.26) положительный входной сигнал определенной величины открывает транзистор и переводит его в режим насыщения. При этом токи, протекающие в транзисторе, равны:

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad I_{C(SAT)} = \frac{E_C}{R_C} \leq \beta I_B.$$

С учетом этого можно рассчитать величину базового сопротивления для режима насыщения транзистора:

$$R_B \leq \beta_{min} R_C \frac{U_B}{E_C}.$$

1.5. Логические элементы на транзисторах

Одним из распространенных режимов работы транзистора является ключевой (то есть релейный) режим, при этом даже одиночный транзистор может работать в качестве быстродействующего ключа (рис. 1.27).

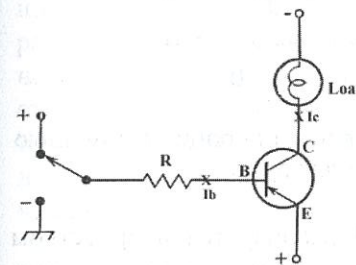


Рис. 1.27. Электронный ключ на одиночном транзисторе

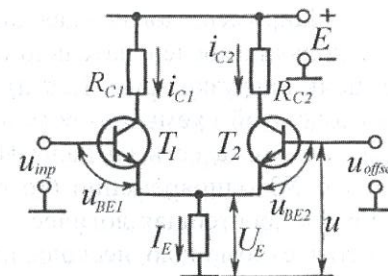


Рис. 1.28. Транзисторный переключатель двух цепей

Для переключения тока из одной цепи в другую используется двухтранзисторная схема (рис. 1.28). В этой схеме на базу транзистора T_2 подается стабильное напряжение смещения, а на базу T_1 управляющее напряжение.

При $u_{inp} = u_{offset}$ токи и напряжения в плечах схемы одинаковы. Если входное напряжение u_{inp} начинает превышать напряжение смещения u_{offset} , транзистор T_2 постепенно запирается и весь ток протекает только через транзистор T_1 и нагрузочный резистор R_{C1} . И наоборот, при уменьшении входного напряжения ниже уровня напряжения смещения ($u_{inp} < u_{offset}$) транзистор T_1 запирается, а T_2 отпирается, переключая весь ток в цепь резистора R_{C2} .

Как известно, контакты нескольких электромагнитных реле, соединенные между собой определенным образом, широко используются в системах автоматики для выполнения простейших логических операций с электрическими сигналами (рис. 1.29).

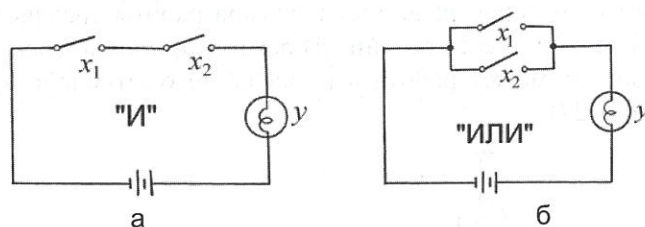


Рис. 1.29. Реализация простейших логических операций с помощью контактов электромагнитных реле.

Например, логическая операция И реализуется посредством нескольких последовательно соединенных контактов, включенных в цепь нагрузки (рис. 1.29 а). Сигнал γ будет присутствовать на выходе этой схемы (то есть лампочка будет гореть) только в том случае, когда есть сигналы И на первом входе X_1 , И на втором входе X_2 одновременно (то есть, когда оба контакта замкнуты). Другая простейшая логическая операция ИЛИ (рис. 1.29 б), реализуется с помощью нескольких параллельно включенных контактов. В этой схеме для появления сигнала γ на выходе (то есть для включения лампочки) необходимо наличие входного сигнала ИЛИ на первом входе (X_1), ИЛИ на втором входе (X_2), ИЛИ на обоих входах одновременно. Реализация логических операций с электрическими цепями – одна из важнейших функций реле. Транзисторные схемы успешно справляются и с этой задачей. Например, на одиночном транзисторе любого типа может быть реализована функция НЕ (рис. 1.30).

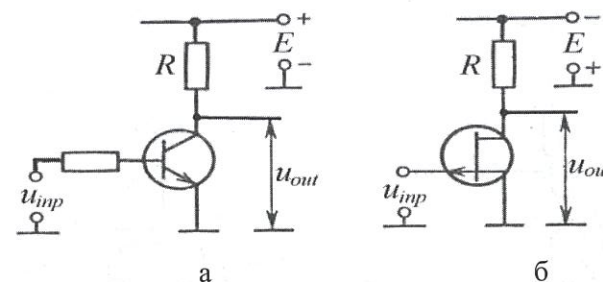


Рис. 1.30. Логический элемент НЕ, реализованный на биполярном и полевом транзисторах

В схеме (рис. 1.30) при отсутствии входного сигнала транзистор заперт, то есть все напряжение источника питания E приложено между эмиттером и коллектором (стоком и истоком) транзистора. А поскольку выходным сигналом является как раз напряжение на коллекторе (истоке) транзистора, то это означает, что при отсутствии сигнала на входе сигнал на выходе в этой схеме присутствует. И наоборот, при подаче сигнала на вход транзистор отпирается и напряжение на нем падает до очень малого значения (доли вольта), что означает исчезновение сигнала на выходе.

Логический элемент И-НЕ может быть реализован различными схемными методами. В наиболее простом случае это цепочка из последовательно включенных транзисторов (рис. 1.31 а). Когда на оба входа X_1 и X_2 одновременно будут поданы управляющие сигналы, оба транзистора откроются и падение напряжения на цепочке из двух последовательно соединенных транзисторов снизится до очень малой величины. Это означает отсутствие выходного сигнала γ . Во второй схеме достаточно наличия даже одного сигнала на любом входе (X_1 или X_2) для того, чтобы исчезло напряжение на выходе γ .

Функционально законченные логические элементы обозначаются на схемах в виде специальных значков (табл. 1.1). Наличие сигнала, достаточного по величине для перехода логического элемента из одного состояния в другое, принято обозначать «1». Отсутствие сигнала (или наличие очень слабого сигнала, не способного повлиять на состояние схемы) принято обозначать «0». Этими же

значками обозначают состояние элементов схемы: «1» - включенное, «0» - выключенное.

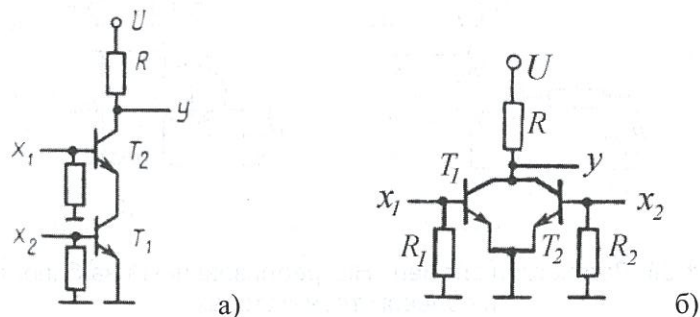


Рис. 1.31. Транзисторные логические элементы И-НЕ (а) и ИЛИ-НЕ (б)

Если соединить между собой два логических элемента НЕ в кольцо, как показано на схеме рис. 1.32, то получится очень интересная схема со свойствами бистабильной защелки, то есть с ярко выраженной релейной характеристикой.

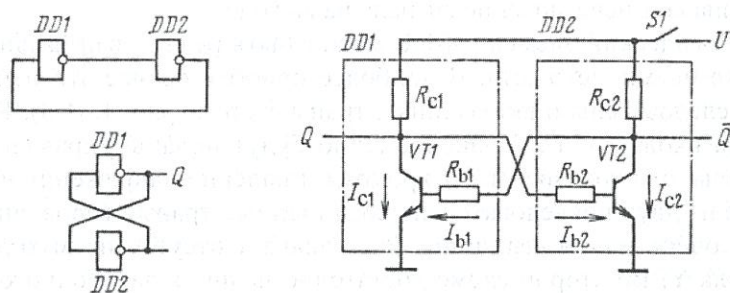


Рис. 1.32. Бистабильная релейная схема, выполненная из двух логических элементов НЕ.

Таблица 1.1. Основные логические элементы. (В соответствии с некоторыми стандартами логические элементы обозначают также в виде прямоугольников)

ЛОГИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	БУЛЕВЫ ФУНКЦИИ	ТАБЛИЦА ИСТИННОСТИ		
			ВХОДЫ		ВЫХОД
И		$A \cdot B = Y$	B	A	Y
			0	0	0
			0	1	0
			1	0	0
			1	1	1
ИЛИ		$A + B = Y$	0	0	0
			0	1	1
			1	0	1
			1	1	1
НЕ		$A = \bar{A}$		0	1
				1	0
И-НЕ		$\overline{A \cdot B} = Y$	0	0	1
			0	1	1
			1	0	1
			1	1	0
ИЛИ-НЕ		$\overline{A + B} = Y$	0	0	1
			0	1	0
			1	0	0
			1	1	0

Такие бистабильные (то есть обладающие двумя устойчивыми состояниями) устройства называют триггерами. После подачи на такое устройство (рис. 1.32) напряжения питания один из транзисторов мгновенно откроется, а второй останется в закрытом состоя-

нии. Процесс этот протекает лавинообразно и называется регенеративным. Какой из транзисторов откроется, предугадать невозможно, так как схема совершенно симметрична и вероятность отпира- ния обоих транзисторов одинакова. Это состояние устройства ус- тойчиво сохраняется. При многократном включении и выключении напряжения питания схема будет переходить в то или другое устой- чивое состояние.

Существенным недостатком такого триггера является отсутст- вие цепи управления, с помощью которой можно было бы уверенно управлять его состоянием при постоянном напряжении питания.

На практике в качестве электронных схем с релейной характе- ристикой широко применяют так называемые *триггеры Шмитта*. Существует много разновидностей таких триггеров, обладающих специальными свойствами. В простейшем исполнении такой триг- гер представляет собой симметричную структуру, образованную из двух соединенных в кольцо логических элементов типа И-НЕ либо ИЛИ-НЕ (рис. 1.33), и называется *асинхронным RS-триггером*.

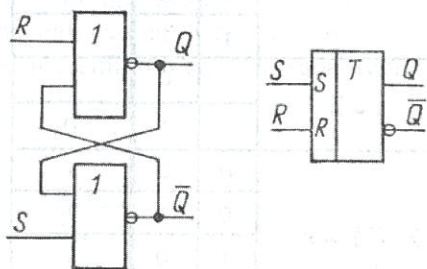


Рис. 1.33. Асинхронный RS-триггер, образованный из двух логических элементов ИЛИ-НЕ

Одному из выходов триггера присваивают наименование *пря- мого* (в силу симметрии схемы им может быть любой выход) и обо- значают буквой Q , а другому — наименование *инверсного* и обозна- чают буквой \bar{Q} (« Q под чертой»), чтобы подчеркнуть, что в логиче- ском смысле сигнал на этом выходе противоположен сигналу на прямом выходе. Состояние всего триггера обычно отождествляют с состоянием прямого выхода, то есть говорят, что триггер находится в единичном (то есть включенном) состоянии, когда $Q = 1$, а $\bar{Q} = 0$, и наоборот.

Таблица 1.2. Комбинации сигналов на входах и положение RS-триггера

Вход			Выход для логических элемен- тов типа:			
S (set) Запись	R (reset) Сброс	Notes	И-НЕ		ИЛИ-НЕ	
			Q	\bar{Q}	Q	\bar{Q}
0	0	Запрещен- ный режим для И-НЕ	Неопределен- ность		Без изменений	
1	0		1	0	1	0
0	1		0	1	0	1
1	1	Запрещен- ный режим для ИЛИ-НЕ	Без изменений		Неопределен- ность	

Смена состояния триггера имеет много синонимов: «переключе- ние», «переброс», «опрокидывание», «запись информации» и производится с помощью сигналов управления, подаваемых на вхо- ды R и S. Вход, по которому триггер устанавливается в единичное состояние, называется входом S (от «Set»), а вход, по которому триггер возвращается в нулевое положение, входом R (от «Reset»). На входах возможны четыре комбинации сигналов, каждой из кото- рых соответствует определенное положение триггера (табл. 1.2).

Как видно из таблицы, при отсутствии сигналов на обоих вхо- дах для триггера, выполненного на элементах И-НЕ или наличии сигналов на обоих входах для триггера на элементах ИЛИ-НЕ, со- стояние триггера будет неопределенным. Поэтому такие комбина- ции сигналов являются запрещенными для RS-триггера.

Из временной диаграммы асинхронного RS-триггера видно (рис. 1.34), что после перебрасывания триггера в единичное состоя- ние никакие повторные сигналы на запускающем входе S уже не способны изменить его состояние. Возврат триггера в исходное со-

стояние возможен только после подачи сигнала на его «стирающий» R вход.

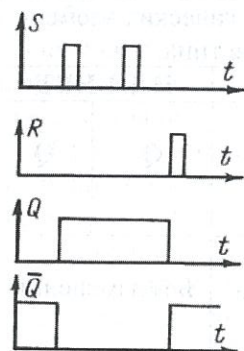


Рис. 1.34. Временная диаграмма асинхронного RS-триггера

Недостатком асинхронного триггера является его неспособность отличить полезный сигнал запуска от помехи, случайно попавшей на запускаящий вход. Поэтому в некоторых случаях применяют так называемые

синхронные или D-триггеры, отличающиеся наличием дополнительного так называемого синхронизирующего входа.

Переключение синхронного триггера в единичное состояние происходит при наличии уже не только запускаящего сигнала на входе S, но и при одновременном наличии еще одного сигнала на синхронном входе. Синхронизирующие (тактовые) сигналы могут поступать на триггер (вход C, рис. 1.35) с определенной частотой от внешнего генератора.

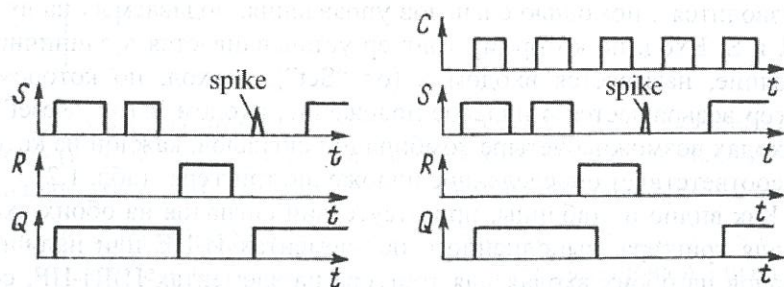


Рис. 1.35. Временные диаграммы работы асинхронного (слева) и синхронного триггеров при наличии помехи (spike)

Помимо повышения помехоустойчивости синхронизация обеспечивает привязку сигналов ко времени и объединяет в общем ритме работу многих узлов аппаратуры.

Различные виды триггеров выпускаются многими фирмами в виде интегральных микросхем в стандартных корпусах (рис. 1.36).

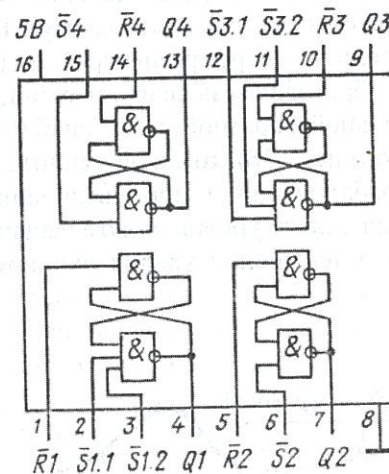
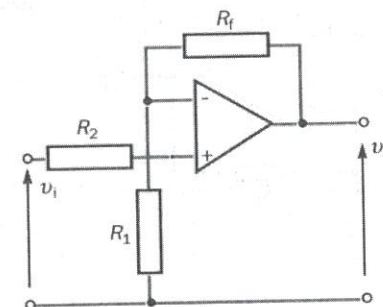


Рис. 1.36. Структура и внешний вид интегральной микросхемы типа 74LS279, содержащей четыре RS-триггера на логических элементах И-НЕ

Рис. 1.37. Операционный усилитель с отрицательной обратной связью, осуществляемой через резистор R_f :
 v_i – входной сигнал;
 v_o – выходной сигнал.



Простые релейные устройства строят также на базе так называемых операционных усилителей. Операционные усилители – это сложные многокаскадные транзисторные схемы с очень высоким коэффициентом усиления, выполненные по интегральной технологии в стандартных корпусах микросхем. При использовании по своему прямому назначению, то есть для усиления сигналов, такой операционный усилитель (ОУ) снабжается, как правило, отрица-

тельной обратной связью (сигнал с выхода усилителя подается на вход, но с обратной полярностью), несколько снижающей усиление, но значительно повышающей стабильность работы и качество усиления (рис. 1.38).

Следует отметить, что «+» и «-» на схеме это прямой и инверсный входы усилителя, а не полярность питания (цепи питания ОУ на схемах обычно не изображают, чтобы не усложнять схему). На схеме (рис. 1.37) сигнал с выхода усилителя через резистор R_f подается на его инверсный вход, то есть обратная связь является отрицательной. Если же вместо отрицательной обратной связи снабдить ОУ положительной обратной связью (рис. 1.38), то такой усилитель начинает работать как триггер, срабатывающий при увеличении входного напряжения выше определенного уровня и возвращающийся в исходное состояние после уменьшения уровня входного сигнала.

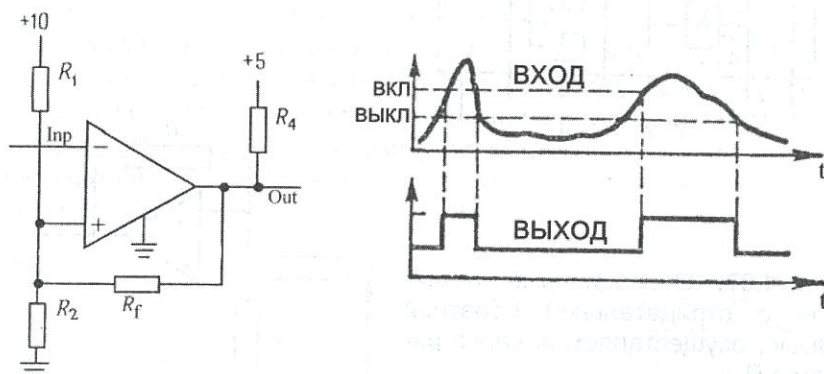


Рис. 1.38. Операционный усилитель с положительной обратной связью, работающий как триггер

Использовать миниатюрный операционный усилитель очень удобно для создания электронных устройств с релейной характеристикой, но совсем не обязательно. Такими же свойствами обладает и простой усилитель на двух транзисторах с положительной обратной связью (рис. 1.39).

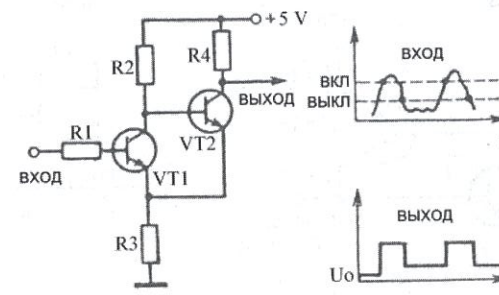


Рис. 1.39. Простой триггер на транзисторах

Когда на входе схемы напряжение отсутствует (или оно мало), транзистор $VT1$ открыт. На его коллекторе существует напряжение, которое открывает транзистор $VT2$. Эмиттерный ток транзистора $VT2$ создает падение напряжения на сопротивлении $R3$, которое закрывает транзистор $VT1$. Если входное напряжение превысит напряжение в эмиттере, то транзистор $VT1$ откроется и перейдет в насыщение.

В результате потенциалы базы и эмиттера транзистора $VT2$ будут равны. Транзистор $VT2$ закроется. На выходе установится напряжение, равное напряжению питания.

При уменьшении входного напряжения транзистор $VT1$ выходит из режима насыщения. Наступает лавинообразный процесс. Эмиттерный ток транзистора $VT2$, создающий закрывающее напряжение на резисторе $R3$, ускоряет закрывание транзистора $VT1$. В результате триггер возвращается в исходное состояние.

1.6. Тиристоры

Еще один замечательный полупроводниковый прибор с релейной характеристикой берет свое начало от сформулированного в начале 50-х годов уже известным нам по своим разработкам в области $p-n$ переходов Уильямом Шокли представления о «коллекторе с ловушкой». Дж. Эберс вслед за Шокли разработал двухтранзисторную аналогию (внутрисвязанные $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы) $p-n-p$ -переключателя, которая стала моделью подобного прибора (рис. 1.40).

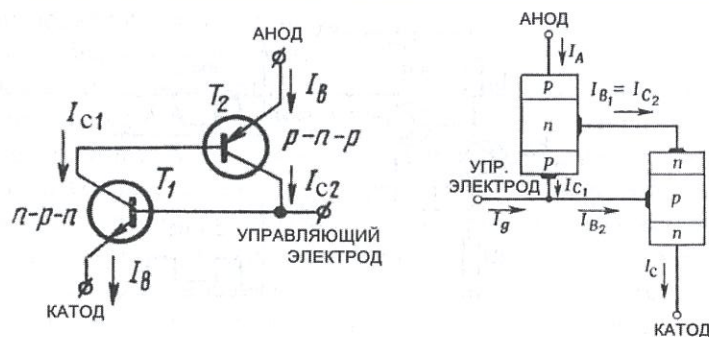


Рис. 1.40. Двухтранзисторная модель тиристора

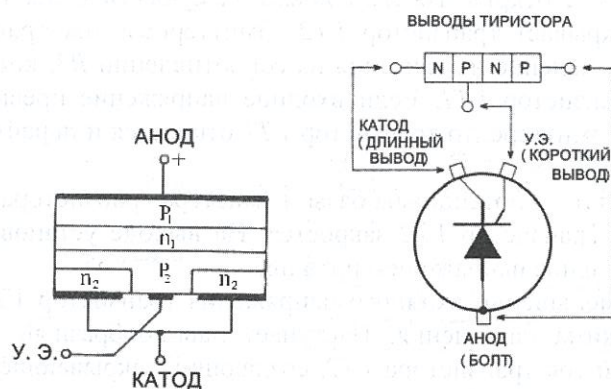


Рис. 1.41. Структура и условное обозначение полупроводникового тиратрона – «тиристора»

Рабочим элементом нового полупроводникового прибора с релейной характеристикой является четырехслойный кристалл кремния с перемежающимися p - и n -слоями (рис. 1.41). Такая структура создается диффузией в исходный монокристалл n_1 -кремния (представляющего собой диск диаметром 20 - 45 мм и толщиной примерно равной 0,4 - 0,8 мм и более для высоковольтных приборов) примесных атомов алюминия и бора со стороны двух его оснований на глубину, примерно равную 60—80 мк. Введенные примеси образуют p_1 - и p_2 -слои в тиристоре. Четвертый (еще более тонкий) слой n_2

(толщина его порядка 10—15 мк) создается последующей диффузией атомов фосфора в слой p_2 . Верхний слой p_1 выполняет в тиристоре функции анода, а нижний слой p_2 — функции катода. Силовая цепь присоединяется к основным электродам тиристора: аноду и катоду. Положительный полюс цепи управления присоединяется через внешний электрод к слою p_2 , а отрицательный полюс — к катодному выводу.

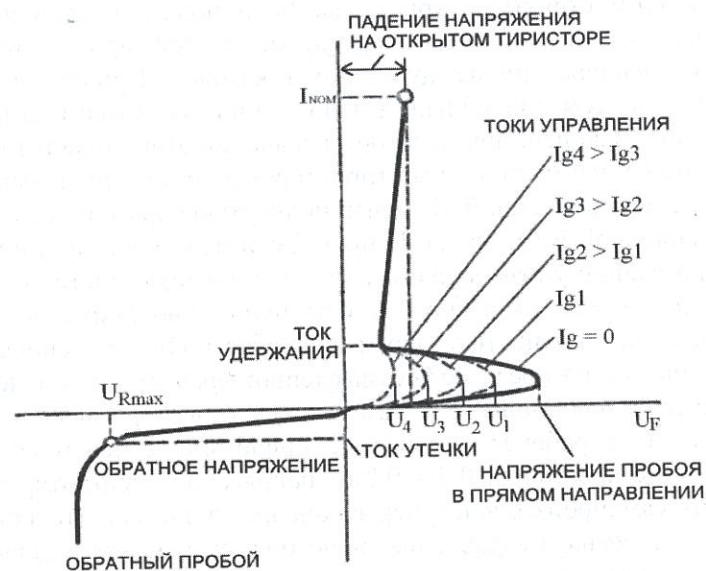


Рис. 1.42. Вольтамперная характеристика тиристора

Вольтамперная характеристика (ВАХ) прибора с такой структурой (рис. 1.42), очень напоминает по своей форме ВАХ диода. Так же как и у диода, ВАХ тиристора имеет прямой и обратный участки. Так же, как и диод, тиристор находится в запертом состоянии при приложении к нему обратного напряжения (минус на аноде и плюс на катоде), а при превышении предельного допустимого уровня этого напряжения U_{Rmax} происходит пробой, сопровождающийся большим током и необратимым разрушением структуры прибора.

Прямой участок ВАХ тиристора не остается постоянным, как у диода, а может изменяться под действием тока управляющего

электрода. При отсутствии тока в цепи этого электрода тиристор остается запертым не только в обратном, но и в прямом направлении, то есть вообще не проводит ток (конечно, кроме токов утечки). С увеличением напряжения, приложенного в прямом направлении между анодом и катодом, до определенного значения, тиристор очень быстро (скачком) отпирается и на нем остается лишь очень небольшое падение напряжения (доли вольта), обусловленное несовершенством структуры кристалла. Если подать в цепь gate небольшой ток, то тиристор переключится уже при значительно меньшем напряжении между анодом и катодом. Причем чем больше этот ток, тем при меньшем напряжении происходит отпирание тиристора. Наконец, при некотором значении этого тока (от единиц миллиампер для маломощных тиристоров до сотен миллиампер для мощных) прямая ветвь ВАХ почти полностью спрямляется и становится подобной ВАХ диода. В таком режиме (то есть при постоянном протекании управляющего тока в цепи gate) тиристор ведет себя точно так же, как и диод, то есть полностью открыт в прямом направлении и полностью закрыт в обратном. Однако использовать тиристоры в таком режиме бессмысленно: для этого есть более простые и дешевые диоды. На самом деле, тиристоры используют в режиме, когда рабочее напряжение, приложенное между анодом и катодом, не превышает 0.5 – 0.7 от напряжения, при котором происходит самопроизвольное переключение тиристора (то есть при отсутствии сигнала управления тиристор всегда остается запертым), а ток управления подают в цепь gate лишь в тот момент времени, когда хотят отпереть тиристор, и такой величины, которая обеспечивает его надежное отпирание. В таком режиме тиристор работает как очень быстродействующее реле (время отпирания тиристора составляет единицы - десятки микросекунд).

Многие, очевидно, слышали о том, что тиристоры используются в качестве основных элементов для плавного регулирования напряжения и тока. Но если тиристор – это всего лишь электронное реле, имеющее, как и все реле, два устойчивых состояния: включенное и выключенное, то как же тиристор может плавно регулировать напряжение? Дело в том, что если к тиристорам приложено не постоянное, переменное синусоидальное напряжение, то, изменяя момент подачи управляющего сигнала на gate относительно фазы приложенного прямого синусоидального напряжения, можно регу-

лировать момент отпирания тиристора, то есть как бы отрезать часть синусоиды тока, поступающего в нагрузку (рис.1.43). Момент подачи импульса отпирающего тока управления (такие импульсы называются еще «поджигающими», по аналогии с импульсами управления тиратронов) принято характеризовать углом отпирания α .



Рис. 1.43. Принцип действия тиристорного регулятора

Учитывая, что среднее за период значение тока в нагрузке определяется как интеграл (то есть площадь оставшейся части синусоиды), то становится понятным принцип действия тиристорного регулятора. После отпирания тиристор остается в открытом состоянии и после окончания действия импульса тока управления. Выключить его можно, только уменьшив прямой ток в цепи анод-катод до величины тока удержания (I_{HOLD}). В цепях переменного тока условие для запираания тиристора создается автоматически при пересечении синусоиды тока через нулевое значение. Для отпирания тиристора в следующую полуволну напряжения, необходимо снова пропустить короткий импульс управления через gate тиристора. Для управления обеими полуволнами переменного тока используют два тиристора, включенных встречно-параллельно. Тогда один из них работает на положительной полуволне, а второй на отрицательной.

В настоящее время такие приборы изготавливаются на токи от нескольких миллиампер до нескольких тысяч ампер и на напряжения запираания, достигающие нескольких тысяч вольт.

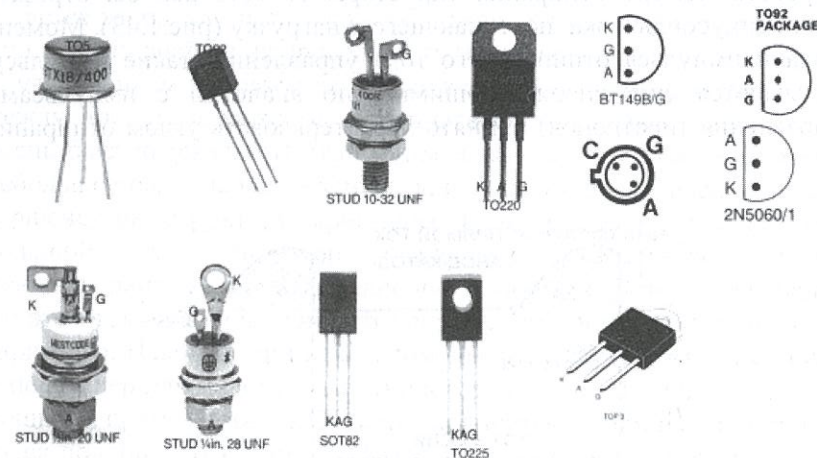


Рис. 1.44. Современные тиристоры малой и средней мощности

Как уже было сказано выше, в исходном состоянии тиристор заперт в обоих направлениях тока и для его правильного (то есть не аварийного) отпирания необходимо создать определенные условия по току и напряжению:

- к тиристорному устройству должно быть приложено прямое напряжение («плюс» на аноде и «минус» на катоде) не превышающее его пробивного напряжения в прямом направлении (рис. 7.81);
- в цепи «управляющий электрод - катод» должен протекать ток положительного направления, достаточный для отпирания тиристора как по величине (для мощных тиристорных устройств это 0.05 – 0.2 А) так и по длительности (десятки – сотни микросекунд).

При наличии этих условий тиристор откроется, и через его основной переход «анод – катод» потечет ток. При этом управляющий переход будет зашунтирован прямым током и дальнейшее поведение тиристора уже не будет зависеть от наличия или отсутствия тока в цепи gate. Состояние тиристора после его отпирания будет полностью определяться величиной прямого тока в цепи «анод-

катод», то есть сопротивлением нагрузки. Если этот ток будет больше тока удержания (I_{HOLD} , рис. 1.42), тиристор останется во включенном состоянии, если же он окажется меньше тока удержания, тиристор мгновенно выключится.

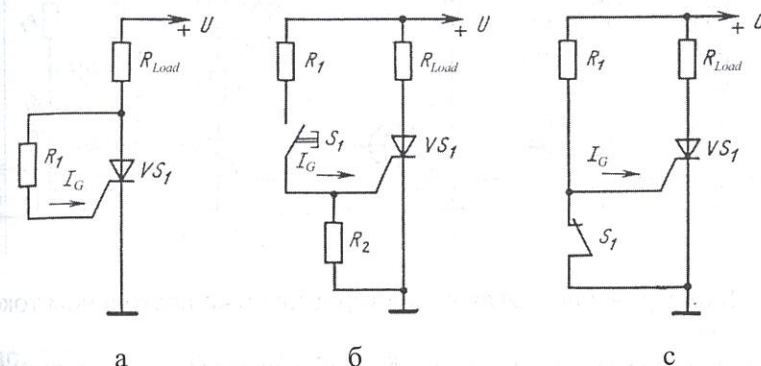


Рис. 1.45. Схемы включения тиристорных устройств на постоянном токе

В схеме (рис. 1.45 а) тиристор VS1 включится в момент, когда сопротивление $R1$ уменьшится до величины, достаточной для протекания в цепи gate тока, соответствующего току отпирания данного тиристора. После отпирания тиристора сопротивление $R1$ шунтируется низким сопротивлением открытого основного перехода и уже не влияет на состояние тиристора. Недостатком этого способа отпирания тиристора является постоянное протекание тока через резистор $R1$ и gate тиристора в запертом состоянии, вызывающего нагрев и резистора и тиристора.

В схеме (рис. 1.45 б) ток в цепи gate тиристора возникает только в момент замыкания управляющего контакта $S1$. Резистор $R2$ применяют почти всегда в подобных схемах для предотвращения проникновения импульсной помехи в цепь gate и самопроизвольного отпирания тиристора.

В схеме (рис. 1.45 в) управляющий переход тиристора постоянно зашунтирован контактом $S1$. При размыкании этого контакта ток резистора $R1$ меняет свой путь, перетекая в цепь gate тиристора и отпирая его.

Ну а как же теперь запереть открытый тиристор? На постоянном токе сделать это не так просто (рис. 1.46).

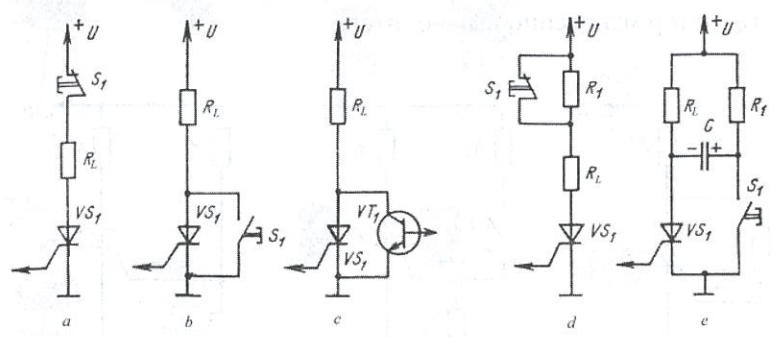


Рис. 1.46. Принципы выключения тиристорov на постоянном токе

Используемые на практике способы сводятся, в основном, к разрыванию цепи анодного тока (а); к шунтированию тиристора вспомогательным контактом или транзистором (b); к уменьшению анодного тока до величины меньшей тока удержания (с); использованием предварительно заряженного конденсатора C , который подключается параллельно тиристорy в момент, когда нужно выключить тиристор, и разряжается на него, создавая ток обратной полярности, запирающий тиристор (е). Все эти способы принудительного запираения тиристорov называются «искусственной коммутацией» (в отличие от «естественной» на переменном токе). Метод запираения тиристорov с помощью конденсаторov получил наибольшее распространение. В схеме с конденсатором, сопротивление резистора R_1 намного меньше сопротивления нагрузки R_L , поэтому в первый момент времени после включения тиристора его анодный ток протекает не через нагрузку, а через резистор R_1 , заряжая конденсатор C . После заряда конденсатора ток через него прекращается, поэтому анодный ток тиристора переходит в параллельную ветвь с нагрузкой R_L . При замыкании контакта S_1 (его роль может выполнять вспомогательный тиристор VS_2 , рис. 1.47) напряжение заряженного конденсатора оказывается приложенным к тиристорy обратной полярностью («плюс» к катоду, «минус» к аноду) что вызывает запираение тиристора.

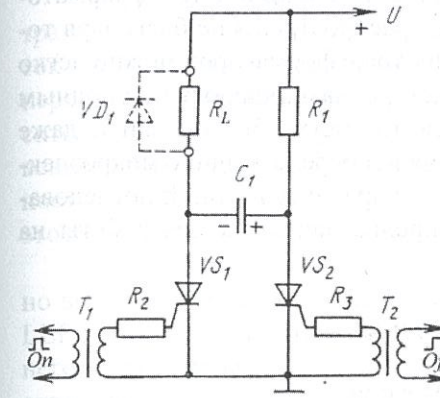
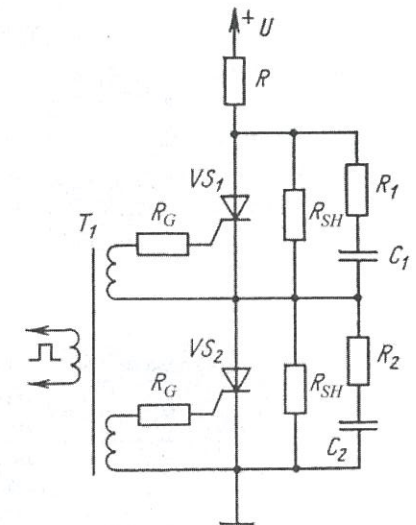


Рис. 1.47. Импульсная схема управления, обеспечивающая «искусственную коммутацию» основного тиристора (VS_1) на постоянном токе

Рис. 1.48. Последовательное включение тиристорov с импульсным управлением:

R_{SH} — шунтирующие резисторы, выравнивающие распределение напряжения между последовательно соединенными тиристорами; R_1C_1 и R_2C_2 — цепочки, предохраняющие тиристоры от перенапряжений при коммутационных процессах



Импульсные схемы управления тиристорами с трансформаторами в цепи gate получили широкое распространение благодаря тому, что с помощью таких небольших трансформаторов можно легко подавать в цепь gate мощного тиристора, находящуюся под полным потенциалом источника питания (а это могут быть сотни и даже тысячи вольт), импульсы управления непосредственно с микроэлектронных блоков управления, а также управлять группой последовательно соединенных тириستоров, предназначенных для работы на высоких напряжениях (рис. 1.48).

1.7. Оптроны

РАЗМЕРЫ КОРПУСОВ

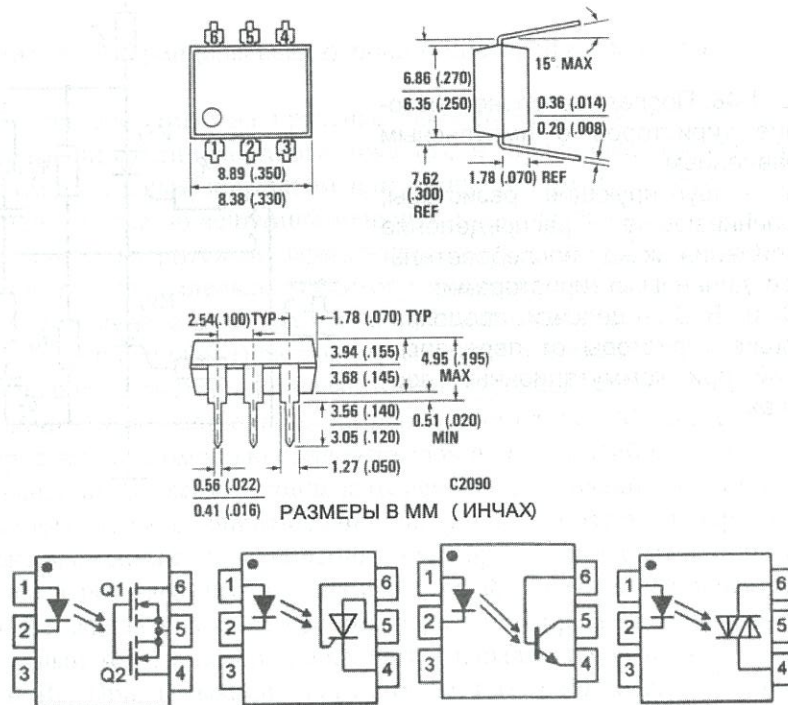


Рис. 1.49. Оптроны, выполненные в стандартном DIP корпусе

Запертый n - p -переход в полупроводниковых приборах (диодах, транзисторах, тиристорах) может начать пропускать электрический ток под действием энергии фотонов (света). При облучении n - p -перехода фотонами в нем генерируются дополнительные пары носителей зарядов - электронов и дырок, обуславливающих возникновение электрического тока через переход. Чем больше интенсивность светового потока, попадающего на n - p -переход, тем больше этот ток.

Оптроны содержат светоизлучающий элемент, который обычно выполнен на основе специального диода (Light Emission Diode - LED), n - p -переход которого излучает фотоны при протекании через него тока и приемника светового потока (фотодиода, фототранзистора, фотиристора). Фотоизлучающий и фотоприемный элементы электрически полностью изолированы друг от друга и могут быть расположены в одном общем корпусе (рис. 1.50) или могут быть разделены гибким стеклянным волокном длиной до 10 - 15 м и более. Обычно, оптроны выдерживают напряжение между светоизлучающим и фотоприемным элементами в диапазоне от 500 до 7500 В.



Рис. 1.50. Внутренняя конструкция оптрона

Существует большое разнообразие схем и конструкций оптронов, в том числе, содержащих встроенные преобразователи и усилители (рис. 1.51). На таком же принципе строятся не только миниатюрные устройства в корпусах микросхем, но и практически все мощные полупроводниковые реле и контакторы.

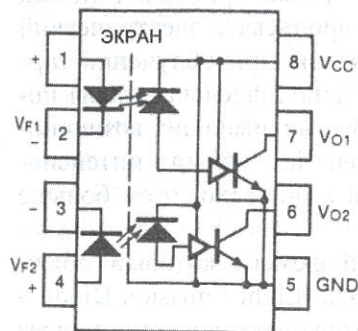


Рис. 1.51. Сдвоенное оптоэлектронное реле со встроенными усилителями мощности

Следует отметить, что внешне не только миниатюрные оптоэлектронные реле в корпусах микросхем, но и более мощные полупроводниковые реле различных фирм-производителей очень похожи друг на друга (рис. 1.52).

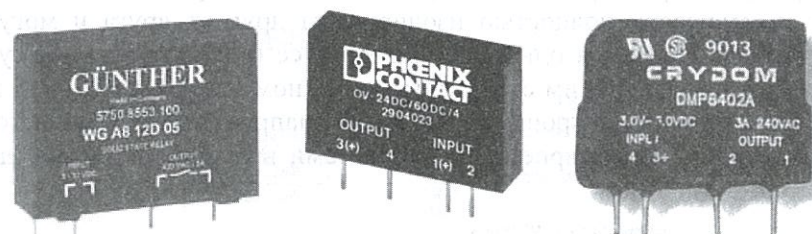


Рис. 1.52. Современные полупроводниковые оптоэлектронные реле на токи 3 – 5 А, производимые различными компаниями

Такие реле выполнены, обычно, по одинаковой схеме (рис. 1.53) с небольшими вариациями. Как правило, они содержат RC-цепочку (так называемый “snubber”) и варистор, защищающие выходные тиристоры от перенапряжений и часто содержат специальный узел (zero voltage detector), контролирующий момент прохождения синусоиды напряжения через нулевое значение и разрешающий отпирание (а иногда и запираение) выходных тириستоров при нулевом значении напряжения (так называемая «синхронная коммутация»). Синхронная коммутация (рис. 1.54), (особенно при большой ее частоте) позволяет значительно уменьшить количество и амплитуду перенапряжений и высокочастотных гармоник, возникающих при переходных коммутационных процессах в цепи нагрузки.

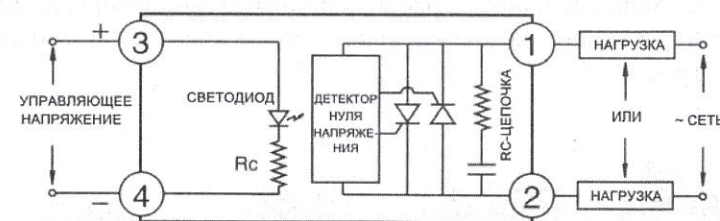


Рис. 1.53. Типовая схема мощного однофазного оптоэлектронного реле переменного тока

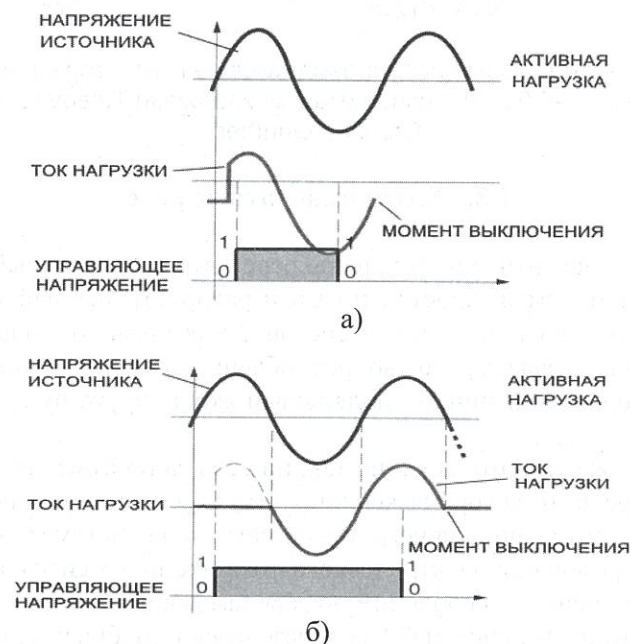


Рис. 1.54. Осциллограммы включения полупроводникового реле переменного тока:

- а) асинхронная коммутация без детектора нуля напряжения;
- б) синхронная коммутация с детектором нуля напряжения

Более мощные однофазные и трехфазные контакторы на токи в 10–150 А различных компаний также имеют очень похожую конструкцию (рис. 1.55).



Рис. 1.55. Однофазные полупроводниковые контакторы переменного тока на 10 – 75 А, производимые компаниями Teledyne, Crydom, Crouzet, Gunther

1.8. Электромагнитные реле

Электромагнитное нейтральное реле - это самый старый по происхождению, самый простой и самый распространенный тип реле. Из каких основных частей оно состоит? Как правило, большинство из тех, кому задавался этот вопрос, обычно называют обмотку, магнитопровод с сердечником, подвижный якорь, пружину и, наконец, контакты.

Ну что же, все это, конечно так, но если задуматься чуть глубже о работе реле, то вскоре выясняется, что здесь чего-то явно не хватает. Действительно, для чего нужна магнитная система? Очевидно, для преобразования электрического тока входного сигнала в механическую энергию, необходимую для замыкания контактов. А что делает контактная система? Преобразовывает сообщенную ей механическую энергию обратно в электрический сигнал! Чувствуешь, читатель, что здесь что-то не то?

Все встанет на свои места, если в перечень основных элементов реле добавить один элемент, который конструктивно не оформлен так ярко как, например, катушка или контакты. Чаще всего, это даже не один элемент, а несколько мелких деталей, которые, как правило, не задерживают на себе наше внимание.

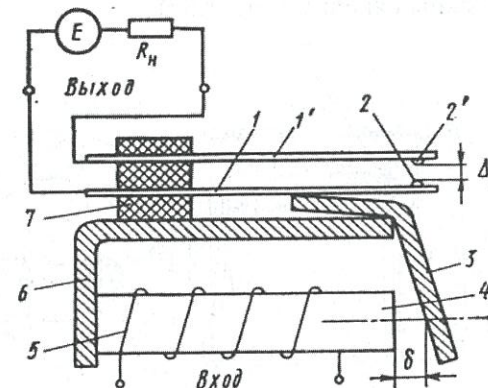


Рис. 1.56. Устройство простейшего электромагнитного реле.
1 – пружины; 2 – контакты; 3 – якорь; 4 – сердечник; 5 – обмотка;
6 – магнитопровод; 7 – изолятор

Эти детали иногда даже не всегда показывают на рисунках, поясняющих принцип действия реле (рис. 1.56). Речь идет об изоляционной системе, обеспечивающей гальваническую изоляцию входной цепи (обмотки) от выходной (контактов). Если принять во внимание наличие изоляционной системы, то становится понятным, что входной сигнал, поступающий на вход реле, и выходной сигнал, выходящий из реле – это не один и тот же сигнал, а разные сигналы, электрически полностью изолированные друг от друга.

Обратите внимание на (рис. 1.56), приводимый, обычно при объяснениях принципа действия реле. Если выполнить реальную конструкцию по этому рисунку, то реле не будет выполнять большинство своих функций, так как его входная цепь (обмотка) электрически не изолирована от выходной цепи (контактов).

В простых конструкциях, рассчитанных на работу при низких напряжениях, основная изоляция обеспечивается (помимо изолятора 7) каркасом катушки 5, отсутствующим на этой схеме, но имеющимся в реальных конструкциях реле (рис. 1.57).

Магнитная система обычных низковольтных электромагнитных реле включает в себя прежде всего обмотку управления 6, вы-

полненную в виде катушки 5 с изолированным проводом, магнитопровод 1 и подвижный якорь 3 (рис. 1.57).

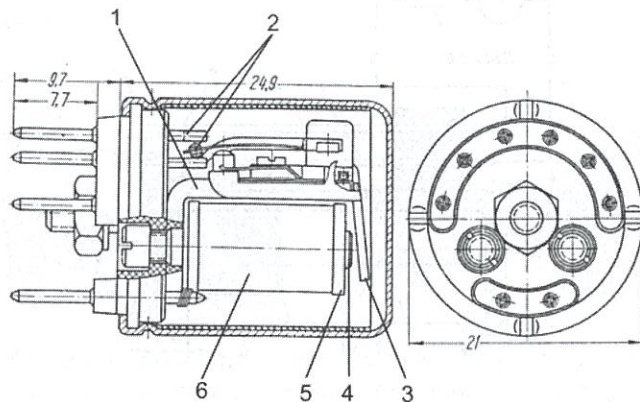


Рис. 1.57. Реальная конструкция низковольтного миниатюрного реле: 1 – магнитопровод; 2 – контакты; 3 – якорь; 4 – полюс сердечника; 5 – изоляционный каркас обмотки; 6 – обмотка управления

Элементы магнитной цепи реле выполняют из магнитомягкой стали. Магнитомягкой называется сталь, имеющая узкую петлю гистерезиса (рис. 1.58). «Гистерезис» - переводится как «отставание». А петля гистерезиса образуется из кривой намагничивания и кривой размагничивания. Эти кривые не накладываются друг на друга, так как для размагничивания предварительно намагниченного

материала уже не достаточно такого же по величине поля, которым материал был намагничен.

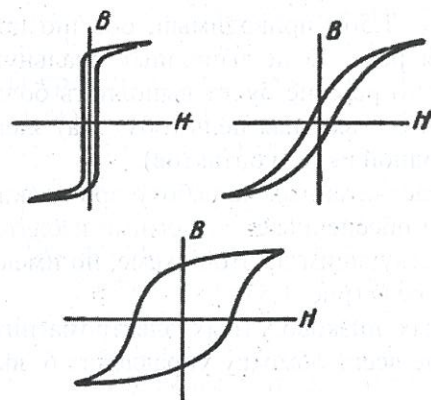


Рис. 1.58. Петли гистерезиса для магнитомягких (вверху) и магнитотвердых (внизу) материалов: В – плотность магнитного потока; Н – напряженность магнитного поля

Требуется дополнительное магнитное поле, необходимое для размагничивания материала до исходного (не намагниченного) состояния. Это происходит по той причине, что в предварительно намагниченном образце остается так называемая остаточная индукция после снятия внешнего магнитного поля.

Это явление обусловлено тем, что развернутые вдоль внешнего магнитного поля домены (кристаллические структуры ферромагнитного материала) не возвращаются в исходное состояние после снятия внешнего магнитного поля. Размагничивающее поле, которое необходимо для полного размагничивания предварительно намагниченного образца, называется *коэрцитивной силой*. Магнитомягкие материалы обладают малой коэрцитивной силой, поэтому их петля гистерезиса узкая. Это означает, что при снятии внешнего магнитного поля (применительно к реле – это обесточивание обмотки), магнитопровод и якорь реле не остаются намагниченными, а возвращаются почти в исходное состояние. Очевидно, что отсутствие остаточной намагниченности – очень важное требование, которым должны отвечать материалы, применяемые в магнитных цепях обычных нейтральных реле. В противном случае параметры реле не будут стабильными, а якорь реле может залипнуть.

Электротехнические стали, применяющиеся для производства электродвигателей, трансформаторов, реле, как раз и являются такими магнитомягкими материалами. Это стали с пониженным содержанием углерода (и других примесей, таких как сера, фосфор, кислород, азот) и с повышенным содержанием кремния (0.5 – 5 %). Кроме улучшения магнитных свойств стали, кремний существенно улучшает ее стабильность и повышает электрическое сопротивление, что способствует значительному ослаблению вихревых токов (см. ниже). Повышенное содержание кремния обуславливает высокую твердость и хрупкость такой стали. Уже при содержании 4 – 5 % кремния сталь выдерживает не более 1 – 2 перегибов на 90°.

Долгое время для изготовления такой стали использовали только горячую прокатку. В 1935 г. Госс обнаружил высокие магнитные свойства холоднокатаной электротехнической стали, но только вдоль направления прокатки. То есть такая сталь обладала магнитной текстурой и являлась анизотропной. Использование анизотропных холоднокатаных сталей требует такой конструкции магнито-

провода, при которой магнитный поток проходит только в направлении прокатки.

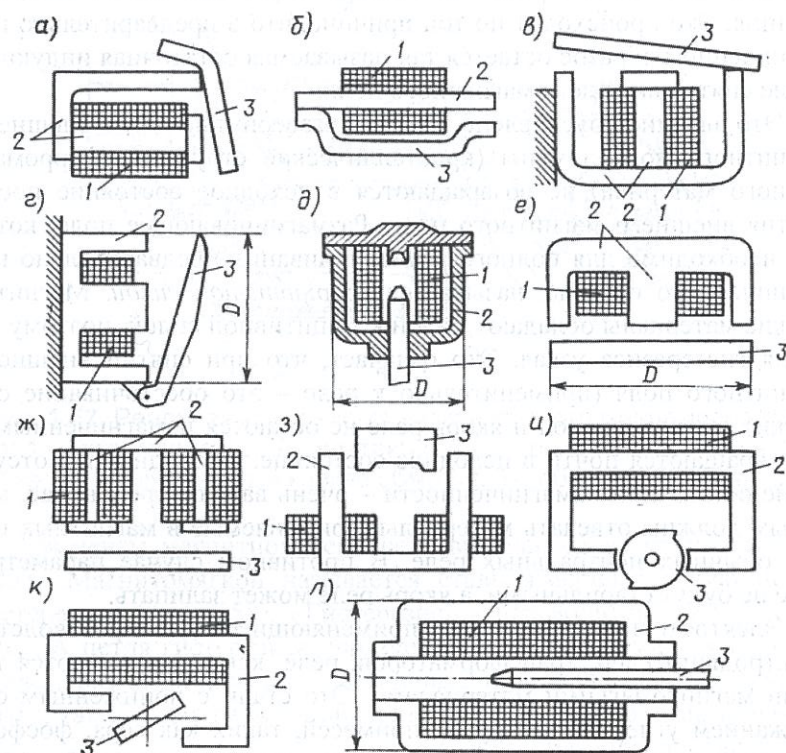


Рис. 1.59. Типы магнитной системы современных электромагнитных реле: 1 – катушка управления; 2 – магнитопровод; 3 – якорь

Механическая обработка деталей магнитопроводов сопровождается появлением больших внутренних напряжений и, как следствие этого, ростом коэрцитивной силы. Поэтому после штамповки, точения и фрезерования детали отжигаются при температуре 800 – 900°C с последующим медленным снижением температуры до 200 – 300°C.

Для магнитопроводов высокочувствительных реле применяют иногда пермаллой – сплав железа с никелем (45 – 78%), легирован-

ный молибденом, хромом, медью и другими элементами. Пермаллой обладают более высокими магнитными свойствами, чем электротехнические стали, в слабых магнитных полях. Однако они мало пригодны для работы при больших магнитных потоках, так как их индукция насыщения в 2 раза меньше, чем у электротехнических сталей.

Магнитопроводы крупных реле переменного тока изготавливаются из листовой электротехнической стали толщиной 0.35 – 0.5 мм.

В современных конструкциях реле нашли применение несколько различных типов магнитной системы (рис. 1.59):

- а ... г – клапанного типа с поворотным якорем;
- е, ж – прямоходовые;
- д, з, л – с втягивающимся якорем (или соленоидного типа);
- и, к – с уравновешенным якорем поворотного типа.

Магнитная система клапанного типа – самый старый тип магнитной системы. В современном виде он был описан еще в патентах Эдисона.

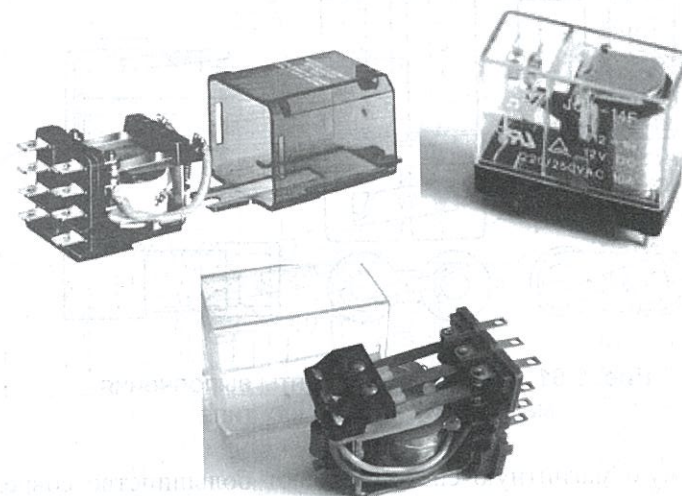


Рис. 1.60. Современные зачехленные реле промышленной автоматики с магнитной системой клапанного типа

Применялся в первых телефонных реле, потом в промышленных и малогабаритных зачехленных реле. В настоящее время этот тип магнитной системы весьма распространен во многих конструкциях средних и небольших реле с пластмассовым прямоугольным чехлом, часто прозрачным, предназначенных для работы в системах промышленной автоматики и электроэнергетики (рис. 1.60), а также в относительно крупных электрических аппаратах открытого типа (рис. 2.8). Недостатком реле с магнитной системой такого типа, особенно крупных, является пониженная устойчивость к внешним механическим воздействиям. При воздействии значительных ускорений в определенных направлениях якорь реле может самопроизвольно сместиться, вызвав коммутацию внешних цепей контактами реле. Такая магнитная система называется неуравновешенной. Когда обнаружилось это неприятное свойство таких реле, сразу же начались поиски технических решений, обеспечивающих нормальную работу реле в составе возимой аппаратуры (в первую очередь, военной).

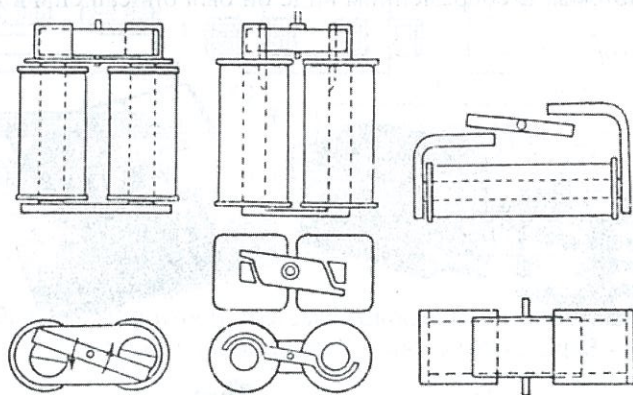


Рис. 1.61. Некоторые варианты выполнения магнитной системы «к» типа

Похожую магнитную систему имеют большинство современных миниатюрных реле в пластмассовых корпусах, а также герметичные реле в металлических корпусах (рис. 1.62), которые выпускаются уже десятки лет.

Рис. 1.62. Один из распространенных вариантов выполнения магнитной системы поворотного типа, широко используемый в миниатюрных реле: 1 – обмотка; 2 – полюс магнитопровода; 3 – возвратная пружина; 4 – замыкающийся контакт; 5 – переключающийся контакт; 6 – основание реле; 7 – размыкающийся контакт; 8 – толкатель с изоляционным шариком на конце; 9 – поворотный якорь; 10 – сердечник

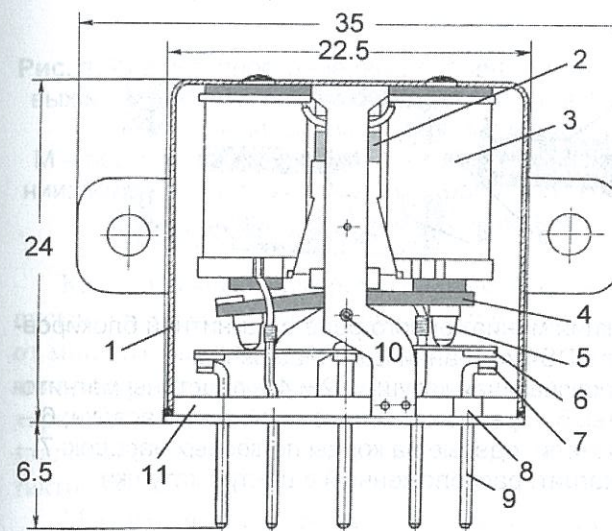
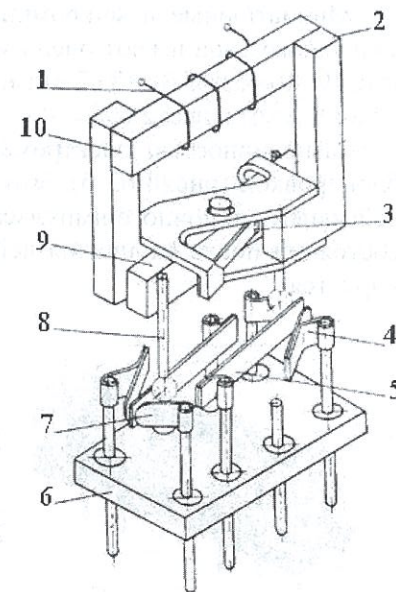


Рис. 1.63 а. Конструкция миниатюрного реле с магнитной блокировкой типа РПС20: 1 – герметичный латунный чехол; 2 – постоянный магнит; 3 – катушка; 4 – плоский симметричный якорь (armature); 5 – толкатели; 6 – подвижный контакт; 7 – неподвижный контакт; 8 – стеклянный бушинг; 9 – выводные штырьки; 10 – ось вращения якоря; 11 – цоколь

Рис. 1.63 а. Конструкция миниатюрного реле с магнитной блокировкой типа РПС20: 1 – герметичный латунный чехол; 2 – постоянный магнит; 3 – катушка; 4 – плоский симметричный якорь (armature); 5 – толкатели; 6 – подвижный контакт; 7 – неподвижный контакт; 8 – стеклянный бушинг; 9 – выводные штырьки; 10 – ось вращения якоря; 11 – цоколь

Миниатюрные и микроминиатюрные реле с магнитной системой такого типа имеют очень малые размеры, например, реле типа РЭС49: 10.45 x 5.3 x 23.2 мм и вес: 3.5 г; реле типа РЭС80: 10.4 x 10.8 x 5.3 мм и вес: 2 г.

Разновидностью электромеханического реле является реле с блокировкой (рис. 1.63 б). Это реле, которое срабатывает под воздействием одиночного импульса тока в катушке и остается в таком состоянии после окончания действия этого импульса, то есть блокируется.

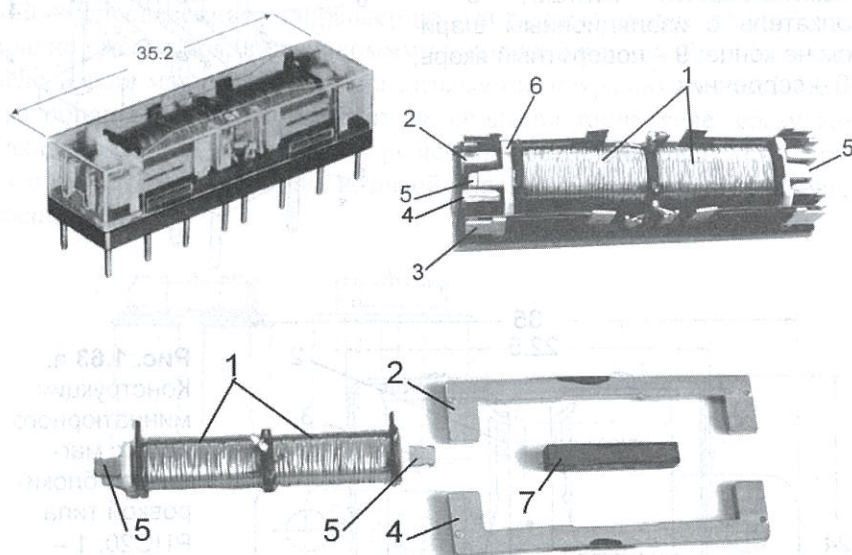


Рис. 1.63 б. Конструкция миниатюрного реле с магнитной блокировкой типа DS4 компании Euro-Matsushita:

1 – включающая и отключающая катушки; 2 и 4 – пластины магнитопровода; 3 – контакты; 5 – ферромагнитные полюсные насадки; 6 – пластмассовые толкатели, одетые на концы полюсных насадок; 7 – постоянный магнит, расположенный в центре катушки

Иногда такие реле называют также двухпозиционными двустабильными, то есть имеющими два устойчивых состояния при отсут-

ствия питания (в отличие от двухпозиционных одностабильных реле, рассмотренных выше).

В реле с блокировкой обычно используется два вида блокирующих элементов: магнитный и механический. Такие реле предназначены для использования в тех случаях, когда требуется коммутация цепей под действием одиночных импульсных сигналов управления, повышенная устойчивость к ударам и вибрациям, для исключения постоянного потребления энергии от источника питания, как элементы памяти и т.п.

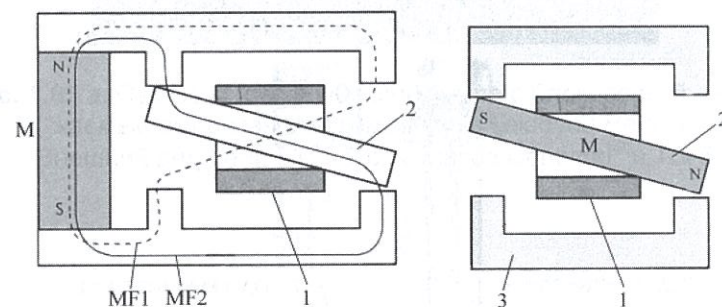


Рис. 1.63 в. Распространенные варианты магнитной системы дешевых миниатюрных реле с блокировкой в пластмассовых корпусах, выпускаемых многими компаниями:

M – постоянный магнит; MF1 – магнитный поток в первом положении; MF2 – магнитный поток во втором положении; 1 – обмотка; 2 – поворотный якорь; 3 – магнитопровод

Как и обычные электромагнитные реле, реле с блокировкой выпускаются на все классы напряжений и коммутируемых мощностей: от миниатюрных и микроминиатюрных реле для радиоэлектронной аппаратуры, имеющих контактную систему и исполнения корпусов, характерных для обычных реле такого же класса по коммутируемой мощности (рис. 1.63), до высоковольтных реле и сильноточных контакторов.

Магнитные системы таких реле, как отмечалось выше, не отличаются особо высокой чувствительностью и сконструированы так, чтобы максимально упростить реле и уменьшить его габариты (рис. 1.64).

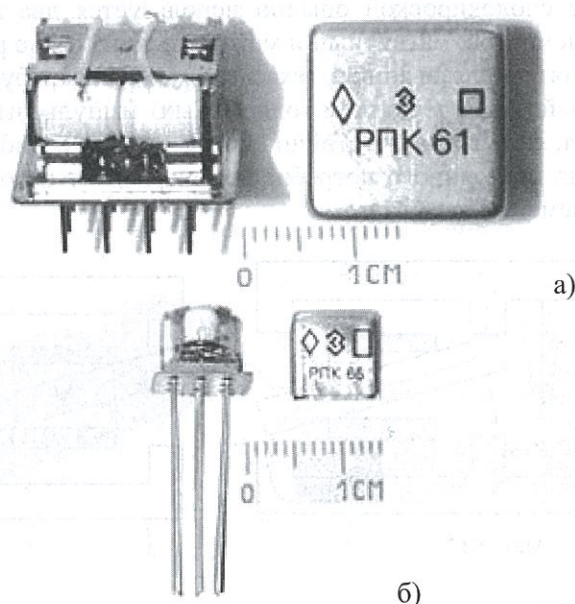


Рис. 1.64. Миниатюрные (а) и микроминиатюрные (б) реле с блокировкой российской компании “Северная Заря”: а – типа РПК61; б – типа РПК65

Практически все западные промышленные компании, занятые производством реле, разрабатывают и выпускают реле с блокировкой.

В последние годы разработкой особо миниатюрных реле с блокировкой начала заниматься и известная российская компания “Северная Заря” (Санкт-Петербург), которой разработаны два типа таких реле (рис. 1.64). Реле РПК61 – двухобмоточное низкопрофильное реле с размерами 19 x 19 x 12 мм. Реле РПК65 – с одной обмоткой и размерами 9.53 x 9.53 x 6.99 мм.

Самые маленькие в мире реле с блокировкой в металлических корпусах маломощных транзисторов выпускает американская компания Teledyne Relays (рис. 1.65).

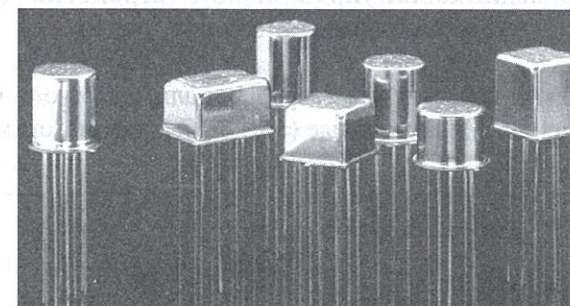


Рис. 1.65 а. Самые маленькие в мире реле с блокировкой, выпускаемые американской компанией Teledyne Relays. Внешний вид реле в корпусах класса Centigrad® и TO-5

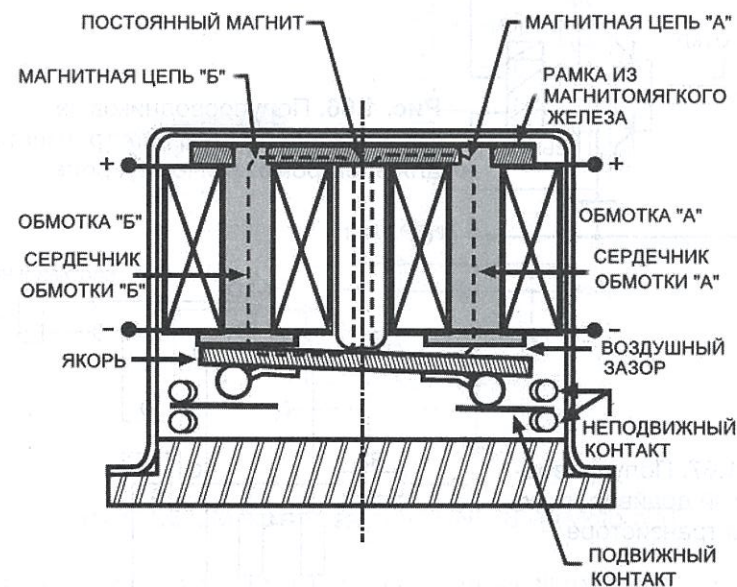
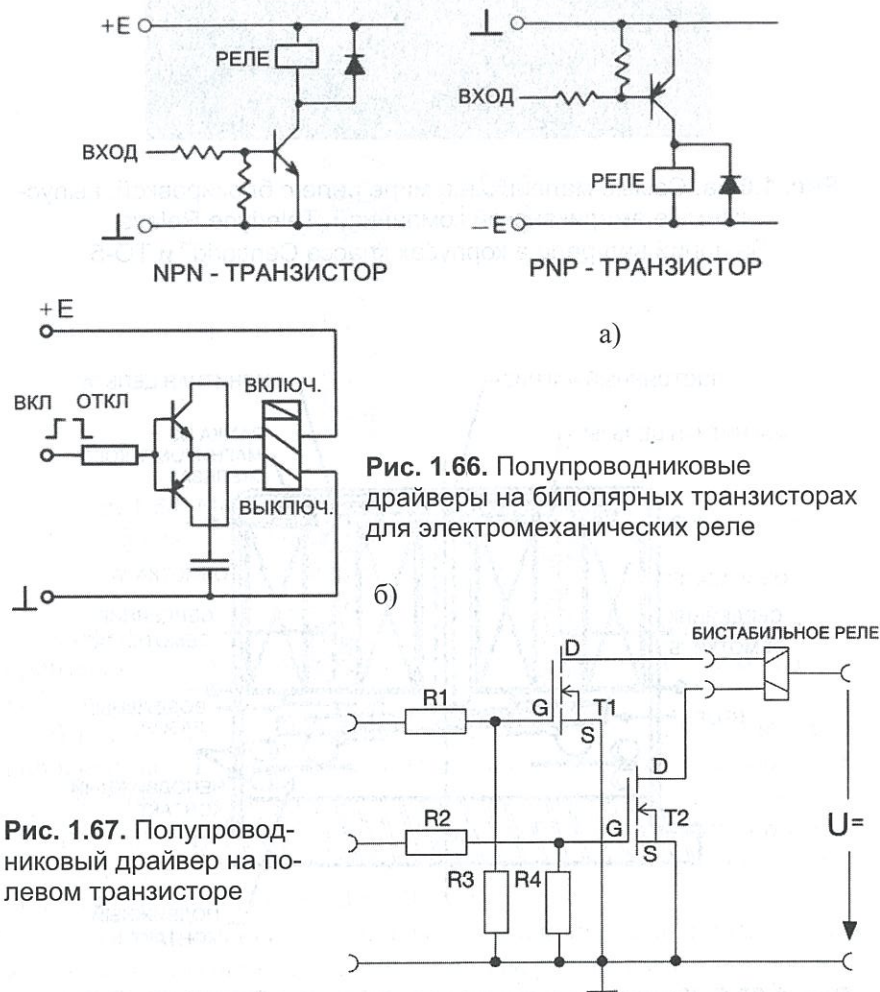


Рис. 1.65 б. Конструкция миниатюрных реле с блокировкой, выпускаемых американской компанией Teledyne Relays

1.9. Полупроводниковые управляющие устройства (драйверы) для электромеханических реле

Чаще всего в качестве драйверов используются одиночные биполярные (рис. 1.66) или полевые (рис. 1.67) транзисторы.



Диоды, включенные параллельно обмотке реле (рис. 1.66), необходимы для предотвращения повреждения транзисторов импульсами перенапряжения, возникающими на обмотке реле в момент записания транзисторов.

Два встречно включенных транзистора (рис. 1.66 б) используются для управления двухобмоточным реле с блокировкой повышенной чувствительности.

Для управления группами реле выпускаются многоканальные драйверы, в корпусе стандартных микросхем (рис. 1.68) каждый канал которых представляет собой отдельный усилитель.

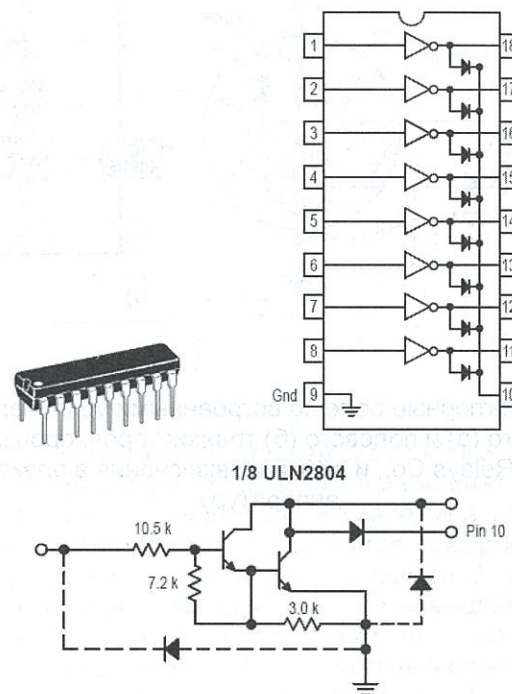


Рис. 1.68. Микросхема типа UNL2804 (Motorola)

Такой драйвер позволяет хорошо согласовать микроэлектронные цепи (например, операционные усилители) с электромеханическими реле.

Некоторые компании производят электромеханические реле с полупроводниковыми усилителями встроенными непосредственно в корпус реле. Такие миниатюрные реле со встроенным усилительным каскадом выпускаются компанией Teledyne Relays Co. и имеют чрезвычайно малые размеры и вес, рис. 1.69, настолько малые, что все реле вместе с усилителем размещается в корпусе ТО-5 стандартного транзистора.

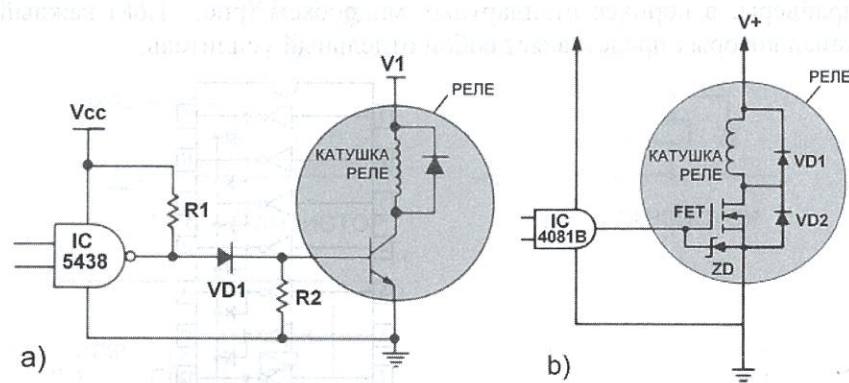


Рис. 1.69 Миниатюрные реле со встроенными усилителями на базе биполярного (а) и полевого (б) транзисторов, производимые Teledyne Relays Co., и схема их включения в электронную аппаратуру

Глава II. УСТРОЙСТВО МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

2.1. Общая структура и конструктивное исполнение микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ)

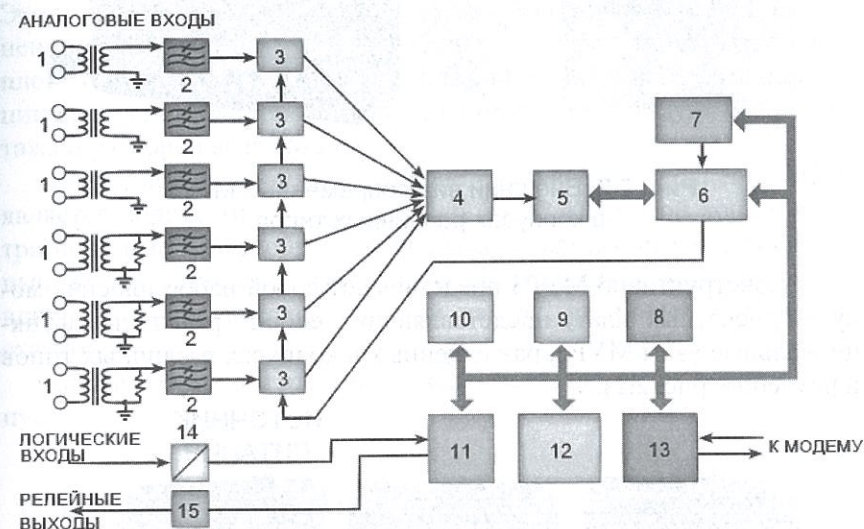


Рис. 2.1. Структурная схема МУРЗ

1 – внутренние трансформаторы тока и напряжения; 2 – антиалиазинговые фильтры; 3 – цепи выборки и запоминания (sample-and-hold circuit); 4 – мультиплексор; 5 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – микропроцессор; 7 – таймер; 8 – электрически стираемое перепрограммируемое запоминающее устройство (EEPROM); 9 – оперативная память (RAM); 10 – постоянное запоминающее устройство (ROM); 11 – логические входы-выходы; 12 – клавиатура и дисплей; 13 – серийный порт; 14 – оптроны; 15 – выходные реле

Основными узлами МУРЗ являются: блок аналоговых входов (трансформаторы тока и напряжения), входные фильтры (антиалиазинговые фильтры; цепи выборки и запоминания), мультиплексор, аналогово-цифровой преобразователь, микропроцессор, различные

виды памяти, блок логических (цифровых) входов, блок релейных выходов (рис. 2.1).



Рис. 2.2 Внешний вид современных МУРЗ в корпусах различных типов

Конструктивно МУРЗ представляют собой набор плоских модулей (печатных плат) представляющих собой различные функциональные узлы МУРЗ, размещенных в корпусах различных типов и размеров (рис. 2.2).

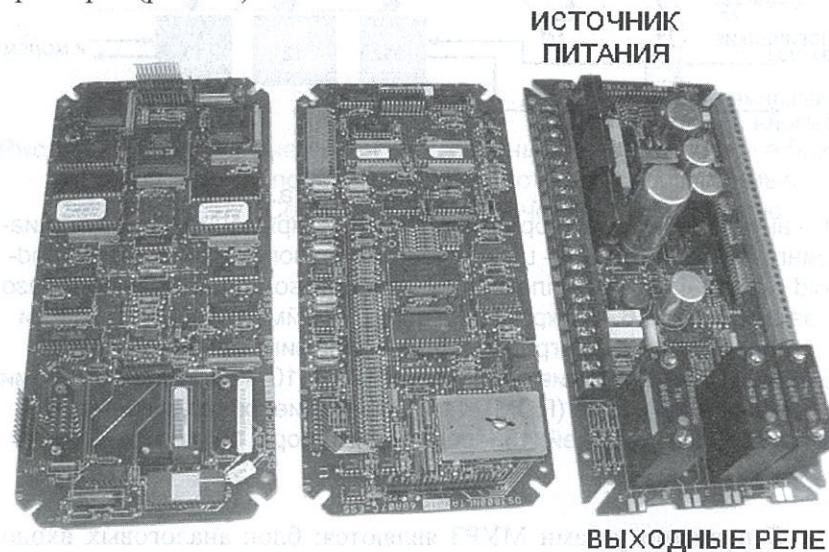


Рис. 2.3. Отдельные платы, из которых собирается трехэтажный этажерочный модуль реле LodTrack, (General Electric)

Существует несколько конструктивных схем расположения печатных плат в корпусах МУРЗ. Одной из таких конструктивных схем является так называемый «этажерочный модуль», которая предусматривает расположение печатных плат одна над другой. Платы скрепляются между собой резьбовыми втулками, образуя единый конструктивный модуль, похожий на этажерку (рис. 2.3). Этот модуль затем устанавливается внутри корпуса МУРЗ. Соединение между платами осуществляется посредством разъемов и плоского гибкого кабеля. Очевидным недостатком такой конструкции является невозможность замены отдельного модуля без демонтажа и разборки всего МУРЗ.

Еще одной разновидностью конструктивного исполнения МУРЗ является корпус типа открытый куб (рис.2.4). В этой конструкции три печатные платы образуют боковые и заднюю стенки, скрепленные между собой специальными угловыми разъемами и присоединенные к металлической лицевой панели, являющейся четвертой стенкой.

После сборки вся эта конструкция вставляется во внешний корпус.

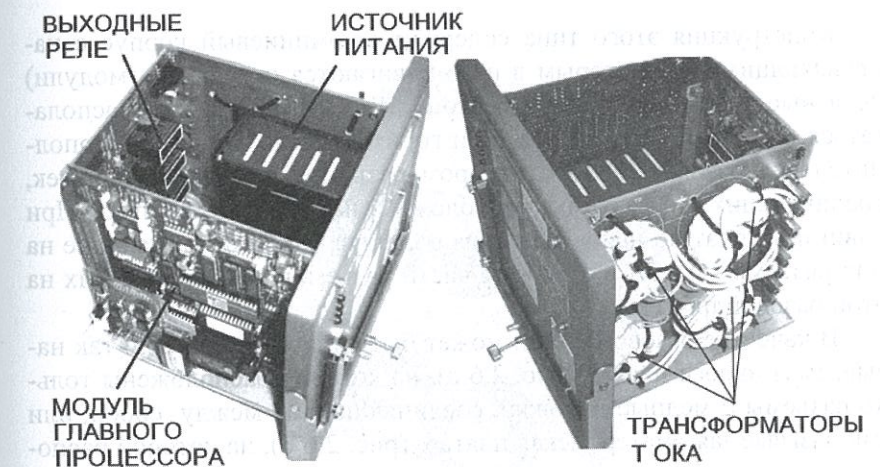


Рис.2.4. Конструкция «открытый куб» МУРЗ типа MPRS (ABB)

Наибольшее распространение получила конструкция с выдвижными платами, имеющая множество разновидностей (рис.2.5).

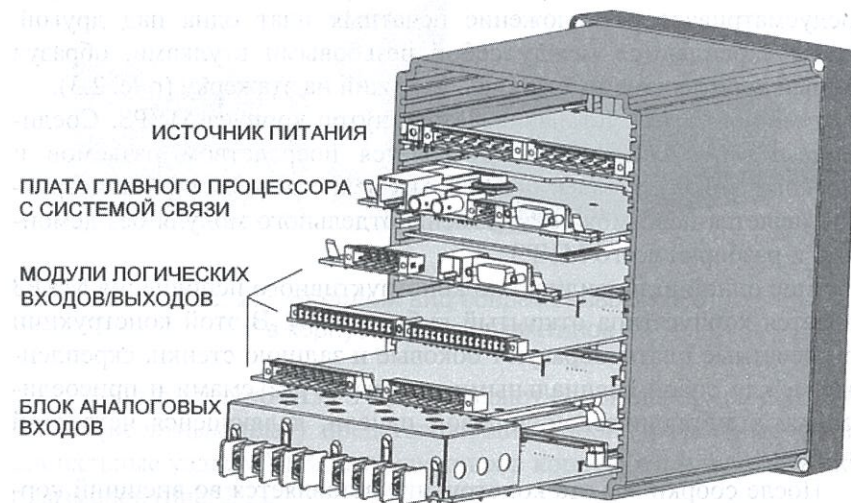


Рис.2.5. Конструкция с горизонтальными выдвижными платами

Конструкция этого типа содержит алюминиевый корпус с направляющими, по которым в него вдвигаются отдельные (модули) печатные платы, из которых состоит МУРЗ. Платы могут располагаться в корпусе вертикально или горизонтально. Еще одна дополнительная базовая плата с набором разъемов и медных дорожек, соединяющих эти разъемы, расположена на дне этого корпуса. При сдвигании плат по направляющим в корпус МУРЗ выступающие на них разъемы входят в ответные части разъемов, расположенных на этой базовой плате.

В качестве базовой платы может быть использована или так называемая «кросс-плата» (рис. 2.6 а), на которой расположены только разъемы и медные дорожки, соединяющие их между собой, или так называемая «материнская плата» (рис. 2.6 б), на которой расположен микропроцессор, элементы памяти и вспомогательные устройства, обслуживающие микропроцессор. Иногда в качестве кросс-платы используется гибкий плоский многожильный кабель с разъемами, соединяющий между собой платы (рис. 2.6 д).



Рис. 2.6. Различные конструкции МУРЗ с выдвижными платами

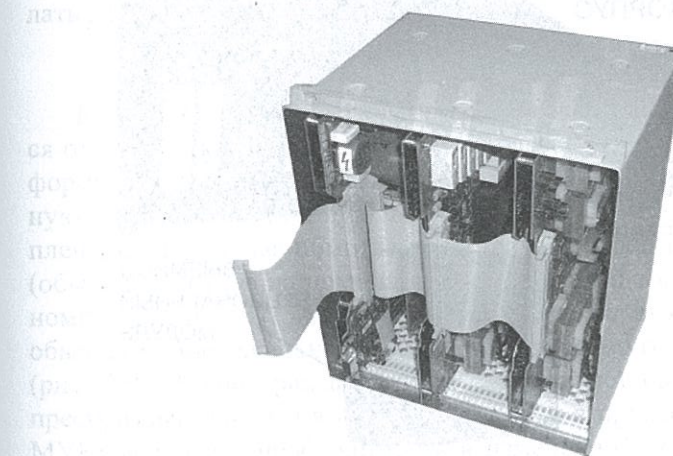


Рис. 2.6 д. Конструкция реле типа SIPROTEC 7U6125 (Siemens)



Рис. 2.7. Корпус реле SEL-487 с частично вынутыми модулями (Schweitzer Engineering Laboratories)

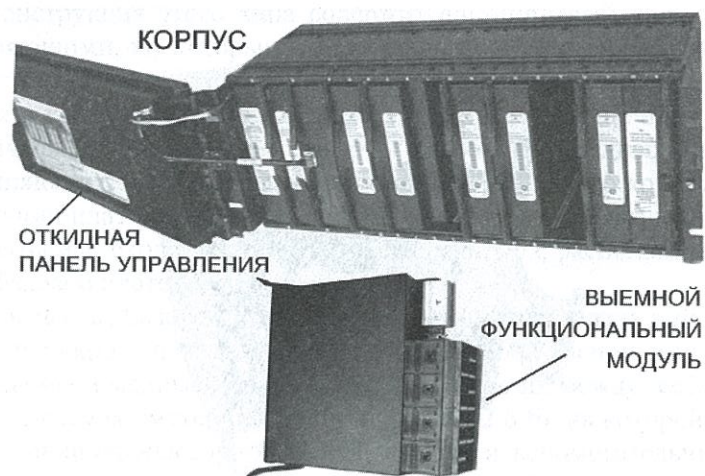


Рис. 2.8. МУРЗ типа T60 модульной конструкции (General Electric.)

В некоторых не очень удачных конструкциях (рис. 2.7) приходится вынимать сразу несколько модулей для того, чтобы добраться до модуля с источником питания. А чтобы выдвинуть этот модуль для замены источника питания, необходимо отпаять выводы всех трансформаторов тока от клеммника на задней панели, а потом опять припаять.

Довольно странную конструкцию имеют реле типа T60 (рис. 2.8). Реле этого типа состоит из отдельных втычных модулей, расположенных в общем корпусе. В отличие от всех остальных МУРЗ, в T60 каждый модуль помещен в стальной кожух, из-за чего реле получилось тяжелым (килограммов 15, не менее). После вскрытия кожуха остается печатная плата с мощным разъемом на торце. Этот разъем имеет очень странную конструкцию и снабжен большим пластмассовым кожухом, разделенным на крупные ячейки, внутри которых расположены электронные компоненты, выходные реле, варисторы.

Этот кожух крепится на разъеме с помощью 8 пластмассовых защелок, по 4 с каждой стороны, которые должны открываться одновременно. Попытка открыть этот кожух сразу же привела к поломке одной из защелок, после чего мои попытки были прекращены. Никакой функциональной нагрузки этот пластмассовый кожух не несет и, по нашему мнению, его единственное назначение – сделать реле неремонтопригодным.

2.2. Модули аналоговых входов

Конструкция трансформаторов напряжения ничем не отличается от конструкции обычных маломощных трансформаторов. Трансформаторы тока содержат изолированную многовитковую вторичную обмотку, намотанную на каркасе и покрытую изоляционной пленкой. Первичная обмотка представляет собой несколько витков (обычно, 5 витков на номинальный первичный ток 1А и 1 виток на номинальный ток 5А), намотанных поверх вторичной обмотки обычным многожильным изолированным монтажным проводом (рис. 2.9). Такой трансформатор представляет собой, фактически, преобразователь тока в напряжение. Если в процессе эксплуатации МУРЗ возникает необходимость в изменении входного номинального тока аналоговых входов с 1А на 5А (или наоборот), то сделать

это очень просто путем намотки (или, наоборот, смотки) нескольких витков провода.

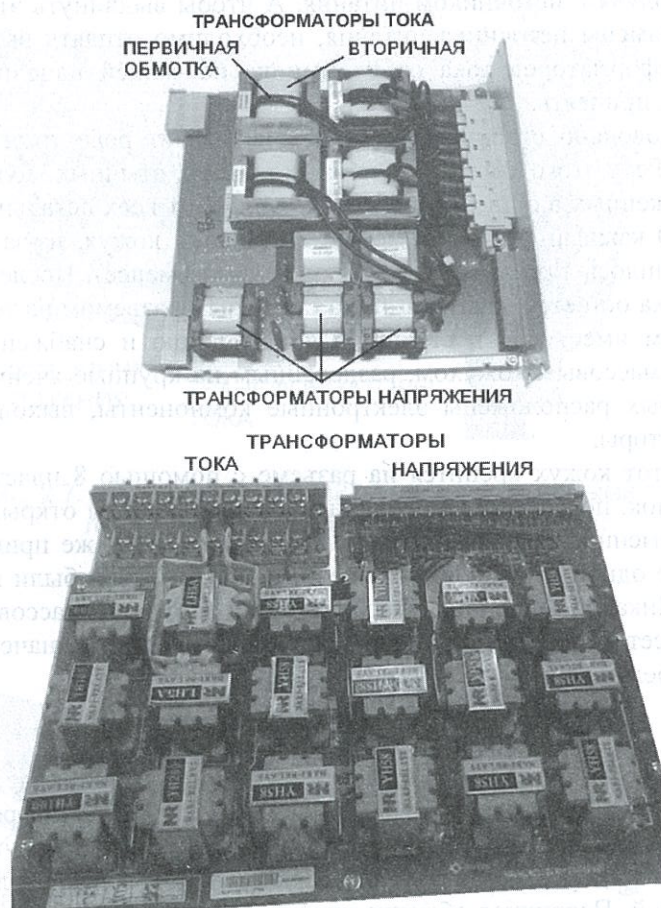


Рис. 2.9. Модули аналоговых входов, состоящие из набора трансформаторов тока и напряжения

Наиболее простыми в МУРЗ являются модули аналоговых входов, состоящие из набора трансформаторов тока и напряжения (рис. 2.9).

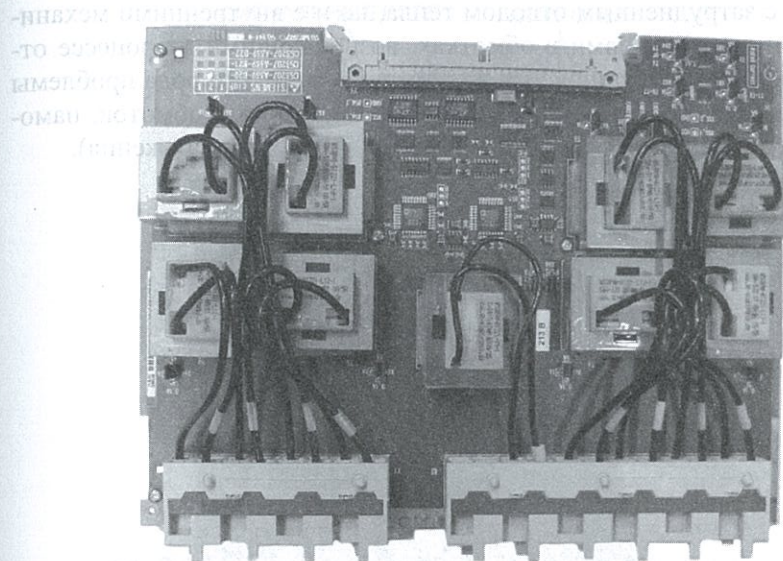


Рис. 2.10. Модуль аналоговых входов МУРЗ типа SIPROTEC 7U6125 (Siemens), содержащий электронные компоненты для предварительной обработки сигналов

Никаких проблем в эксплуатации этот узел МУРЗ обычно не создает и является самой надежной его частью.

В большинстве типов МУРЗ этот набор трансформаторов выполнен в виде отдельного модуля, хотя встречаются и конструкции, в которых в этом же модуле размещены входные фильтры, аналого-цифровые преобразователи и другие элементы предварительной обработки аналоговых сигналов (рис. 2.10).

В некоторых типах МУРЗ можно встретить миниатюрные тороидальные трансформаторы тока и напряжения, капсулированные эпоксидным компаундом (рис. 2.11). Такая конструкция лучше защищена от воздействия влаги, но отвод тепла в ней затруднен. Кроме того, она является неремонтопригодной и в ней невозможно изменить коэффициент трансформации. Следует иметь в виду, что при кажущейся более высокой надежности такой конструкции, ее реальная эксплуатационная надежность может быть даже ниже, чем у обычного некапсулированного трансформатора. Это связано не

только с затрудненным отводом тепла, но и с внутренними механическими напряжениями в обмотках, возникающими в процессе отверждения и усадки эпоксидного компаунда. Такого рода проблемы проявляются, обычно, при наличии многovitковых обмоток, намотанных тонким проводом (как в трансформаторах напряжения).

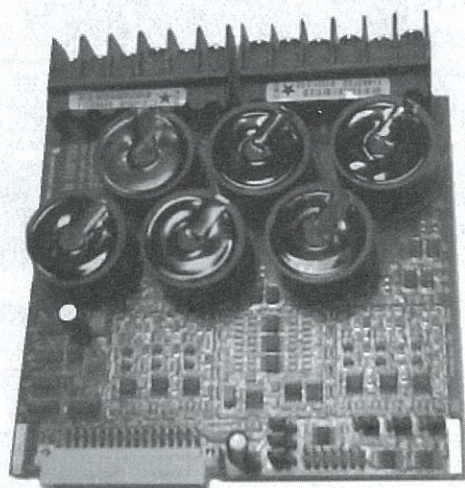


Рис. 2.11. Модуль аналоговых входов с капсулированными трансформаторами тока на тороидальных сердечниках

2.3. Модули выходных реле

Несколько более сложную конструкцию имеют узлы выходных реле. Довольно редко они выполняются в виде отдельных модулей, как, например, в реле компании Nari-Relays (рис. 2.12).

Такой модуль содержит некоторое количество электромеханических реле относительно большой мощности, предназначенных для непосредственного включения отключающей катушки высоковольтного выключателя или мощного промежуточного реле с механической блокировкой и нескольких реле меньшей мощности, контакты которых предназначены для активации внешних устройств и цепей сигнализации.

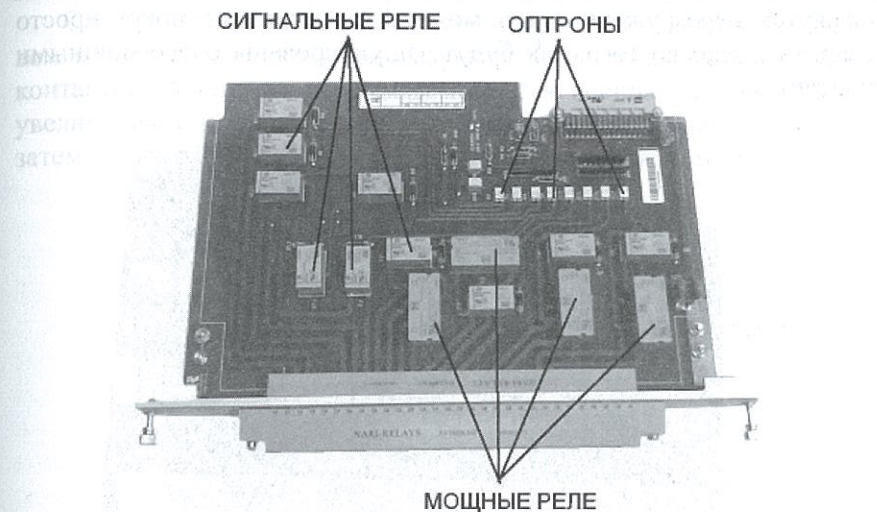


Рис. 2.12. Отдельный модуль выходных реле производства Китайской компании Nari-Relays

В реле типа RCS-9681 (Nari-Relays) автору пришлось встретиться с довольно странным техническим решением, когда для повышения быстродействия были использованы два электромеханических реле: достаточно мощное (типа ST), с временем срабатывания 10-12 мс и маленькое быстродействующее (типа DS-P) с временем срабатывания 3 – 4 мс (рис. 2.13). Контакты обоих реле включены параллельно, что, по утверждению разработчика, должно было привести к объединению высокого быстродействия маломощного реле с достаточно большой коммутируемой мощностью обычного реле. На проверку оказалось, что маленькое быстродействующее реле (имеющее мелкие детали и малые зазоры между контактами) вообще не предназначено для коммутации нагрузок при напряжении 220 В постоянного тока (его максимальное коммутируемое напряжение 125 В). В беседе с разработчиками выяснилось, что они не приняли во внимание также и то обстоятельство, что процесс замыкания всегда сопровождается отскоками контактов (contact bouncing), то есть многократными разрывами коммутируемой цепи после первого смыкания контактов. Таким образом, контакты миниатюрного реле

Глава II. Устройство микропроцессорных устройств релейной защиты
окажутся перегруженными в момент замыкания и могут просто свариться еще до того, как будут шунтированы более мощными контактами.

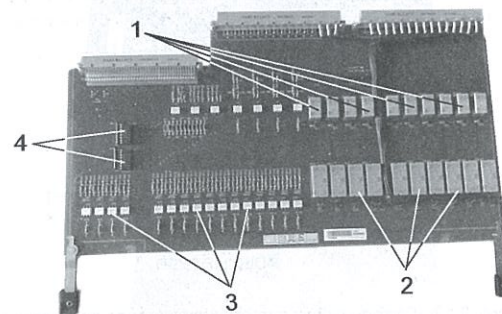


Рис. 2.13. Модуль выходных реле МУРЗ типа RCS-9681 (Nari-Relays) с двумя параллельно включенными реле (мощным и маломощным) в каждом канале: 1 – маломощные выходные реле типа DS-P; 2 – мощные выходные реле типа ST; 3 – оптроны типа МОС8030; 4 – управляющие драйверы выходных реле типа ULN3003АР

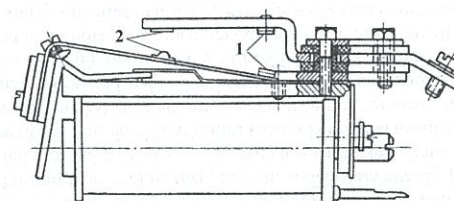


Рис. 2.14. Двухступенчатая контактная система электромагнитного реле: 1 – вспомогательный вольфрамовый контакт, осуществляющий коммутацию; 2 – главный серебряный контакт

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы

Следует отметить, что контактные системы с двойным разрывом известны и широко используются в технике. Однако в таких контактных системах первым замыкается специальный контакт с увеличенным зазором, особо устойчивый к электрической дуге, а затем он шунтируется обычным серебряным контактом (рис. 2.14).

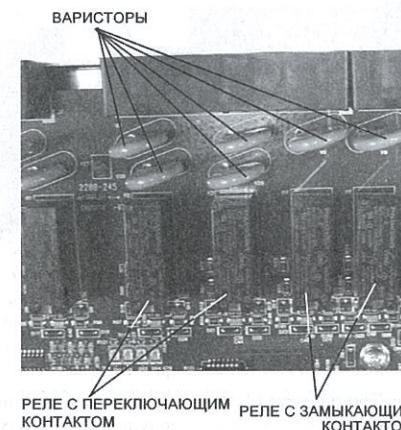


Рис. 2.15. Фрагмент модуля выходных реле в МУРЗ типов SEL-787, SEL-751, контакты которых шунтированы варисторами

Поскольку применение миниатюрных электромеханических реле с параметрами, не соответствующими условиям работы в МУРЗ, стало весьма распространенным явлением, некоторые компании пытаются выйти из положения, включая параллельно контактам варисторы, которые, по мысли разработчиков, должны облегчить коммутацию индуктивной нагрузки (рис. 2.15). В данном случае речь идет о МУРЗ типов SEL-787, SEL-751 и некоторых других, в которых используются миниатюрное реле серии JS с максимальным коммутируемым напряжением на постоянном токе 150 В и варисторы типа 14D431K с напряжением срабатывания (clamping

voltage) 710 В. Следует отметить, что это не очень эффективное решение, поскольку перенапряжения выше 700 В возникают при коммутации на постоянном токе нагрузки, содержащей заметную индуктивную составляющую.

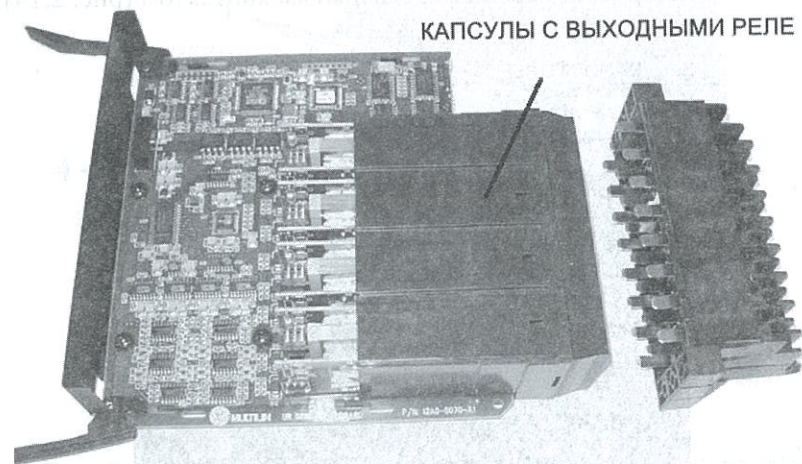


Рис. 2.16. Модуль выходных реле со снятым кожухом МУРЗ типа Т60

МУРЗ типа Т60 (General Electric) снабжено как обычными электромеханическими (рис.2.16), так и полупроводниковыми выходными реле, причем, как указано в его описании (Т60 Revision: 5.6х), полупроводниковые выходные реле снабжены специальными схемами для мониторинга постоянного напряжения на открытых контактах и постоянного тока, протекающего через замкнутые контакты. Как будто все ясно и понятно... Но то, что было написано далее поставило автора в тупик: «Напряжение записывается в виде логической единицы, когда ток в цепи контактов превышает 1 – 2.5 мА и ток считается логической единицей, когда он превышает 80 – 100 мА». Более странное (мягко выражаясь) объяснение, трудно даже представить. Странность эта не только в тексте, но и в сущности технического решения. Во-первых, мониторинг возможен только на постоянном токе, что ограничивает его область применения. Во-вторых, ток нагрузки может быть очень маленьким (1 – 3 мА), например, ток логического входа другого МУРЗ, или чувствительных

электромеханических промежуточных реле. Как будет в этом случае работать система мониторинга тока? Оказывается, разработчики этой системы учли такую возможность и предлагают потребителям включать параллельно контактам дополнительный внешний резистор. Для напряжения 48 В этот резистор рекомендуется выбирать сопротивлением 500 Ом и мощностью 10 Вт. Это довольно крупный резистор! Представляете, каким должен быть этот резистор для напряжения 220 В? И где его устанавливать? Об этом разработчики Т60 скромно умалчивают...

Еще одно «изобретение»: автоматическая очистка контактов (auto-burnishing) внешних реле, которые подают сигналы на логические входы Т60. Конструкторы озаботились тем, что при очень малых входных токах логических входов (менее 3 мА) и окисленных контактах внешних реле сигнал может «не пройти» через них. Для самоочистки этих контактов в Т60 установлены на входах специальные нелинейные элементы (очевидно, что-то вроде позисторов), имеющих низкое сопротивление в обесточенном (холодном) состоянии и быстро повышающих сопротивление при приложении к ним напряжения (и повышении температуры). В результате, в первый момент после замыкания контактов внешнего реле, через них проходит ток 50 – 70 мА, который быстро снижается (в течение 25 – 50 мс) до 3 мА. Как будто, красивая идея. Но это только для тех, кто не очень хорошо разбирается в процессах на контактах. «Непроходимость» контактов в результате их окисления имеет место в слабых цепях с напряжением коммутации ниже 20-30 В. При более высоких напряжениях происходит пробой очень тонких окисных пленок, и контакты, на вид черные и неприглядные, прекрасно проводят даже малые токи (фрикинг-эффект). Поэтому, для реальных напряжений эксплуатации МУРЗ проблема эта полностью надумана, а ее техническое воплощение совершенно бессмысленно. При небольших индуктивностях, когда перенапряжение на контактах не будет превышать 700 В, варистор просто не будет работать, тогда как для поддержания электрической дуги постоянного тока на контактах реле этого напряжения вполне достаточно. Кроме того, контакты реле, зашунтированных варисторами, невозможно проверить на соответствие требованиям стандарта (сопротивление изоляции, выдерживаемое напряжение).

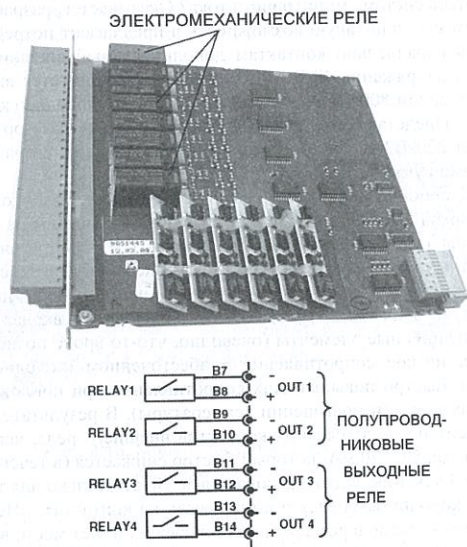


Рис. 2.17. Модуль входов-выходов, содержащий обычные электромеханические реле и обозначение быстродействующих полупроводниковых реле в технической документации компании Areva

В современных МУРЗ различного типа компании Areva применяются электромеханические реле типа G6RN-1 в качестве стандартных выходных реле или специальные модули с полупроводниковыми элементами – в качестве твердотельных полупроводниковых реле (рис. 2.17). Тот или другой тип реле может быть выбран на стадии заказа реле.

Компания Areva утверждает, что применяемые ею стандартные реле способны включать нагрузку с током 250А при длительности

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы

30 мс или 30 А при длительности 3 сек при напряжении 300 В. Предлагаем читателю самому оценить заявленную коммутационную способность МУРЗ компании Areva, воспользовавшись графиком, заимствованным из технической документации на реле G6RN-1 (рис. 2.18).

Твердотельные реле, по утверждению компании Areva, могут длительно находиться под током до 10 А. Не очень понятно, каким образом миниатюрные полупроводниковые элементы без радиаторов (а для радиаторов просто физически нет места на печатной плате) могут длительно пропускать ток в 10 А, если при прохождении тока более 2 – 3 А в длительном режиме полупроводниковые приборы без радиаторов обычно разогреваются до очень высокой температуры и выходят из строя.

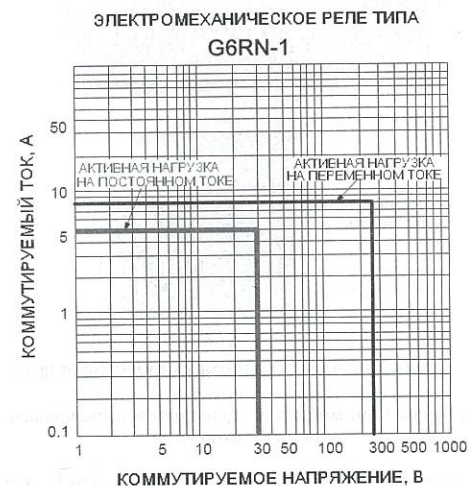


Рис. 2.18. Максимальная коммутационная способность миниатюрного реле типа G6RN-1, применяемого в МУРЗ производства компании Areva

Еще одним решением проблемы является использование гибридных выходных реле, образованных параллельным включением контакта электромеханического реле и полупроводникового ключевого элемента (рис. 2.19). В качестве такого ключевого элемента используются, как правило, IGBT-транзисторы с соответствующими драйверами с оптической развязкой, защищенные варисторами от перенапряжений. Транзисторы выбираются, обычно, с большими запасами по току (40 – 90 А) для обеспечения необходимой устойчивости к импульсным токам и повышения надежности. В гибридной схеме транзисторы находятся под током лишь до замыкания контактов электромеханических реле (10 – 15 мс), и поэтому не успевают разогреться даже при отсутствии радиаторов.

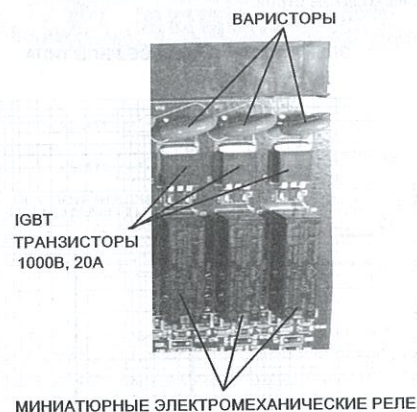


Рис. 2.19. Фрагмент модуля выходных реле, выполненных по гибридной технологии

Такой принцип используется в МУРЗ фирмы SEL. Для защиты IGBT-транзистора он зашунтирован обратно включенным диодом. При ошибочной полярности подключения внешней нагрузки (например, отключающей катушки выключателя) она окажется вклю-

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы

ченной сразу же при подаче внешнего напряжения питания, что чревато крупными неприятностями.

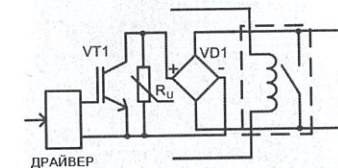


Рис. 2.20. Фрагмент модуля выходных реле в МУРЗ типа SEL-487, выполненных по гибридной технологии для коммутации и переменного и постоянного тока и его схема.

Эта же фирма использует в реле типа SEL-487 усложненную конструкцию гибридного реле, дополненную диодным мостом (типа KBU4M, 1000В, 4А) (рис. 2.20). При этом IGBT-транзистор (типа IRG4PF50, 900В, 50А), включенный в диагональ моста, позволяет коммутировать и постоянный, и переменный ток нагрузки. Диод-

ный мост этого типа имеет более чем 20-кратную перегрузочную способность в течение короткого времени (до замыкания контактов реле), что позволяет использовать его для коммутации значительных токов нагрузки.

Помимо непосредственно реле, модуль содержит также набор оптронов, служащих буфером между управляющими микрочипами и реле, а также резисторы, задающие режим работы оптронов.

Производитель рекламирует такую конструкцию выходных реле как супербыстродействующую (время срабатывания 10 мкс). Вопрос в том, кому это нужно, если время, затрачиваемое МУРЗ на обработку входного сигнала и выдачу команды на выходное реле, составляет 20 – 40 мс. С другой стороны, такое высокое быстродействие вполне может быть источником крупных неприятностей, обусловленных ложными срабатываниями от коротких импульсных и высокочастотных помех.

2.4. Модули цифровых (логических) входов

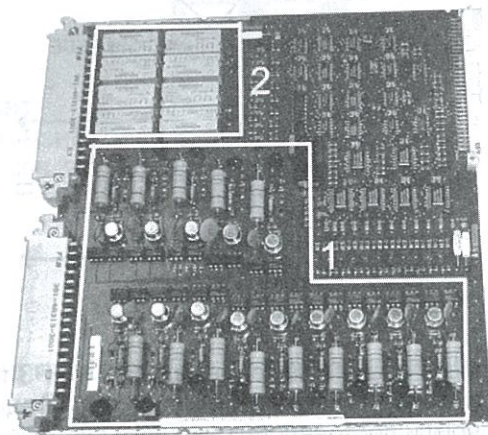


Рис. 2.21. Объединенный модуль «входов-выходов» МУРЗ типа REC-316: 1 – узел входных элементов; 2 – узел выходных реле

Чаще приходится встречаться с конструкциями, в которых выходные реле расположены на общей плате с другими функциональ-

ными узлами МУРЗ, например, с узлом логических (цифровых) входов (поэтому часто такие объединенные узлы называют модулями входов-выходов (I/O modules) (рис. 2.21).

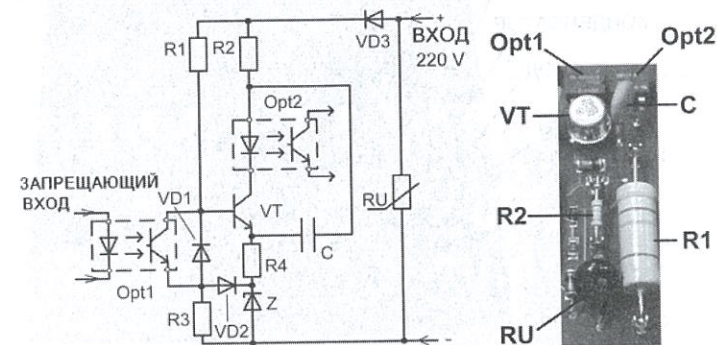


Рис. 2.22. Принципиальная схема и внешний вид одного канала узла логических входов реле серии 316 (REL, REC, RET, REG и др.) производства компании ABB

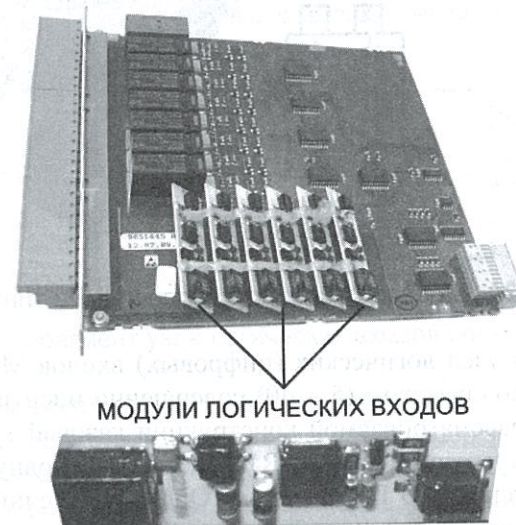


Рис. 2.23. Модули логических входов с регулируемым порогом срабатывания (Areva)

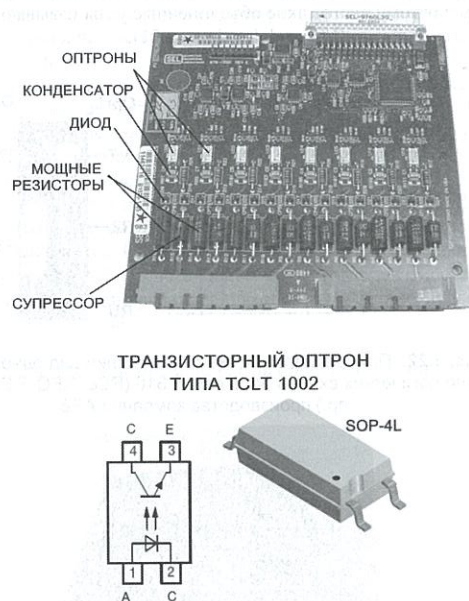


Рис. 2.24. Модуль логических входов МУРЗ типа SEL-787

Обычно узел логических (цифровых) входов МУРЗ образован некоторым количеством (5 – 40) совершенно идентичных входных каналов. В рассматриваемой конструкции каждый такой канал образован мощным резистором (R1), гасящим основную часть входного напряжения 220 В, оптроном (Opt2), обеспечивающими гальваническую развязку внутренних цепей МУРЗ от входного напряжения 220 В, элементом защиты от перенапряжений (R_U) на входе и некоторыми вспомогательными элементами (рис. 2.22). В данной

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы конкретной схеме на транзисторе VT собран логический элемент «Запрет» с запрещающим входом на базе оптрона (Opt1), позволяющий по внутренней команде микропроцессора заблокировать данный логический вход путем активации оптрона (Opt1).

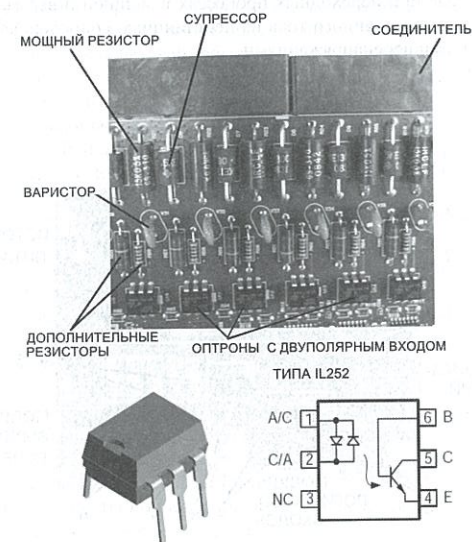


Рис. 2.25. Фрагмент узла логических входов реле SEL-487

Узлы логических входов в МУРЗ различных типов, производимых компанией Areva, имеют аналогичный набор элементов (рис. 2.23), однако, в отличие от описанного выше, в них имеется возможность выбирать пороговое напряжение активации узла. По-видимому, это реализуется путем изменения предварительного потенциала на базе транзистора. Выбор уровня напряжения активации логических входов осуществляется на стадии заказа МУРЗ.

Иногда встречаются упрощенные конструкции каналов логических входов, содержащие один гасящий резистор, оптрон и небольшой керамический конденсатор емкостью несколько сотен пикофард на входе. Следует отметить, что такой конденсатор не способен поглотить энергию импульсов, поступающих на вход логического канала при переходных процессах в мощной и весьма протяженной сети постоянного тока на подстанциях, сопровождающихся импульсными перенапряжениями.

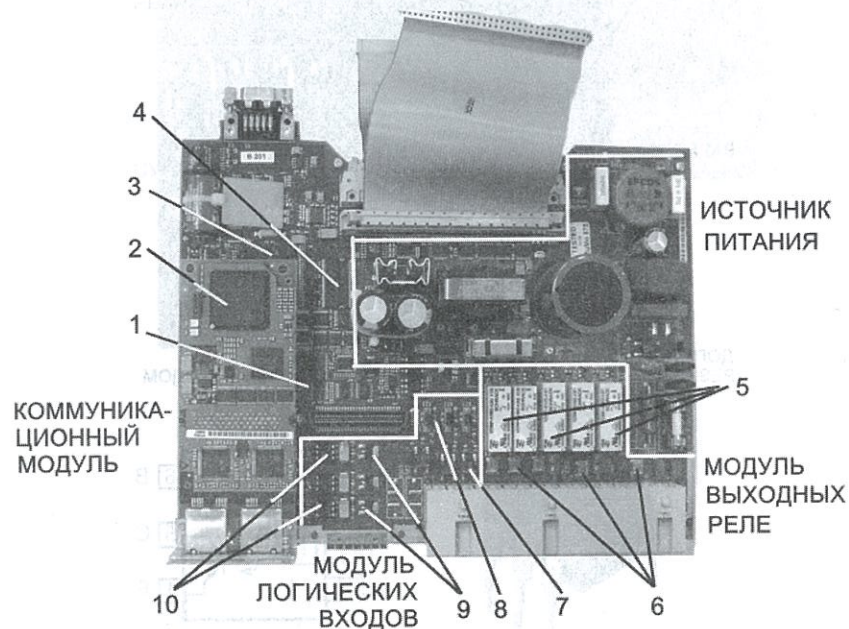


Рис. 2.26. Комбинированный модуль МУРЗ типа SIPROTEC 7U6125 (Siemens): 1 – 32 Mb CMOS флэш-память типа S29AL032090; 2 – коммуникационный контроллер типа MPC860EN; 3 – центральный процессор типа MCF5280CVM66 (Freescale); 4 – синхронизированная динамическая оперативная память типа 48LC2M3282; 5 – выходные реле типа V23061-A1001-A302; 6 – конденсаторы (4.7 нФ, 250 В), включенные параллельно контактам реле; 7 – диодный мост типа DF10S (1000 В, 1 А); 8 – стабилизатор; 9 – транзисторы типа BSP135 (600 В, 0.1 А); 10 – оптроны типа SFH601

Важным элементом такого канала является также диод, включенный параллельно входу в обратном направлении (или последовательно, в прямом направлении) и предотвращающий попадание на вход МУРЗ напряжения обратной полярности (рис. 2.24). Это предотвращает ложную активацию логических входов от импульсов напряжения обратной полярности, возникающую иногда на входах МУРЗ при коммутации индуктивной нагрузки (отключающие катушки выключателей, обмотки промежуточных реле). К сожалению, такой диод присутствует далеко не во всех типах МУРЗ, а использование оптронов с двунаправленным входом (рис. 2.25) приводит к возможности активации логических входов МУРЗ напряжением любой полярности.

В одной из новых моделей МУРЗ (SIPROTEC 7U6125) (рис. 2.26) все функциональные узлы, кроме блока с входными трансформаторами напряжения и тока, расположены на одной общей печатной плате, причем таким образом, что импульсный источник питания размещен буквально вплотную к центральному процессору, размещенному под коммуникационным модулем (рис. 2.25). Это единственная, известная автору, конструкция такого рода. Учитывая высокочастотные электромагнитные излучения импульсного источника питания, правильность такой конструкции вызывает сомнения с точки зрения электромагнитной совместимости. Некоторое удивление вызывает также выбранный конструкторами этого МУРЗ способ повышения коммутационной способности контактов миниатюрных реле путем их шунтирования конденсаторами 4.7 нФ, 250 В. Во-первых, одного только конденсатора не достаточно для повышения коммутационной способности контактов, нужен еще и последовательно включенный резистор. Во-вторых, номинального напряжения конденсатора 250 В совершенно не достаточно для работы в сети 220 В, где возможны значительные коммутационные перенапряжения.

Резисторы, гасящие большую часть входного напряжения в узле логических входов, расположены с обратной стороны печатной платы. Стабилитроны вместе с транзисторами образуют стабилизатор входного напряжения (аналогичный по принципу действия рассмотренному выше и применяющийся в МУРЗ серии REC, REL, RET компании ABB), позволяющий МУРЗ работать в широком диапазоне входных напряжений (24–250 В), а наличие диодных

мостов на логических входах делает их не чувствительными к полярности входного напряжения.

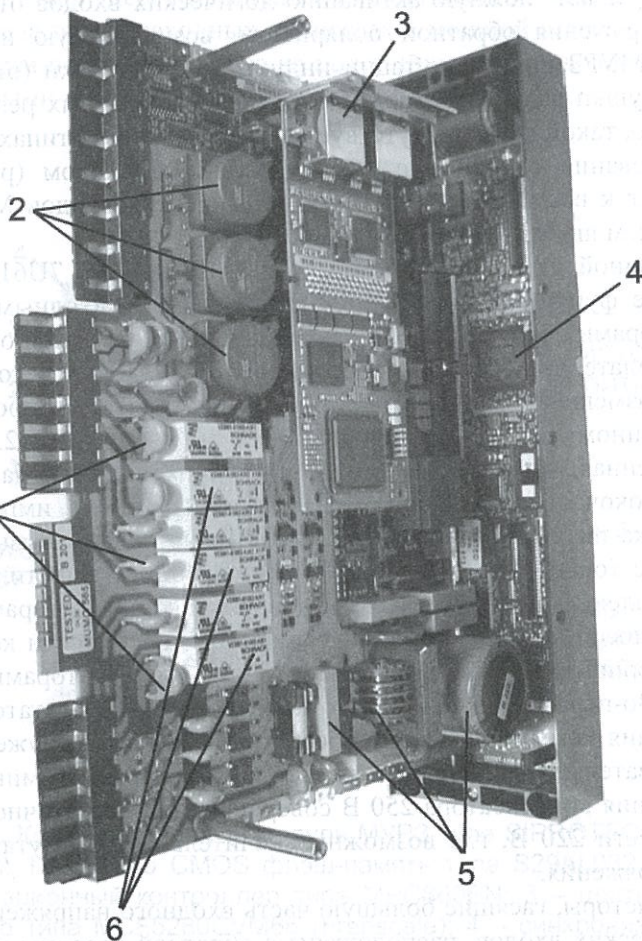


Рис. 2.27. SIPROTEC 7SJ8032 (Siemens) 1 – защитные конденсаторы (2.2 нФ, 250 В), подключенные параллельно контактам реле; 2 – капсулированные трансформаторы тока; 3 – модуль связи; 4 – основной микропроцессор; 5 – элементы источника питания; 6 – электромеханические выходные реле

Обе эти особенности схемы являются скорее недостатками, чем преимуществами (см. выше). Кроме того, полное отсутствие элементов для защиты от высоковольтных импульсных перенапряжений (варисторов, супрессоров) на входах этого узла является, по нашему мнению, существенным недостатком конструкции.

Похожую конструкцию имеют и реле токовой защиты типа 7SJ8032 (рис. 2.27). В отличие от предыдущей конструкции, узел аналоговых входов расположен на общей печатной плате, а центральный процессор – на отдельной плате, размещенной под прямым углом к основной. Принцип построения входных логических входов, выходные реле, защитный элемент на контактах реле – такие же, как и в рассмотренном выше случае.

2.5. Модуль центрального процессора

Главным модулем МУРЗ, часто называемым CPU Module, является наиболее сложная, наиболее дорогая и наиболее насыщенная элементами печатная плата (рис. 2.28), выполненная по технологии поверхностного монтажа (SMD technology), на которой расположены: микропроцессор, элементы памяти, АЦП, мультиплексор, вспомогательные (периферийные) микропроцессоры, коммуникационный контроллер, коммуникационный порт и т.д.

За полтора десятка лет, прошедших с выпуска реле 316 серии, конструкция главного модуля с центральным процессором не претерпела принципиальных изменений (рис. 2.9). Заметны на глаз лишь меньшие размеры главного микропроцессора и сопутствующих функциональных элементов, меньшее их количество. Это обусловлено прогрессом последних лет в области нанотехнологий, который привел к существенному снижению размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, уменьшению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, увеличению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве. Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности полупроводниковых элементов, особенно ячеек памяти, к ионизирующим излучениям. Эта чувствительность стала настолько высокой, что обычный (то

есть совершенно нормальный) радиационный фон на уровне моря стал опасным для ячеек памяти.

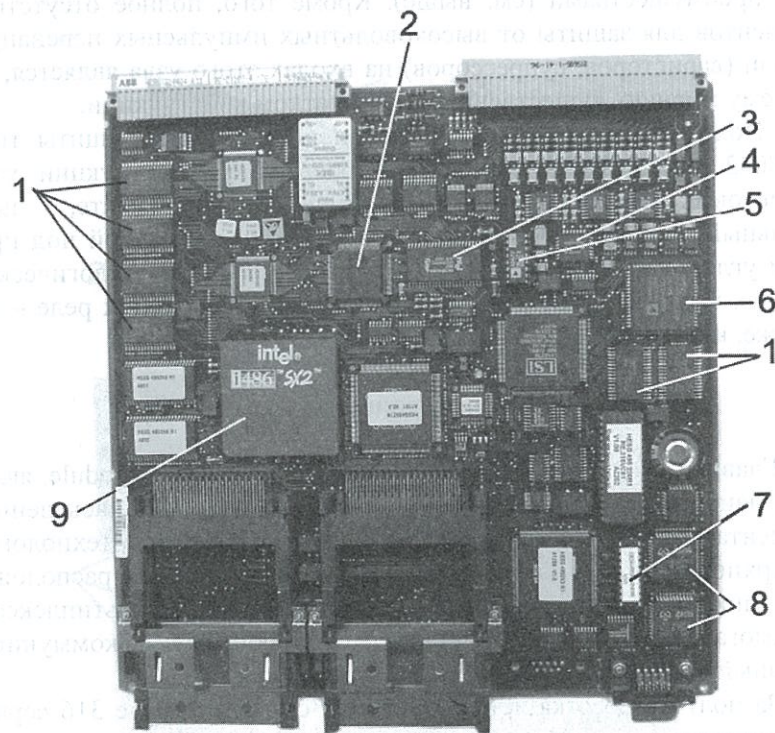


Рис. 2.28. Главный модуль МУРЗ типа REL316, производства 90-х годов прошлого века: 1 – оперативная память (SRAM) типа TC551001BFL-70L (Toshiba); 2 – периферийный микропроцессор типа NG8237016 (Intel); 3 – флэш-память (Intel); 4 – 16-канальный мультиплексор типа ADG506AKP (Analog Devices); 5 – аналого-цифровой преобразователь AD677 (Analog Devices); 6 – периферийный микропроцессор типа ADSP-2105 (Analog Devices); 7 – постоянное запоминающее устройство с алгоритмом работы защиты («software key»); 8 – коммуникационные контроллеры типа Z85C3016VSC (Zilog); 9 – главный процессор 486 серии (Intel)

Особенно опасными являются потоки высокоэнергетических элементарных частиц, приходящих из космоса.

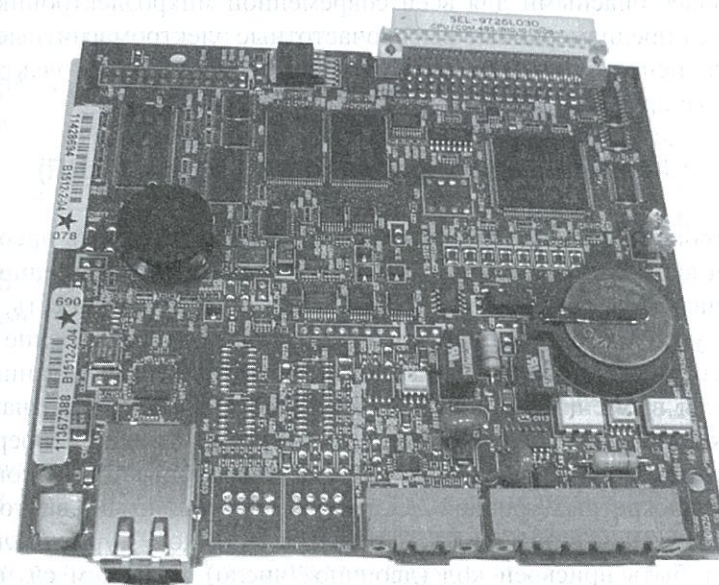


Рис. 2.29. Главный модуль МУРЗ типа SEL-787, производства 2009 г.

Даже одна такая частица при попадании в ячейку памяти рождает вторичные потоки электронов и ионов, вызывающие самопроизвольное переключение элементарного транзистора или разряд емкости в элементах с зарядовой памятью. Проблема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется. В последние годы проблема резкого увеличения чувствительности к ионизирующим излучениям стала актуальной не только для элементов памяти, но также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т. д., то есть, практически, для всей современной микроэлектроники. Кроме ионизирующих излучений,

все более опасными для всей современной микроэлектроники становятся преднамеренные высокочастотные электромагнитные излучения, используемые во многих видах современного электромагнитного оружия.

2. 5. 1. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Процесс аналого-цифрового преобразования (то есть преобразования входного аналогового сигнала в цифровой код) предполагает две операции: квантование по времени и по уровню. То есть, по существу, аналого-цифровое преобразование - это измерение мгновенных значений аналогового входного сигнала через заданные интервалы времени (sampling) и кодирование измеренных значений. Для кодирования весь диапазон возможных изменений непрерывного (аналогового) сигнала (U), равномерно разбивается на конечное число дискретных уровней ΔU , называемых уровнями квантования. Каждому значению (в нашем примере от 1 до 9) уровня сигнала может быть присвоен код (двоичное число). В нашем случае это числа от 0001 до 10001. После такого кодирования операции над аналоговым сигналом можно заменить соответствующими операциями с двоичными числами, для которых, собственно, и предназначен микропроцессор. Записанные двоичные числа передаются в микропроцессор через определенные промежутки времени t .

При квантовании по уровню не всегда измеренный сигнал совпадает с уровнем квантования ΔU (рис. 1-30). В таком случае он округляется до ближайшего значения, определяемого целым числом квантов. Естественно, что при этом возникает погрешность, обуславливаемая этим округлением.

Важной характеристикой АЦП является разрядность формируемого им на выходах двоичного числа. Разрядность АЦП — это объем дискретных степеней сигнала, определяемых и кодируемых АЦП. Например, разрядность 8 бит означает способность АЦП производить квантование и кодировать сигналы в виде 256 дискретных значений ($2^8 = 256$). Для преобразования аналоговых величин на входах МУРЗ (например, напряжения изменяющегося на токовом входе МУРЗ в пределах от 0 до 10 В) с погрешностью не более 2 – 5 % используются 12-разрядные АЦП, позволяющие получить $2^{12} = 4096$ уровней квантования.

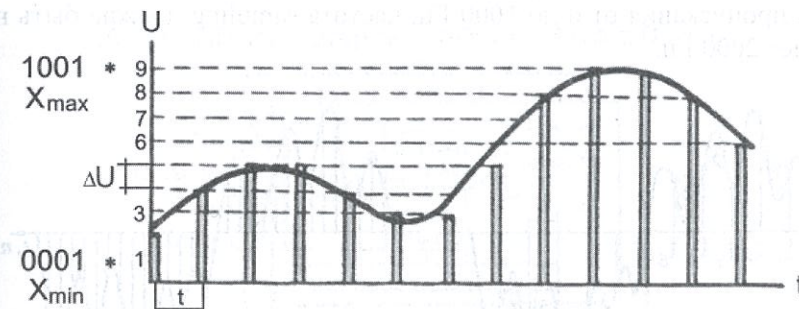


Рис. 2.30. Квантование сигнала по уровню

Для приведенного выше примера входного аналогового сигнала МУРЗ, разрешающая способность АЦП составит: $10/4096 = 2.44$ мВ. На практике далеко не всегда удастся реализовать такую высокую разрядность АЦП из-за наличия помех на его входе (в рассмотренном примере речь идет о единицах милливольт). При этом АЦП просто не в состоянии различать соседние уровни входного сигнала, поэтому младшие биты выходного сигнала практически бесполезны. Реально достижимая разрядность (эффективная разрядность или effective number of bits – ENOB) всегда меньше номинальной.

Очевидно, что и квантование по времени связано с погрешностью, а фактически с потерей части информации. В самом деле, дискретный сигнал не показывает, как ведет себя исходный непрерывный сигнал в моменты времени, например, между t_1 и t_2 , t_3 и t_4 , и т.д. (рис. 2.31). Иначе говоря, этот процесс связан с некоторой погрешностью, которая зависит от шага дискретизации T : при малых значениях шага дискретизации (то есть высокой частоте дискретизации – sampling frequency) число точек замера высоко, и теряется мало информации; очевидно, картина обратная при больших шагах дискретизации. Обычно, в МУРЗ применяется равномерное квантование (sampling) с интервалом в $1/12$, $1/20$ или $1/24$ периода основной рабочей частоты, то есть sampling с частотой 600, 1000 или 1200 Гц для рабочей частоты 50 Гц, или, соответственно: 720, 1200 и 1440 Гц для базовой частоты 60 Гц. Более высокая частота используется в микропроцессорных регистраторах аварийных режи-

мов. Для осциллографирования аварийного режима в сети с полосой пропускания от 0 до 1000 Гц, частота sampling должна быть не менее 2000 Гц.

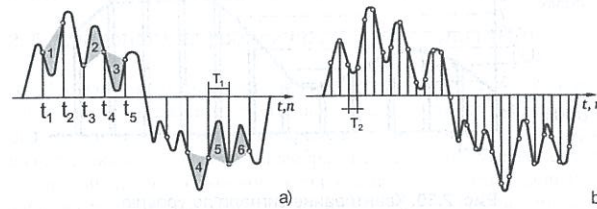


Рис. 2.31. Возникновение ошибки в процессе квантования сигнала по времени

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. 2.31). Если при этом еще и входной сигнал изменяется быстрее (имеет более высокую частоту), чем производится его измерения (то есть, чем частота sampling), то точное восстановление сигнала с помощью цифро-аналогового преобразователя становится невозможным и на его выходе появятся ложные низкочастотные сигналы, определяемые разностью упомянутых частот, называемые алиасинг (aliasing). Например, синусоидальный сигнал с частотой 3000 Гц, измеренный с частотой sampling 2000 Гц был бы воспроизведен как синусоида с частотой 1000 Гц. Оптимальное соотношение между частотой сигнала и sampling frequency описывается теоремой Найквиста-Шеннона или теоремой Котельникова-Шеннона, в русской технической литературе. Обычно, для более точного преобразования, частота дискретизации (сэмплирования) выбирается как минимум вдвое выше самой высокочастотной составляющей сигнала, а все сигналы с частотой более высокой, чем частота квантования, должны быть исключены (отфильтрованы) из входного сигнала. Фильтр, осуществляющий такую фильтрацию, называется анти-алиасинговым (anti-aliasing filter).

16 бит АЦП конвертер типа AD677 (Analog Device)

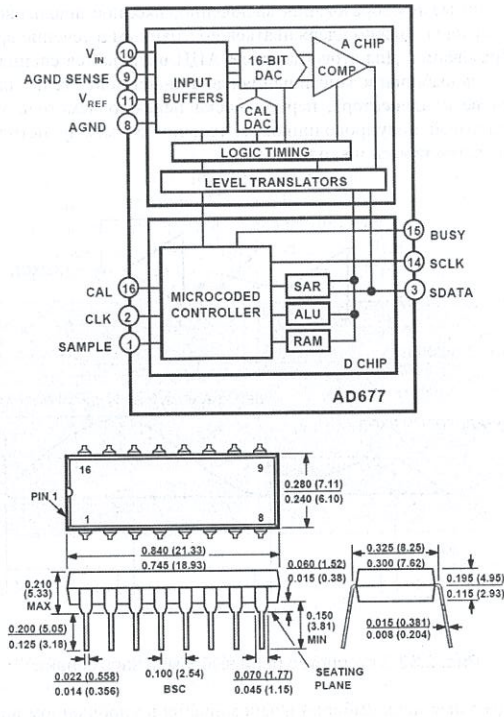


Рис. 2.32. 16-битный АЦП типа AD677 (Analog Devices, Inc.)

Дополнительную ошибку вносит так называемая аппертурная погрешность, обусловленная флуктуациями синхросигнала (clock

jitter), определяющего момент времени измерения входного сигнала.

Поскольку реальные АЦП (рис. 2.32) не в состоянии произвести необходимые преобразования мгновенно, входное аналоговое значение сигнала должно удерживаться постоянным в течение времени преобразования. Для этого на входе АЦП включается специальный узел: цепь выборки и запоминания (sample-and-hold circuit, или S/H) на основе конденсатора, периодически переключаемого с требуемой частотой полупроводниковым ключом S_1 между источником аналогового сигнала и входом АЦП.

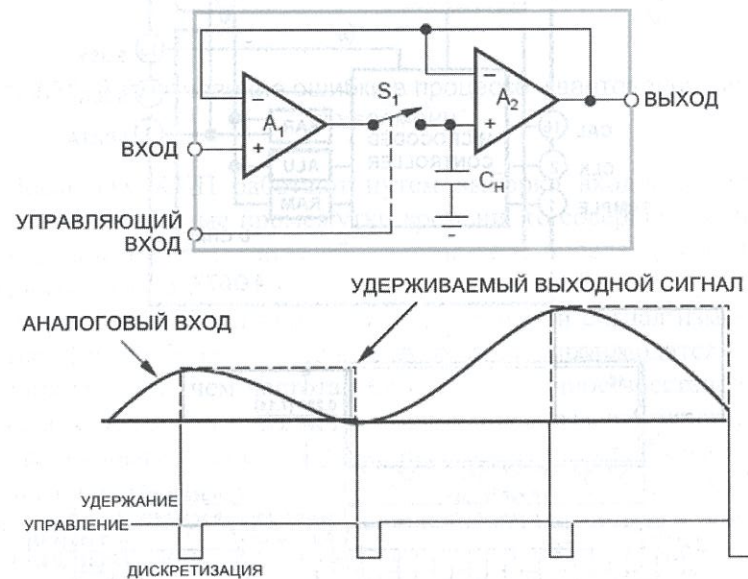


Рис. 2.33. Устройство цепи выборки и запоминания

Идеальная цепь выборки и запоминания в упрощенном виде содержит четыре основных компонента, как показано (рис. 2.33), хотя в реальной конструкции они, конечно, не могут быть внутренне связаны точно так, как это показано на рисунке. Усилитель A_1 (буфер входа) обладает высоким входным импедансом и, одновременно,

но, обеспечивает достаточный зарядный ток запоминающему конденсатору C_H . Выключатель S_1 периодически подключает и отключает под действием схемы управления выход буферного усилителя к удерживающему элементу (конденсатору) так, чтобы последний поступивший сигнал был сохранен в виде заряда конденсатора.

Усилитель A_2 служит для того, чтобы преобразовать запоминающий конденсатор с высоким импедансом в источник напряжения с низким внутренним импедансом, необходимым для внешней нагрузки.

При замкнутом ключе S_1 выходной сигнал повторяет входной, подверженный помехам и ошибкам, обусловленным широкой полосой пропускания усилителя. Когда S_1 открыт, чистое напряжение, сохраненное конденсатором (в идеале оно сохраняется неизменным), поступает на выход устройства до тех пор, пока ключ S_1 опять не замкнется под действием управляющей команды.

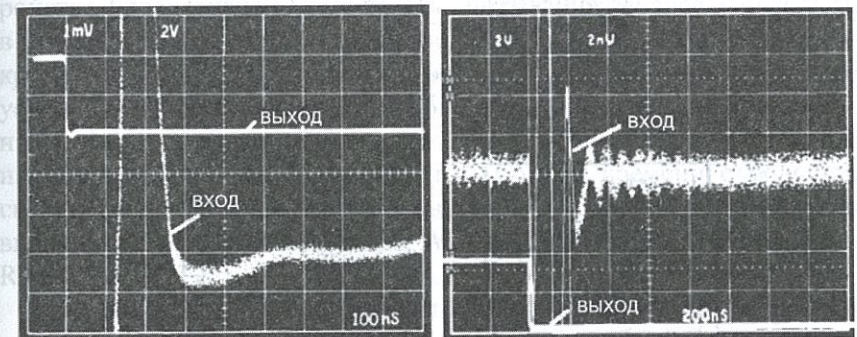


Рис. 2.34. Реальные осциллограммы сигналов на входе и на выходе схемы выборки и удержания

Из реальных осциллограмм (рис. 2.34) можно видеть, что устройство выборки и удержания является, по сути, дополнительным фильтром, очищающим сигнал, подаваемый на вход АЦП, от выбросов, переходных процессов и высокочастотных помех и включается на входе АЦП последовательно с антиалиасинговым фильтром (рис. 2.35).

Устройства АЦП имеют довольно сложную внутреннюю структуру, включающую различные дополнительные сервисные узлы,

Глава II. Устройство микропроцессорных устройств релейной защиты
улучшающие качество преобразования и выпускаются в виде оди-
ночных многвыводных микрочипов (рис. 2.32).

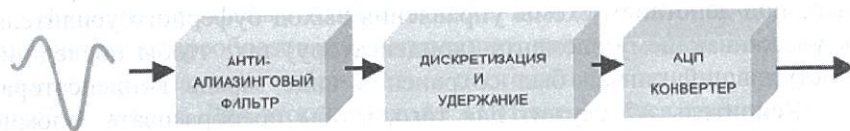


Рис. 2.35. Структура входной цепи аналогового сигнала МУРЗ

Обычно тракт аналого-цифрового преобразования включает еще и мультиплексор.

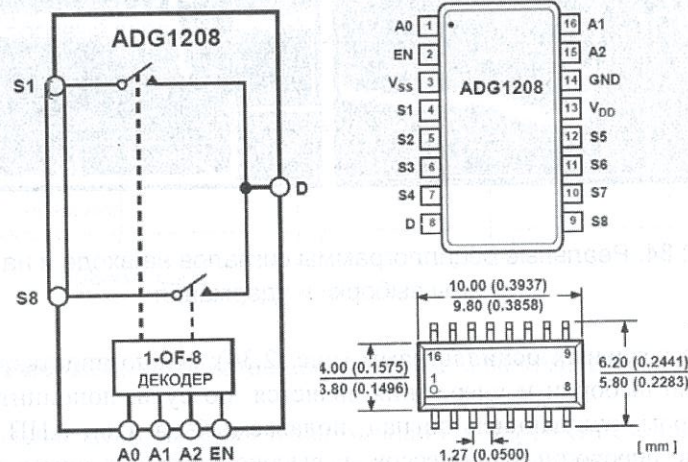
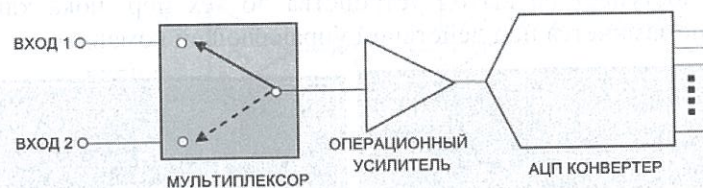


Рис. 2.36. 8-входовой мультиплексор типа ADG1208
(Analog Devices, Inc.)

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы

Мультиплексор – это электронный коммутатор, поочередно подключающий сигналы с многочисленных входов МУРЗ к АЦП, рис. 2.36. Применение мультиплексора позволяет использовать один достаточно сложный и дорогой АЦП для работы одновременно с несколькими сигналами (входами).

2. 5. 2. Память

Информация в микропроцессорных системах хранится в специальных устройствах, называемых памятью. Существует два основных вида устройств памяти: постоянное запоминающее устройство, в котором постоянно хранится рабочая программа, управляющая работой микропроцессора, и оперативное запоминающее устройство, предназначенное для временного хранения результатов промежуточных вычислений. Поскольку постоянное запоминающее устройство предназначено только для считывания заранее записанной в нем программы, то оно и называется Read Only Memory (или, сокращенно ROM). В отличие от него, оперативное запоминающее устройство служит для постоянного обмена информацией с внешними устройствами, то есть и для считывания, и для записи новой информации в любой произвольный момент времени с большой скоростью при обращении к ней внешних устройств. Поэтому такой вид памяти называется Random Access Memory (или, сокращенно RAM).

Оба эти основных вида памяти имеют множество подвидов. Например, некоторые виды ROM позволяют перепрограммировать их по мере надобности в процессе эксплуатации, например, стереть старые уставки релейной защиты и ввести новые. Такие виды ROM называются Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM). Этот вид памяти был изобретен в 1972 г. Довом Фрохманом (патент США 3,660,189) – основателем и генеральным директором Израильского отделения компании Intel, рис. 2.37. В течение многих лет EPROM оставался одним из самых массовых продуктов, выпускаемых компанией Intel.

Стереть содержимое такой памяти можно было, только подвергнув ее воздействию ультрафиолетового излучения через специальное окно в корпусе чипа в течение 10 – 15 минут.

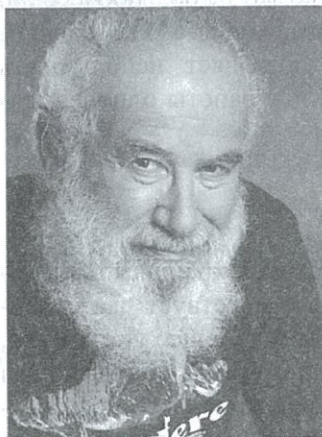


Рис. 2.37. Дов Фрохман – изобретатель EPROM

Для этого существовали специальные устройства. В дальнейшем появилась Electrical Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM или E²PROM), стирание и перезапись содержимого которого производилось электрическими сигналами, подаваемыми на специальные входы. Это оказалось очень удобным для перепрограммируемых микроконтроллеров и МУРЗ, хотя имело и свою цену, так как даже очень большие EEPROM имеют гораздо меньший объем памяти и меньший срок жизни, чем обычный EPROM. В последние годы появился новый вид постоянной памяти, так называемая флэш-память. В отличие от EEPROM, с побитным стиранием и перезаписью данных, в флэш-памяти стирание и запись данных производится большими блоками. Поскольку процесс стирания данных из памяти является относительно длительным, большого размера блоки, используемые в флэш-памяти позволили значительно ускорить этот процесс по сравнению со старыми EEPROM.



Рис. 2.38. Доктор наук Фуджио Масуока, изобретатель флэш-памяти (Toshiba Corp.)

Флэш-память была впервые представлена доктором наук Фуджио Масуока из корпорации Тошиба в 1984 г. (рис. 2.38). Флэш-память основана на использовании MOSFET-тран-

зисторов. Эти транзисторы имеют изолированный управляющий электрод, называемый «gate» и управляются подачей на него электрического потенциала.

Благодаря очень хорошей изоляции, электрический заряд (определяющий состояние транзистора) сохраняется в MOSFET-транзисторах очень долго. Для изменения состояния такого транзистора (то есть для стирания памяти из ячейки, образованной таким транзистором) достаточно лишь разрядить его управляющий переход, то есть снять электрический заряд. Построенная на таком принципе память способна сохранять информацию годами и допускает до 50 - 100 тысяч перезаписей. Совершенно очевидно, что сохранность памяти, основанной на электрическом заряде, зависит от скорости саморазряда ячеек памяти, на которую в сильной степени влияют различные неблагоприятные факторы, такие как ионизирующее излучение и другие.

Все виды постоянной памяти являются энергонезависимыми (non-volatile memory), то есть такими, в которых информация не разрушается при отключении питания.

В действительности, при использовании в релейной защите, имеется часть программы, которая определяет алгоритм работы МУРЗ (то есть определяет вид защиты: дифференциальная, дистанционная, токовая и т.д.), и поэтому она не должна изменяться ни при каких условиях, и есть часть программы, которая может быть изменена потребителем (например, та часть, которая относится к рабочим уставкам и режимам работы защиты). Для того, чтобы разделить эти две части памяти, иногда их выполняют в виде физически разделенных чипов, в одном из которых хранится доступная для перезаписывания информация (EEPROM), а в другом – не доступная (так называемый Software Key - SWK, выполненная на основе ROM). Для того, чтобы изменить алгоритм работы МУРЗ, необходимо физически извлечь SWK чип и заменить его новым. Для автоматического контроля исправности ROM и EEPROM в процессе их работы записанный в них массив данных суммируется и кодируется в виде некоторого числа, называемого контрольной суммой, которая записывается в специально отведенную для нее ячейку. В режиме тестовой проверки (как правило, при загрузке микропроцессора) он просматривает содержимое памяти и сравнивает его с контрольной суммой. Если обнаруживается несоответствие, дальней-

шая работа микропроцессора блокируется. В некоторых продвинутых системах имеется не одно, а сразу два параллельно работающих EEPROM. Если в одном из них обнаруживается несоответствие с контрольной суммой (то есть повреждение содержимого памяти), то в этом случае содержимое этой памяти автоматически перезаписывается со второго, неповрежденного EEPROM.

Существует также и несколько типов RAM памяти, прежде всего, это SRAM (static RAM) и DRAM (dynamic RAM).

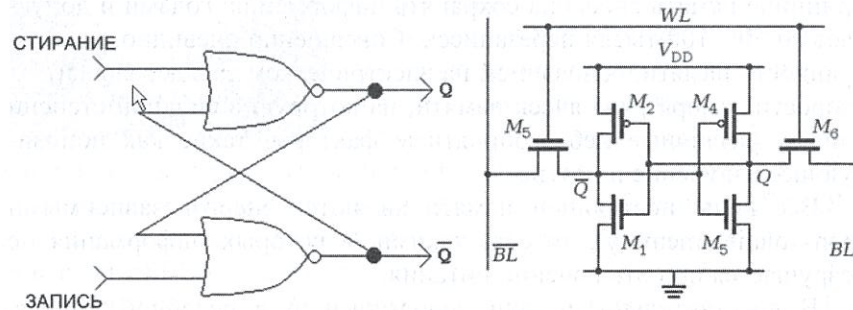


Рис. 2.39. Типовая ячейка статической оперативной памяти (SRAM) на базе шести транзисторов CMOS-типа

Типичная ячейка статической двоичной памяти представляет собой двоичный триггер на транзисторах, состоящий из двух перекрестно (кольцом) включенных инверторов (логических элементов НЕ) и ключевых транзисторов для обеспечения доступа к ячейке (рис. 2.39).

Такая схема является бистабильной, то есть, будучи переключенной из одного состояния в другое, сохраняет свое положение до прихода электрического импульса, изменяющего ее состояние. Таким образом, память, выполненная на таком принципе (рис. 2.40) не требует периодической перезагрузки для сохранения информации, но остается энергозависимой, то есть такой, в которой данные будут потеряны при отключении питания.

Для сохранения записанной информации и после отключения питания иногда применяют внешнюю литиевую батарейку, расположенную на плате.

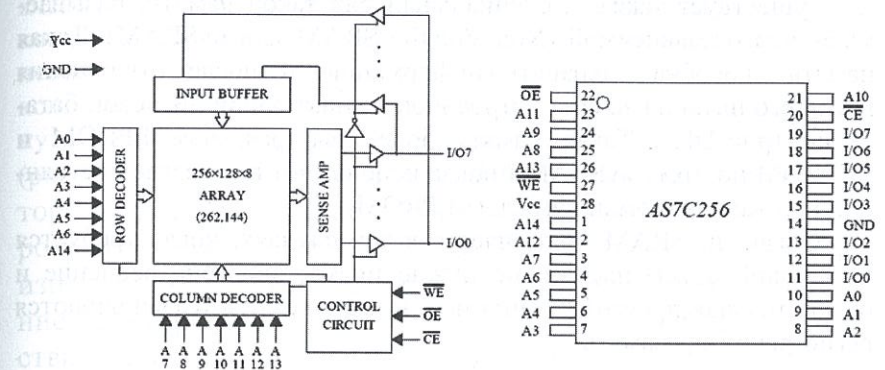


Рис. 2.40. Энергозависимая статическая оперативная память (SRAM) типа AS7C256 (32k x 8 bit) на основе CMOS-транзисторов (Alliance Semiconductor)

Обычно такой батарейки хватает на много лет, но когда ее напряжение снижается, ее необходимо заменить. Однако, если просто вынуть ее, все данные, записанные в такой памяти, будут потеряны. Поэтому замену такой батарейки следует производить при подключенном параллельно ее держателю внешнем источнике питания.

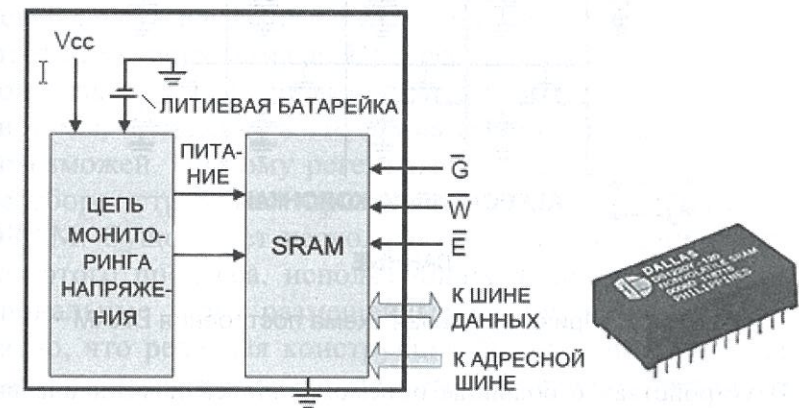


Рис. 2.41. Структура и внешний вид энергонезависимой памяти SRAM

Существует также и специальный вид такой памяти, называемый энергонезависимой (Non Volatile SRAM или nvSRAM). Такая память способна сохранять информацию и после отключения внешнего питания за счет встроенной миниатюрной литиевой батарейки (рис.2.41). Такая память более быстрая, чем EPROM и EEPROM поэтому nvSRAM иногда используют в качестве постоянной перезаписываемой памяти (EEPROM).

Обычный SRAM применяется в тех случаях, когда требуется небольшой объем памяти, но нужно низкое энергопотребление и относительная простота. Например, на основе SRAM выполняются регистры и кэш-память.

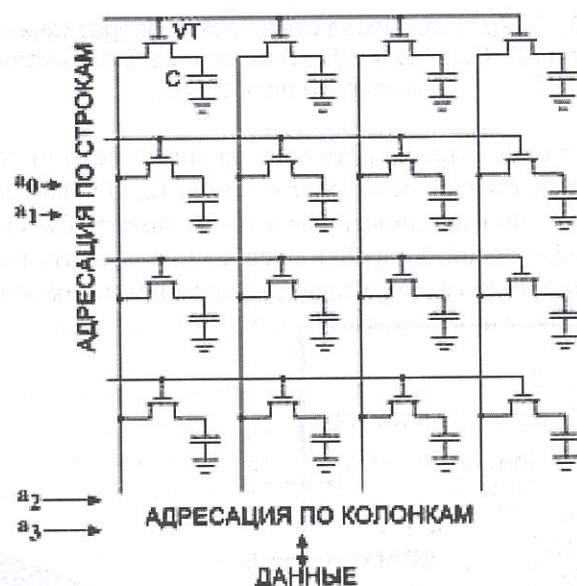


Рис. 2.42. Принципиальная схема построения DRAM

В устройствах с большим объемом рабочей памяти она выполняется как Dynamic Random Access Memory (DRAM). Каждая ячейка этой памяти содержит конденсатор C небольшой емкости и полупроводниковый ключ VT , расположенные внутри единичного чипа (рис. 2.42). Конденсаторы заряжаются в случае, когда в

ячейку заносится единичный бит, либо разряжаются в случае, когда в ячейку заносится нулевой бит. Полупроводниковый ключ необходим для «запираания» ячейки и удержания заряда внутри конденсатора. Доступ к определенной ячейке осуществляется путем выбора ее адреса по строкам (rows) и столбцам (columns) (рис. 2.42). В реальных чипах DRAM функцию и конденсатора, и полупроводникового ключа выполняют CMOS микротранзисторы, которые, благодаря хорошей внутренней изоляции, способны накапливать и сохранять заряд в течение некоторого времени, подобно конденсаторам. Достоинства такой конструкции — относительно низкая стоимость, большой объем памяти. Однако, из-за того, что емкость, образуемая микротранзисторами, очень невелика, запасенный заряд быстро стекает, поэтому информацию приходится обновлять через определённые периоды времени во избежание потерь данных (собственно, именно поэтому этот вид памяти и называется «динамическим»). Этот процесс называется регенерацией памяти (memory refresh) и реализуется с помощью специального контроллера. В течение времени, называемого шагом регенерации, в DRAM перезаписывается целая строка ячеек, и через 8 - 64 миллисекунд обновляются все строки памяти. Процесс регенерации памяти в таком классическом варианте существенно «тормозит» работу системы, поскольку в это время обмен данными с памятью невозможен. Поэтому регенерация, основанная на обычном переборе строк, не применяется в современных типах DRAM. Существует несколько более экономичных вариантов этого процесса, использующих дополнительные функциональные узлы, размещенные внутри чипа DRAM. Понятно, что реальная конструкция DRAM (рис. 2.43) оказывается намного сложнее, чем его упрощенная принципиальная схема.

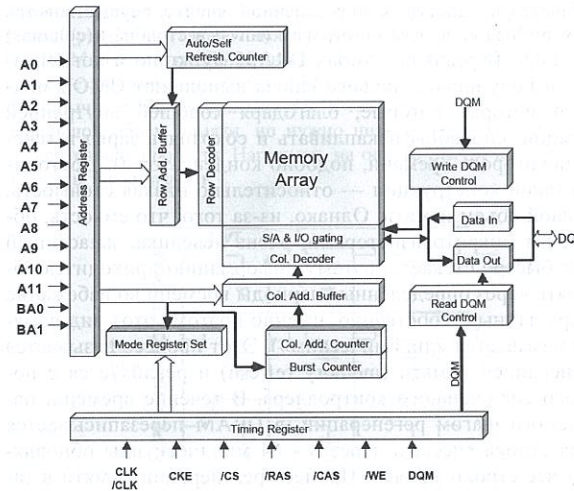


Рис. 2.43 а. Реальная конструкция DRAM.
 Функциональная блок-схема

В последние годы появилось множество усовершенствованных видов DRAM (EDRAM, FPM DRAM, EDO DRAM, SDRAM, DRRAM, etc.), одно лишь перечисление которых может занять много места, и рассмотрение которых выходит далеко за рамки данной статьи.

В заключение отметим лишь одну очень важную особенность DRAM: его высокую чувствительность к электрическим помехам и к радиации. Электрические помехи, возникающие от внутренних цепей или проникающие извне, могут привести к самопроизволь-

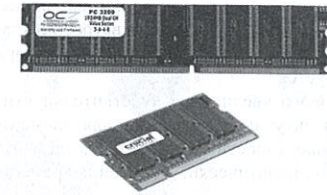


Рис. 2.43. Реальные конструкции DRAM. Внешний вид некоторых типов DRAM модулей, широко применяемых в персональных компьютерах

Первоначально предполагалось, что влияние радиации обусловлено альфа-частицами, излучаемыми пластмассой, которой опрессован кристалл памяти, загрязнителями, содержащимися в самом чипе, упаковочным материалом при воздействии

Прогресс последних лет в области нанотехнологий привел к существенному снижению размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, уменьшению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, уменьшению электрической емкости отдельных ячеек памяти, увеличению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве. Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности элементов памяти к ионизирующим излучениям. Эта чувствительность стала настолько высокой, что обычный (то есть совершенно нормальный) радиационный фон на уровне моря стал опасным для ячеек памяти. Особенно опасными являются потоки высокоэнергетических элементарных частиц, приходящих из космоса. Даже одна такая частица при попадании в ячейку памяти рождает вторичные потоки электронов и ионов, вызывающие самопроизвольное переключение элементарного транзистора или разряд емкости в элементах с зарядовой памятью. Про-

блема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется.

Проблема резкого увеличения чувствительности к ионизирующим излучениям актуальна не только для элементов памяти, но также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т. д., то есть, практически, для всей современной микроэлектроники.

Самое страшное, что случайные сбои в работе микропроцессора, вызванные электромагнитными шумами и радиацией, могут быть временными, такими как самопроизвольные изменения содержания оперативной памяти (RAM) и регистров, а внутренние повреждения могут носить скрытый характер. Оба этих вида повреждений не выявляются никакими тестами и могут проявляться в самые неожиданные моменты.

2.5.3. Микропроцессор

Микропроцессор — это центральный узел МУРЗ, предназначенный для управления работой всех остальных узлов и выполнения арифметических и логических операций над информацией. Современный микропроцессор является, практически, законченной системой управления. Он имеет сложную внутреннюю архитектуру и представляет собой сверхбольшую интегральную схему, формируемую на слоях кремниевой подложки. Для этого применяются специальные процессы формирования схемы под воздействием химических препаратов, газов и излучения.

Процессор содержит огромное количество микротранзисторов, связанных между собой сверхтонкими алюминиевыми соединительными каналами, обеспечивающими их взаимодействие при записи и обработке данных, позволяя микропроцессору выполнять множество различных функций. Самый первый микропроцессор модели 4004, о котором корпорация Intel объявила в 1971 г. (рис.

2.45) содержал «всего» 2300 транзисторов и выполнял примерно 60000 вычислительных операций в секунду.

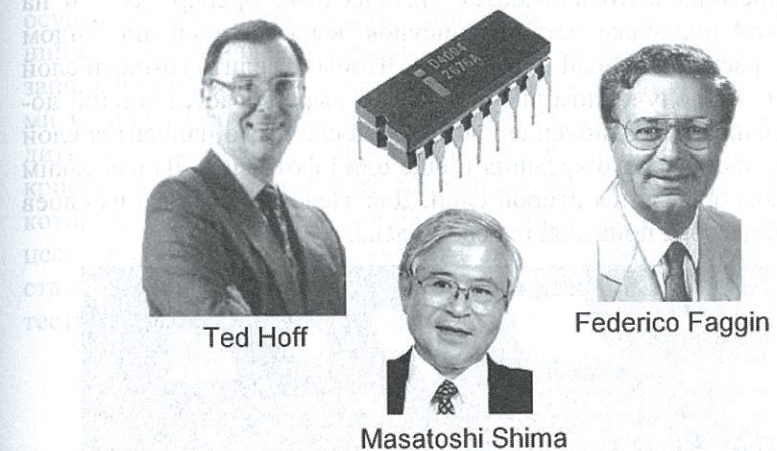


Рис. 2.44. Изобретатели первого в мире микропроцессора

Широко применяющийся сегодня в МУРЗ процессор 486 серии содержит уже 1.6 миллиона транзисторов, а процессор Pentium IV насчитывает 42 миллиона транзисторов и выполняют сотни миллионов операций в секунду.

На сегодняшний день микропроцессоры — самые сложные в производстве электронные устройства. Для создания современных микропроцессоров требуются сотни производственных этапов, к чистоте и точности каждого из которых предъявляются исключительно жесткие требования. Сначала на подложке под воздействием высокой температуры и кислорода формируется первый очень тонкий слой диоксида кремния. Затем подложка покрывается фотоэмульсией, способной разрушаться под действием ультрафиолетового излучения, на которую наносится так называемая маска (трафарет с рисунком будущей схемы).

В процессе фотолитографии ультрафиолетовое излучение, проходя сквозь маску, формирует на подложке рисунок схемы. Засвеченные участки фотослоя становятся растворимыми и вымываются

специальным растворителем в процессе дальнейшей обработки, при этом открывается соответствующая часть слоя диоксида кремния, которая не была защищена маской. Эти незащищенные участки диоксида кремния вытравливаются химическими препаратами, и на кремниевой подложке остается рисунок, выполненный диоксидом кремния, расположенный под маской. Чтобы отделить готовый слой от нового, на полученном рисунке схемы выращивается тонкий дополнительный слой диоксида кремния. После этого наносится слой поликристаллического кремния и еще один фотослой. Далее, таким же образом образуется второй слой. Для засветки каждого из слоев микропроцессора применяется своя маска.

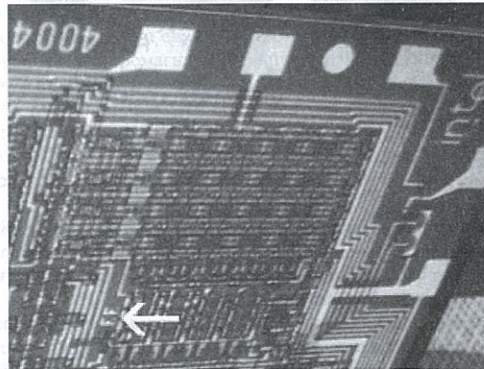


Рис. 2.45. Сильно увеличенный фрагмент внутренней структуры первого в мире микропроцессора (Intel 4004). Стрелкой отмечены буквы FF (Federico Faggin), вытравленные на кристалле

Формирование из чистого кремния полупроводников нужного типа проводимости и $p-n$ — переходов будущих транзисторов, осуществляют с помощью процесса ионной имплантации, при которой области кремниевой подложки, обработанные ультрафиолетом, бомбардируются ионами различных примесей. Ионы проникают в

подложку, обеспечивая необходимую электрическую проводимость этих областей.

Наложение новых слоев с последующим вытравливанием схемы осуществляется несколько раз, при этом для межслойных соединений в слоях оставляются очень малые по площади окошки, которые заполняются атомами металла и образуют соединения между слоями будущего микропроцессора (количество которых может достигать до 20 и более в современных микропроцессорах). По краям кристалла также оставляют тончайшие металлические полоски, к которым в дальнейшем прикрепляют внешние выводы микропроцессора. Общий производственный цикл состоит из более чем 250 стадий, по окончании которого готовый микропроцессор тщательно тестируется и встраивается в защитный корпус.

Микропроцессор выполняет следующие основные функции:

- чтение и дешифрацию команд из основной памяти;
- чтение данных из основной памяти и регистров адаптеров внешних устройств;
- обработку данных и их запись в основную память и регистры
- выработку управляющих сигналов для выходных устройств МУРЗ.

Конкретные задачи, выполняемые микропроцессором, определяются его программным обеспечением.

Различные типы микропроцессоров отличаются типом и размером памяти, набором команд, скоростью обработки данных, количеством входных и выходных линий, разрядностью данных. В общем виде структурная схема микропроцессора может иметь следующий вид (рис. 2.46).

Центральный процессор (Central Processor Unit - CPU) является обязательным узлом любого микропроцессорного устройства, его ядром — core. Некоторые современные суперпроизводительные микропроцессоры содержат несколько таких ядер, работающих параллельно под управлением master core (рис.2.47) и называются многоядерными процессорами ("multicore processor"). В состав ядра обычного CPU входит: арифметико-логическое устройство (ALU); регистр-аккумулятор (RAC); многоразрядный сдвигатель (Shifter);

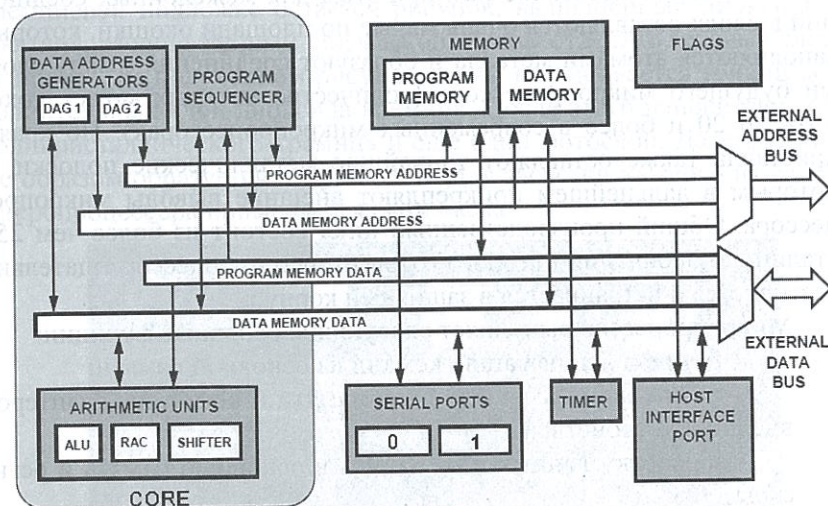


Рис. 2.46. Пример внутренней структуры серийно выпускаемого микропроцессора со встроенной памятью и некоторыми вспомогательными элементами

Арифметико-логическое устройство выполняет арифметические или логические операции над данными, представленными в двоичном или двоично-десятичном коде. Результат выполнения операции сохраняется в так называемом регистре-аккумуляторе.

Регистр-аккумулятор представляет собой ячейки оперативной памяти, но, в отличие от основной памяти, обмен информацией производится более короткими командами, т.е. регистр-аккумулятор является наиболее быстродействующим устройством памяти микропроцессора.

Многоразрядный сдвигатель (Shifter) с набором мультиплексоров используется при отработке логических команд сдвига и при выполнении операций умножения и деления. В бинарном вычислительном устройстве левый сдвиг двоичного числа на одну позицию

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы
дает тот же эффект, что и умножение на 2 (рис. 2.48), а правый сдвиг – деление на 2 (ноль сдвигается в новую позицию). Поскольку операция сдвига происходит намного быстрее, чем умножение и деление, она широко используется в качестве инструмента программной оптимизации.

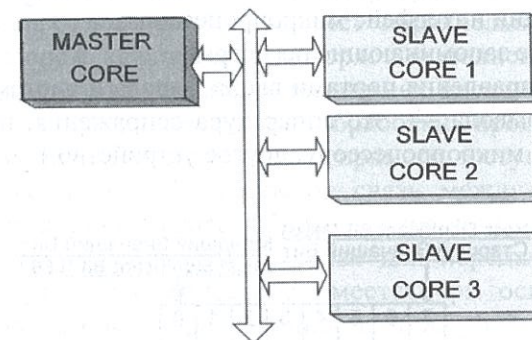


Рис. 2.47. Структура многоядерного процессора; Master core – управляющее (ведущее) ядро; Slave core – (исполнительное) ведомое ядро

Устройство управления и синхронизации координирует взаимодействие различных частей микропроцессора. В состав устройства управления и синхронизации входят тактовый генератор и формирователь тактовых импульсов, а также Program Sequencer. Для генерации импульсов синхронизации используется кварцевый генератор, имеющий внешний кварцевый резонатор. Частота тактового генератора определяет быстродействие микропроцессора.

Program Sequencer (or Controller-Sequencer) обеспечивает временный останов выполнения одной программы в целях оперативного выполнения другой, в данный момент более важной. Program Sequencer обслуживает процедуры прерывания, принимает запрос на прерывание от внешних устройств, определяет уровень приоритета этого запроса и выдает сигнал прерывания в микропроцессор.

Микропроцессорная память предназначена для кратковременного хранения, записи и выдачи информации, используемой в вычислениях непосредственно в ближайшие такты работы машины. Микропроцессорная память строится на регистрах и используется

для обеспечения высокого быстродействия МУРЗ, так как основная память не всегда обеспечивает скорость записи, поиска и считывания информации, необходимую для эффективной работы быстродействующего микропроцессора.

Интерфейсная система микропроцессора, предназначенная для связи с другими устройствами МУРЗ. Включает в себя:

- внутренний интерфейс микропроцессора;
- буферные запоминающие регистры;
- схемы управления портами ввода-вывода и системной шиной.

(Порт ввода-вывода — это аппаратура сопряжения, позволяющая подключить к микропроцессору, другое устройство.)



Рис.2.48 Использование сдвигателя для умножения на 2:
10111 — двоичное изображение числа 23; 101110 — двоичное изображение числа 46

К микропроцессору и системной шине наряду с типовыми внешними устройствами могут быть подключены и дополнительные платы с интегральными микросхемами, расширяющие и улучшающие функциональные возможности микропроцессора. К ним относятся математический сопроцессор, сопроцессор ввода-вывода, контроллер прерываний и др.

Математический сопроцессор используется для ускорения выполнения операций над двоичными числами с плавающей запятой, над двоично-кодированными десятичными числами, для

вычисления тригонометрических функций. Математический сопроцессор имеет свою систему команд и работает параллельно с основным микропроцессором, но под управлением последнего. В результате происходит ускорение выполнения операций в десятки раз. Современные модели микропроцессора обычно включают математический сопроцессор в свою структуру.

Сопроцессор ввода-вывода за счет параллельной работы с микропроцессором значительно ускоряет выполнение процедур ввода-вывода при обслуживании нескольких внешних устройств, освобождает микропроцессор от обработки процедур ввода-вывода, в том числе реализует режим прямого доступа к памяти.

Системные шины обеспечивают связь между различными элементами микропроцессора. Шина — это группа проводников, используемых в качестве линии связи для передачи цифровой информации. В микропроцессоре имеется три основных вида шин: это шина данных, адресная шина и шина управления. Шина данных обеспечивает передачу данных между узлами процессора. Адресная шина используется для передачи адреса ячейки памяти с целью получить данные из постоянного запоминающего устройства или оперативного запоминающего устройства. Шина управления используется для передачи управляющих сигналов от микропроцессора к другим элементам системы.

Важнейшими характеристиками микропроцессора являются: *Тактовая частота.* Характеризует быстродействие процессора. Его режим работы задается специальной микросхемой, называемой генератором тактовых импульсов. На выполнение процессором каждой операции отводится определенное количество тактов. Тактовая частота указывает, сколько элементарных операций выполняет микропроцессор за одну секунду. Первый микропроцессор 4004 типа работал на частоте 108 кГц, микропроцессор 486 серии — уже на частоте 33 МГц, а Pentium-IV — на 1.5 ГГц. В микропроцессорах, обозначение которых содержит символы DX2 или DX4, используется внутреннее удвоение (x2) или учетверение (x4) тактовой частоты.

Разрядность процессора — это максимальное количество разрядов двоичного числа (битов), которое одновременно может обрабатывать процессор. То есть, если процессор за один раз может обработать 8 бит информации, то процессор 8-разрядный, если —

32 бита, то процессор 32-разрядный и т.д. Чем больше разрядность процессора, тем больше информации он может обрабатывать в единицу времени и тем больше, при прочих равных условиях, производительность устройства. Например, микропроцессор 486 серии, который часто применяется в МУРЗ, является 32-битным (32 разрядным). В более простых технологических контроллерах широко применяются и более дешевые 8 и 16 разрядные процессоры. Как уже отмечалось, центральный процессор соединяется с остальными устройствами с помощью системной шины. Поскольку каждая из этих шин имеет свою разрядность, которая может не совпадать с разрядностью центрального процессора, то иногда разрядность центрального процессора обозначают двумя цифрами. Например, обозначение разрядности «32/64» означает, что процессор имеет 32-разрядную шину данных и 64-разрядную шину адреса. В МУРЗ не используются процессоры выше 32 разрядов. Сегодня 64-разрядные процессоры используются, прежде всего, в серверах, ориентированных на корпоративные сети, в которых работают приложения, требующие значительных вычислительных ресурсов и исключительной надежности систем, в банковской, производственной, инженерной и научно-исследовательской деятельности.

Порт – специальное устройство, через которое обеспечивает связь микропроцессора с внешними и периферийными устройствами. Для управления процессом передачи-приема данных служат communication controllers, расположенные на главной плате. При этом возникает проблема предотвращения несанкционированного или неквалифицированного доступа к внутренней логике и настройкам МУРЗ. В эпоху электромеханических реле, все присоединения выполнялись жестким монтажным проводом, стянутым в жгуты, после ввода в эксплуатацию реле закрывались защитными крышками и пломбировались. Это гарантировало защиту от несанкционированного или неквалифицированного доступа к реле.

В МУРЗ внутренняя логика работы, выполняемые функции и настройки могут быть легко изменены с помощью внешнего компьютера и даже с помощью удаленного доступа local area networks (Ethernet). Последствия такого вмешательства непредсказуемы и опасны, поэтому некоторые производители МУРЗ

предпринимают меры для предотвращения возможности такого вмешательства. Одной из таких мер является использование так называемой «жесткой логики» – алгоритма работы МУРЗ, заранее полностью согласованного с заказчиком и не подлежащего изменению в процессе эксплуатации защиты. Такой принцип положен в основу МУРЗ типов SPAC-800, SPAC-810, производимых в России по лицензии компании ABB.

«Полужесткая логика» (то есть алгоритм, допускающий ввод-вывод отдельных функций и уставок защит без доступа к изменению базовой логики) – это наиболее оправданный принцип, использующийся во многих типах МУРЗ.

Однако в последнее время все большее распространение получают МУРЗ с так называемой «свободно программируемой логикой», которая, по мнению производителей, обеспечивает наибольшую гибкость и универсальность релейной защиты и предоставляет потребителю самые широкие возможности по адаптации МУРЗ под его конкретные специфические потребности и особенности. К таким типам МУРЗ можно отнести новейшие устройства серий SIPROTEC компании Siemens, устройства SEPAM-80 производства Schneider Electric и многие другие. Процесс программирования этих устройств формализован и заключается в работе со специальными таблицами, матрицами, логическими элементами, логическими уравнениями и укрупненными блоками логики (часто весьма несовершенными и требующими глубокого анализа для правильного выбора). Естественно, что в МУРЗ такого типа широко применяются многочисленные пароли для разных уровней доступа. Например, в МУРЗ типа SIPROTEC предусмотрено более десятка уровней доступа, при этом ни одним из них не удается полностью отделить доступ к логике от доступа к вводу параметров настройки реле. Поэтому в процессе наладки МУРЗ на месте эксплуатации приходится открывать полный доступ к его программированию, что лишает смысла деление допуска с паролями по уровням. Более того, в эксплуатации можно без затруднений уничтожить всю заложенную проектировщиками логику защиты вместе с настройками и загрузить любую другую. «Стирание» паролей и всей другой информации происходит при перепрошивке RAM посредством про-

граммы «Firmware-Update», при этом можно заново установить в МУРЗ любую логику.

Совершенно очевидно, что оборотной стороной такой гибкости и универсальности является резко возросшая опасность несанкционированного или неквалифицированного доступа к реле. В этой связи имеют место попытки возврата к ограничению доступа к внутренней логике МУРЗ более надежными методами, применяющимися ранее в электромеханических реле. Так, например, в МУРЗ типа RCS-9671 (Transformer Differential Protection) китайской компании Nari-Relays для активации той или иной функции необходимо соединить монтажным проводом две точки на наружных выводных терминалах МУРЗ (то есть, установить соответствующую перемычку), обеспечивающую подачу плюсового потенциала (с отдельного, специально предназначенного для этого маломощного внутреннего источника питания напряжением 24 В) на вход, соответствующий активации данной функции. Очень удачное, по нашему мнению, решение проблемы.

2.6. Внутренний источник питания

Источник питания является важнейшей составной частью МУРЗ, от надежности которой зависит работоспособность релейной защиты. В МУРЗ используются исключительно импульсные источники питания (ИИП), которые были впервые разработаны в 60-х годах прошлого века, интенсивно развивались в течение десятков лет и сегодня почти полностью вытеснили линейные источники питания (ЛИП) практически во всех областях техники. В чем же разница между этими двумя типами источников питания и чем ИИП так хороши?

Широко применявшиеся повсеместно в технике на протяжении многих десятков лет ЛИП являются весьма простыми и даже примитивными устройствами (рис.2.49), состоящими всего лишь из нескольких элементов: понижающего трансформатора, выпрямителя, сглаживающего фильтра на основе конденсатора и полупроводникового стабилизатора (стабилитрон с мощным

транзистором или аналогичный по функции одиночный силовой полупроводниковый элемент).

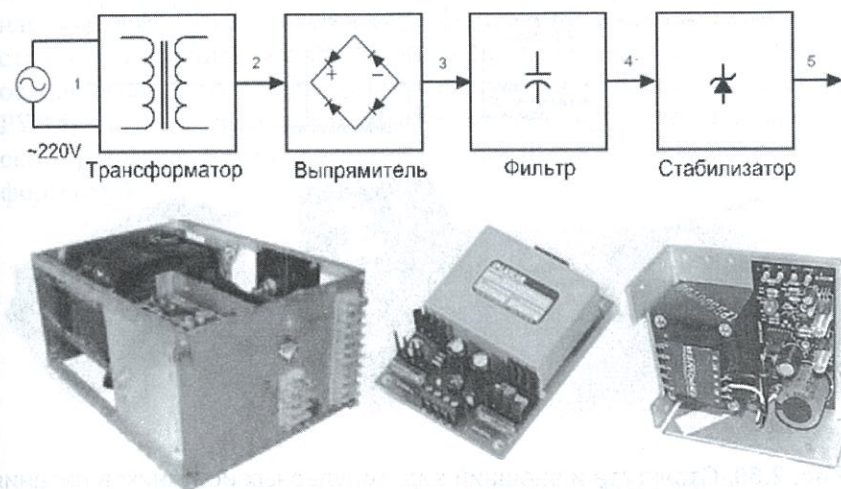


Рис. 2.49. Структура и внешний вид линейных источников питания

В отличие от них, ИИП являются значительно более сложными устройствами, работающими на высокой частоте и состоящими из сотен активных и пассивных элементов (рис. 2.50).

В чем же основные принципиальные отличия между этими двумя типами источников? В ЛИП входное переменное напряжение сначала понижается до необходимого уровня (или уровней, в случае многообмоточного трансформатора) с помощью трансформатора, затем выпрямляется диодным мостом, фильтруется с помощью электролитического конденсатора и стабилизируется нелинейным электронным элементом.

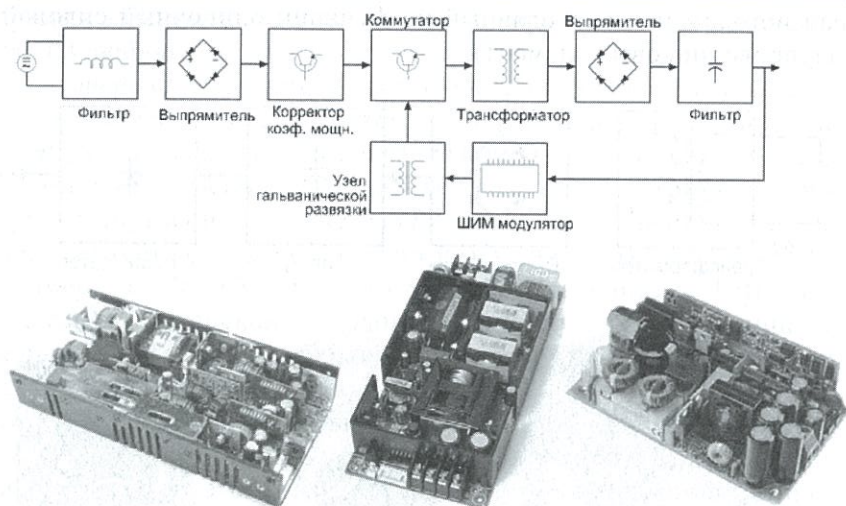


Рис. 2.50. Структура и внешний вид импульсных источников питания

Напряжение до стабилизирующего элемента выбирается большим, чем номинальное выходное напряжение источника, а его излишек гасится (рассеивается) в виде тепла на этом стабилизирующем элементе (что требует иногда использования радиаторов).

Наличие некоторого излишка напряжения позволяет осуществлять стабилизацию выходного напряжения источника, как при уменьшении, так и при увеличении входного напряжения за счет изменения доли энергии, рассеиваемой на стабилизирующем элементе. По этой причине к.п.д. такого источника всегда намного ниже единицы.

В ИИП входное переменное напряжение сначала выпрямляется диодным мостом (или просто проходит без изменения через диоды этого моста в случае питания источника от сети постоянного тока), сглаживается и поступает на коммутатор (обычно, ключевой элемент на базе MOSFET-транзистора), с помощью которого постоянное напряжение «нарезается» на узкие полоски (частота коммутатора составляет 70 – 700 кГц для мощных источников и 1 – 3 МГц для маломощных). Сформированные таким образом прямоугольные высокочастотные импульсы поступают на трансформатор, выход-

ное напряжение которого соответствует требуемому уровню напряжения, которое затем выпрямляется и фильтруется. Стабилизация уровня выходного напряжения при изменении уровня входного напряжения осуществляется с помощью цепи обратной связи, состоящей из специально предназначенного для этой цели драйвера, обеспечивающего широтно-импульсную модуляцию (ШИМ или PWM) сигнала управления коммутатором через узел гальванической развязки (обычно, дополнительный развязывающий трансформатор).

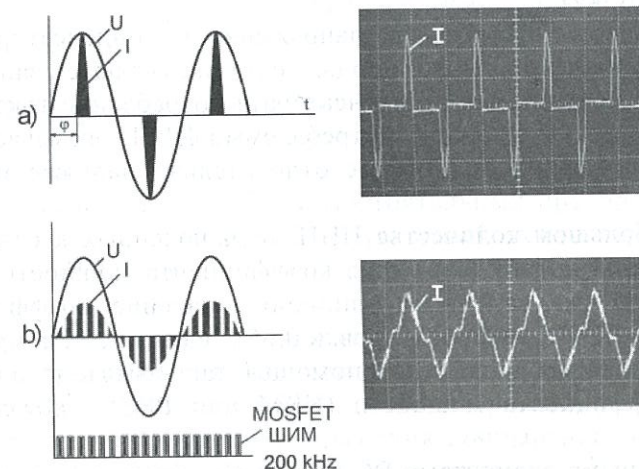


Рис. 2.51. Форма тока и сдвиг фаз между напряжением и током, потребляемым ИИП, без ККМ (а) и с ККМ (б)

Этот драйвер представляет собой небольшую, но достаточно сложную микросхему, отслеживающую выходное напряжение источника и изменяющую ширину импульсов управления в ту или иную сторону, при отклонении уровня выходного напряжения от заданного значения. Такую структуру имеют дешевые источники питания. Более качественные и дорогие ИИП содержат, как минимум, два дополнительных узла: входной высокочастотный фильтр и корректор коэффициента мощности (рис. 2.50).

Первый нужен для защиты питающей сети (то есть всех остальных потребителей, питающихся от той же сети, что и ИИП)

от высокочастотных гармоник, генерируемых в сеть ИИП. Второй применяется для увеличения коэффициента мощности источника питания. Проблема коррекции коэффициента мощности возникает в связи с наличием диодного моста и со сглаживающим конденсатором на входе ИИП.

При таком включении конденсатор потребляет из сети ток импульсами только в те моменты времени, когда мгновенное значение синусоидально изменяющегося входного напряжения становится больше напряжения на конденсаторе (из-за его разряда на нагрузку).

В остальное время, когда напряжение на конденсаторе больше мгновенного входного, диоды моста оказываются запертыми обратным напряжением конденсатора и потребление тока отсутствует. В результате, ток, потребляемый ИИП, оказывается существенно сдвинутым по фазе относительно напряжения (рис. 2.51 а).

При большом количестве ИИП, подключенных к сети переменного тока, общее снижение коэффициента мощности в сети становится уже заметным (типичное значение коэффициента мощности ИИП без корректировки 0.65), в связи с чем, применяется его активная коррекция с помощью так называемого корректора коэффициента мощности (ККМ или PFC – power phase corrector).

Основными элементами ВС являются: дроссель L , диод $VD2$, конденсатор $C2$ и быстродействующий ключевой элемент VT на базе MOSFET-транзистора. Работа этого устройства основана на явлении возникновения импульсов повышенного напряжения обратной полярности на индуктивности, при разрыве тока в ее цепи. Транзистор VT с большой частотой (обычно, 200 кГц) включает и выключает ток в цепи индуктивности L , а образующиеся при этом импульсы повышенного напряжения через диод $VD2$ заряжают конденсатор $C2$, от которого питается нагрузка (в нашем случае, собственно ИИП).

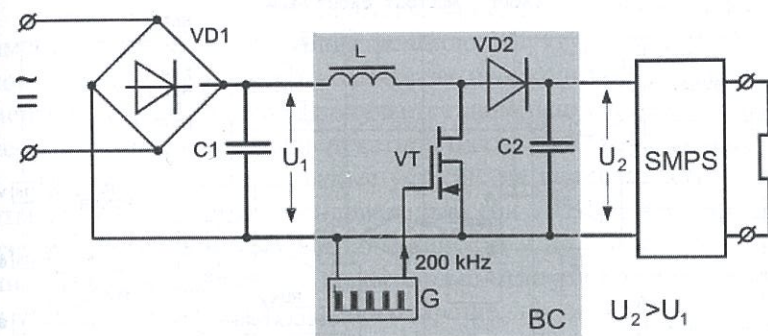


Рис. 2.52. Бустерный конвертер (BC) и его подключение к импульсному источнику питания (SMPS)

ККМ представляет собой самостоятельный преобразователь напряжения, так называемый «бустерный конвертер» (boost converter - BC), снабженный специальной схемой управления (рис. 2.52).

Таким образом, напряжение на конденсаторе $C2$ всегда выше входного напряжения ВС. Благодаря этому свойству ВС они получили большое распространение в электронных устройствах в качестве преобразователя напряжения стандартного гальванического элемента (1.2 – 1.5 В) в другое стандартное напряжение 5 В, необходимое для управления микросхемами. В нашем случае конденсатор $C2$ заряжается до напряжения 385 – 400 В. Благодаря тому, что конденсатор $C1$ имеет очень небольшую емкость (это, по сути, высокочастотный фильтр), а схема управления с ШИМ ключевого элемента постоянно отслеживает фазу входного переменного напряжения и обеспечивает соответствующую привязку импульсов управления (то есть импульсов тока) к фазе напряжения, удастся практически полностью устранить сдвиг фаз между током и напряжением, потребляемым накопительным конденсатором $C2$ (рис. 2.51 б). Кроме того, эта же схема управления обеспечивает жесткую стабилизацию напряжения заряда конденсатора $C2$.

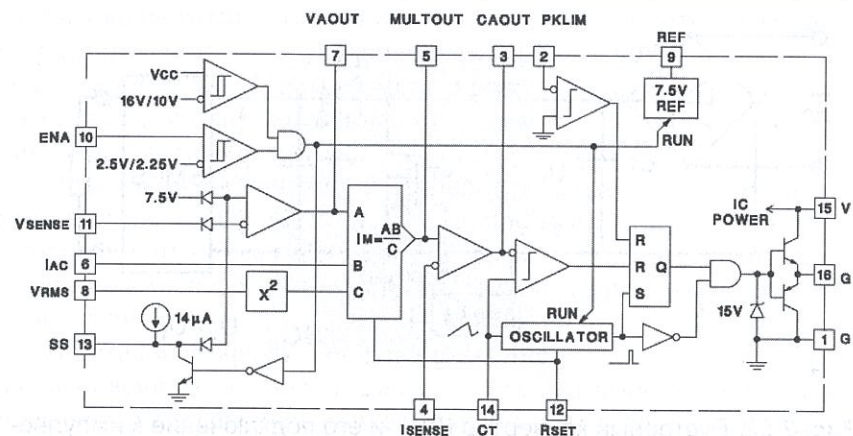


Рис. 2.53. Микросхема управления (УС 1854 типа) бустерным конвертером

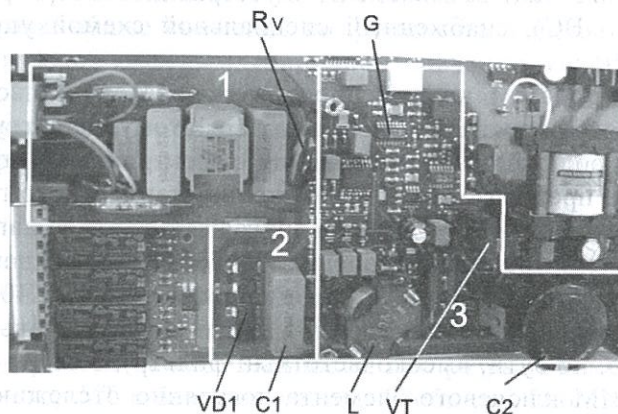


Рис. 2.54. Фрагмент печатной платы ИИП с бустерным конвертером:
1 – входной фильтр; 2 – входной выпрямительный мост (VD1) с
фильтрующим конденсатором C1; 3 – корректор коэффициента
мощности; R_V – варистор; G – микросхема управления бустерным
конвертером, L – дроссель; VT – коммутирующий транзистор; C2 –
высоковольтный накопительный конденсатор

Несмотря на малые габариты микросхемы управления ККМ, она имеет довольно сложную внутреннюю структуру (рис. 2.53), а в целом, с учетом большого количества необходимых пассивных элементов, устройство ККМ получается довольно сложным и занимает весьма заметную площадь печатной платы ИИП (рис. 2.54).

Почему же такие сложные устройства вытеснили с рынка простые и хорошо зарекомендовавшие себя ЛИП? Даже при беглом взгляде на два одинаковых по мощности и по свойствам источника питания хорошо заметны характерные отличия между ЛИП (слева) и ИИП (справа): ЛИП намного проще, но содержит значительно более крупный и тяжелый трансформатор (Т) (рис. 2.55).

Основными преимуществами ИИП перед ЛИП, которые обычно указываются в технической литературе являются:

1. Значительное уменьшение размеров и массы за счет меньшего понижающего трансформатора (высоочастотный трансформатор имеет значительно меньшие габариты и массу по сравнению с трансформатором промышленной частоты той же мощности).
2. Возможность работы в очень широком диапазоне изменения входного напряжения.
3. Значительно более высокий к.п.д. (до 90 – 95%, против 40 – 70 % для ЛИП).
4. От себя добавим еще одно важное преимущество: возможность работы от сети и переменного, и постоянного тока.

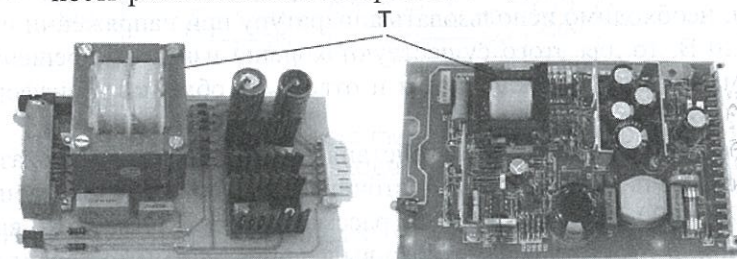


Рис. 2.55. Линейный (слева) и импульсный (справа) источники питания с одинаковыми техническими характеристиками.

Т – трансформатор

Плоский модуль ИИП (рис. 2.55, справа) является универсальным источником питания микропроцессорных реле защиты серии SPAC, SPAD, SPAU и др., который вдвигается по направляющим в корпус реле. Естественно, использовать в такой конструкции ЛИП с крупным трансформатором затруднительно.

Но, что мешает вместо одного крупного многообмоточного трансформатора с тремя выходными напряжениями применить три отдельных маленьких трансформатора, для которых вполне достаточно места на печатной плате ЛИП? В этом случае габаритные размеры ЛИП будут не намного отличаться от ИИП. Даже в случае мощного источника с одним уровнем выходного напряжения можно использовать несколько плоских трансформаторов, соединенных между собой параллельно. Так что наличие малого по размерам трансформатора не является абсолютным преимуществом ИИП.

Что касается очень широкого диапазона входных напряжений, при которых обеспечивается работоспособность ИИП за счет использования ШИМ в системе управления основного ключевого элемента, то это преимущество представляется нам весьма условным. Ну, действительно, так уж важно на практике, что ИИП может работать при входных напряжениях, изменяющихся в пределах от 48 до 312 В? Ведь этот диапазон охватывает сразу несколько рядов номинальных напряжений, таких как: 48, 60, 110, 127, 220 В. Совершенно очевидно, что в конкретной аппаратуре ИИП будет работать при каком-то одном номинальном напряжении (изменяющемся в пределах не более, чем $\pm 20\%$), а не сразу на всех одновременно. А если необходимо использовать аппаратуру при напряжении и 110 В и 220 В, то для этого существуют хорошо известные решения в виде маленького переключателя и отвода от обмотки трансформатора.

Коэффициент полезного действия является важным показателем, если речь идет о мощном источнике, а не об источнике мощностью 25 - 100 Ватт, которые мы рассматриваем. Кроме того, высокий к.п.д. и отсутствие заметного выделения тепла (что характерно для ИИП) может быть важно в миниатюрном переносном источнике питания полностью закрытого исполнения, например в таком, как источник питания лэптопов. Во множестве других случаев, например в источниках питания контроллеров и электронных реле

промышленного назначения, вопрос о к.п.д. источника питания не является актуальным.

Возможность работы от сети постоянного тока является важнейшим и абсолютным преимуществом ИИП. Линейные источники принципиально не могут работать от сети постоянного тока.

Вот, кратко, анализ преимуществ ИИП перед ЛИП. Рассмотрим теперь недостатки ИИП.

К недостаткам ИИП можно отнести наличие высокого уровня импульсных шумов на выходе источника, рис. 2.56.

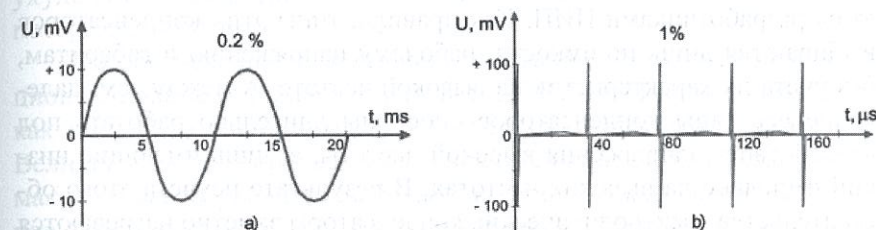


Рис. 2.56. Типовые уровни пульсаций выходного напряжения для ЛИП (а) и ИИП (б) с выходным напряжением 12 В

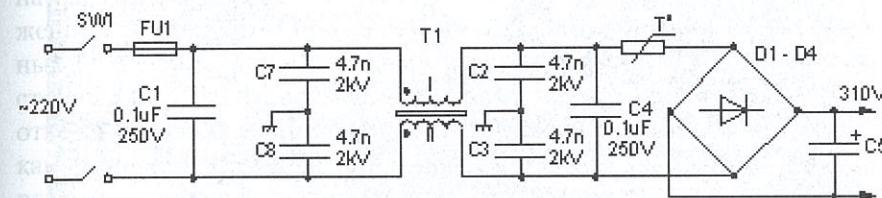


Рис. 2.57. Схема типового фильтра, устанавливаемого на входе ИИП

В отличие от ЛИП с его слабой 50-герцовой пульсацией, пульсации выходного напряжения в ИИП как правило, имеют значительно большую амплитуду и лежат в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких мегагерц, что создает проблемы распространения излучений в цепи электронной аппаратуры, для питания которой предназначен ИИП, а также (по проводам и даже через эфир)

в цепи совершенно посторонних электронных приборов. Кроме того, в ИИП приходится принимать специальные меры для предотвращения проникновения высокочастотных излучений в питающую сеть (по которой они распространяются и могут нарушить работу других электронных приборов) путем использования специальных фильтров, рис. 2.57.

Наличие высокочастотной составляющей в выходном напряжении и в промежуточных узлах схемы предъявляет повышенные требования к многочисленным электролитическим конденсаторам, имеющимся в схеме ИИП, которые, к сожалению, редко учитываются разработчиками ИИП. Как правило, типы этих конденсаторов выбираются лишь по емкости, рабочему напряжению и габаритам, без учета их характеристик на высокой частоте. А между тем, далеко не все типы конденсаторов способны длительно работать под воздействием напряжения высокой частоты, а лишь имеющие низкий импеданс на высоких частотах. В результате неучета этого обстоятельства электролитические конденсаторы заметно нагреваются из-за повышенных диэлектрических потерь на высокой частоте.

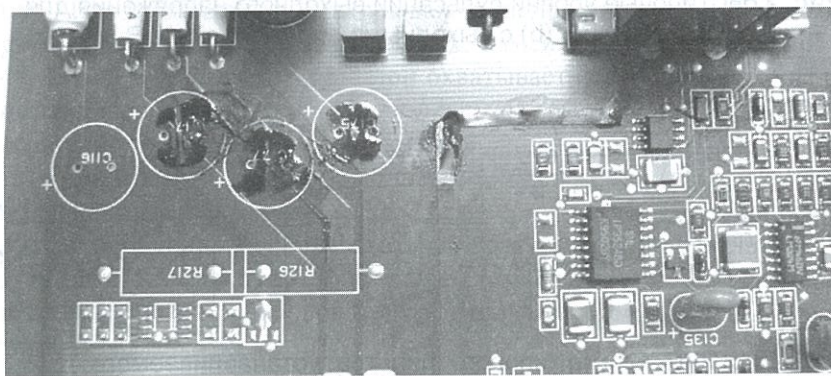


Рис. 2.58. Медные дорожки печатной платы ИИП, поврежденные просочившимся из конденсаторов электролитом

Повышенная температура электролита интенсифицирует химические реакции в конденсаторе, что, в свою очередь приводит к ускоренному растворению элементов корпуса конденсатора и выте-

канию электролита прямо на печатную плату, что при очень плотном монтаже приводит к коротким замыканиям между разнотенциальными выводами или, наоборот, к обрыву цепей вследствие растворения медных дорожек печатной платы (даже, несмотря на наличие прочного покрытия дорожек платы) (рис. 2.58).

Другой распространенный тип повреждений ИИП, обусловленный повышенной температурой электролита, – быстрое (в течение нескольких лет) высыхание электролита и значительное (на 30 – 70%) снижение емкости конденсаторов, что приводит к резкому ухудшению характеристик источника питания, а иногда и полной потере его работоспособности.

Для обеспечения эффективной работы КKM, силовой коммутационный элемент (обычно, транзистор MOSFET) должен обладать как можно более низким сопротивлением в открытом состоянии. Величина этого сопротивления в значительной степени зависит от максимального рабочего напряжения транзистора. Для транзисторов с максимальным рабочим напряжением 500 – 600 В это сопротивление составляет 0.05 – 0.3 Ома, тогда как для транзисторов на более высокие напряжения (1000 – 1500 В) это сопротивление на один – два порядка выше (например, 12 Ом для транзистора 2SK1794 на напряжение 900 В; 17 Ом для транзистора IXTP05N100 на напряжение 1000 В; 7 Ом для транзистора STP4N150 на напряжение 1500 В). Этим объясняется выбор относительно низковольтных (с максимальным рабочим напряжением 500 – 600 В) транзисторов для КKM. Например, в реальных конструкциях ИИП весьма ответственных устройств, используемых в электроэнергетике, таких как микропроцессорные реле защиты и регистраторы аварийных режимов, широко применяются транзисторы типов IRF440, APT5025 и др. с максимальным напряжением 500 В, что совершенно недостаточно для работы в промышленной электрической сети с напряжением 220 В из-за наличия значительных коммутационных и атмосферных перенапряжений. Как известно, для защиты от таких перенапряжений электронная аппаратура снабжается, обычно варисторами. Однако, из-за недостаточной нелинейности характеристики вблизи рабочей точки, варисторы выбираются таким образом, чтобы между длительно приложенным рабочим напряжением и напряжением срабатывания под воздействием импульсного перенапряжения (так называемое “clamping voltage”) была бы довольно

существенная разница. Например, для варисторов любого типа, предназначенных для длительной работы при номинальном напряжении переменного тока 220 В clamping voltage составляет 650 – 700 В. В источниках питания упомянутых выше микропроцессорных устройств использованы варисторы типа 20K431 с clamping voltage 710 В. Это означает, что при воздействии импульсов напряжения с амплитудой ниже 700 В варистор не обеспечит защиты электронных компонентов источника питания, особенно силовых транзисторов (500 В), включенных напрямую в цепь сети.

На высокой рабочей частоте трансформатор и катушка индуктивности в ККМ обладают высоким импедансом, ограничивающим ток, протекающий через них и через коммутирующие элементы. Однако сбой в работе микросхем, обеспечивающих управление силовыми ключами ККМ или основного силового ключа ИИП (например, в результате воздействия импульсной помехи), приводит к переходу в режим работы на постоянном токе (то есть с очень низким импедансом) и резкой токовой перегрузке сразу многих силовых элементов схемы и мгновенному выходу их из строя. Учитывая высокую плотность монтажа ИИП, это приводит часто к повреждению соседних элементов схемы, выгоранию целых участков печатного монтажа. Вообще, что касается надежности, должно быть совершенно ясно, что надежность такого сложного устройства, как ИИП, содержащего множество сложных микросхем и силовых элементов, в том числе работающих на высоких напряжениях в импульсном режиме с высокими скоростями нарастания тока и напряжения, всегда будет заметно ниже надежности такого простого устройства, как ЛИП, в котором имеется всего лишь несколько электронных компонентов, работающих в линейном режиме.

Плотность монтажа и энергоемкость ИИП постоянно растут, например, источник типа ЕМА212 (рис. 2.50, справа), при размерах 12.7x7.62x3 см имеет мощность 200 Вт. Этому способствует применение схем управления на миниатюрных элементах поверхностного монтажа, очень плотный монтаж силовых элементов, постоянный рост рабочей частоты. Когда-то эта частота не превышала 50 – 100 кГц. Сейчас уже многие мощные источники с выходным током до 20 А работают на частоте 300 – 600 кГц, а менее мощные, например, работающие под управлением контроллера ADP1621, уже на частоте более 1 МГц и более, что способствует дальнейшему сни-

жению массогабаритных показателей ИИП. Обратной стороной этой медали (которую всячески рекламируют как достоинство ИИП) становится практически полная потеря ремонтпригодности таких устройств.

А нужны ли вообще встроенные источники питания в электронных приборах, контроллерах промышленного назначения, МУРЗ, предназначенные для установки в шкафах управления?

Почему бы не выпускать для комплектных систем автоматики такие устройства, как контроллеры, электронные реле, электронные измерительные преобразователи и т.п., вообще без источников питания, а лишь с разъемом, предназначенным для подключения внешнего источника? Этот внешний источник питания, расположенный в шкафу, должен быть, по нашему мнению, линейным, иметь хороший запас по мощности, должен быть снабжен необходимыми элементами для защиты от перенапряжений, коротких замыканий и т.п. Более того, в шкафах, относящихся к системам автоматики повышенной надежности, таких линейных источников, соединенных между собой через диод, должно быть два (так называемый «горячий» резерв). Как это ни покажется странным, но в эпоху импульсных источников питания существует множество компаний (VXI, Lascar, Callex Electronics, Power One, HiTek Power, R3 Power и много других), продолжающих выпускать ЛИП, что свидетельствует об их популярности в определенных областях техники и об их доступности для практического применения. По нашему мнению, указанный выше подход позволил бы значительно повысить надежность систем автоматики, телеуправления, релейной защиты (с питанием от сети переменного тока) без увеличения ее стоимости (вследствие меньшей стоимости электронных приборов без встроенных источников питания).

Аналогичный подход может использоваться и в случае питания электронной аппаратуры (например, тех же микропроцессорных реле защиты), установленной в шкафах, от сети постоянного тока, с той лишь разницей, что два общих на шкаф источника питания («горячий» резерв) должны быть импульсными, а не линейными. При этом эти источники должны быть подвергнуты серьезной реконструкции. Во-первых, из них должны быть исключены корректоры коэффициента мощности, как совершенно бессмысленные узлы при питании от сети постоянного тока, что само по себе уже по-

высит надежность источников. Во-вторых, эти ИИП шкафного типа должны быть достаточно крупными и удобными для поиска неисправностей и ремонта (в источниках шкафного типа нет смысла гнаться за компактностью), они не должны содержать элементов поверхностного монтажа. В-третьих, многочисленные электролитические конденсаторы, имеющиеся в ИИП, должны быть сконцентрированы на отдельной плате, предназначенной для простой замены ее после каждых 5 лет эксплуатации (то есть до того, как конденсаторы начнут выходить из строя). Сетевой фильтр должен использоваться готовый (такие фильтры представлены на рынке сотнями моделей), а не собираться из отдельных элементов, для того, чтобы его можно было просто и быстро заменить в случае необходимости. Предлагаемые меры, по нашему мнению, позволят снизить зависимость микропроцессорных устройств релейной защиты от вторичных источников электропитания и значительно повысить ее надежность.

2.7. Система самодиагностики МУРЗ

Поскольку современные МУРЗ являются устройствами многофункциональными, то есть в одном единственном устройстве сконцентрированы функции 10 – 15 видов релейной защиты как, например, в МУРЗ типа М-3430 (рис. 2.59), то совершенно очевидно, что оставлять такое устройство без «присмотра» недопустимо, ибо отказ любого из общих блоков такого МУРЗ (источника питания, микропроцессора, памяти и т.д.) приведет к полному отказу сразу всех видов защит генератора. По этой причине современные многофункциональные МУРЗ снабжаются системой внутренней самодиагностики, которой, по утверждению производителей, охвачено 70 – 80% всех внутренних элементов МУРЗ. Эта система призвана блокировать функционирование МУРЗ и выдавать соответствующий сигнал в случае обнаружения неисправности. При наличии резервной защиты, такая система может также активировать ее после блокирования основной. В связи с таким широким охватом системой самодиагностики производители говорят о том, что нет необходимости проверять исправность МУРЗ раз в 2 года, как это делалось, обычно, для электромеханических реле. Правда, производители специального испытательного оборудования, предназначенного

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы как раз для такой периодической проверки МУРЗ, утверждают, что даже теоретически невозможно контролировать более 30 – 40% внутренних элементов МУРЗ.

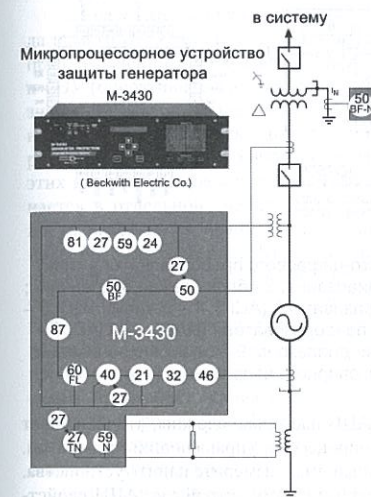


Рис.2.59.
Функциональный состав комплектного микропроцессорного устройства защиты генератора типа М-3430 (Beckwith Electric Co.):
21 – дистанционная защита; 24 – защита от перевозбуждения генератора; 27 – реле пониженного напряжения; 27TN – реле пониженного напряжения по 3 гармонике; 32 – реле направления мощности; 40 – реле гашения поля генератора; 46 – реле контроля баланса фаз тока; 50 – реле контроля предохранителей в цепи трансформатора напряжения; 50BF – токовое реле контроля исправности выключателя; 59 – защита от повышенного напряжения; 59N – реле напряжения нулевой последовательности; 60FL – реле контроля предохранителей в цепи трансформатора напряжения; 81 – реле частоты; 87 – дифференциальная защита.

Как же построена эта система?

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Как уже отмечалось ранее, все АЦП работают путем выборки входных значений через фиксированные интервалы времени и таким образом преобразуют синусоидальный сигнал в набор фиксированных амплитуд. Как можно видеть из приведенного на (рис. 2.60) примера, это довольно сложное устройство, осуществ-

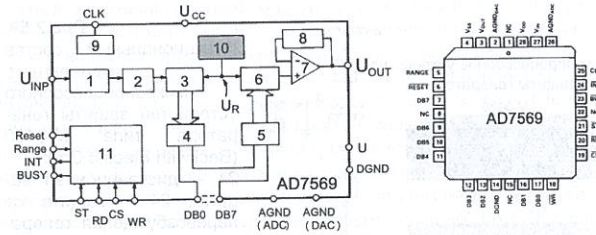


Рис. 2.60. Структура аналого-цифрового преобразователя типа AD7569: 1 – блок установки диапазона; 2 – блок слежения/хранения; 3 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 – регистр АЦП; 5 – регистр цифро-аналогового преобразователя (ЦАП); 6 – ЦАП; 7 – усилитель; 8 – блок установки диапазона; 9 – блок синхронизации; 10 – источник опорного напряжения

Некоторые современные АЦП настолько сложны, что включают в себя даже небольшой микропроцессор, управляющий их работой. АЦП – это фактически главный узел измерительного устройства. Как и любому сложному измерительному устройству АЦП свойственны различные погрешности и ошибки преобразования входной величины. Это ошибки квантования; аддитивная и мультипликативная погрешности; дифференциальная и интегральная нелинейности передаточной характеристики; апертурная погрешность; ошибка, вызванная наложением частот (aliasing).

Как же можно контролировать в процессе непрерывно изменяющейся входной величины исправность такого сложного устройства? А помните старый анекдот про пьяного, который искал утерянный бумажник под фонарем? На вопрос, почему он ищет под фонарем, а не там, где потерял бумажник, он ответил, что под фонарем светлее. По такому же принципу работает и так называемая «самодиагностика» АЦП. Поскольку единственным элементом с неизменным уровнем сигнала в процессе работы АЦП является ис-

точник опорного напряжения 10, то именно на его мониторинге и основана, в большинстве случаев, так называемая «самодиагностика» АЦП. О пользе и эффективности такой самодиагностики читатель может судить сам.

Память. Как мы уже знаем, в МУРЗ имеется два различных вида памяти: ПЗУ (постоянное запоминающее устройство или ROM), предназначенное для хранения управляющей программы и уставок, и ОЗУ (оперативное запоминающее устройство или RAM), предназначенное для временного хранения результатов измерения входных величин и промежуточных вычислений. Управляющий алгоритм представляет собой набор определенных числовых кодов. Из этих кодов составляется некая контрольная сумма, которая запоминается в отдельной ячейке памяти. В процессе работы МУРЗ эта предварительно записанная контрольная сумма периодически сравнивается с фактической. Несовпадение этих сумм должно указывать на неисправность ПЗУ. Понятно, что процесс вычисления фактической контрольной суммы и сравнения ее с предварительно записанной суммой – это процесс дискретный, производимый с определенными интервалами. А что будет, если повреждение возникнет в промежутке времени между интервалами сравнения контрольных сумм? Произойдет ложное срабатывание реле защиты и отключение линии электропередач? Вопрос отнюдь не гипотетический. Такие реальные случаи не выявленных системой самодиагностики сбоев, описаны в литературе.

Ситуация с самотестированием ОЗУ обстоит намного сложнее, так как содержимое ОЗУ постоянно изменяется случайным образом, причем с большой частотой, в процессе работы МУРЗ. Очевидно, что очень сложно тестировать ОЗУ в процессе функционирования (то есть диагностировать так называемые «динамические сбои»), постоянно перезаписываемые с большой частотой ячейки памяти. Поэтому, как правило, ОЗУ тестируется в автоматическом режиме путем периодического записывания в специально зарезервированные для этого ячейки памяти некоего постоянного числа и периодического считывания этого числа с последующим сравнением этих двух чисел. Совпадение этих чисел должно, по замыслу производителей, якобы подтверждать исправность всего ОЗУ, хотя непонятно, как можно судить об исправности всего ОЗУ по факту сохранения информации в нескольких ячейках памяти. Кроме то-

го, хорошо известно, что отсутствие статических ошибок памяти абсолютно не гарантирует возникновение динамических ошибок, то есть ошибок, возникающих непосредственно в процессе записи и считывания информации.

Вопрос о самодиагностике элементов памяти МУРЗ в действительности намного сложнее, поскольку в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется.

Центральный процессор (ЦП). В отличие от описанных выше сложностей с контролем исправности памяти, самоконтроль ЦП выглядит достаточно простым (рис. 2.61).

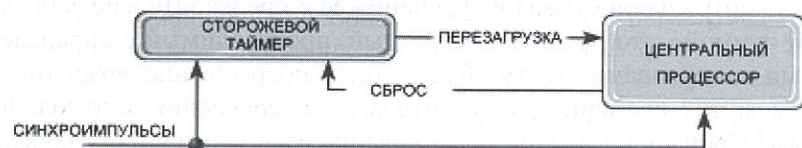


Рис. 2.61. Принцип автоматического контроля исправности микропроцессора с помощью сторожевого таймера

Он просто посылает контрольные импульсы с заданным периодом следования в так называемый «watchdog timer» – сторожевой таймер (“watchdog” – дословно «сторожевой пес»), который сбрасывается в исходное состояние с приходом каждого нового контрольного импульса, после чего начинает новый отсчет времени. Если к определенному моменту времени с ЦП не поступил очередной контрольный импульс, таймер запускает процесс перезагрузки ЦП. При серьезной неисправности микропроцессора и его «зависании» при перезагрузке, которое обнаруживается таймером как повторное отсутствие контрольного сигнала, происходит блокирование ЦП и выдача сигнала о неисправности центрального процессора. Работа по отслеживанию контрольных импульсов сторожевым таймером

синхронизирована с помощью внешних синхроимпульсов (так называемое «стробирование»). Иногда сторожевые таймеры встраиваются непосредственно в микропроцессор, иногда (что предпочтительнее) представляют собой внешние специализированные интегральные микросхемы. Примером таких устройств могут служить микросхемы из серии ADM690 – ADM695, производимые компанией Analog Devices. Такой маленький чип содержит не только сторожевой таймер, но также и монитор напряжения питания ЦП. Пауза между контрольными импульсами сторожевого таймера этой серии может быть 0.1 или 1.6 сек.

Совершенно очевидно, что проверить таким образом исправность сотен тысяч транзисторных наноструктур, из которых собственно и состоит любой микропроцессор, абсолютно невозможно. Речь может идти о мониторинге лишь общей работоспособности ЦП, то есть о том, жив он или мертв. При очень сложной внутренней структуре ЦП, содержащей большое количество узлов (регистры для временного хранения команд, данных и адресов; арифметико-логическое устройство; стек, система управления и синхронизации и т.д.) и микроэлементов, контрольные сигналы с ЦП могут продолжать поступать на сторожевой таймер, даже если часть внутренней структуры ЦП окажется поврежденной. Очевидно, что повреждения участков структуры ЦП (или участков его внутренней управляющей программы) могут проявиться только во время работы (то есть активизации) этих участков. Если эти участки ЦП активизируются лишь при сигналах, соответствующих аварийным режимам в электрической сети, то это означает, что сторожевой таймер – это слабое утешение.

Сам по себе сторожевой таймер – это устройство, выполненное по такой же технологии, как и все остальные устройства микроэлектроники (рис. 2.62) и, точно так, как и все остальные устройства, содержащие микроэлектронные компоненты, подвержен отказам и сбоям в работе. Вследствие описанного выше алгоритма работы сторожевого таймера, его отказ в процессе нормального функционирования МУРЗ может привести либо к блокированию ЦП и выходу из строя всего МУРЗ, либо к тому, что он не заметит «зависания» ЦП, в результате чего релейная защита не сработает должным образом при возникновении аварийного режима. Таким образом, работоспособность всего МУРЗ оказывается в очень сильной зави-

симости от исправности одного маленького чипа, называемого «watchdog».

Еще одним важным обстоятельством является то, что ЦП во все не является каким-то отдельно стоящим элементом, правильное функционирование которого в составе МУРЗ не зависит от исправности десятков других сложных интегральных микросхем, с которыми связан ЦП, но самодиагностика которых не предусмотрена.

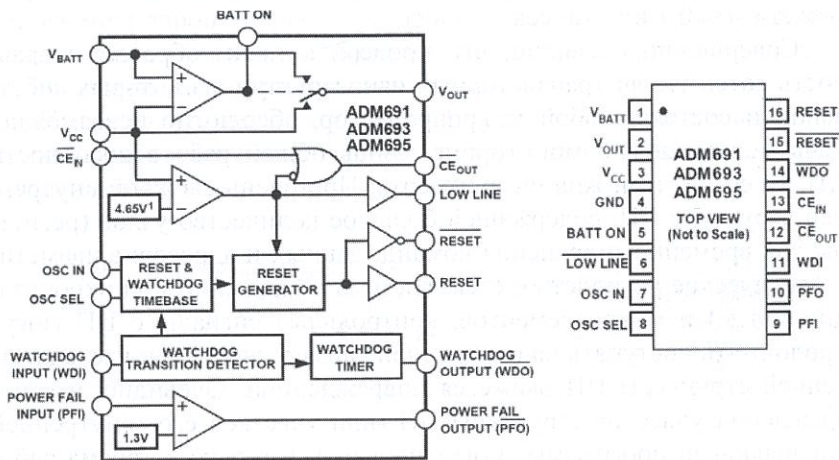


Рис. 2.62. Блок-схема сторожевого таймера («watchdog») серии ADM691 – ADM695, производимого компанией Analog Devices.

Достаточно взглянуть на печатную плату блока центрального процессора, чтобы понять, что исправность самого ЦП еще не говорит об исправности всего этого блока.

Повреждение любого из многочисленных микросхемных компонентов этой многослойной платы с неизбежностью приведет к нарушению правильного функционирования МУРЗ, и никакой watchdog здесь не поможет.

Источник питания. Микропроцессоры, обычно, весьма чувствительны к уровню питающего напряжения и могут производить непредсказуемые операции при определенном снижении напряжения питания, в связи с чем в МУРЗ осуществляется по-

стоянный мониторинг уровня напряжения питания ЦП. Как отмечалось выше, микросхемы семейства ADM 691-695 могут быть использованы для непрерывного контроля напряжения питания МУРЗ. Как и в случае со сторожевым таймером, эта микросхема производит генерацию сигнала, блокирующего работу ЦП при недопустимом снижении напряжения питания. Блокирующий сигнал остается до тех пор, пока напряжение питания не восстановится.

Выходные электромагнитные реле. Как показано в исследованиях, выполненных нами ранее, контакты миниатюрных электромагнитных реле (обычно используемых во всех типах МУРЗ в качестве выходных элементов, непосредственно управляющих отключающими катушками высоковольтных выключателей или катушками промежуточных реле) работают со значительной перегрузкой. Поэтому надежность этих реле существенно снижена по сравнению с величиной, нормируемой заводом-изготовителем. С другой стороны, в рекламных проспектах МУРЗ различных производителей обязательно отмечается, что исправность таких важных элементов, как выходные реле, непрерывно контролируется средствами самодиагностики МУРЗ. В действительности оказывается, что в большинстве случаев контролируются вовсе не контакты реле, как наиболее нагруженные элементы, а лишь целостность обмотки управления реле, путем пропускания через нее постоянного слабого тока, не вызывающего срабатывания. Попытки контролировать положение контактов выходных реле (как, например, это сделано в рассмотренном ранее реле типа Т60) вряд ли можно признать успешными из-за сложности, неудобства и малой эффективности.

Узлы цифровых и аналоговых входов. Как было показано выше, узел цифровых входов – это набор мощных гасящих резисторов, оптронов, электронных фильтров, мультиплексоров и т.д., смонтированных, обычно, на плате вместе с выходными реле, а узел аналоговых входов – это трансформаторы тока и напряжения, смонтированные, как правило, на отдельной плате.

По объяснению некоторых производителей, эти узлы только частично охвачены самодиагностикой, причем без всяких пояснений того, как именно это сделано, хотя некоторые специалисты отмечают, что в действительности они вовсе не охвачены самодиаг-

ностикой. Платы аналоговых и цифровых входов МУРЗ имеют, как правило, несколько различных конфигураций. Тип платы, установленной в данном конкретном МУРЗ, должен быть обязательно введен в его память. Для того, чтобы прояснить ситуацию и расставить точки над i , мы заменили плату входов у МУРЗ типа REL316, тип которой записан в его памяти, на плату другого типа без изменения записи в памяти МУРЗ и включили его. Оказалось, что МУРЗ загружается в нормальный режим работы, совершенно не замечая подмены целой платы. Естественно, что правильно функционировать он уже не будет. О какой же самодиагностике исправности внутренних компонентов этих узлов вообще может идти речь в такой ситуации? Как говорится, комментарии излишни.

В заключение этого раздела следует отметить, что вопреки распространенному мнению, внутренняя самодиагностика на самом деле не является средством, предназначенным для снижения интенсивности отказов МУРЗ, то есть повышения его надежности. Целью такой самодиагностики является предотвращение ложных срабатываний (или, наоборот, несрабатываний, когда это требуется) релейной защиты и выдача сигнала тревоги о неисправности МУРЗ до возникновения аварийного режима в сети, а не во время его.

2. 8. Новая концепция построения МУРЗ

Микропроцессорные устройства релейной защиты интенсивно вытесняют сегодня с рынка все другие типы устройств релейной защиты, поскольку все ведущие мировые лидеры в этой области практически полностью прекратили производство всех других видов реле защиты для электроэнергетики. Появившись впервые 20 лет назад в электроэнергетике эти устройства вызвали бурную эйфорию среди специалистов. В технической литературе появилась масса восторженных публикаций, на все лады восхваляющих преимущества и достоинства МУРЗ. Однако, любому здравомыслящему специалисту понятно, что идеальных устройств в технике не бывает и даже у МУРЗ имеется масса технических проблем и недостатков, которые уже привели к заметному снижению аппаратной надежности релейной защиты [2.1-2.4] и росту затрат на нее.

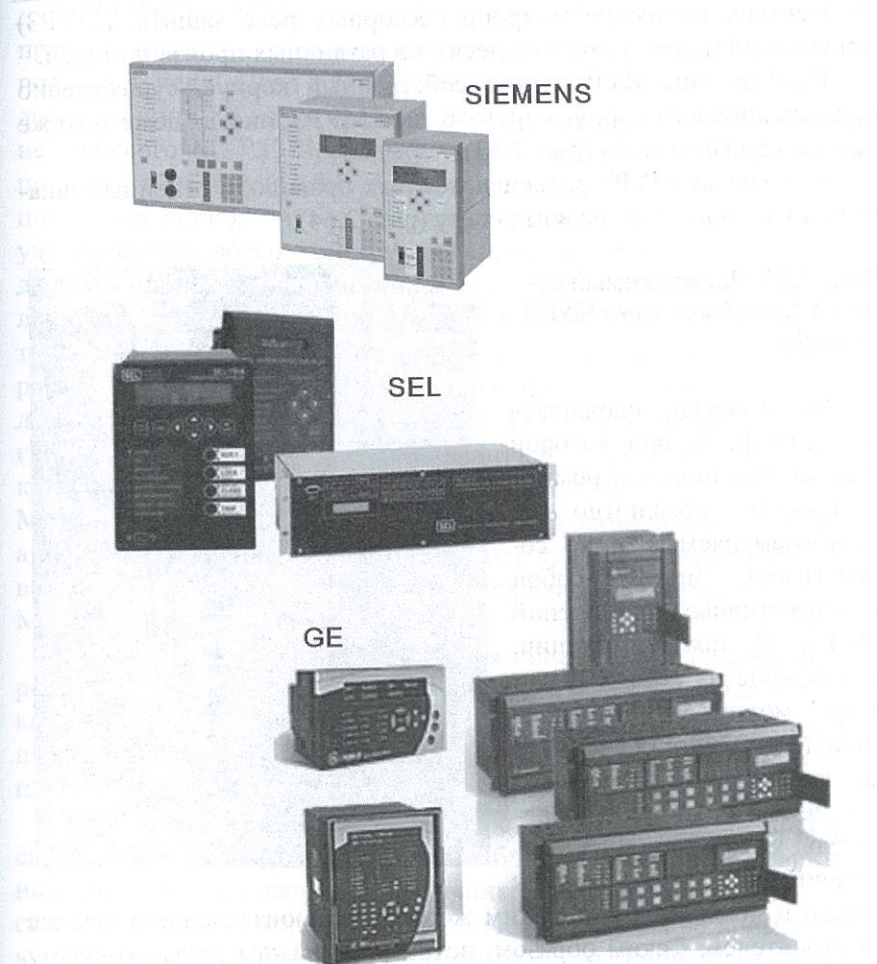


Рис. 2.63. Внешний вид современных МУРЗ различных производителей

Поскольку никакой альтернативы МУРЗ сегодня не осталось, возникает проблема компенсации тех негативных последствий, которые привнесли с собой в релейную защиту МУРЗ. Автором предлагается новая концепция построения МУРЗ, способная, по его мнению, решить многие актуальные проблемы МУРЗ.

Сегодня на рынке микропроцессорных реле защиты (МУРЗ) присутствуют сотни моделей десятков различных производителей.

Каждый тип МУРЗ имеет собственный корпус, существенно отличающийся от корпуса другого типа МУРЗ, иногда даже того же самого производителя (рис. 2.63).

Отдельные МУРЗ размещаются, как правило, в релейных шкафах: по 3 – 5 штук в каждом шкафу (рис. 2.64).

Рис. 2.64. Применяемый сегодня способ монтажа МУРЗ в шкафы



Исторически сложилась ситуация [2.5], при которой сегодня мы имеем огромное количество абсолютно не взаимозаменяемых и не совместимых между собой конструктивных исполнений МУРЗ. В такой ситуации, при выходе из строя какого-либо модуля конкретного типа МУРЗ, установленного на конкретной подстанции или электростанции, потребитель может заменить вышедший из строя модуль только и исключительно таким же самым, произведенным тем же изготовителем. Таким образом, потратив однажды круглую сумму на приобретение комплекта МУРЗ у одного из производителей, потребитель, фактически, попадает в экономическую зависимость к этому производителю на период в 10 – 15 лет, поскольку после совершения сделки для потребителя уже не имеет значения наличие нескольких разных производителей на рынке, так как он не может воспользоваться изделиями других производителей. Выбраться из этой ситуации можно, только потратив еще раз не менее круглую сумму на приобретение комплекта МУРЗ другого производителя (и, таким образом, из одной кабалы попасть в другую). А что делает

производитель в ситуации абсолютного монополиста? Правильно: повышает цену! Цена одного запасного модуля для МУРЗ может доходить чуть ли не до трети и даже половины цены всего весьма не дешевого МУРЗ! Поскольку потребителю некуда деваться, он покупает и по такой цене. А что происходит через 8 – 10 лет эксплуатации МУРЗ? А вот что: производитель за это время освоил уже несколько новых конструкций и ему становится невыгодно содержать производственные мощности для выпуска запасных модулей для старых реле и он прекращает их выпускать. Что в такой ситуации вынужден делать потребитель? Правильно: выбросить старый МУРЗ, даже если в нем вышел из строя всего лишь один из модулей (печатные платы современных МУРЗ выполнены по технологии, не предусматривающей их ремонт), и приобрести новый. Таким образом, проблема недостаточной аппаратной надежности МУРЗ [2.1-2.4] перерастает в серьезную экономическую проблему, а наличие встроеной самодиагностики, так рекламируемой производителями, никак не влияет на интенсивность поломок и отказов МУРЗ.

Такой известный путь повышения аппаратной надежности, как резервирование, также довольно затруднителен в случае с МУРЗ ввиду их высокой стоимости и нехватки средств даже на переоснащение основного комплекта защит, не говоря уже о резервном комплекте.

Другой путь повышения надежности электронной аппаратуры, связанный с превентивной заменой блоков, имеющих ограниченный срок службы, например, источников питания с электролитическими конденсаторами, также практически никогда не применяется в практике эксплуатации МУРЗ по тем же самым причинам.

Еще одной проблемой, существенно затрудняющей эксплуатацию МУРЗ, является полное отсутствие совместимости программного обеспечения, иногда даже между отдельными версиями одной и той же программы, не говоря уже о программах разных производителей. При наличии в одной энергокомпании 4 – 5 видов МУРЗ, обслуживаемому персоналу приходится изучать все эти программы, кардинально отличающиеся между собой, что является источником серьезных проблем, связанных с так называемым «человеческим фактором». И это на фоне продолжающегося повсеместного усложнения МУРЗ и программ их обслуживающих. Вот, например,

как оценивают релейную защиту одного из ведущих мировых производителей МУРЗ российские специалисты-релейщики [2.6]:

«В терминале Siprotec 7SJ642 (Siemens) заложена неоправданная техническая и информационная избыточность. В руководстве по эксплуатации (C53000G1140C1476, 2005 г.) отмечается «простота работы с устройством с помощью интегрированной панели управления или посредством подключения ПК с системной программой DIGSI», что не соответствует действительности. Например, требуется вводить около 500 параметров (уставок), не считая внесения неизбежных изменений в матрицу сигналов, а у каждого из сигналов есть «свойства», влияющие на работу устройства (распечатанная из DIGSI матрица сигналов занимает около 100 страниц англоязычного текста). Учитывая необходимость составления заданий на наладку и протоколов проверки терминалов, где должны указываться все параметры настройки, объем документации становится неподъемным. Большой объем вводимой информации усложняет настройку. Информационная избыточность повышает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Техническая избыточность требует для работы с терминалом специалистов высокой квалификации. Документация фирмы по рассматриваемым терминалам – это тысячи страниц, но при этом зачастую нет нужной информации, встречаются ошибки».

Упомянутое выше изделия фирмы Siemens не является чем-то из ряда вон выходящим. Такую же оценку можно дать и большинству изделий других производителей. К сожалению, сегодня это стало общей тенденцией.

Отсутствие даже элементарной, базовой стандартизации применительно к конструкции и программному обеспечению МУРЗ приводит также к существенному усложнению их приемочных и периодических испытаний [2.7].

Современная тенденция увеличения количества функций защиты в одном модуле, «навешивание» на МУРЗ массы дополнительных функций, не имеющих ничего общего с релейной защитой, а также использование в МУРЗ так называемой недетерминированной (неопределенной) логики – все это дополнительные факторы

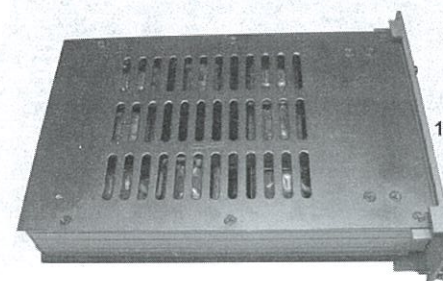
снижения надежности релейной защиты и повышения непредсказуемости ее поведения в сложных аварийных ситуациях [28, 2.9].

Как же можно решить все эти проблемы?

Предлагаемая нами концепция построения МУРЗ основана на следующих основных принципах:

1. Функциональные блоки МУРЗ должны быть физически четко разделены, и хаотический принцип размещения этих функциональных блоков на печатных платах, имеющий место сегодня [2.10], должен быть заменен упорядоченным размещением, оговоренным специальным стандартом. К примеру: такие функциональные модули, как, источник питания, модуль входных трансформаторов тока и напряжения с элементами предварительной обработки сигналов, модуль цифровых входов, модуль выходных реле, модуль центрального процессора и т.д., должны быть выполнены на отдельных печатных платах стандартных размеров, снабженных универсальными разъемами.

2. Отдельные устройства релейной защиты энергетических объектов должны производиться и продаваться не в виде отдельных изделий, снабженных индивидуальными корпусами разных размеров и формы, а в виде отдельных универсальных печатных плат (модулей), из которых потребитель может собрать МУРЗ требуемой конфигурации. Эти платы (модули) должны быть предназначены для простой установки (путем введения по направляющим до состыковки с разъемом кросс-платы) в металлические шкафы, снабженные отдельными отсеками с отдельными дверцами.



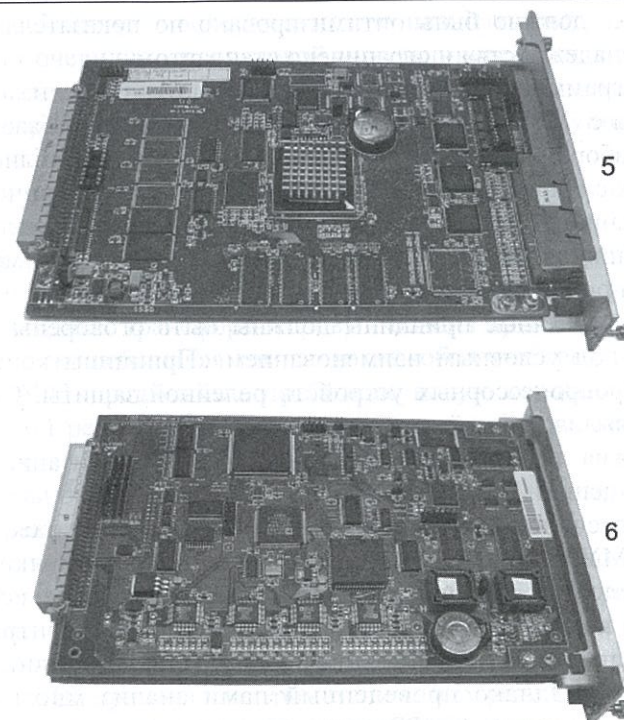
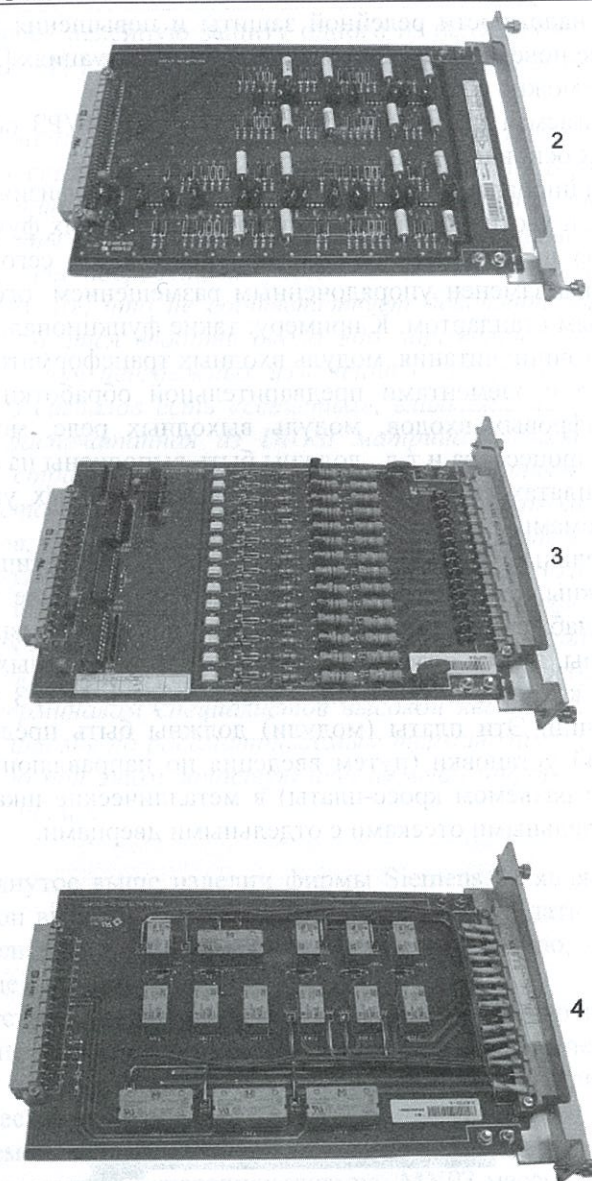


Рис. 2.65. Набор универсальных функциональных модулей (220 x 145 мм), выполненных на отдельных печатных платах, из которых состоят различные МУРЗ производства компании Nari-Relays: PCS-931 (дифференциальная защита линий), PSC-902 (дистанционная защита), и др.: 1 – модуль входных трансформаторов тока и напряжения; 2 – узкополосный фильтр (антиалиасинговый фильтр); 3 – модуль цифровых входов; 4 – модуль выходных реле; 5 – модуль оптической связи; 6 – модуль центрального процессора

Металлические шкафы должны быть выполнены по технологии, предусматривающей защиту их содержимого от внешних электромагнитных излучений.

3. Функции МУРЗ должны быть ограничены только задачами релейной защиты и никакими другими. Количество функций в од-

ном модуле должно быть оптимизировано по показателям «стоимость» и «надежность» и ограничено стандартом.

4. Программное обеспечение для компьютера, предназначенное для работы с МУРЗ, должно состоять из стандартной базовой оболочки и набора различных прикладных программ и библиотек, совместимых с общей базовой оболочкой.

5. Питание всех модулей в шкафу должно осуществляться от двух источников повышенной надежности, соединенных между собой как основной и резервный.

6. Все указанные принципы должны быть оговорены в новом стандарте под условным наименованием «Принципы конструирования микропроцессорных устройств релейной защиты. Основные требования».

Возможна ли, с технической точки зрения, реализация предлагаемой концепции?

Как отмечалось выше, большинство из имеющихся сегодня на рынке МУРЗ не имеют строго разделенного по функциям набора модулей, а их конструкция напоминает скорее «сборную солянку», когда на одной печатной плате блок центрального процессора может соседствовать с импульсным источником питания [2.10]. Однако проведенный нами анализ многих типов самых современных МУРЗ ведущих мировых производителей позволил все же найти устройства, идеально удовлетворяющие уже сегодня сформулированному выше требованию в части конструктивного исполнения. Такими устройствами являются МУРЗ серии 900 известной китайской компании Nari-Relays с их универсальными модулями, используемыми в защитах разного типа (рис. 2.65).

Эти модули полностью готовы к использованию и не требуют никакой предварительной подготовки (кроме программного конфигурирования функций защиты, разумеется). Не требуется и наладки МУРЗ после его сборки, которая заключается лишь в установке печатных плат, изображенных на (рис. 2.65) (в реальный комплект входит еще и плата источника питания, который не нужен в нашей концепции, и поэтому не показан), в размеченные направляющие корпуса (в нашем случае это будет отсек шкафа). На сборку такой сложной защиты, как дистанционная, из 7 отдельных модулей, поставляемых в картонных коробках, и включение реле требуется не

более 10-15 минут, после чего можно начинать ввод уставок. Совершенно очевидно, что рядовой инженер-релейщик, не имеющий специальных знаний в области микропроцессорной техники, с легкостью справится со сборкой реле защиты из таких универсальных блоков непосредственно на месте его установки.

В принципе, уже сегодня ничего не мешает началу воплощения предлагаемой концепции на территории отдельной страны. Приобретая на первых порах наборы универсальных модулей Nari-Relays (с разными алгоритмами, записанными в EEPROM и разными наборами входных трансформаторов) и освоив производство шкафов под них, даже небольшая компания способна уже сегодня выйти на рынок МУРЗ, предложив потребителю новую концепцию дешевой и надежной релейной защиты, оснащенной резервными блоками-модулями.

Отдельное решение имеет проблема тестовых проверок МУРЗ.

Исправность устройств релейной защиты обычно принято проверять на тех конкретных уставках, которые будут использоваться в дальнейшем при реальной работе реле в данной конкретной точке сети. При изменении уставок в процессе эксплуатации реле требовалась повторная проверка работоспособности реле с этими новыми уставками. Во времена электромеханических реле защиты это было вполне оправданной мерой, так как переход с одной уставки на другую осуществлялся путем механического перемещения внутренних элементов реле или переключения отпайек встроенных трансформаторов и т.п. При изменении настроек таких реле вполне могло оказаться, что внутренние цепи реле, подключенные к новой отпайке трансформатора, неисправны (обрыв провода, нарушение контакта, поврежденная изоляция и т.п.) или, что в новом положении механических элементов реле нарушается его балансировка, появляется «затирание» и т.п. неприятности. Поэтому, нормальная работоспособность электромеханического реле с одним набором уставок еще не гарантировала его работоспособности с другими уставками.

В МУРЗ переход с одного набора уставок на другой не сопровождается физическими изменениями в его внутренней структуре. Независимо от конкретных уставок и режимов работы, в МУРЗ работают одни и те же входные и выходные цепи, одни и те же логические элементы, тот же самый процессор, тот же самый источник питания и т.д. Даже включение или отключение отдельных функ-

ций МУРЗ не связано с изменениями физического состояния его цепей. Проверка же правильности выбора логики защиты и правильности расчета уставок для конкретных условий конкретной сети — это совсем другая задача, которая не имеет отношения к проверке исправности реле и решается не персоналом, эксплуатирующим реле и отвечающим за его исправность, а инженерной службой, отвечающей за расчеты уставок и выбор внутренней логики работы реле. Да и невозможно в процессе тестирования исправности реле смоделировать все реальные ситуации и все возможные комбинации факторов, действующих в реальной сети. Выявление таких ситуаций не является целью проверки исправности реле защиты. Более того, можно показать, что отказ от проверки реле с использованием расчетных уставок является положительной мерой, снижающей риск неправильных действий защиты вследствие так называемого «человеческого фактора» (причины почти 50% неправильных действий защиты). Дело в том, что в multifunctional микропроцессорных защитах уставки для конкретных условий работы выбираются таким образом, что проверить определенные функции реле можно только при загрузке или полном отключении другой, конкурирующей функции. Невозврат такой загруженной или отключенной функции в исходное положение после окончания тестирования реле часто является причиной неправильных действий защиты в аварийных режимах. Аналогичный подход к проблеме испытаний реле защиты принят и в [2.11]. В этом документе, имеющем статус стандарта, все испытания реле разделены на два вида: калибровочные испытания (предназначенные для проверки уставок и конфигурации реле) и функциональные. Если для функциональных испытаний установлена периодичность один раз в 4 года для всех типов реле (включая электромеханические и микропроцессорные), то для калибровочных испытаний установлена периодичность один раз в 4 года только для электромеханических реле. Периодическая калибровка (то есть проверка уставок) микропроцессорных реле защиты вообще не предусмотрена.

На основании изложенного выше, можно сформулировать некоторые принципы, которые могут быть приняты при тестировании МУРЗ.

1. Для подтверждения исправности сложных multifunctional МУРЗ при вводе их в эксплуатацию после ремонта или в

процессе периодических испытаний совершенно не обязательно проводить их тестирование именно на тех уставках, при которых реле будет в дальнейшем работать в данной конкретной сети.

2. Для проверки исправности МУРЗ достаточно проверить их правильное функционирование лишь в некоторых, заранее заданных, наиболее критичных точках характеристики; в некоторых, заранее заданных, наиболее сложных (комбинированных) режимах работы, включая динамические режимы работы с заранее заданными переходными процессами, характерными для типовых электрических сетей (но не обязательно для данной конкретной сети).



Рис. 2.66. Набор индуктивностей фирмы General Electric для проверки электромеханических реле защиты

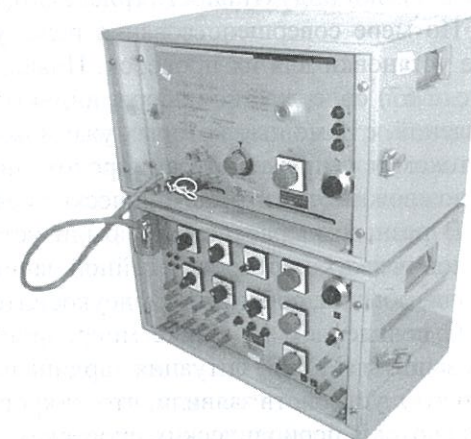


Рис. 2.67. Испытательная установка типа TURH-20 (ASEA) для проверки электромеханических реле защиты содержащая наборы индуктивностей и активных сопротивлений

Такие испытания должны охватывать все физические входы и выходы реле. После окончания проверки реле и подтверждения его исправности все тестовые уставки должны быть автоматически заменены заранее подготовленным набором (файлом) реальных расчетных уставок.

3. Такое тестирование микропроцессорной защиты в наиболее сложных режимах работы позволит, по нашему мнению, значительно лучше проверить исправность МУРЗ, нежели ограниченная проверка в очень ограниченных пределах конкретных уставок, при которых МУРЗ будет в дальнейшем функционировать.

4. Комплексная проверка МУРЗ при вводе его в эксплуатацию в наиболее тяжелых для него режимах работы позволяет исключить дополнительные проверки работоспособности МУРЗ при каждом изменении уставок в процессе эксплуатации.

Сформулированные выше принципы позволяют по-новому взглянуть на проблему тестирования МУРЗ.

Можно предположить, что первые приспособления для проверки реле защиты появились практически одновременно с самими реле защиты. Естественно, они были такими же примитивными, как и сами реле защиты. На первых порах это были просто калиброванные катушки индуктивности (рис. 2.66), и реостаты.

По мере совершенствования реле, усложнялись и испытательные установки для их проверок. Появились испытательные стенды (рис. 2.67) содержащие наборы индуктивностей и активных сопротивлений, с помощью которых уже можно было задавать углы между током и напряжением в широком диапазоне и проверять достаточно сложные электромеханические реле.

В разных энергосистемах были установлены различные сроки периодических проверок релейной защиты (один раз в 2 – 3 года), но они, обычно, соблюдались неукоснительно.

С появлением на рынке микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) ситуация кардинально изменилась. Производители этих устройств заявили, что микропроцессорные реле якобы не нуждаются в периодических проверках, потому что имеют мощную встроенную систему самодиагностики.



Рис. 2.68. Современные компьютеризированные тестовые системы последнего поколения для испытания многофункциональных микропроцессорных защит

Эта особенность МУРЗ фигурировала в рекламных проспектах чуть ли не как главное их преимущество перед электромеханическими и аналоговыми электронными реле. Мощная рекламная компания, развернутая производителями МУРЗ, сыграла свою роль. Многие специалисты релейной защиты безоговорочно поверили в этот рекламный трюк, не имея возможности на практике проверить достоверность этого утверждения, хотя было совершенно очевидно, что невозможно создать тестовую систему на базе внутреннего микропроцессора МУРЗ, которая проверяла бы физическую исправность многих тысяч электронных компонентов. Да и функционально невозможно проверить исправность, например, блока входов или блока выходов без включения этих блоков и проверки реакции реле на подачу на них сигналов. На практике оказывается, что большинство МУРЗ попросту не замечают замену целой печатной платы одного вида на плату другого вида, не совместимую с теку-

щими уставками реле. Об этом и о других рекламных трюках, связанных с «самодиагностикой» МУРЗ, уже упоминалось ранее в многочисленных публикациях на эту тему.

В отличие от производителей МУРЗ, производители тестовых систем релейной защиты (ТСРЗ) всегда утверждали, что все реле защиты должны обязательно проходить периодические проверки, включая также и МУРЗ, поскольку так называемой «самодиагностикой» в них охвачены не более 15% программного обеспечения и «железа». Несмотря на утверждения производителей МУРЗ о целесообразности периодических проверок защит, фирмы-производители ТСРЗ продолжали, не переставая, интенсивно разрабатывать и выбрасывать на рынок все новые и новые тестовые системы.

Поскольку принципы построения МУРЗ сегодня стали общими для большинства фирм-производителей, то, естественно, и предлагаемые сегодня на рынке тестовые системы различных фирм также весьма похожи друг на друга, и не только по внешнему виду (рис.2.68), но и по своим характеристикам. ТСРЗ сегодня – это полностью компьютеризированные устройства, не содержащие на лицевой панели никаких органов управления, кроме гнезд для подключения внешних проводов и разъема RS232 для подключения компьютера. Стоимость таких ТСРЗ составляет десятки тысяч долларов.

Такие системы предназначены для проведения испытаний трех групп: статических (steady state tests), динамических (dynamic tests) и переходных процессов (transient tests). Первая группа испытаний предполагает проверку базовых уставок срабатывания реле и является как бы предварительным испытанием реле. Вторая группа испытаний предназначена, в основном, для проверки поведения сложных защит, таких как дистанционные или дифференциальные, на различных участках характеристик и зон защиты при изменении входных параметров (ток, напряжение, угол) во времени. Третья группа испытаний предполагает инъекцию во входные цепи реле файлов переходных процессов в формате COMTRADE, извлеченных из регистрирующих устройств, записавших реальный переходной процесс короткого замыкания в сети, или файлов в том же формате, построенных искусственно с помощью специальных программ. Результаты испытаний формируются в базу данных, реали-

зованную, как правило, на основе Sybase SQL Anywhere и автоматически оформляются в виде стандартного протокола, который может быть переслан на принтер. Изготовители ТСРЗ предлагают, обычно, наборы тестовых процедур (библиотеки) в виде макросов для различных видов испытаний и даже для некоторых распространенных типов реле.

Современные ТСРЗ обладают поистине супергибкостью и широчайшими функциональными возможностями. Эти ТСРЗ позволяют симулировать практически любые встречающиеся на практике условия работы реле защиты, включая создание под собственные требования искусственных COMTRADE файлов; искусственное искажение формы кривой тока; симуляция гармоник; смещение синусоиды тока относительно оси (симуляция апериодической составляющей); симуляция ответной реакции выключателя; автоматическое построение самых сложных полигональных характеристик дистанционных защит; синхронизация дифференциальных защит через спутники и т.п. Такие супервозможности современных ТСРЗ обуславливают наличие и оборотной стороны медали: необходимости вводить сотни параметров в десятки таблиц для выполнения каждого отдельного испытания реле. При этом встроенные библиотеки тестовых процедур на практике мало помогают, так как не освобождают от необходимости заполнения многих таблиц. К этому следует добавить не меньшую гибкость и универсальность испытуемого объекта (МУРЗ), также требующего введения огромного количества параметров из десятков выпадающих меню и таблиц. Малейшее несоответствие между собой настроек МУРЗ и ТСРЗ приводит к неправильным результатам. Причем далеко не всегда можно понять, что полученные результаты неверны. И даже в тех случаях, когда ошибка очевидна (например, полученная характеристика реле не соответствует теоретической), очень сложно определить, где именно допущена ошибка: в настройках МУРЗ или в настройках ТСРЗ. На собственном опыте автор может подтвердить, что поиск ошибки такого рода чрезвычайно сложен и занимает много усилий и времени. Не менее сложна работа с моделью электрической сети (Power System Model), применяемой в ТСРЗ некоторых типов, для проверки дистанционных защит. Для настройки параметров ТСРЗ в этом режиме необходимо знание множества параметров реальной электрической сети, которые необходимо зане-

сти со специальными коэффициентами во множество таблиц. Технику и даже инженеру службы релейной защиты многие из этих параметров реальной сети и применяемых коэффициентов часто не известны, что требует участия в процедуре проверки реле инженеров из других служб энергосистемы.

Психологами давно установлено, что чем большим количество кнопок и рычажков (реальных или виртуальных, то есть программных) должен манипулировать оператор, тем ниже эффективность взаимодействия человека с такой техникой. Многие функции и возможности такой «навороченной» техники просто выпадают из человеческого восприятия. Как же совместить универсальность и широчайшие функциональные возможности ТСПЗ с реальными возможностями среднего техника или инженера службы релейной защиты, нуждающегося в быстрой и точной проверке ограниченного количества типов реле? Преодолевая огромные сложности, разрабатывать и отлаживать собственные процедуры и создавать на их основе собственную библиотеку макросов, как это предусмотрено производителями ТСПЗ? У нас имеются предложения по более радикальному решению этой проблемы:

Современные микропроцессорные ТСПЗ последнего поколения технически нецелесообразно и экономически неоправданно использовать для тестирования простейших электромеханических реле, таких как реле тока и напряжения (например, типа РТ-40 или РН-54, как это предусмотрено производителями российского ТСПЗ типа РЕТОМ-51). Для этих целей значительно эффективнее использование более простых тестовых систем. Не имеет никакого смысла разработка тестовых процедур для компьютерного автоматизированного тестирования таких реле, если только речь не идет об испытании сотен одинаковых реле в процессе их производства.

Использование в современных микропроцессорных ТСПЗ последнего поколения встроенных библиотек тестовых процедур, требующих внесения большого количества параметров и знания множества коэффициентов, можно признать целесообразным только для сложных электромеханических защит старого типа (например, дистанционных защит типа LZ-31).

Для тестирования современных сложных многофункциональных МУРЗ должна быть разработана общая для всех типов ТСПЗ программная платформа, требования к которой должны быть узаконены международным стандартом. Примером такой общей программной платформы является общеизвестная Sybase SQL Anywhere, которая широко используется для создания базы данных в различных устройствах сбора и обработки данных, симуляторах, испытательных установках различных изготовителей. Другим примером является универсальный формат COMTRADE, который используется во всех типах микропроцессорных регистраторов аварийных режимов и, собственно, во всех типах ТСПЗ для симуляции переходных режимов.

Прикладные программы для работы с ТСПЗ различных типов могут иметь совершенно разные интерфейсы, но все они должны быть выполнены на общей стандартной программной платформе.

Производители МУРЗ должны снабжать свои защиты двумя компакт дисками. На одном из них под соответствующими номерами должны быть записаны полные наборы уставок для специфических режимов работы защит, или для характерных точек характеристики, или для типовых примеров электрических сетей. На втором, под номерами, соответствующими наборам уставок защиты, должны быть записаны полные наборы уставок для ТСПЗ и схемы внешних подключений МУРЗ к выходам и входам ТСПЗ.

Эффективное использование современных ТСПЗ для тестирования современных многофункциональных МУРЗ обеспечивается, по нашему мнению, только в том случае, если вся процедура тестирования сведется к загрузке в МУРЗ набора уставок номер ХХ1, загрузке в ТСПЗ набора уставок номер YY1, подключению МУРЗ к ТСПЗ и ... приготовлению порции кофе.

Предлагаемый набор мероприятий по унификации программной платформы современных микропроцессорных ТСПЗ последнего поколения позволит организовать работу по тестированию современных многофункциональных МУРЗ совершенно по-новому, что, по нашему мнению, снимет массу технических и психологических барьеров, и будет способствовать значительно более широкому использованию, как МУРЗ, так и ТСПЗ.

Какие преимущества сулит предлагаемый путь развития МУРЗ?

Для потребителя:

- значительное снижение стоимости МУРЗ при покупке;
- возможность компоновать МУРЗ из отдельных модулей, различных производителей, наиболее полно удовлетворяющих потребности эксплуатирующей организации с точки зрения наиболее оптимального баланса между качеством и стоимостью;
- возможность создания оптимального ЗИПа модулей МУРЗ;
- снижение актуальности проблемы пониженной надежности МУРЗ за счет быстрой и свободной замены на месте вышедших из строя дешевых модулей, за счет установки резервных модулей, автоматически вводимых в работу при повреждении основных; исключение необходимости в ремонте вышедших из строя модулей МУРЗ;
- возможность ухода от привязки к монополисту-производителю, единожды продавшему МУРЗ;
- усиление конкуренции между производителями за счет появления на рынке новых «игроков» - малых и средних компаний, специализирующихся на выпуске лишь отдельных видов модулей, а не комплектных МУРЗ;
- упрощение испытаний МУРЗ и снижение влияния «человеческого фактора»;
- значительное упрощение работы с программным обеспечением, возможность выбора наиболее подходящей и удобной прикладной программы (интерфейса), возможность безболезненной замены прикладных программ (интерфейсов) для одного и того же МУРЗ;
- ускорение технического прогресса в области МУРЗ, без усложнения их эксплуатации и без возникновения дополнительных проблем у потребителя при каждом переходе на новое поколение устройств
- снижение затрат на обновление МУРЗ, поскольку обновлять весь МУРЗ каждые 10-15 лет, как это часто происходит сегодня, не обязательно. Достаточно обновить его отдельные модули. Более того, обновлять материнскую плату можно даже чаще, чем это делается сейчас, ускоряя технический прогресс в этой области.

Для производителя:

- отсутствие необходимости в выпуске устаревших модулей, необходимых для поддержания эксплуатации старых моделей МУРЗ;
 - отказ от пожизненного бесплатного ремонта МУРЗ;
 - значительный рост потребления отдельных модулей;
 - появление нового рынка прикладных программ (интерфейсных оболочек);
 - возможность специализации на производстве каких-то отдельных, наиболее выгодных для данного производителя, видов модулей;
 - возможность участия в данном бизнесе малых и средних компаний, не имеющих достаточных ресурсов для разработки и производства комплектных МУРЗ;
 - конкурентное преимущество национальных производителей, первыми начавших производство МУРЗ в виде модулей на территории отдельной страны, перед иностранными.
- В случае принятия предложенного пути развития МУРЗ на рынке появились бы новые «игроки», одни из которых специализировались бы на выпуске модулей аналоговых входов с трансформаторами тока и напряжения, другие – на выпуске материнской платы, третьи – на программном обеспечении. Потребитель мог бы компоновать свой МУРЗ из модулей различных производителей, точно так, как это происходит сегодня с ПК, с учетом стоимости и качества этих модулей, а также использовать одну и ту же программу для всех своих МУРЗ. При этом были бы решены не только очень многие из сформулированных выше вопросов, но и была бы существенно снижена стоимость релейной защиты. Последнее позволило бы устанавливать два комплекта идентичных защит вместо одного для повышения надежности и использовать второй комплект как резервный, автоматически запускаемый в работу по сигналу “watchdog” поврежденного основного МУРЗ. Можно было бы отказаться от использования индивидуального источника питания для каждого МУРЗ и использовать один удвоенный комплект питания повышенной мощности и надежности на весь шкаф. Можно было бы установить в таком шкафу много разных сервисных модулей, повышающих надежность работы МУРЗ.

Значительно упростилась бы работа обслуживающего персонала, то есть служб релейной защиты, поскольку теперь им не нужно было бы изучать толстенные фолианты каждого из установленных типов МУРЗ, разбираться с особенностями программы каждого типа МУРЗ. Кроме существенного облегчения работы с МУРЗ и сокращением времени освоения новых защит, существенно снизился бы процент ошибок, вызванных так называемым «человеческим фактором».

При такой конструкции МУРЗ решилась бы и проблема тестирования сложных функций МУРЗ, таких как полигональная характеристика дистанционных реле.

Насколько привлекательна предлагаемая концепция с коммерческой стороны?

В соответствии с данными отчета Newton-Evans Research Co. в 2006 г. группой ведущих компаний мира: ABB, Areva, SEL, Siemens, NARI-RELAYS было продано реле защиты на сумму около 950 миллионов долларов, а второй группой, в которую вошли Basler, General Electric, Schneider – еще на 500 миллионов. Помимо указанных в отчете, на рынке МУРЗ сегодня активно работают такие крупные компании, как Beckwith, Cooper Power, Orion Italia, VAMP, Woodward и др.

По данным того же отчета в 2009 г. объем продаж реле защиты западными компаниями должен был составить сумму уже 2 миллиарда долларов.

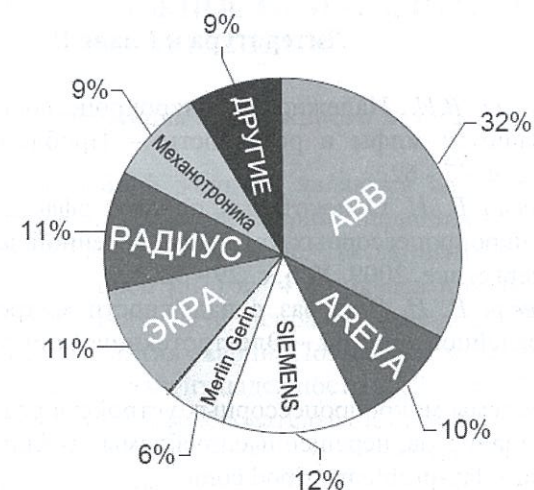


Рис. 2.69. Российский рынок МУРЗ.

Рынок России и других стран бывшего СССР представлен как крупными западными производителями, так и местными: НПП «Бреслер», НПП «Экра», РЕЛСiС, Киевприбор, ЗАО «Меандр», НТЦ «Механотроника», ЗАО «Радиус Автоматика», Энергомашвин, ЗАО ЧЭАЗ, ВНИИР и др. (рис. 2.69). С учетом того обстоятельства, что сегодня доля МУРЗ в релейной защите России составляет лишь 10 %, остается еще очень большой сектор рынка для реализации данной концепции в ближайшем будущем.

Конечно, рынок МУРЗ существенно меньше рынка персональных компьютеров с его 52 миллиардами долларов, но, тем не менее, он все же достаточно емкий для успешной реализации предлагаемой концепции.

С чего можно было бы начать реализацию этой концепции? По нашему мнению, с разработки уже упомянутого стандарта, к которой должен быть привлечен широкий круг специалистов, включающий и инженеров-релейщиков, и ученых, и проектировщиков, и представителей промышленности, а также контракта с Nari-Relays, как первого шага на пути к реализации концепции.

Литература к Главе II

2.1. Гуревич В.И. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность. – Проблемы энергетики, 2008, № 5 - 6, с. 47 - 62.

2.2. Гуревич В. И. О некоторых оценках эффективности и надежности микропроцессорных устройств релейной защиты. - Вести в электроэнергетику, 2009, № 5, с. 29 - 32.

2.3. Гуревич В. И. Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты. - Электротехнический рынок, 2009, № 3 (29), с. 40 - 45.

2.4. Проблемы микропроцессорных устройств релейной защиты: мнения специалистов, нерешенные проблемы, публикации в прессе. - <http://digital-relay-problems.tripod.com/>

2.5. Гуревич В. И. Проблемы микропроцессорных реле защиты: кто виноват и что делать? – Энерго-инфо, 2009, № 10, с. 64 - 69.

2.6. Беляев А., Широков В., Емельянец А. Цифровые терминалы РЗА. Опыт адаптации к российским условиям. – Новости электротехники, 2009, № 5.

2.7. Гуревич В. И. Испытания микропроцессорных устройств релейной защиты. – Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2009, №1, с. 31 – 33.

2.8. Гуревич В. И. Сенсационные «открытия» в области релейной защиты. – Энергетика и промышленность России, № 23-24 (139-140) декабрь 2009 г.

2.9. Гуревич В. И. Энергобезопасна ли релейная защита? – Энергобезопасность и энергосбережение, 2010, № 2.

2.10. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты. Как они устроены? – Электротехнический рынок, 2009, № 4, с. 46-49; № 5, с. 46-50; № 6, с. 46 – 50; 2010, № 1 – 2.

2.11. PJM Relay Testing and Maintenance Practices. PJM Interconnection. Relay Subcommittee. Rev. 2/26/04, 2004.

Глава III. НАДЕЖНОСТЬ МУРЗ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

3. 1. Мифы о надежности МУРЗ

Проблемы с релейной защитой являются одной из основных причин возникновения тяжелых аварий, периодически происходящих в энергосистемах во всем мире. По данным North American Electric Reliability Council [3.1] в 74% случаев причиной тяжелых аварий в энергосистемах были неправильные действия релейной защиты в процессе развития аварии. Поэтому от надежности релейной защиты во многом зависит надежность всей энергосистемы.

Интенсивные научно-исследовательские и конструкторские работы в области электромеханических реле защиты (ЭМЗ) были фактически полностью заморожены около 30 – 35 лет назад, и все усилия разработчиков были переключены на создание электронных, а затем и микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ). ЭМЗ полностью обеспечивали и обеспечивают до сих пор надежную защиту объектов электроэнергетики, поэтому причиной полного забвения ЭМЗ и перехода на МУРЗ является не неспособность ЭМЗ выполнять свои функции, а нечто совершенно иное.

Вследствие проводимой ведущими компаниями-производителями реле защиты технической политики, прогресс последних десятилетий в области новых материалов и технологий никак не затронул ЭМЗ. Находящиеся десятки лет в эксплуатации ЭМЗ на сегодняшний день сильно износились и устарели, и поэтому вызывают справедливое недовольство обслуживающего персонала. С другой стороны, демонтаж ЭМЗ и переход на микропроцессорные реле защиты на действующих объектах электроэнергетики связан с необходимостью инвестирования значительных денежных средств, причем не только на приобретение МУРЗ, компьютеров и специального дорогостоящего тестового оборудования, на замену вышедших из строя и не подлежащих ремонту весьма дорогостоящих блоков МУРЗ. Значительные капиталовложения потребуются также и на реконструкцию системы заземления подстанции, на обучение обслуживающего персонала и т.д. Все это существенно тормозит процесс перехода на МУРЗ. По данным [3.2] к 2002 г. в

энергосистемах России находилось в эксплуатации 98,5% ЭМЗ и только 1,5% различных электронных устройств релейной защиты, а по данным [2.3] количество МУРЗ составляет около 0,12% от общего количества устройств релейной защиты. На Западе темпы замены релейной защиты на действующих объектах также не очень высоки. По данным [3.4] при существующих темпах потребуется около 70 лет для замены всех реле защиты на микропроцессорные. Такие низкие темпы обновления парка релейной защиты на действующих объектах электроэнергетики во всем мире обуславливает интенсивную рекламную деятельность компаний-производителей МУРЗ и их торговых агентов.

Одним из основных доводов, приводимых, обычно, в доказательство преимуществ МУРЗ, является их якобы значительно более высокая надежность по сравнению с электромеханическими и электронными защитами. Этот тезис представляется многим специалистам настолько очевидным, что, обычно, не вызывает возражений и часто повторяется менеджерами и даже техническим персоналом электроэнергетических компаний в их выступлениях на совещаниях и конференциях, в многочисленных статьях. Однако, при более глубоком анализе ситуации оказывается, что основу этого тезиса составляет целый набор распространенных мифов о микропроцессорных защитах [3.5].

3.1.1. Отсутствие в МУРЗ подвижных частей

Надежность МУРЗ выше надежности ЭМЗ потому, что МУРЗ не содержит подвижных частей [3.6].

Отказы ЭМЗ в литературе связывают, обычно, со старением и повреждением изоляции в результате высыхания (или, наоборот, увлажнения), ржавлением винтов и клеммных зажимов, износом в механической части реле. Однако с учетом того, что количество циклов срабатывания (то есть движения подвижных частей) за весь срок службы ЭМЗ в реальных условиях эксплуатации в энергосистемах не превышает нескольких сотен, говорить о механическом износе подвижных частей реле можно только в случае явного брака завода-изготовителя или использования не подходящих для этих целей материалов. Что касается коррозии металлических элементов или высыхания (увлажнения) изоляции, то это следствие использо-

вания при изготовлении реле некачественных материалов. Такие дефекты являются характерными для ЭМЗ российского производства и практически не встречаются в реле ведущих западных компаний, находящихся в эксплуатации по 30-40 лет даже в условия тропического климата [3.7]. Таким образом, говорить о недостаточном механическом ресурсе ЭМЗ, *как вида реле*, абсолютно необоснованно. С другой стороны, если подвижные элементы ЭМЗ находятся в движении *только в моменты срабатывания реле*, то тысячи электронных компонентов МУРЗ *постоянно находятся в работе*: постоянно работают генераторы сигналов, многочисленные транзисторные ключи, усилители, стабилизаторы напряжения, микропроцессор постоянно обменивается сигналами с элементами памяти, аналого-цифровой преобразователь постоянно ведет обработку входных сигналов и т.д. Многие элементы постоянно находятся под воздействием высокого рабочего напряжения (220 - 250 В) и импульсов перенапряжений, периодически возникающих во входных цепях и цепях питания, постоянно рассеивают мощность (то есть греются и деградируют) и т.д. В особо тяжелом режиме работают в МУРЗ импульсные высокочастотные источники питания, которые очень часто являются причиной отказов МУРЗ.

3.1.2. Сравнительная надежность электромеханических, полупроводниковых и микропроцессорных реле

Надежность полупроводниковых реле на дискретных компонентах выше надежности электромеханических реле [3.8]. Надежность полупроводниковых устройств защиты на основе интегральных микросхем с высокой степенью интеграции выше, чем надежность устройств на дискретных электронных компонентах [3.8]. Надежность микропроцессорных реле выше надежности электронных не микропроцессорных устройств.

Утверждение о безусловно большей надежности электронных реле перед электромеханическими – распространенное заблуждение [3.9]. Повышенной надежностью полупроводниковые реле обладают только при очень большом (сотни тысяч, миллионы) количестве коммутационных циклов или при большой частоте коммутации. Во многих других случаях надежность полупроводниковых реле существенно ниже надежности электромеханических [3.10].

Дискретные электронные элементы имеют гораздо более высокую устойчивость к перенапряжениям и другим неблагоприятным воздействиям, чем интегральные микросхемы [3.11]. По данным [3.12] 75% всех повреждений микропроцессорных устройств происходит по причине воздействия перенапряжений.

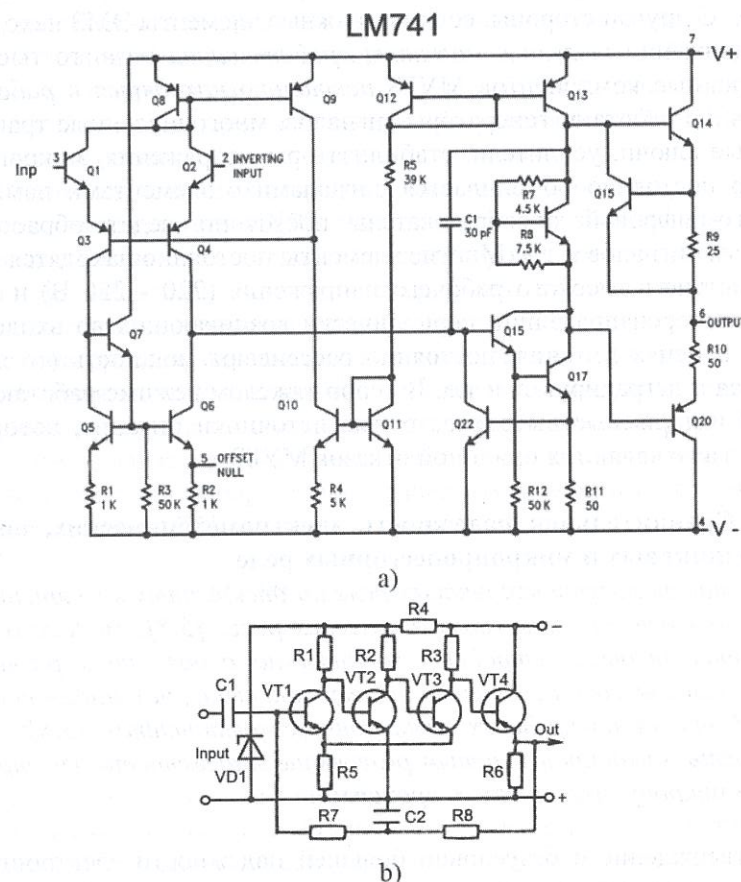


Рис. 3.1. Принципиальные схемы двух усилителей сигналов с близкими параметрами: вверху интегральной микросхемы типа LM741 широкого применения, содержащего 20 транзисторов; внизу – усилителя на дискретных элементах, содержащего 4 транзистора

Такие перенапряжения с амплитудой от десятков вольт до нескольких киловольт, возникающие вследствие коммутационных процессов в цепях [3.13] или при воздействии электростатических разрядов, являются «смертельными» для внутренних микроэлементов микросхем и процессоров. По данным [3.12] обычные транзисторы (дискретные элементы) могут выдерживать напряжение электростатического разряда почти в 70 раз более высокое, чем, например, микрочип памяти (EPROM) микропроцессорной системы. Самое страшное, что случайные сбои в работе микропроцессора, вызванные электромагнитными шумами, могут быть временными [3.14], такими как самопроизвольные изменения содержания оперативной памяти (RAM) и регистров, а внутренние повреждения могут носить скрытый характер [3.15]. Оба этих вида повреждений не выявляются никакими тестами и могут проявляться в самые неожиданные моменты.



Рис. 3.2. Статистические данные по повреждениям МУРЗ ведущих японских компаний [3.18].

В [3.16] отмечается, что в связи с низкой устойчивостью МУРЗ к переходным процессам и перенапряжениям МУРЗ предъявляют особо жесткие требования к защите от электромагнитных воздействий. Попытки использования микропроцессорных реле без усиленной электромагнитной защиты часто приводят к их отказам [3.16, 3.17]. Электронные устройства на дискретных элементах содержат гораздо меньше компонентов, чем аналогичные по параметрам устройства на интегральных микросхемах (рис. 3.1), что уже само по себе отнюдь не способствует более высокой надежности интегральных микросхем. Да и статистика по повреждениям элементов МУРЗ, собранная представителями различных компаний-производителей МУРЗ (рис. 3.2) [3.18], очень убедительно опровергает очередной миф о более высокой надежности интегральных микросхем.

По данным статистики, представленным в [3.18], хорошо видно, что реле защиты на электронных элементах имеют втрое большую повреждаемость, чем электромеханические, а микропроцессорные – в 50 раз большую повреждаемость!

Надежность собственно микропроцессоров таких производителей как Intel, AMD может быть очень высокой, но ведь микропроцессор – это всего лишь небольшая, хотя и очень важная часть МУРЗ, содержащего много десятков микросхем. В [3.19] утверждается, что блок микропроцессора (то есть печатная плата с микропроцессором, памятью, аналого-цифровым преобразователем, библиотекой программ и всеми вспомогательными элементами), наиболее подверженная отказам часть МУРЗ. Кроме того, в отличие от обычных микросхем, отказом микропроцессора является не только его физическое повреждение, но также и сбои в его программном обеспечении – повреждения не известные ранее для электромеханических и электронных реле. Как отмечено в [3.19] программные багги далеко не всегда обнаруживаются при тестировании МУРЗ. Дополнительным источником проблем является необходимость периодического обновления (upgrade) версий программ, используемых МУРЗ, при котором часто возникает несоответствие между «железом» и программой (hardware and software incompatibilities) [3.19]. Такого рода проблемы могут проявиться в самые неожиданные моменты и могут привести к очень тяжелым последствиям для сети. Как известно, одной из причин крупнейшей аварии в энерго-

системах США и Канады в августе 2003 г. была именно «компьютерная проблема», обусловленная «зависанием» компьютерной системы управления в энергосистеме “First Energy” [3.20].

3.1.3. Надежность и самодиагностика

Надежность МУРЗ значительно выше надежности всех остальных типов реле защиты благодаря наличию встроенной самодиагностики. Самодиагностикой в МУРЗ охвачено 70 – 80 % всех элементов МУРЗ [3.21, 3.30].

Этот тезис является очень распространенным и встречается практически во всех публикациях, посвященных преимуществам МУРЗ. Основные принципы построения системы самодиагностики в МУРЗ мы уже рассматривали выше в Главе II. Добавим лишь несколько штрихов к общей картине.

3.1.3.1. Элементы памяти

Вопрос о надежности элементов памяти МУРЗ в действительности достаточно сложен. Оказывается, элементы памяти подвержены случайным непредсказуемым сбоям, не связанным с физическим повреждением ячеек памяти. Такие случайные, обратимые сбои, обусловленные самопроизвольным изменением содержания ячеек памяти, называются «мягкими ошибками» (“soft-failures” или “soft errors”, не путать с программными ошибками - “software programming errors”). Ошибки такого рода были неизвестны ранее для электронных устройств, выполненных на дискретных полупроводниковых элементах или на обычных микросхемах. Прогресс последних лет в области нанотехнологий привел к существенному снижению размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, уменьшению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, уменьшению электрической емкости отдельных ячеек памяти, увеличению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве. Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности элементов памяти к ионизирующим излучениям [3.22, 3.23]. Эта чувствительность стала настолько высокой, что обычный (то

есть совершенно нормальный) радиационный фон на уровне моря стал опасным для ячеек памяти. Особенно опасными являются потоки высокоэнергетических элементарных частиц, приходящих из космоса. Даже одна такая частица при попадании в ячейку памяти рождает вторичные потоки электронов и ионов, вызывающие самопроизвольное переключение элементарного транзистора или разряд емкости в элементах с зарядовой памятью. Проблема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти [2.23]. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется. Как показано в [3.24, 3.25], проблема резкого увеличения чувствительности к ионизирующим излучениям актуальна не только для элементов памяти, но также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т. д., то есть, практически, для всей современной микроэлектроники.

3.1.3.2. Источник питания

Устройство и принцип действия встроенных в МУРЗ источников питания рассматривался выше в Главе II. Как отмечалось, в МУРЗ осуществляется постоянный мониторинг уровня напряжения питания ЦП, при этом микросхемы семейства ADM 691-695 могут быть использованы для непрерывного контроля напряжения питания МУРЗ. Как и в случае со сторожевым таймером, эта микросхема производит генерацию сигнала блокирующего работу ЦП при недопустимом снижении напряжения питания. Блокирующий сигнал остается до тех пор, пока напряжение питания не восстановится. Можно ли считать такой контроль уровня напряжения источника питания его самодиагностикой, повышающей надежность его функционирования? Вряд ли, поскольку речь идет о чисто технологической внутренней блокировке, предотвращающей сбой в ЦП. К надежности источника питания такой контроль не имеет никакого отношения. А между тем, именно источники питания МУРЗ являются самым ненадежным узлом МУРЗ. Во-первых, элементы источника питания работают в очень напряженном режиме: они по-

стоянно подвержены воздействию высоких значений напряжения и тока, рассеивают довольно высокие мощности на своих элементах. Во-вторых, они содержат большое количество алюминиевых электролитических конденсаторов, весьма плохо переносящих воздействие токов высокой частоты, на которой работают источники питания, и часто являющихся причиной полного отказа источника питания (а следовательно, и всего МУРЗ). Ну и чем тут может помочь мониторинг выходного напряжения источника? Разве он может заранее просигнализировать об ухудшении состояния конденсаторов и предотвратить, таким образом, внезапный отказ МУРЗ?

3.1.3.3. Узел аналоговых входов

Это трансформаторы тока и напряжения, смонтированные, как правило, на отдельной плате (см. Главу II). По признанию [3.32] эти узлы только частично охвачены самодиагностикой, причем без всяких пояснений того, как именно это сделано, а в [3.33] отмечается, что они вовсе не охвачены самодиагностикой. Платы аналоговых и цифровых входов МУРЗ имеют, как правило, несколько различных конфигураций. Тип платы, установленной в данном конкретном МУРЗ должен быть обязательно введен в его память. Для того, чтобы прояснить ситуацию и расставить точки над *i*, мы заменили плату входов у МУРЗ типа REL316, тип которой записан в его памяти, на плату другого типа без изменения записи в памяти МУРЗ и включили его. Оказалось, что МУРЗ загружается в нормальный режим работы, совершенно не замечая подмены целой платы [3.34]. Естественно, что правильно функционировать он уже не будет. О какой же самодиагностике исправности внутренних компонентов этих узлов вообще может идти речь в такой ситуации? Как говорится, комментарии излишни.

В заключение следует отметить, что вопреки распространенному мнению, внутренняя самодиагностика на самом деле не является средством, предназначенным для снижения интенсивности отказов МУРЗ, то есть повышения его надежности. Целью такой самодиагностики является блокирование работы МУРЗ и выдача об этом сигнала тревоги до возникновения аварийного режима в сети, а не во время его.

3.1.4. МУРЗ содержат уменьшенное количество элементов

МУРЗ являются существенно более надежными по сравнению с устройствами релейной защиты предыдущего поколения, так как содержат значительно меньшее число элементов, и эти элементы значительно меньше подвержены физическому старению. МУРЗ также содержат меньшее количество внутренних соединений.

Тезис о том, что МУРЗ содержит меньшее количество элементов, не выдерживает никакой критики и, по нашему мнению, вообще не требует даже обсуждения, поскольку в действительности количество элементов, из которых состоит МУРЗ на несколько порядков больше, чем количество элементов, из которых состояли реле защиты предыдущих поколений.

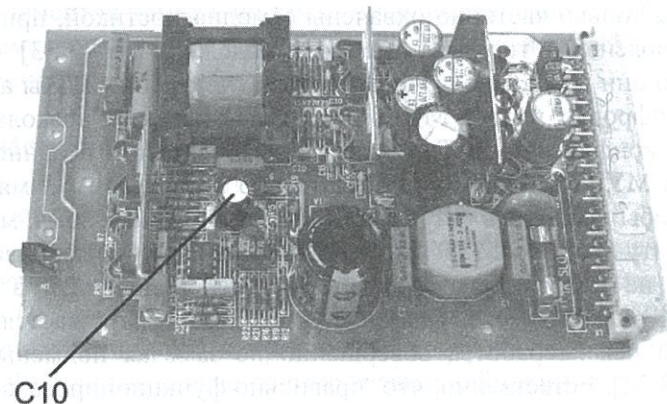


Рис. 3.3. Импульсный источник питания типа SPGU240A1, применяемый в МУРЗ различных типов. C10 – конденсатор, изменение параметров которого во времени приводит к полной потере работоспособности источника питания

Что касается якобы более интенсивного физического старения, элементов реле защиты предыдущего поколения, то этот тезис также не выдерживает критики.

Автор этого тезиса сравнивает современные материалы, применяющиеся в МУРЗ, с материалами (пропиточными и покровными

лаками, пластмассами, изоляционными материалами и электрическими контактами), разработанными в СССР 50 лет тому назад и проработавшими в реле защиты десятки лет. Как мы уже отмечали выше, старые электромеханические реле западного производства, в которых применялись высококачественные материалы и покрытия, до сих пор успешно работают и прекрасно выглядят.

Кроме того, за последние десятилетия прогресс в области материалов достигнут не меньший, чем прогресс в области микроэлектроники. С другой стороны, не все обстоит так радужно со старением электронных компонентов, широко используемых в МУРЗ. Так, даже высококачественные электролитические конденсаторы японского производства начинают изменять свои параметры через 7 - 10 лет работы в высокочастотных импульсных источниках питания, применяемых в МУРЗ.

В результате всего лишь изменения параметров одного из таких конденсаторов (рис. 3.3), полностью перестают функционировать, например, источники питания типа SPGU240A1, применяемые в МУРЗ типов SPAC, SPAD, SPAU, SPAJ.

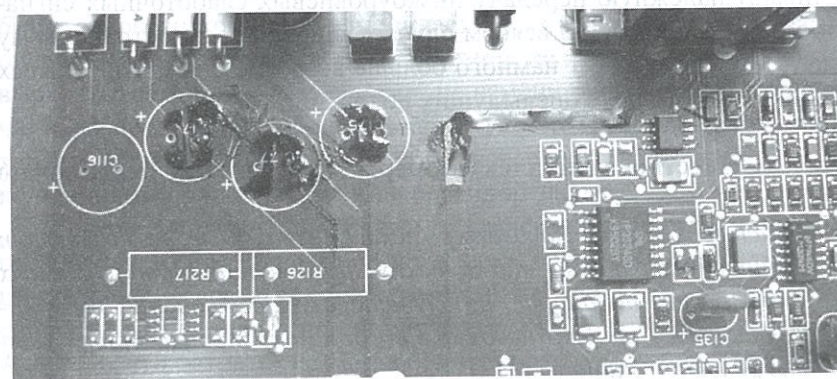


Рис. 3.4. Разрушение медных дорожек печатной платы, проходящих под конденсаторами из-за просочившегося электролита.

В других случаях имеет место разрушение не только электронных компонентов, но даже растворение участков медных дорожек под действием вытекшего из конденсаторов электролита, рис. 3.4.

Еще одной проблемой является стремление производителей к миниатюризации МУРЗ любой ценой, что приводит к использованию в МУРЗ электронных элементов, работающих с перегрузкой и рассеивающих повышенное количество тепла, что отнюдь не способствует повышению их надежности и уменьшению старения. Особенно актуальна эта проблема для цепей цифровых входов, на которые подается напряжение до 250 В [3.34].

Многослойные печатные платы МУРЗ предполагают огромное количество контактных переходов (перемычек) между слоями. Из личной практики автора известны случаи неправильных действий МУРЗ вследствие возрастания переходного сопротивления этих переходов.

Конструкция многих типов МУРЗ предполагает наличие материнской печатной платы с многоконтактными разъемами и функциональных печатных плат с ответными разъемами, сочленяемыми с материнской платой. Вместо материнской платы иногда используются гибкие многожильные шины с многочисленными контактными разъемами, соединяющими между собой отдельные печатные платы. Далеко не всегда все эти контактные соединения обеспечивают надежную передачу низкоуровневых слаботочных сигналов между платами. Во всяком случае, вопреки распространенному мифу, МУРЗ содержит намного больше всевозможных контактных соединений, чем реле предыдущих поколений.

3.1.5. Существование электроэнергетики сегодня невозможно без МУРЗ

Устройства защиты на электромеханических реле не позволяют обеспечить выполнение технических требований, предъявляемых сегодня к релейной защите, и дальнейшее существование электроэнергетики уже просто невозможно без микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ).

Одним из широко распространенных мифов [3.5], объясняющих неизбежность перехода на микропроцессорные защиты, является миф о том, что устройства защиты на электромеханических реле не позволяют обеспечить выполнение технических требований, предъявляемых к релейной защите и дальнейшее существование электро-

энергетики уже просто не возможно без микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ).

В действительности, никаких принципиально новых функций в релейную защиту МУРЗ не привнесли, а параметры и возможности высококачественных электромеханических и полупроводниковых (то есть статических аналоговых устройств, выполненных на основе дискретных полупроводниковых элементов или с применением интегральных микросхем) полностью обеспечивают потребности релейной защиты. Несмотря на то, что некоторые специфические характеристики, реализуемые МУРЗ, не могут быть реализованы защитами других типов (например, полигональные характеристики дистанционной защиты), тем не менее, в релейной защите по большому счету нет таких задач, которые нельзя было бы решить с помощью электромеханических или статических реле. Свидетельством этому является тот факт, что развитые электрические сети и системы существуют и успешно функционируют во всем мире уже более ста лет, тогда как микропроцессорные защиты появились в эксплуатации в сколько-нибудь заметном количестве всего каких-то 10-15 лет назад. При этом, с началом применения МУРЗ, логика работы энергосистемы не изменилась, не увеличилось количество операций, выполняемых энергосистемой, не изменилось количество вырабатываемой электроэнергии, не изменились принципы передачи и распределения электроэнергии. А что касается улучшенных характеристик МУРЗ, то их наличие вовсе не означает каких-то революционных преобразований в релейной защите.

Прогресс в развитии электромеханических реле был полностью остановлен 30-35 лет назад. И дело здесь вовсе не в каких-то принципиальных недостатках электромеханических реле и в их неспособности обеспечивать надежную защиту энергетических объектов. А в том, что затраты на полностью роботизированное (вплоть до автоматического тестирования) производство МУРЗ из дешевых электронных комплектующих высокой степени интеграции не идет ни в какое сравнение с затратами на производство и ручную сборку из высокоточных механических элементов электромеханических реле, при том, что продажная стоимость МУРЗ остается очень высокой. Например, российская компания НЭК из Новосибирска (www.nec.mbit.ru) предлагает контрактную сборку печатных плат с использованием современной технологии поверхностного монтажа

со скоростью монтажа 50.000 компонентов в час. Да, да 50 тысяч компонентов в час! Совершенно очевидно, что при наличии такого высокопроизводительного полностью автоматического оборудования производство печатных плат, из которых и состоит МУРЗ, приносит производителям баснословные прибыли по сравнению с производством механических реле. Именно в сфере производства, а не эксплуатации проявляется самое важное преимущество МУРЗ: сверхприбыль производителей. Апологеты скорейшего и повсеместного внедрения МУРЗ часто приводят такие доводы, в пользу последних, как отсутствовавшая у электромеханических реле возможность записи аварийных режимов, возможность обмена информацией между реле и т.п. Но, все это рекламные трюки, не имеющие ничего общего с действительностью. Сегодня на рынке имеются сотни разновидностей микропроцессорных самописцев аварийных режимов, способных передавать данные по сети, которые регистрируют аварийные режимы значительно лучше и полнее, чем это делают МУРЗ; имеются развитые системы передачи информации такие, например, как SCADA, хорошо работающие уже многие годы с электромеханическими реле.

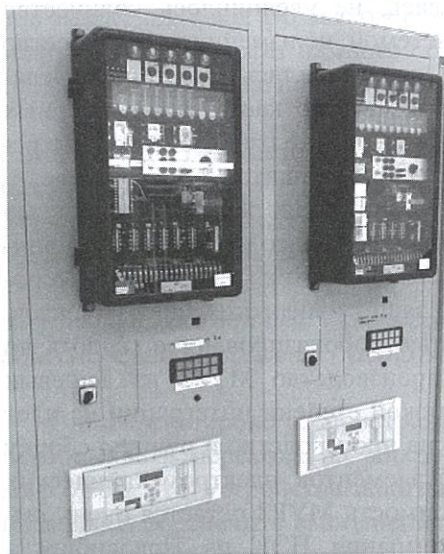


Рис. 3.5. Фрагмент панели дистанционной защиты ответственных линий 160 кВ, содержащей электромеханические реле типа LZ31 (вверху), включенные на параллельную работу с микропроцессорными защитами типа MiCOM P437 (внизу)

В отличие от реле защиты, микропроцессорные самописцы аварийных режимов не способны повлиять на надежность электро-

снабжения и спровоцировать тяжелые аварии в сети при отказах в работе, поэтому широкое их использование можно только приветствовать. Следует подчеркнуть весьма важный момент: говоря о не микропроцессорных реле, мы подразумеваем не какие-то конкретные образцы реле, а общий принцип: неиспользование микропроцессоров и микросхемотехники в реле защиты. А говоря об электромеханических реле – не сильно устаревшие и изношенные однофункциональные электромеханические реле российского производства типа РТ-40 или РТ-80, а лучшие образцы реле ведущих западных фирм-производителей. Это очень важный момент во всех наших рассуждениях, поскольку во всех своих доводах апологеты МУРЗ используют в качестве базы для доказательства преимуществ МУРЗ именно эти типы электромеханических реле. Чтобы понять всю абсурдность такого сравнения достаточно вспомнить, что реле РТ-40 – это легкая модификация реле ЭТ-520, разработанного в СССР более 50 лет назад. Его конструкция была «заимствована» российскими конструкторами с реле фирмы Siemens, которое производилось в 30-х годах прошлого века. А реле РТ-80 – это практически точная копия реле типа RIK, выпускавшееся шведской фирмой ASEA в тех же 30-х годах. Чего же можно ожидать от конструкций, разработанных 80 лет назад и произведенных к тому же, советской не военной промышленностью из крайне некачественных материалов? Как вообще могла возникнуть мысль сравнивать эти достаточно примитивные устройства, с современными изделиями, произведенными с использованием новейших технологий? Во всяком случае, автору (в отличие от многочисленных оппонентов) такая мысль никогда не приходила в голову. По-видимому, проблема российских оппонентов, критикующих автора, заключается в их очень ограниченном знании электромеханических реле. По существу, ничего, кроме РТ-40 и РТ-80, им неизвестно. Когда же мы упоминаем электромеханические реле, то мы имеем в виду лучшие образцы ведущих мировых компаний производителей, таких как: General Electric, BBC, Siemens.

Автор не сомневается в том, что если бы оппонентам удалось своими собственными руками «пощупать» такой, например, шедевр релестроения, как электромеханическое трехступенчатое реле дистанционной защиты LZ31 или аналогичные ему после 40 лет эксплуатации в морском субтропическом (то есть с воздействи-

ем солевого тумана) климате, то они, несомненно, изменили бы свое мнение об электромеханических реле. Кстати, еще во многих местах эти реле защищают многие ответственные линии напряжением 160 кВ, иногда и параллельно с микропроцессорными реле (рис. 3.5).

Ситуация в странах бывшего СССР отличается особой сложностью. Нормированные сроки эксплуатации электромеханических реле там уже давно исчерпаны, многие из них находятся в весьма плачевном состоянии, и эксплуатационному персоналу приходится предпринимать героические усилия для поддержания работоспособности релейной защиты. В такой ситуации переход на МУРЗ — это единственный вариант, у которого просто нет альтернативы из-за диктата производителей (см. выше). Сегодня на мировом рынке просто не существует электромеханических реле защиты, разработанных с использованием современных материалов и технологий, а все ведущие мировые производители реле защиты полностью перешли на производство исключительно МУРЗ. Вместе с тем, прогресс в области новых материалов и новых компонентов позволяет построить реле защиты на совершенно новых принципах, к которым можно отнести, например, гибридные реле [3.6]. К сожалению, сегодня производителей МУРЗ, увлеченных все большим функциональным усложнением своих изделий, позволяющим, не вкладывая значительных средств, увеличивать стоимость МУРЗ (или на протяжении многих лет не снижать их стоимость), уже практически невозможно заинтересовать какими-то альтернативными видами реле, не способными конкурировать в части прибыльности с МУРЗ. Причем прибыльность производителя МУРЗ обусловлена не только большой разницей между себестоимостью и продажной ценой МУРЗ, но также и использованием технологии производства (поверхностный монтаж суперминиатюрных элементов и микросхем с повышенной степенью интеграции на многослойной печатной плате), не допускающей ремонта модулей МУРЗ. Вышедший из строя модуль МУРЗ, выполненный по такой технологии, можно только выбросить, заменив его новым. Именно такой подход рекламируется производителями МУРЗ как высокая «ремонтпригодность» их изделий. Но если учесть, что весь МУРЗ стоимостью 5 – 15 тыс. долларов состоит из 4 – 5 таких модулей (отдельных печатных плат), то становится понятным, во что обойдется потребителю (то есть энер-

госистемам) такая «ремонтпригодность». По данным, приведенным в [3.2], уже сейчас надежной эксплуатации устройств РЗА «препятствуют ... невыполнение заявок служб РЗА на запчасти, существенный рост затрат на РЗ и проверочные устройства к ним в случае применения микропроцессорных устройств РЗА». И это при менее, чем 3 – 4 % МУРЗ в релейной защите! Что же будет при возрастании процента МУРЗ в общем объеме реле защиты?

Еще одна статья доходов производителей МУРЗ обеспечивается за счет попытки переложить на плечи потребителей технические проблемы МУРЗ, заставив их приобретать дополнительные блоки и модули, направленные на повышение надежности работы МУРЗ. В качестве примера можно привести дополнительные модули питания, рекомендуемые НТЦ «Механотроника» для обеспечения работоспособности МУРЗ при перерывах оперативного питания в течение 0.5 с. Но ведь такое требование предъявляется [3.35] непосредственно к самому МУРЗ, а не к дополнительным блокам и модулям питания, предлагаемым НТЦ «Механотроника». В п. 4.5.8 [3.35] совершенно однозначно записано: *«Устройства МП РЗА должны сохранять заданные функции без изменения параметров и характеристик срабатывания при перерывах питания длительностью до 0.5 с»*. Так почему бы производителю не ввести дополнительный конденсатор большой емкости во внутренний источник питания МУРЗ для поддержания его работоспособности в течение 0.5с при перерывах оперативного питания (тем более, что собственное потребление современных МУРЗ весьма незначительное)? Вопрос, конечно, риторический, ведь совершенно очевидно, что намного выгоднее заставить потребителя раскошелиться на приобретение дополнительного модуля питания, как это рекомендует один из менеджеров НТЦ «Механотроника» в своей статье [3.36].

3.1.6. Еще один класс проблем, о которых умалчивается

В свете повышенной чувствительности современной микроэлектроники к электромагнитным излучениям, особенно актуальной для МУРЗ становится проблема электромагнитной совместимости (ЭМС). Многие специалисты обращают внимание на частое несоответствие реальных параметров систем заземления на подстанциях требованиям, предъявляемым МУРЗ [3.37, 3.38] и, как следствие этого, на отказы в работе МУРЗ. Но мало что известно специали-

стам в области релейной защиты о проблеме электромагнитного терроризма, то есть преднамеренных воздействий на устройства релейной защиты мощных электромагнитных излучений [3.39], а также о проблеме хакерских атак (Cyber Security) [3.40]. Эти проблемы были неизвестны ранее в релейной защите и стали актуальными лишь в связи с применением МУРЗ, поскольку их чувствительность к электромагнитным помехам в 10000 раз выше, чем у электромеханических реле [3.37] и они имеют встроенное программное обеспечение, также подверженное внешним воздействиям. А если, в дополнение ко всему вышесказанному, принять во внимание, что один МУРЗ выполняет функции 3 – 5 ЭМЗ, то положение с надежностью МУРЗ усугубляется еще больше, так как отказ одного из общих элементов МУРЗ эквивалентен по своим последствиям одновременному отказу сразу нескольких видов защиты. В связи с этим в [3.41] даже предлагается при переходе на МУРЗ предусматривать дополнительную независимую, простую, недорогую, *не микропроцессорную* резервную защиту на случай чрезвычайных ситуаций.

3.2. Выходные электромагнитные реле: проблемы и решения

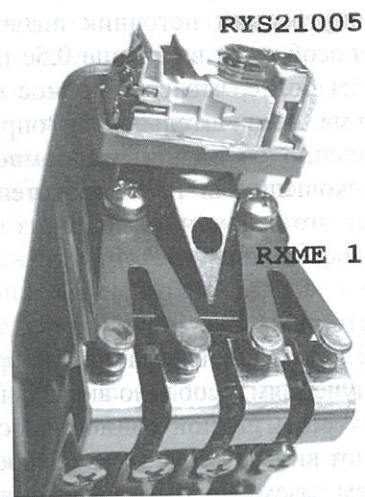


Рис. 3.6. Субминиатюрное реле RYS 21005, расположенное на контактах с двойным разрывом V-образной формы промежуточного реле типа RXME 1, предназначенного для управления отключающей катушкой выключателя

Как показано в исследованиях, выполненных автором [3.26, 3.27], контакты миниатюрных электромеханических реле (обычно используемых во всех типах МУРЗ в качестве выходных элементов, непосредственно управляющих отключающими катушками высоковольтных выключателей или катушками промежуточных реле) работают со значительной перегрузкой. Использование промежуточных (более мощных) реле, включаемых между выходными цепями МУРЗ и отключающей катушкой выключателя, приводит к увеличению общего времени срабатывания защиты на 30 – 40 %, что далеко не всегда является таким уж безобидным. Поэтому производители МУРЗ не требуют использования промежуточных реле. По их утверждению, миниатюрные выходные реле способны самостоятельно управлять отключающей катушкой высоковольтного выключателя. Посмотрим, не является ли это очередным мифом.

Как известно, коммутационная способность контактов реле определяется (при прочих равных условиях) площадью контактной поверхности, массой контактов, контактным нажатием и межконтактным зазором. Чем большие значения имеют эти параметры, тем выше коммутационная способность контактов. Поэтому мощные контакты отличаются от маломощных прежде всего своими размерами и зазором. Для создания большого контактного нажатия и для перемещения более тяжелых контактов на большее расстояние требуется и более крупная и мощная катушка. Таким образом, можно констатировать, что для коммутации более мощной нагрузки требуется и более крупное реле (рис. 3.6).

В старых электромеханических реле защиты в качестве элемента, включающего отключающую катушку высоковольтного выключателя, использовалось специальное встроенное промежуточное реле, обычно с фиксацией положения после срабатывания и ручным возвратом (seal-in relay) и со встроенным флажком (target), индицирующим состояние реле. Такое реле называется “auxiliary seal-in relay with target” и имеет мощные контакты с большим зазором, специально рассчитанные на включение тока до 30А при напряжении 250 В постоянного тока.

В реле защиты следующего поколения: электронных аналоговых (или статических), выполненных на микросхемах и транзисторах, сохранилась тенденция использования встроенных крупных

выходных реле с мощными контактами, предназначенными для включения отключающей катушки выключателя (рис. 3.7).

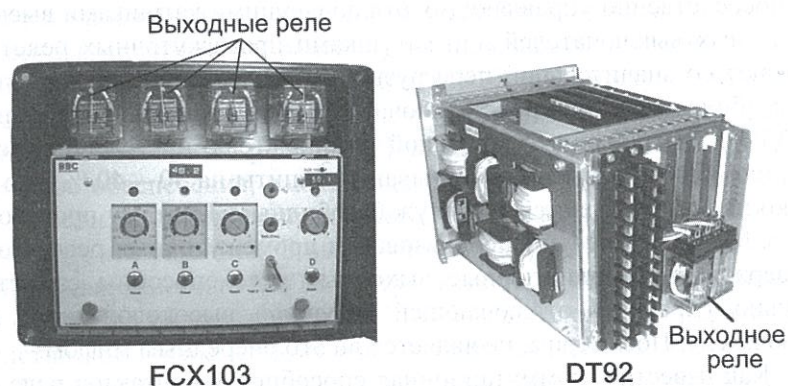


Рис. 3.7. Полупроводниковые реле защиты со встроенными мощными выходными реле

Некая новая реальность возникла при переходе на защиты самого последнего поколения — микропроцессорные. Жесткая конкурентная борьба на рынке и стремление к максимальному уменьшению размеров микропроцессорных защит привели к использованию в качестве выходных элементов субминиатюрных электромагнитных реле (см. Главу II).

В соответствии с характеристиками производителей субминиатюрных электромагнитных реле, они предназначены для применения в системах промышленной автоматики, в электронных источниках питания, в телевизорах, в бытовой технике, в компьютерах и системах связи, таймерах и т.п.

В технических характеристиках на эти реле коммутационная способность на постоянном токе ограничивается, как правило, на уровне 28 — 30 В и только для чисто активной нагрузки. Вместе с тем, такой параметр, как максимальная коммутируемая мощность на постоянном токе (иногда это кривые коммутационной способности на постоянном токе), дает возможность рассчитать максимальный коммутируемый ток при напряжении 250 В постоянного тока (табл. 3.1).

Как видно из таблицы, значения этих токов, даже при чисто активной нагрузке, в 20 — 40 раз меньше, чем на переменном токе. Что касается коммутации индуктивной нагрузки на постоянном токе, то такая способность этих реле вообще не предусматривается в технических характеристиках. Что же позволило производителям микропроцессорных защит использовать миниатюрные (то есть маломощные) реле для прямого включения отключающей катушки выключателя? Может быть, уменьшились требования к контактам управления отключающей катушкой? Отнюдь нет! В технических спецификациях на все микропроцессорные устройства защиты производителями гарантируется коммутация тока не менее 30А при напряжении 250В постоянного тока.

Таблица 3.1. Коммутационные параметры субминиатюрных электромагнитных реле применяемых в микропроцессорных устройствах защиты в качестве выходных реле

Тип реле (производитель)	Максимальная коммутируемая мощность (для резистивной нагрузки)		Номинальный ток и номинальное напряжение (для резистивной нагрузки)		
	Перем.	Пост.	Перем.	Пост.	250 В пост.
ST (Matsusita)	2000 ВА	150 Вт	8А; 380В	5А; 30В	0.40А
JS (Fujitsu)	2000 ВА	192 Вт	8А; 250В	8А; 24В	0.35А
RT2 (Schrack)	2000 ВА	240 Вт	8А; 250В	8А; 30В	0.25А
RYII (Schrack)	2000 ВА	224 Вт	8А; 240В	8А; 28В	0.28А
G6RN (Omron)	2000 ВА	150 Вт	8А; 250В	5А; 30В	-
G2RL-1E (Omron)	3000 ВА	288 Вт	12А; 250 В	12А; 24 В	0.30А

Может быть, сами миниатюрные реле достигли такого уровня совершенства, что теперь они способны включать индуктивные нагрузки (катушки) с током 30 А при напряжении 250 В постоянного тока? Увы, технические спецификации на субминиатюрные реле, используемые в микропроцессорных устройствах защиты, о таких возможностях миниатюрных реле умалчивают. Зато инженеры компаний-производителей этих реле, к которым автор обращался с

прямым запросом, категорически отвергают наличие таких способностей у реле, используемых в микропроцессорных защитах.

Получается, что производители микропроцессорных защит комплектуют столь ответственные и дорогостоящие (10 – 15 тыс. долларов) устройства, как микропроцессорные защиты, заведомо негодными элементами? Из отчетов об испытаниях коммутационной способности выходных реле, представленных по нашему запросу крупнейшими мировыми производителями микропроцессорных защит, следует, что эти реле успешно выдержали испытания и признаны годными для применения. Но где же в таком случае логика?

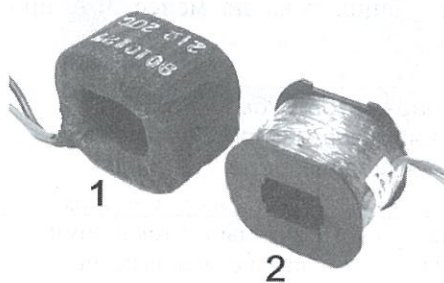


Рис. 3.8. Отключающие катушки выключателей класса 160 - 170 кВ различных производителей: 1 – Hitachi Kokubo Works (GE-Hitachi, USA); 2 – AQ Trafo AB (Sweden)

Таблица 3.2. Основные параметры отключающих катушек высоковольтных выключателей некоторых типов и специального промежуточного реле с фиксацией и ручным возвратом

Параметр	Единица измерения	L1	L2	L3	L4
Ток, I	A	1.25	2.5	5	12
Индуктивность катушки с сердечником, L	H	0.5	1.0	1.0	0.22
Сопротивление катушки, R	Ω	200	100	50	22
Постоянная времени, $\tau = L/R$	ms	2.5	10	20	10
Энергия магнитного поля, E	J	0.40	3.12	12.50	15.80

Может быть, эти испытания производители микропроцессорных защит проводят не так как следует? Но, с другой стороны, ведь микропроцессорные защиты с этими миниатюрными выходными реле успешно функционируют во многих энергосистемах мира уже

немало лет. Так может быть, реальные условия эксплуатации этих реле намного легче, чем требования, записанные в технической спецификации? Попробуем разобраться в сложившейся ситуации. Прежде всего, рассмотрим реальные параметры отключающих катушек выключателей.

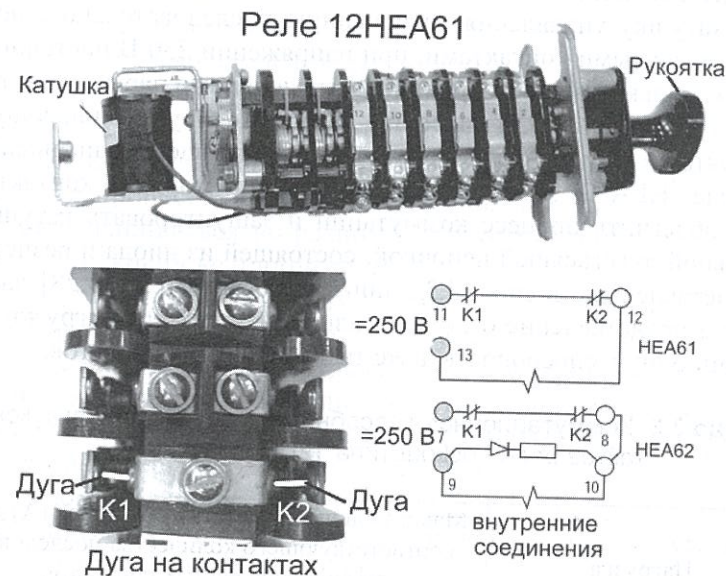


Рис. 3.9. Быстродействующее промежуточное реле с фиксацией положения и ручным возвратом (Lockout), 12HEA61 типа

В табл. 3.2 приведены результаты измерений основных параметров отключающих катушек (L1, L3, L4) высоковольтных выключателей некоторых типов, а также катушки (L2) специального быстродействующего промежуточного реле с фиксацией положения и ручным возвратом (Lockout), включаемого иногда между реле защиты и выключателем.

Из анализа параметров катушек, представленных в этой таблице, можно сделать некоторые интересные выводы.

Во-первых, промежуточное реле с фиксацией положения и ручным возвратом (Lockout) является для контактов миниатюрных вы-

ходных реле нагрузкой ничуть не меньшей, чем отключающие катушки выключателей (рис. 3.9).

Эксперименты, выполненные автором с этим реле, показали, что даже мощные контакты этого реле (диаметр контакта 6 мм, зазор между контактами около 8 мм) не способны отключить собственную катушку управления, включенную последовательно с нормально замкнутыми контактами, при напряжении 250 В постоянного тока. И только две последовательно включенные пары контактов (как показано на рис. 3.9) способны разорвать дугу, возникающую на контактах в момент отключения. В последующей модификации этого реле (HEA62) даже для двух пар таких мощных контактов решили облегчить процесс коммутации и зашунтировать катушку специальной дугогасящей цепочкой, состоящей из диода и резистора. Представленные в табл. 3.3 данные производителя [3.28] дают наглядное представление о степени влиянии характера нагрузки на коммутационную способность даже таких мощных контактов.

Таблица 3.3. Коммутационная способность мощных силовых контактов реле Lockout типа 12HEA61 [3.28]

Нагрузка	Максимальный коммутируемый ток (А) для соответствующего количества последовательно включенных контактов		
	1	2	4
250 В постоянного тока, индуктивная	0.7	1.75	6.5
220 В переменного тока, активная	25	50	-
220 В переменного тока, индуктивная	12	25	40

Во-вторых, постоянная времени $\tau = L/R$, которой обычно характеризуется вид нагрузки, не является достаточно информативным показателем, позволяющим делать выводы о реальной коммутационной способности контактов. Например, как видно из табл. 3.2, в катушках L2 и L4 с одинаковой L/R запасается существенно разная энергия, которая рассчитывается по хорошо известной классической формуле [3.29]:

$$E_L = \int_0^I id\psi = \int_0^I Lidi = \frac{LI^2}{2},$$

где ψ – потокосцепление;

L – индуктивность нагрузки;

I – ток в нагрузке.

Именно эта энергия магнитного поля и выделяется на контактах в процессе коммутации. Это значит, что контакты реле будут изнашиваться по-разному при коммутации катушек L2 и L4 с одинаковой величиной L/R .

В-третьих, величина коммутируемого тока без указания других параметров индуктивной нагрузки (как, например, в табл. 3.3), не является параметром, достаточным для однозначной оценки коммутационной способности контактов. Например, ток в катушке L2 всего лишь вдвое превышает ток в катушке L1, тогда как энергия, запасаемая в L2, почти в 8 раз превышает энергию, выделяемую при коммутации в L1. Эксперименты на этих катушках с визуальной фиксацией мощности дуги на контактах подтвердили эти выводы.

В связи с изложенным, в качестве показателя, характеризующего индуктивную нагрузку для контактов реле, предлагается использовать энергию магнитного поля этой нагрузки. Однако использовать показатель, характеризующий нагрузку, в качестве одного из параметров параметра контактов не очень удобно. С другой стороны, поскольку вся эта энергия выделяется на контактах реле в процессе коммутации, то, очевидно, более удобным показателем, характеризующим контакты реле, мог бы быть такой параметр, как «максимальная энергия коммутации», который может быть определен как максимальная энергии магнитного поля нагрузки, которую способны коммутировать контакты реле при заданных показателях надежности и срока службы. Для номинальных напряжений 250 В и 125 В постоянного тока этот показатель будет иметь вид, соответственно:

$$E_{250} = 0.125I\tau,$$

$$E_{125} = 0.062I\tau$$

где I – ток в нагрузке в амперах;

τ – постоянная времени нагрузки в миллисекундах.

Таким образом, из рассмотрения реальных параметров отключающих катушек выключателей и быстродействующего промежуточного реле Lockout можно сделать вывод о том, что они действительно представляют собой серьезные индуктивные нагрузки для контактов выходных реле устройств защиты.

Таблица 3.4. Коммутационная способность контактов в зависимости от типа нагрузки для электромагнитов управления, клапанов и соленоидов

Категория применения (IEC 60947-4)	Род тока	Коммутационная способность контактов в режиме нормальных коммутаций					
		включение			выключение		
		ток	напряжение	cosφ	ток	напряжение	cosφ
AC-15	Пер.	$10 I_N$	U_N	0.3	$10 I_N$	U_N	0.3
DC-13	Пост.	I_N	U_N	-	I_N	U_N	-
Коммутационная способность контактов в режиме редких коммутаций							
AC-15	Пер.	$10 I_N$	$1.1 U_N$	0.3	$10 I_N$	$1.1 U_N$	0.3
DC-13	Пост.	$1.1 I_N$	$1.1 U_N$	-	$1.1 I_N$	$1.1 U_N$	-

Примечание: I_N и U_N – номинальные значения токов и напряжений нагрузок, коммутируемых контактами реле.

Обосновывая способность миниатюрных электромагнитных реле управлять катушками отключения высоковольтных выключателей, производители микропроцессорных защит обычно ссылаются на то обстоятельство, что контакты этих реле только **ВКЛЮЧАЮТ** отключающую катушку выключателя. Отключение этой катушки,

сопровожаемое интенсивной дугой, осуществляется вспомогательными нормально-замкнутыми контактами самого выключателя, а не контактами миниатюрного реле, поэтому-де и удастся мало-мощными контактами миниатюрных реле включать мощные отключающие катушки выключателей. Так ли однозначно такое утверждение? Ведь хорошо известно, что замыкание контактов электрических аппаратов сопровождается многократными отскоками контактов после первого замыкания и последующими повторными замыканиями (этот процесс получил название “bouncing” или «дребезг»). Этот факт отражен и в технической литературе и в стандартах. Это означает, что никакого «чистого замыкания» контактов, без многократных размыканий в процессе срабатывания реле, просто не существует. Конечно, время нахождения контактов в открытом состоянии (то есть при горячей дуге) при отскоках незначительно, но малые расстояния между контактами в этот период времени и следующее за этим их сжатие делает опасность приваривания контактов вполне реальной. Поэтому в существующих стандартах нет больших различий между замыканием и размыканием цепей с индуктивной нагрузкой на постоянном токе при оценке коммутационной способности контактов.

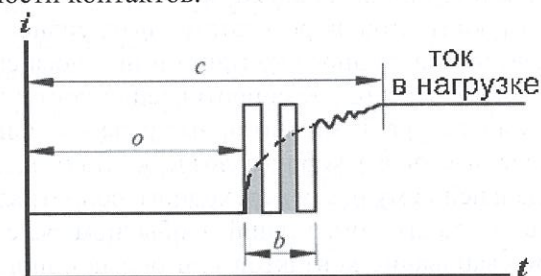


Рис. 3.10. Процесс замыкания нормально открытого контакта реле в соответствии с международным стандартом IEC 61810-7 [3.30]
o – время до первого соударения контактов; c – полное время замыкания; b – время дребезга контактов

Так, например, для категории применения DC-13 (управление электромагнитами, катушками соленоидов и клапанов) в соответствии со стандартом IEC60947 ток включения контактов, как и ток

отключения, не должны превышать номинального (т.е. длительно-го) тока, в то время как для контактов, работающих на переменном токе, допускается 10-кратное значение тока включения, табл. 3.4.

Однако из вышеизложенного еще нельзя сделать однозначный вывод о том, что контакты миниатюрных реле, осуществляющие включение отключающих катушек выключателей или катушек мощных быстродействующих промежуточных реле, действительно подвергаются значительным перегрузкам. Дело в том, что во время включения индуктивной нагрузки ток в ней нарастает не сразу, а по экспоненте. А это означает, что разрывы цепи нагрузки во время дребезга контактов происходят при токе, меньше номинального (рис. 3.10).

С другой стороны, тот факт, что выходные контакты миниатюрных реле в устройствах защиты не выходят из строя при первом же включении, а работают достаточно долго в реальных условиях эксплуатации, также не доказывает, что эти контакты работают в нормальном для них режиме. Это обусловлено тем, что даже при заметной дуге на контактах, отказ коммутации (то есть незамыкание или неразмыкание контактов) происходит далеко не сразу. Имеет место достаточно длительный процесс накопления дефектов на поверхности контактов в результате интенсивного испарения контактного материала с одного контакта и переноса его на другой контакт. Возрастает переходное сопротивление контактов и, следовательно, их температура. В миниатюрных реле это приводит к расплавлению пластмассового корпуса возле контактов, загрязнению контактов и дальнейшему росту переходного сопротивления. После нескольких тысяч таких коммутаций в обычном реле происходит окончательное сваривание контактов или обрыв одного из контактов, что является полным отказом реле. Поскольку электромагнитные реле предназначены, обычно, для сотен тысяч или даже миллионов коммутаций, то режим работы, при котором вместо миллиона коммутаций реле выходит из строя уже при нескольких тысячах коммутаций, является недопустимым и не разрешается изготовителями этих реле. С другой стороны, выходные реле в устройствах защиты не работают с такой интенсивностью. Максимальное количество срабатываний таких реле за весь срок их службы вряд ли превысит несколько тысяч. Отсюда становится понятным, почему реле, работающие в ненормальном для них режиме, тем не менее,

обеспечивают работоспособность защит и даже успешно проходят испытания на предприятиях-изготовителях защит. Именно эти два факта всегда приводятся компаниями-производителями устройств релейной защиты в оправдание возможности использования миниатюрных реле для прямого отключения высоковольтных выключателей. Но действительно ли это означает отсутствие проблемы в этом вопросе? Ведь процесс отказа контактов реле в таком режиме работы является статистическим, а момент отказа зависит от накопленных дефектов и их величины, что, в свою очередь, определяется конкретными параметрами отключающих катушек, частотой срабатывания реле защиты, технологическими особенностями конструкции контактов и разбросами их параметров при сборке реле. Чем дольше работает такое реле, тем выше вероятность его отказа, следовательно, и отказа защиты важного энергетического объекта. Таким образом, речь идет не о том, что миниатюрное электромагнитное реле, используемое в устройстве защиты, выходит из строя сразу же после первого включения или после определенного количества включений, а о том, что в процессе эксплуатации происходит прогрессирующее снижение его надежности и резкий рост вероятности выхода из строя.

То есть, надежность этих миниатюрных реле существенно снижена при использовании их в качестве выходных элементов МУРЗ по сравнению с величиной, нормируемой заводом-изготовителем этих миниатюрных реле. И никакая самодиагностика не в состоянии улучшить эту надежность.

Очевидно, что широкое применение таких не подходящих по своим параметрам электромеханических реле практически во всех типах МУРЗ, а также в микропроцессорных устройствах, обеспечивающих связь между реле защиты, и в других аналогичных устройствах, имеющих на рынке, обусловлено стремлением производителей уменьшить массогабаритные показатели этих устройств. При большом количестве выходных реле, достигающем иногда до нескольких десятков, использование более подходящих по параметрам, но и более крупных реле, привело бы к необходимости существенного увеличения размеров корпуса МУРЗ. Понятно, что производители МУРЗ не могут пойти на такой шаг, так как размеры МУРЗ являются одним из важных рекламных критериев в борьбе за потенциального покупателя. Расплачиваться за эти игры приходится

ся потребителю. Но можно ли решить эту проблему? Да, отвечает автор этой книги и предлагает варианты решения проблемы.

Общая суть предлагаемого нами решения заключается в отказе от установки выходных электромеханических реле внутри МУРЗ. Такие реле вообще не должны быть частью МУРЗ, а должны выбираться и приобретаться потребителем (или поставляться в комплекте с реле защиты) отдельно в зависимости от его конкретных условий. А условия эти могут быть самыми разными, что обуславливает и разные требования к выходным реле, контакты которых используются в разных цепях. Например, для коммутации низковольтных слаботочных сигналов (так называемых «сухих» цепей) в электронных цепях нужны реле с раздвоенными золотыми или позолоченными контактами, тогда как для коммутации цепей переменного тока с напряжением 220 В и током в несколько ампер нужны контакты из сплавов на основе серебра. Для коммутации индуктивных нагрузок при напряжении 220 В постоянного тока нужны вообще особые реле, рассмотренные ниже.

Практическая реализация этого принципа может быть осуществлена двумя путями: установкой внутри МУРЗ специального полупроводникового элемента, предназначенного для коммутации катушек внешних реле, или выполнением каждого выходного канала в виде источника напряжения с мощностью, достаточной для срабатывания внешнего электромагнитного или полупроводникового реле. Рассмотрим особенности каждого из этих путей.

Сегодня на рынке полупроводниковых приборов имеется множество типов миниатюрных высоковольтных MOSFET - и IGBT транзисторов на напряжения 1000 – 1500 В и токи 5 – 50 А, а также соответствующие драйверы с оптической развязкой к ним. В качестве примера можно указать транзисторы типов: IXYS05N100, STFV4N150, STP4N150, STP5NB100, STP5NK100Z и др. в корпусах типа TO-220, а также транзисторы типов STPW4N150, STW11NK100Z, APT15GN120BDQ1, APT35GN120B, IRG4PH20K, IXDH20N120, IXGH25N160 и др. в корпусах типа TO-247. Установленные на печатной плате МУРЗ без радиаторов и снабженные элементами защиты от перенапряжений (варисторами достаточной мощности) эти транзисторы способны непосредственно включать и выключать катушки управления промежуточных реле и небольших контакторов с токами до 1 А при номинальном напряжении 220 В

постоянного тока. Недавно, известная фирма CP Clare освоила массовое производство высоковольтных MOSFET-транзисторов со встроенными в корпус (типа ISOPLUS264) драйверами с оптической развязкой (рис. 3.11).

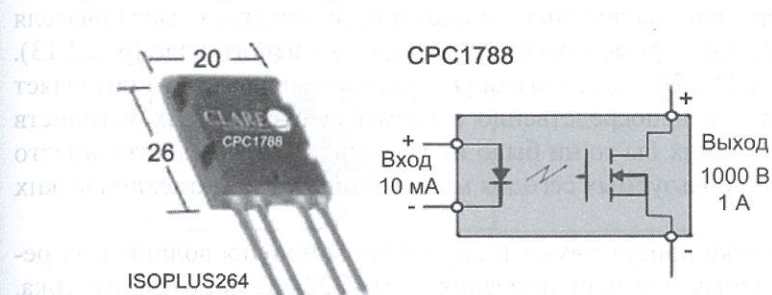


Рис. 3.11. Высоковольтный MOSFET-транзистор типа CPC1788 в корпусе ISOPLUS264 со встроенным драйвером с оптической развязкой, производимый фирмой CP Clare

Такое устройство может управляться напрямую током в 10 мА от внутренних электронных цепей МУРЗ и осуществлять коммутацию катушек внешних электромагнитных реле с токами до 1 А при номинальном напряжении 220 В постоянного тока.

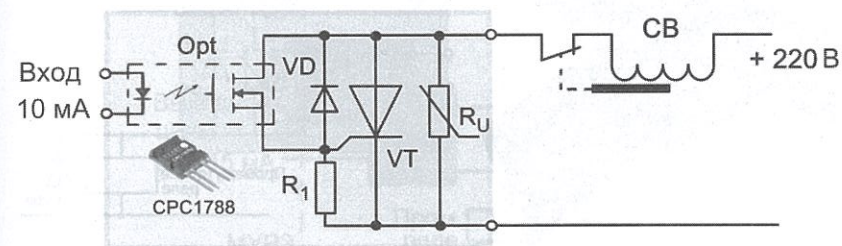


Рис. 3.12. Электрическая схема внешнего модуля на базе элемента CPC1788, подключаемого к выходу МУРЗ для управления отключающей катушкой выключателя (CB) при питании от сети 220В постоянного тока: VT - тиристор; R_U – варистор

На этом, в общем-то, исчерпываются возможности разработчиков по реализации первого упомянутого выше подхода.

Второй путь решения проблемы дает намного больше вариантов.

Во-первых, имеется несколько вариантов использования описанного выше элемента типа CPC1788 в составе внешнего модуля, например, для включения отключающей катушки выключателя (рис.3.12) или промежуточного электромагнитного реле (рис.3.13). Элемент CPC1788 имеет высокую чувствительность, что позволяет включать его непосредственно в схемы существующих устройств МУРЗ без каких бы то ни было изменений режимов работы, вместо катушек используемых сегодня миниатюрных электромеханических реле.

На рынке присутствуют и другие типы полупроводниковых реле, пригодных для использования в сети 220 В постоянного тока, например типа SSC1000-25, рассчитанное на максимальное напряжение 1000 В и максимальный ток 25 А (рис. 3.14). Особенностью этого реле является: во-первых, коммутируемый им ток должен превышать некоторое минимальное значение (20 мА); во-вторых, оно требует напряжения минимум 12 В в качестве сигнала управления.

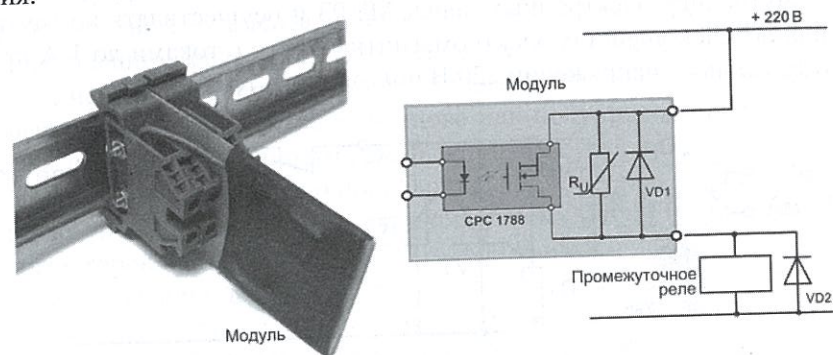


Рис. 3.13. Схема и устройство внешнего модуля простейшей конструкции на базе элемента CPC1788, подключаемого к выходу МУРЗ для управления промежуточными реле

Первая особенность обуславливает применение этого устройства лишь для достаточно мощных нагрузок, таких как отключающие катушки выключателей, мощные контакторы и т.п. Вто-

рая требует переделки внутренней электронной схемы МУРЗ, поскольку, обычно катушки встроенных выходных реле работают от напряжения 5 В.

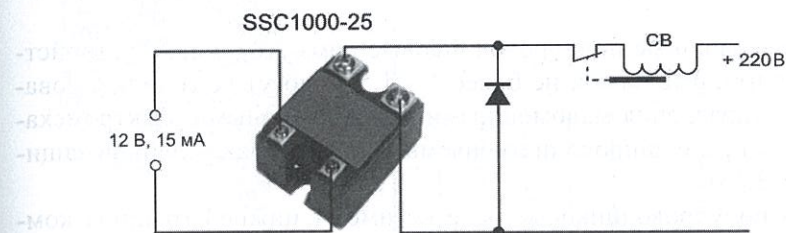


Рис. 3.14. Схема включения мощного полупроводникового реле типа SSC1000-25 для управления отключающей катушкой выключателя (CB)

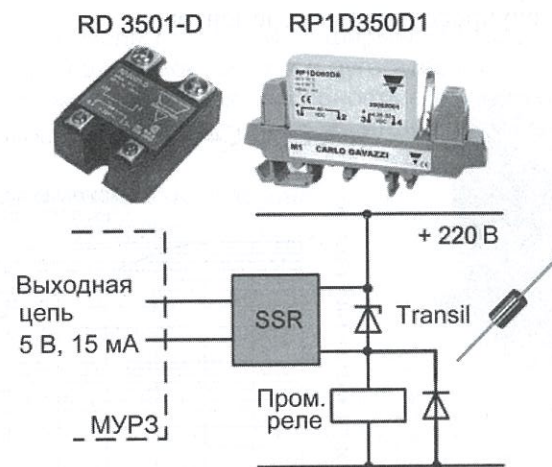


Рис. 3.15. Внешние выходные коммутационные элементы МУРЗ на основе маломощных полупроводниковых реле для включения и выключения промежуточных электромеханических реле в сети 220 В постоянного тока. Transil® - полупроводниковый элемент, предназначенный для защиты от перенапряжений полупроводникового реле SSR

Для использования элемента SSC1000-25 в качестве внешнего выходного реле разработчикам новых МУРЗ придется предусмотреть увеличение уровня выходного управляющего напряжения до 12 В.

Менее мощные полупроводниковые коммутирующие устройства, рассчитанные на ток не более 1 – 1.5 А могут быть использованы для управления маломощными промежуточными электромеханическими реле, широко применяемыми в системах релейной защиты (рис. 3.15).

Эти полупроводниковые реле не имеют нижней границы коммутируемых токов и могут управляться напряжением 5 В, что освобождает разработчиков МУРЗ от необходимости увеличения уровня напряжения выходных цепей. Если при разработке новых МУРЗ увеличить мощность выходного сигнала до значений: 12 В и 100 мА, то появляется возможность использования внешних достаточно мощных электромагнитных реле без каких бы то ни было промежуточных полупроводниковых элементов.

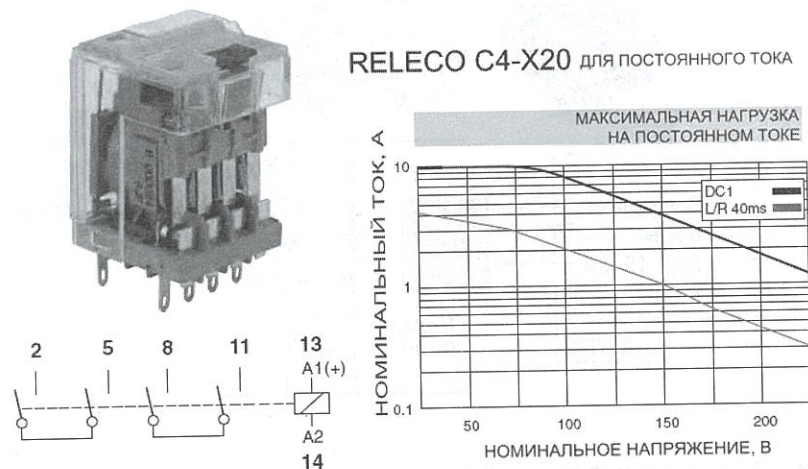


Рис. 3.16. Реле типа C4-X20 фирмы RELECO (с частично удаленным чехлом) с двумя контактами с двойным разрывом и его коммутационная способность на постоянном токе

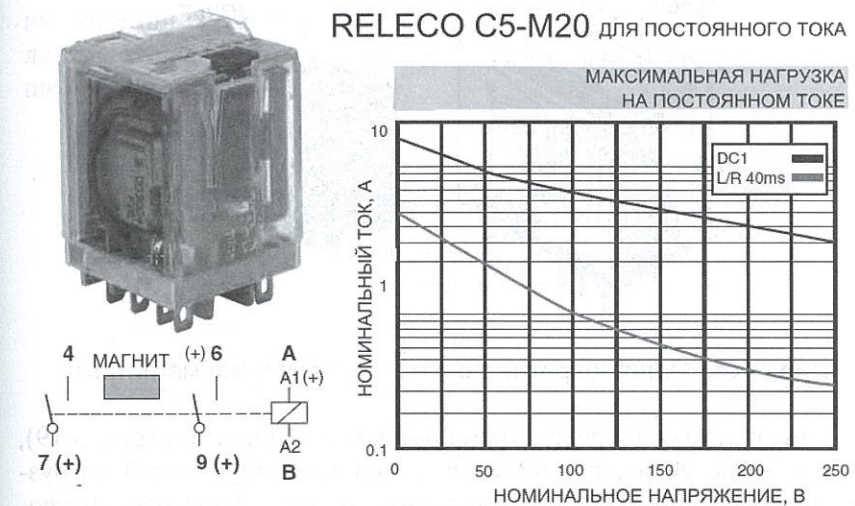


Рис. 3.17. Реле типа C5-M20 фирмы RELECO с двумя замыкающими контактами и дугогасящим магнитом и коммутационная способность его контактов для индуктивной нагрузки

Необходимо отметить, что многие нагрузки, используемые на объектах электроэнергетики в сети 220 В, имеют индуктивный характер. Это накладывает особые требования на промежуточные электромеханические реле, контакты которых должны быть способны коммутировать такие нагрузки. Анализ спецификаций распространенных типов электромагнитных реле показывает, что большинство из них не предназначены для коммутации индуктивных нагрузок на постоянном токе с напряжением 220 В.

Для этой цели служат реле специальной конструкции: обеспечивающие многократные последовательные разрывы в коммутируемой цепи (рис. 3.16) или содержащие постоянный магнит вблизи контактов, предназначенный для выталкивания электрической дуги из межконтактного зазора (рис. 3.17).

На рынке имеются и меньшие по размерам многополюсные реле с дугогасящим магнитом, и даже предназначенные для печатного монтажа (рис. 3.18).

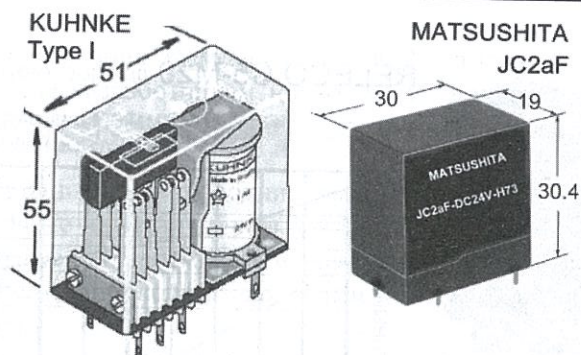


Рис. 3.18. Малогабаритные реле с дугогасящими магнитами

Имеются также и реле с тремя разрывами на контакт (рис. 3.19), позволяющие управлять достаточно мощной индуктивной нагрузкой при напряжении 220 В постоянного тока, например, отключающими катушками высоковольтных выключателей, особенно старого типа.

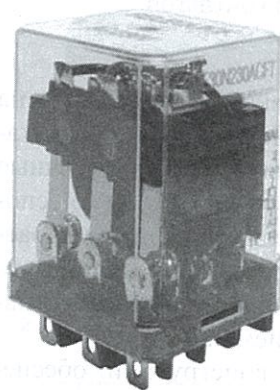


Рис. 3.19. Реле типа RMEA-FT-1 с одним замыкающим контактом с тройным разрывом, способным коммутировать постоянный ток до 3 А в индуктивной нагрузке при напряжении 220 В (производитель: RELEQUICK S. A.)

Хорошие перспективы имеет использование герконовых реле, выполненных на основе нового малогабаритного геркона большой мощности, с двойной коммутацией, производимого компанией Yaskawa, под торговой маркой BESTACT® (рис. 3.20). Герконы этого типа имеют двойной контакт (основной и дугогасительный), с последовательной коммутацией, позволяющий включать и отклю-

чать высокоиндуктивную нагрузку ($L/R = 100$ мс) с током 0.2 А при напряжении 220 В постоянного тока. Катушки управления этих реле имеют параметры, аналогичные параметрам рассмотренных выше электрохимических реле.

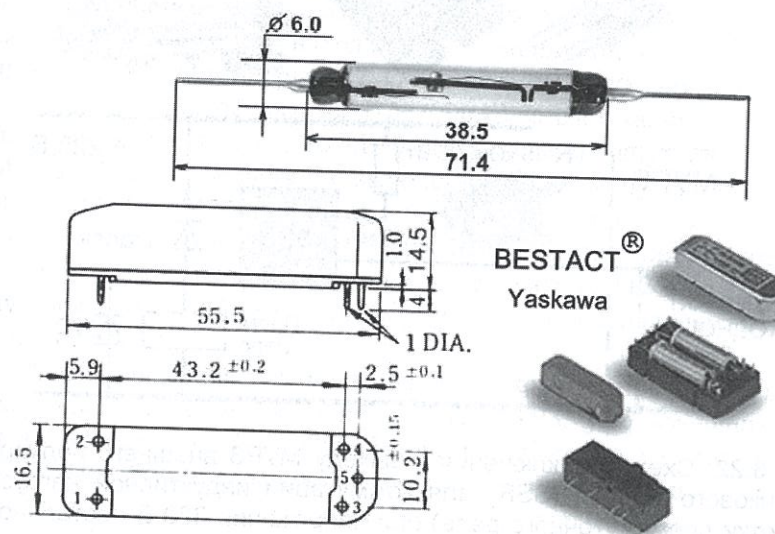


Рис. 3.20. Мощный геркон типа R14U (R15U) с двойным контактом и реле на его основе, производимый компанией Yaskawa

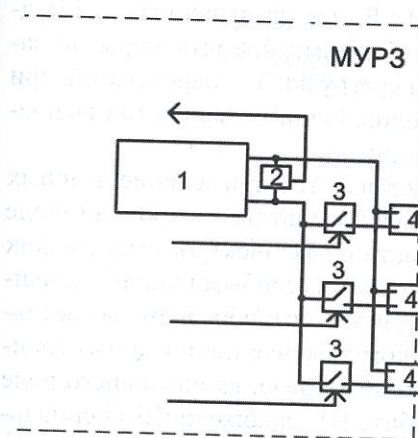


Рис. 3.21. Вариант выполнения выходов МУРЗ в виде источников управляющего напряжения: 1 – отдельный источник питания 5 В или 12 В с токоограничением и защитой от короткого замыкания; 2 – датчик напряжения для контроля исправности источника питания; 3 – низковольтные оптроны; 4 – выходные разъемы для присоединения внешних реле

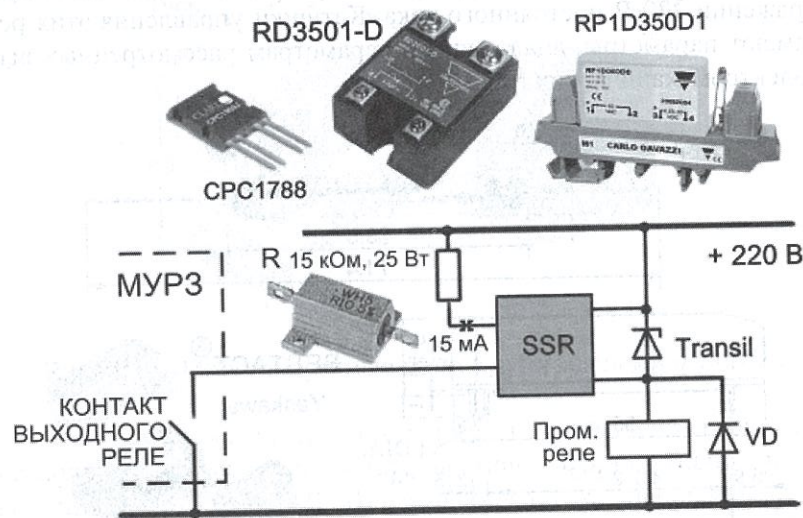


Рис. 3.22. Схема подключения к выходу МУРЗ внешнего полупроводникового модуля (SSR) для коммутации индуктивной нагрузки (обмотки промежуточного реле) при напряжении 220 В постоянного тока

При реализации рассмотренного выше направления модернизации МУРЗ, основанного на выполнении их выходных каналов в виде источников напряжения 5 В или 12 В, предназначенных для подключения входов внешних реле, необходимо принять меры по защите внутренних цепей МУРЗ от перегрузки и повреждений при неправильном включении этих выходов. Один из вариантов выполнения таких выходов представлен на рис. 3.21.

Идеальным решением нам представляется применение в новых типах МУРЗ встроенных мощных высоковольтных оптронов (вроде CPC1788) вместо внутренних миниатюрных электромеханических реле, применяемых сегодня, для управления любыми типами внешних промежуточных реле, выбираемыми потребителем самостоятельно. Другим решением является комплектная поставка изготовителем совместно с МУРЗ блока выходных реле, включающего реле различных типов (по заявке потребителя), снабженного специальным разъемом, служащим для соединения с МУРЗ. Назначение и

переназначение (переадресация) тех или иных выходов МУРЗ для тех или иных видов выходных реле может осуществляться чисто программным методом.

Рассмотренные выше технические решения предназначены для использования во вновь разрабатываемых МУРЗ. А как быть с тысячами устройств, уже находящихся в эксплуатации и продолжающих выпускаться на рынок? Очевидно, что модернизация таких устройств может осуществляться только за счет каких-то внешних модулей, без каких бы то ни было изменений внутренних цепей МУРЗ. Один из вариантов включения таких модулей показан на рис. 3.22. В нем могут быть использованы любые из описанных выше компонентов. Поскольку для цепей управления полупроводниковых модулей требуются низкие напряжения (12 – 36 В), в схему добавлен резистор R, на котором гасится основная часть напряжения сети 220 В.

Специально для решения проблемы коммутации индуктивных нагрузок контактами выходных реле МУРЗ, уже имеющих на рынке, известная компания Schweitzer Engineering Laboratories, Inc (SEL) разработала и освоила выпуск специальных активных дугогасительных элементов, подключаемых параллельно этим контактам (рис. 3.23).

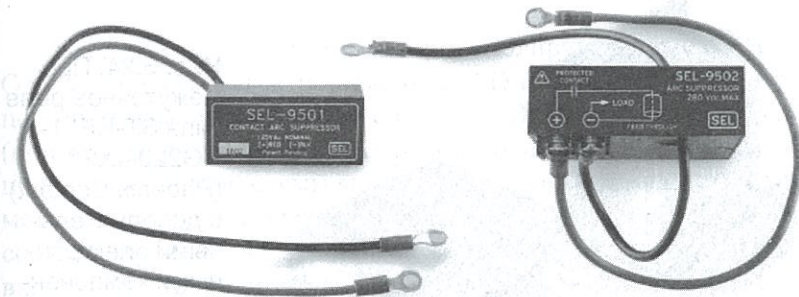


Рис. 3.23. Активные дугогасительные элементы типа SEL-9501 и SEL-9502, выпускаемые компанией Schweitzer Engineering Laboratories, Inc

В том случае, когда в качестве нагрузки используются обмотки небольших маломощных промежуточных реле, простейшим

выходом из положения может быть замена этих реле на реле того же типа, но с катушками на напряжение 12 - 36 В, включенными последовательно с гасящими резисторами соответствующей мощности. В дополнение к этому, катушка реле должна быть зашунтирована диодом, включенным в обратном направлении (как на рис. 3.22). Использование катушки промежуточного реле на меньшее напряжение (то есть, содержащей значительно меньшее количество витков) и включение резистора последовательно с обмоткой реле приводит к существенному снижению постоянной времени катушки L/R и облегчению условий коммутации. Собственно говоря, такой же принцип используется и в некоторых типах серийных реле, например, в небольшом промежуточном реле типа ST-REL7-HG220/4X21 (с контактами, не предназначенными для коммутации индуктивной нагрузки на постоянном токе), производимом компанией Phoenix Contact, содержащей внутри корпуса небольшую печатную плату с установленными на ней диодами, резисторами, индикаторным светодиодом (рис. 3.24). Входная цепь этого реле обладает очень высоким сопротивлением и может совершенно свободно коммутироваться контактами выходных миниатюрных реле любого типа при напряжении 220 В постоянного тока.

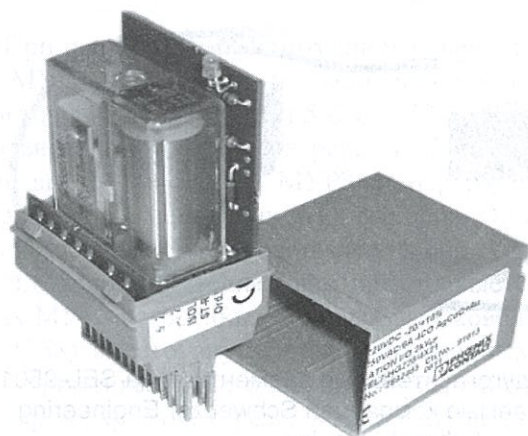


Рис. 3.24. Промежуточное реле типа ST-REL7-HG220/4X21 (Phoenix Contact) с дополнительными электронными компонентами, установленными на печатной плате внутри корпуса реле

3.3. Логические входы: проблемы и решения

Узел логических (цифровых) входов – это набор мощных гасящих резисторов, оптронов, электронных фильтров, мультиплексоров и т.д., смонтированных, обычно, на плате вместе с выходными реле. Цифровые (логические) входы в МУРЗ этого типа выполнены в виде набора совершенно одинаковых ячеек, функционально представляющих собой логические элементы ЗАПРЕТ (рис. 3.25).

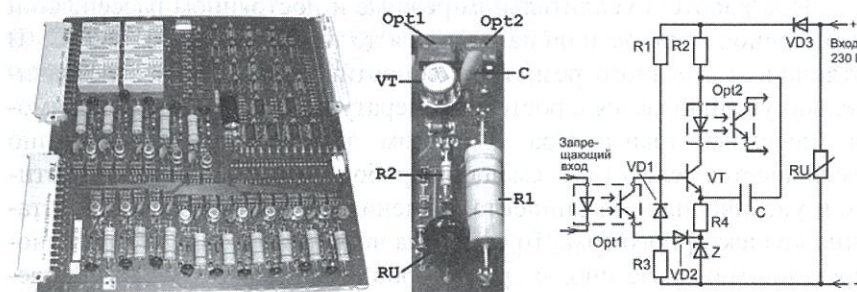


Рис. 3.25. Внешний вид модуля цифровых входов МУРЗ типа REL316 и устройство одного канала

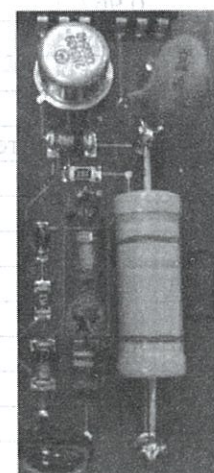
Вход и выход этой схемы через изолирующие оптроны Opt1 и Opt2 включены в электронные цепи МУРЗ, связанные с микропроцессором. Выходной сигнал с оптрона Opt2 логически моделирует (повторяет) наличие или отсутствие входного напряжения. Функционирование этой схемы может быть заблокировано программным методом. При этом блокирующий сигнал с микропроцессора через соответствующие электронные цепи поступает на запрещающий вход ячейки (вход оптрона Opt1). Проблема такой логической ячейки заключается в высоком уровне входного сигнала (220 – 250 В постоянного тока), который нужно погасить до уровня 1.5 – 2 В, при котором работает оптрон Opt2. Общий ток, потребляемый схемой, делится примерно поровну между резисторами R1 и R2, поэтому оба они, в принципе, должны были быть одинаковой мощности. Однако для двух крупных резисторов (таких как R1), да еще и с расстоянием между ними, необходимым для охлаждения, нет места

на плате. Поэтому функции элемента, рассеивающего избыточную мощность, конструкторы МУРЗ возложили на транзистор VT, работающий не в ключевом режиме, как обычно в таких схемах, а в усилительном. Естественно, что резистор R2 при этом выбран малой мощности и малых размеров. На практике такое стремление к миниатюризации приводит к серьезным проблемам: резистор R2 часто полностью сгорает, приводя иногда к выгоранию участков печатной платы и даже рядом стоящих элементов.

Первая проблема этого устройства заключается в транзисторе VT. При работе в усилительном режиме и постоянном рассеивании избыточной мощности он нагревается до температуры 70 – 80 °С. В отличие от обычного резистора, сопротивление которого незначительно увеличивается с ростом температуры, сопротивление прямого перехода транзистора с ростом температуры существенно уменьшается вследствие смещения рабочей точки на характеристике и увеличения коэффициента усиления. Это приводит к возрастанию коллекторного тока, то есть тока через резистор R2. При одновременном нагреве многих резисторов R1 и транзисторов VT в десяти-пятнадцати входных цепях температура внутри части корпуса МУРЗ (разделенного переборками), в которой установлена плата цифровых входов, может существенно возрасти. Это приводит к дальнейшему смещению рабочей точки транзистора и увеличению его коллекторного тока вплоть до полного сгорания резистора R1. При этом диод VD, который, судя по схеме, призван стабилизировать рабочую точку транзистора, оказывается мало эффективным в связи с тем, что его температура и температура транзистора различаются на 50 – 60 градусов. Таким образом, стремление производителя уменьшить размеры МУРЗ, используя транзистор вместо мощного резистора для рассеивания избыточной мощности, привело к снижению надежности МУРЗ. Проблема недостаточной надежности этой схемы, связанной с миниатюризацией, не ограничивается только описанным парадоксом.

Второй проблемой является миниатюрный дисковый керамический конденсатор С, емкостью 2.2 nF. Керамические конденсаторы считаются одними из наиболее устойчивых к воздействию электрических эксплуатационных нагрузок и стабильными во времени. Однако, у керамических конденсаторов с открытым (или плохо изолированным) междуэлектродным зазором возможно снижение сопро-

тивления изоляции и даже электрический пробой за счет миграции ионов металла обкладок (особенно серебра) по торцу конденсатора, особенно в условиях влажного тропического климата. При напряжении на входе реле ниже 100 В такие конденсаторы ничем не выдают своей неисправности и при «прозвонке» обычным тестером показывают полную исправность. Но уже при напряжении 180 – 230 В ток утечки через эти конденсаторы (рис. 3.26), возрастает настолько, что нормальная работа транзистора и оптрона становится невозможной. Более того, при длительном воздействии входного напряжения 220 – 230 В из-за увеличенного тока утечки через этот конденсатор возрастает мощность, рассеиваемая на резисторе R2 и он просто сгорает (рис. 3.26).



Зависимость сопротивления по постоянному току конденсатора С от приложенного напряжения

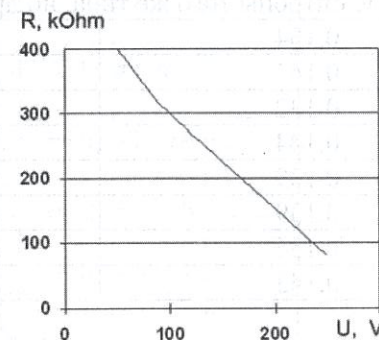


Рис. 3.26. Причиной сгорания резистора R2 является возрастание тока утечки через конденсатор С

Третьей проблемой, выявленной нами в этих узлах МУРЗ, являются внутренние обрывы, появляющиеся со временем в мощных резисторах R1, рис. 3.25. Это явление предположительно возникает вследствие нарушения контакта между металлическими чашками на

торцах резистора и резистивным слоем на поверхности керамического цилиндра из-за его отслаивания.

Таблица 3.5. Падения напряжения (Вольт) на выходных транзисторах оптронов типа CNY17-2 при токе коллектора 0.5 мА и входных токах 2 и 2.5 мА

$I_F = 2.0 \text{ мА}$	$I_F = 2.5 \text{ мА}$
Оптроны, извлеченные из неработающих входов реле REC316	
1.471	0.992
1.027	0.344
0.574	0.188
1.452	0.967
1.315	0.769
0.734	0.201
0.634	0.178
Новые оптроны того же типа, но другого производителя	
0.134	0.120
0.143	0.127
0.132	0.119
0.144	0.127
0.139	0.123
0.139	0.124
0.134	0.120
0.143	0.125

Четвертой проблемой являются массовые отказы оптронов Opt2. Например, однажды нам пришлось заменить 7 оптронов типа CNY17-2 на одной лишь печатной плате логических входов реле REC316!

Оптроны этого типа имеют следующие параметры:

- номинальный прямой входной ток (ток светоизлучающего элемента - I_F) – 60 мА;
- максимальный прямой входной ток (I_F) – 100 мА;

- номинальный выходной ток (ток коллектора выходного транзистора) – 50 мА;
- максимальный ток коллектора выходного транзистора – 100 мА;

Как оказалось, эти оптроны работают в реле в режиме, весьма далеком от номинального, при очень малых входном и выходном токах, практически на нижней границе этих токов. Кроме того, в результате проведенного нами исследования было выяснено, что оптроны, выпаянные из неработающих входов реле, в действительности не являются поврежденными. Разница между «работающими» и «неработающими» оптронами в реле оказалась лишь в их чувствительности к очень малым, фактически, предельным входным токам (I_F) (табл. 3.5).

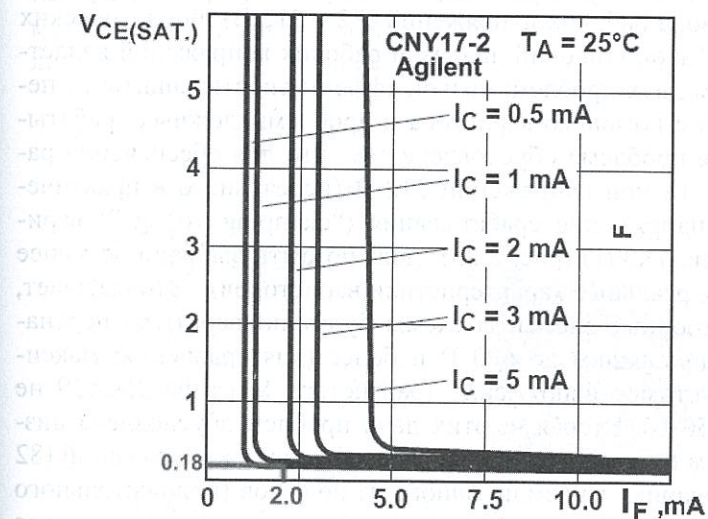


Рис. 3.27. Зависимость падения напряжения на выходном транзисторе оптрона - $V_{CE(SAT.)}$ от входного тока (I_F) фотоизлучающего элемента для различных токов коллектора выходного транзистора

Как видно из табл. 3.5, падения напряжения на транзисторах оптронов, извлеченных из неработающих входных цепей реле, значительно превышают типовые значения (рис. 3.27) (0.18 В при вход-

ном токе $I_F = 2$ мА), в то время как те же значения для новых оптронов другого производителя даже ниже типовых.

К сожалению, многие производители (а оптроны типа CNY17-2 выпускаются компаниями Agilent, Toshiba, QT Optoelectronics, Fairchild, Vishay, Liteon, Everlight, Isocom, Opto Inc. и др.) просто не представляют эти важнейшие характеристики оптронов в технической документации на свои изделия, поэтому никаких претензий к ним предъявить нельзя. Претензии скорее можно предъявить к конструкторам электронной аппаратуры (в данном случае к конструкторам реле RE*316 из компании ABB), выбравшим режим работы своей аппаратуры на самой границе характеристики оптронов, в результате чего малейшие технологические отклонения параметров приборов приводят к полной потере работоспособности таких ответственных устройств, как многофункциональные реле защиты.

Пятой проблемой является выбор изготовителем слишком широкого диапазона рабочих напряжений (82 – 312 В) для логических входов реле. Такой широкий диапазон рабочих напряжений является источником двух проблем: низкой эффективности защиты от перенапряжений с помощью варистора и проблемы ложных срабатываний. Первая проблема обусловлена тем, что для обеспечения работоспособности при напряжении 312 В (нереального в практическом плане) напряжение срабатывания (“clamping voltage”) варистора RU (типа 7K391) (рис. 3.25) должно быть выбрано не менее 650 В (таковы реальные характеристики варисторов). Это означает, что все электронные элементы схемы будут подвергаться перенапряжениям, достигающим до 600 В и более (для сравнения: максимальное допустимое напряжение транзистора VT типа 2N3439 не превышает 350 В). Вторая из этих двух проблем обусловлена низким значением нижней границы диапазона рабочих напряжений (82 В). При замыканиях на землю одного из полюсов (положительного или отрицательного) в системе постоянного тока, применяющегося в релейной защите, возникает импульс тока напряжением в половину напряжения батареи (около 110 В), обусловленный разрядом емкости проводов сети постоянного тока (рис. 3.28). Как показано в [3.31], при таком разряде создаются условия для самопроизвольной активации логических входов микропроцессорных защит в том случае, если порог срабатывания логических входов ниже половины напряжения сети постоянного тока (то есть 110 В).

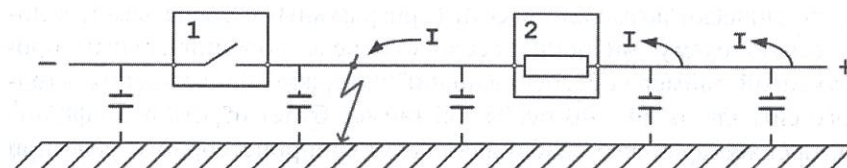


Рис. 3.28. Схема разряда емкости сети постоянного тока через логический вход реле защиты (2) с разомкнутым управляющим контактом (1) при замыкании на землю

Как показали расследования причин нескольких аварийных отключений, мощность и длительность импульса разрядного тока оказываются вполне достаточными не только для инициации логических входов микропроцессорных реле, но даже для срабатывания некоторых типов промежуточных электромеханических реле с номинальным напряжением 220 В (срабатывание этих реле происходило при напряжении около 70 В).

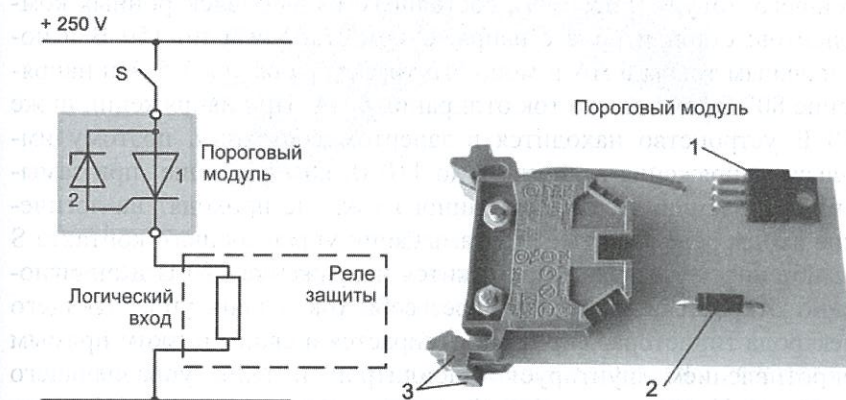


Рис. 3.29. Схема включения и конструкция порогового модуля: 1 – тиристор типа BT151-800L; 2 – стабилитрон типа 1N5383; 3 – две клеммные панельки типа Wieland 9700A/6S35

Учитывая ограниченную длительность импульса разрядного тока, технически возможно ввести (программными средствами) в логическую схему микропроцессорного реле дополнительный программный таймер, обеспечивающий задержку прохождения входного сигнала на 20 – 40 мс. Такой таймер будет играть роль фильтра, препятствующего срабатыванию микропроцессорного реле при воздействии кратковременных импульсов тока при разряде емкости сети. Можно использовать RC-цепочку, подключенную к входам реле и выполняющую ту же функцию. Однако прежде необходимо решить, допустимо ли, в принципе, увеличение почти вдвое времени реакции реле на повреждение (короткое замыкание). По нашему мнению, такое замедление действия реле защиты является недопустимым.

В связи с изложенным, нами предложено иное решение проблемы, основанное на повышении нижнего порога срабатывания логических входов до нормируемого уровня, превышающего половину напряжения сети. В качестве такого уровня выбрано напряжение 150 В. Для реализации этой идеи предложено использование простейшего модуля (рис. 3.29), состоящего из двух электронных компонентов: стабилизатора с напряжением стабилизации 150 В и номинальным током 5 мА и мощного тиристора на ток 7.5 А и напряжение 800 В, имеющего ток отпирания 5 мА. При напряжении ниже 150 В устройство находится в запертом состоянии, поэтому импульсы напряжения величиной до 110 В, возникающие при замыканиях на землю в сети постоянного тока, не проходят на логические входы реле защиты. При замыкании управляющего контакта S к стабилизатору скачком приложится напряжение 220 В и он мгновенно откроется, пропуская через себя ток в цепь управляющего электрода тиристора. Тиристор отпирается и своим низким прямым сопротивлением шунтирует стабилизатор и цепь управляющего электрода. Теперь весь рабочий ток проходит через цепь анод-катод тиристора. Падение напряжения на открытом тиристоре не превышает долей вольта, что в сочетании с небольшим током, протекающим через него (15 – 50 мА), обуславливает очень незначительное рассеивание мощности и не вызывает нагрева мощного тиристора.

Оба элемента размещены на небольшой плате из стеклотекстолита размерами 70 х 40 мм, зажатой с помощью двух винтов между двумя стандартными клеммными панельками, предназначенными

для установки на стандартной DIN-рейке. После монтажа элементов на плате, они покрываются слоем водостойкого лака и изолируются с помощью термоусаживающейся диэлектрической трубки, обеспечивающей механическую защиту элементов и соединений на плате. Готовое устройство представляет собой небольшой, легко монтируемый модуль (рис. 3.30), имеющий очень низкую стоимость (тиристор вместе со стабилизатором стоят менее 2 долларов США).

Модуль подключается не ко всем логическим входам, а лишь к особо критическим, инициация которых может вызвать срабатывание реле и отключение линий электропередач или силового электрооборудования. Для одного микропроцессорного реле может потребоваться 2 – 4 модуля.

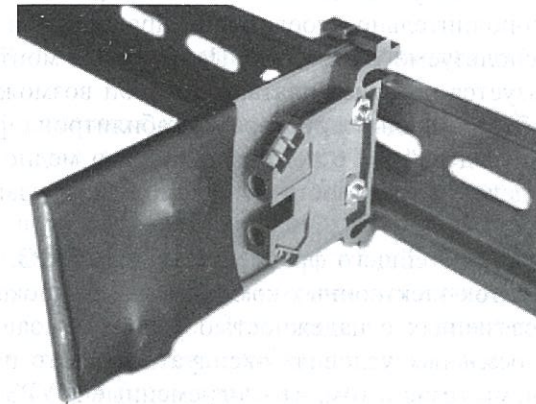


Рис. 3.30. Внешний вид одиночного модуля, установленного на стандартной DIN-рейке

Описанное устройство можно использовать также совместно с обычными электромеханическими реле в тех случаях, когда их реальное напряжение срабатывания меньше половины напряжения сети постоянного тока, то есть когда существует угроза их ложного срабатывания.

Следует отметить, что применение предлагаемого устройства фактически не снижает надежности релейной защиты, поскольку электронные элементы полностью обесточены при разомкнутом управляющем контакте и принципиально не могут сработать само-

произвольно, например, вследствие пробоя или самопроизвольного отпирания тиристора. Даже если допустить (теоретически) вероятность пробоя электронных элементов модуля, то в таком состоянии реле защиты просто возвращается в режим работы, который был до применения модуля. Повлиять на надежность реле может лишь обрыв внутренней цепи модуля. Однако, согласно статистике, внутренние обрывы в полупроводниковых приборах возникают только под действием очень большого протекающего тока (когда происходит выгорание полупроводниковой структуры) и при этом составляют не более 5% всех повреждений. При реальных токах, протекающих через тиристор в схеме модуля (15 – 50 мА), выгорание структуры тиристора невозможно. Реально повлиять на надежность релейной защиты могут лишь несколько внутренних паянных соединений и дополнительное соединение проводников с помощью клеммника, используемого в модуле. Поэтому для монтажа элементов не используется печатная плата, в которой возможны скрытые дефекты, а гибкие выводы тиристора и стабилитрона фиксируются между собой перед пайкой с помощью тонкого медного луженого провода, что делает вероятность отказа модуля чрезвычайно низкой.

На примере простейшего фрагмента схемы МУРЗ, содержащей всего лишь десяток электронных компонентов, мы показали, сколько проблем, связанных с надежностью релейной защиты, может возникнуть в реальных условиях эксплуатации. Это подтверждает выдвинутый нами тезис о том, что современные МУРЗ вовсе не являются эталонами совершенства и надежности, как это пытаются представить рекламные каталоги, а представляют собой сложнейшие и не всегда достаточно надежные устройства, проблемы которых нужно не замалчивать, как это делается сегодня, а широко обсуждать.

Некоторые выводы:

1. Надежность МУРЗ ниже надежности электромеханических реле и электронных реле на дискретных элементах.
2. Встроенная самодиагностика МУРЗ малоэффективна и вообще не является средством повышения надежности МУРЗ.

3. Нанотехнологии, применяемые при производстве комплектующих элементов, на основе которых построены МУРЗ, приводят к возникновению не известных ранее для релейной защиты проблем, игнорирование которых может привести к катастрофическим последствиям. Менеджеры, принимающие решения в области релейной защиты, и персонал энергокомпаний должны быть осведомлены об этих особенностях МУРЗ.

4. Ответственные лица, принимающие решения о реконструкции релейной защиты и путях ее дальнейшего развития, должны четко понимать свойства и особенности МУРЗ, учитывать не только широко рекламируемые преимущества МУРЗ, но также и их, обычно замалчиваемые, серьезные недостатки, одним из которых является пониженная надежность.

3. 4. Реальные данные о надежности МУРЗ

Непосредственно с вопросами надежности МУРЗ и их стоимости связан также вопрос о старении и сроке эксплуатации устройств защиты. Для МУРЗ (как и для электромеханических реле) установлен нормативный срок эксплуатации 25 лет [3.42]. Фактически же, многие электромеханические реле находятся в эксплуатации по 30 и даже 40 лет, в то время как компьютерная техника стареет намного быстрее. Речь идет и о физическом старении электронных компонентов, особенно таких, как электролитические конденсаторы (срок службы которых не превышает 7 – 10 лет), и особенно о старении программного обеспечения. Так, по данным, приведенным в [3.43], срок морального устаревания устройств релейной защиты резко снизился с 30 лет, характерных для традиционных электромеханических защит примерно до 5 лет для современных МУРЗ (рис. 3.31). Это означает, что потребители МУРЗ должны будут тратить в будущем на обновление релейной защиты (и физическое, и программное) значительно большие суммы и гораздо чаще, чем они делали это раньше при использовании электромеханических защит.

Несмотря на отмеченные проблемы, тенденции развития релейной защиты таковы, что широкое и всё возрастающее применение микропроцессорных реле защиты неизбежно.

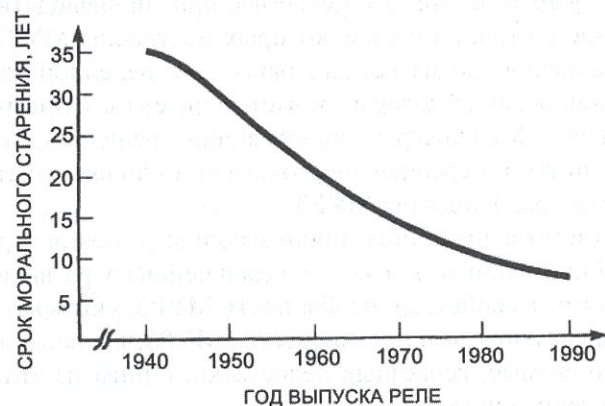


Рис. 3.31. Тенденция ускорения морального старения реле защиты

При этом расширение распространения МУРЗ связано не только с необходимостью замены выработавших свои нормативные сроки электромеханических реле, но и с вводом в строй новых энергетических объектов. В последние 10 – 15 лет во всем мире идет процесс постепенного перехода на устройства релейной защиты нового поколения, выполненные на базе микропроцессоров. Для «проталкивания» на рынок МУРЗ производители этих устройств, а также их многочисленные торговые представители проводят весьма активную рекламную кампанию, всячески восхваляя МУРЗ и принижая достоинства реле других типов. Основным тезисом этих рекламных компаний является утверждение о том, что МУРЗ обеспечивают очень высокую надежность релейной защиты в отличие от старых и сильно изношенных электромеханических реле, доживающих свой век. Вместе с тем, совершенно очевидно, что МУРЗ представляют собой сложные технические комплексы, состоящие из многих тысяч компонентов. Точно так, как и любые другие сложные электронные системы, они не могут не иметь недостатков и не могут обладать абсолютной надежностью, особенно если учесть совсем не «тепличные» условия работы МУРЗ в электрических сетях. Но, если это так, то, наверное, в технической литературе должно было быть достаточно много статей, рассматривающих технические проблемы микропроцессорных реле. Уважаемый читатель, а много ли статей,

рассматривающих проблемы МУРЗ, ты читал? Весьма показательным является тот факт, что подавляющее большинство статей в технических журналах, посвященных МУРЗ, написано представителями компаний-производителей МУРЗ.

Таблица 3.6. Интенсивность отказов релейной защиты различных видов

Параметр Вид реле	Электромеханические		Статические		Микропроцессорные	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Общее количество реле в эксплуатации	2312		2745		3787	
Количество отказов	1	4	8	8	43	51
Относительное количество отказов ¹ , %	0.043	0.173	0.291	0.291	1.135	1.347
Среднегодовое относительное количество отказов ² , %	0.11		0.29		1.24	
Годовая интенсивность отказов ³	1		2.6		11.3	

¹Относительное количество отказов – отношение количества отказов реле данного типа к общему количеству реле этого типа, находящихся в эксплуатации

²Среднегодовое относительное количество отказов – среднее за два года (2007-2008) количество относительных отказов

³Годовая интенсивность отказов – отношение среднегодового относительного количества отказов реле различных видов к такому же показателю для электромеханических реле (принятому за 1).

Совершенно естественно, что эти публикации представляют собой откровенную или завуалированную рекламу, а вовсе не серьезный анализ проблем с надежностью или других вполне реальных проблем, имеющих у МУРЗ. Более того, поскольку эти же компании являются богатыми рекламодателями, щедро оплачивающими весьма значительные площади журнальных страниц, журналы крайне неохотно принимают к публикации статьи, посвященные критике продукции их рекламодателей, причем иногда даже не стесняясь откровенно заявлять об этом.

Сложившаяся ситуация выглядит как некое табу, наложенное на обсуждение этой темы. А если одиночному автору и удастся случайно прорваться через этот «железный занавес» [3.43 - 3.46], то на него обрушивается шквал весьма резкой критики, включающей личные выпады и даже обвинения в попытке затормозить технический прогресс в России (как это было после одной из наших публикаций).

Выше мы уже подробно рассматривали проблемы с надежностью каждого из основных функциональных узлов МУРЗ и показали на конкретных примерах, что так называемая «самодиагностика», которой охвачены якобы 80% узлов МУРЗ, является, по большому счету, рекламным трюком и распространенным мифом.

Да, действительно, самодиагностика МУРЗ может выявить некоторые внутренние повреждения, например, такие как выход из строя внутреннего источника питания или микропроцессора. Но как можно всерьез говорить об этом как о великом «преимуществе» МУРЗ перед электромеханическими реле, если в последних вообще не было никаких внутренних источников питания и никаких микропроцессоров, то есть просто нечего было «самодиагностировать»?!

Что же касается модулей МУРЗ со входными трансформаторами тока и напряжения, модулей цифровых входов, модуля с выходными реле, то они, как это показано выше не охвачены самодиагностикой. Кроме того, поскольку система самодиагностики построена на микропроцессорах и элементах памяти, то она сама является источником повреждений МУРЗ. В действительности, самодиагностика не является преимуществом МУРЗ перед электромеханическими реле, а является всего лишь частичной компенсацией очень серьезного недостатка МУРЗ: концентрацией многих защитных функций в одном-единственном модуле. Например, единственное

МУРЗ типа М-3430, обеспечивает полную защиту генератора электростанции от всех возможных аварийных режимов, совмещая функции 14 отдельных реле защиты. Можно себе только представить, что произойдет, если в аварийном режиме откажет какой-нибудь общий для всех этих реле узел из-за повреждения какой-то копеечной детали: генератор попросту окажется **ВООБЩЕ БЕЗ ВСЯКОЙ ЗАЩИТЫ!**

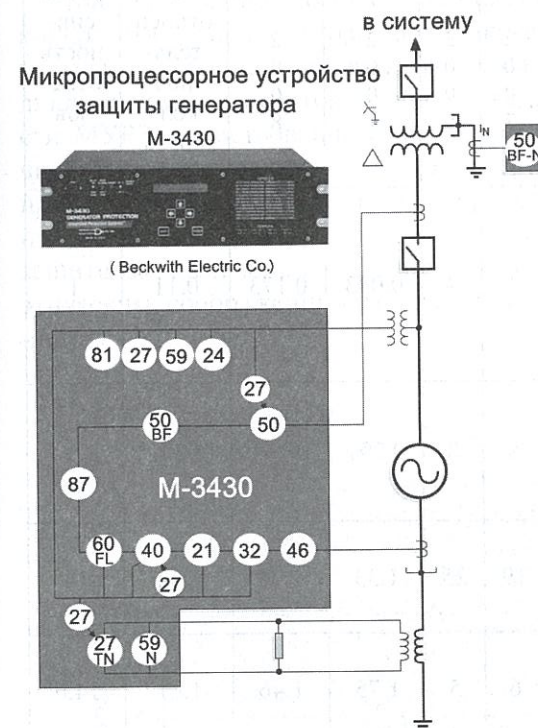


Рис. 3.32. Состав комплектного микропроцессорного устройства защиты генератора типа М-3430 (Beckwith Electric Co.):

21 – дистанционная защита; 24 – защита от перевозбуждения генератора; 27 – реле пониженного напряжения; 27TN – реле пониженного напряжения по 3 гармонике; 32 – реле направления мощности; 40 – реле гашения поля генератора; 46 – реле контроля баланса фаз тока; 50 – токовая отсечка; 50BF – токовое реле контроля исправности выключателя; 59 – защита от повышенного напряжения; 59N – реле напряжения нулевой последовательности; 60FL – реле контроля предохранителей в цепи трансформатора напряжения; 81 – реле частоты; 87 – дифференциальная защита

Без самодиагностики такое устройство нельзя было бы и на пушечный выстрел подпускать к защите электроэнергетических объектов.

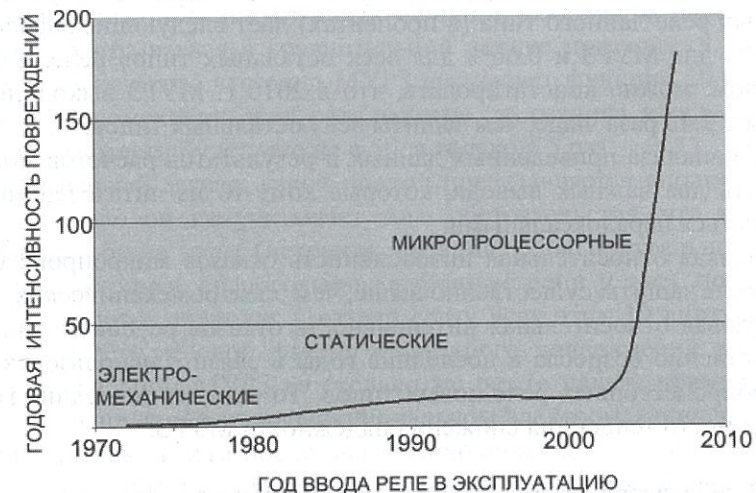
Таблица 3.7 Рост интенсивности отказов релейной защиты при использовании реле новых типов

Начало ввода в эксплуатацию	Вид реле	Общее кол-во реле	Отказы					
			Общее количество		Относительное количество, %		Среднее годовое относительное количество, %	Годовая интенсивность отказов
			2	2	2	2		
			0	0	0	0		
			7	8	7	8		
1970 1975	Электро-механические различных типов	3212	1	4	0.043	0.173	0.11	1
1975 1980	Статические Различных типов	2745	8	8	0.291	0.291	0.291	2.6
1990 1995	Микро-процессорные Тип 1	1423	19	25	1.33	1.76	1.54	14
2000 2005	Микро-процессорные Тип 2	342	6	5	1.75	1.46	1.61	14.6
2003 2005	Микро-процессорные Тип 3	49	3	1	6.12	2.04	4.08	37
2005 2008	Микро-процессорные Тип 4	10	3	1	30	10	20	182

Примечание: В табл. 3.7 приведены данные по микропроцессорным реле различных типов, произведенными компаниями ABB, General Electric и Siemens.

Так что самодиагностика – это вынужденная мера, а вовсе не красивое приложение, поэтому рекламировать ее как некое выдающееся достижение в релейной защите, совершенно не оправдано.

Как ни странно, но никто из оппонентов не стал опровергать конкретные доводы автора, опубликованные им в [3.43] по конкретным проблемам конкретных узлов МУРЗ, сосредоточившись лишь на критике некоторых общих сведений и доводов о надежности МУРЗ, заимствованных автором (с соответствующими многочисленными ссылками) у других авторов, исследовавших этот вопрос. В связи с этим мы решили провести собственное исследование, воспользовавшись статистическими данными по отказам реле защиты за последние годы одной из западных энергокомпаний (по этическим соображениям мы не приводим название этой компании).

**Рис. 3.33.** Тенденция роста интенсивности отказов МУРЗ новых типов (по данным табл. 3.7)

Ниже приведены дополнительные данные по отказам за последние 5 лет по отделению передачи и распределения электроэнергии (отделение подстанций) той же компании.

Таблица 3. 8. Статистика отказов реле защиты за последние 5 лет

Год	Количество отказов реле защиты за последние 5 лет	
	МУРЗ	статические и электро-механические
2005	56	64
2006	62	55
2007	65	60
2008	69	45
2009	89	39
2010	92	34

По состоянию на 2010 г. в эксплуатации находилось 4070 МУРЗ и 5170 статических и электромеханических реле защиты. Отношение количества отказов реле данного типа к количеству установленных реле данного типа (в процентах) дает следующие значения: 2.26 % для МУРЗ и 0.66% для всех остальных типов реле. Таким образом, можно констатировать, что в 2010 г. МУРЗ выходили из строя в 3.42 раза чаще, чем защиты всех остальных типов.

Из анализа приведенных данных и результатов расчетов можно сделать два важных вывода, которые кому-то из читателей могут показаться парадоксальными:

1. Годовая относительная интенсивность отказов микропроцессорных реле защиты существенно выше, чем электромеханических.
2. Годовая относительная интенсивность отказов релейной защиты существенно возросла в последние годы в связи с использованием микропроцессорных реле новых типов. То есть, за последние годы имеет место тенденция снижения надежности МУРЗ.

В действительности же, ничего необычного в этих выводах нет. По данным статистики, представленным также и в работе [3.43], хорошо видно, что статические реле защиты имеют втрое большую повреждаемость, чем электромеханические, а микропроцессорные – в 50 раз большую повреждаемость (табл. 3.9).

Таблица 3.9. Типичные значения отказов реле защиты различных видов (по данным [3.43])

Вид реле Параметр надежности	Относительное количество отказов в год, %	Физический срок службы без учета морального старения, лет
Электромеханические	0.1	> 30
Электронные (статические) с единичной функцией	0.3	>20
Микропроцессорные системы	5.0	>20

Правда, при этом отмечается, что поскольку одна микропроцессорная защита объединяет в себе функции нескольких реле, то это должно учитываться в сравнительной оценке надежности. Например, если принять, что одно МУРЗ выполняет функции 10 одиночных электромеханических реле защиты, то разница между ними в повреждаемости будет уже не в 50, а только в 5 раз.

На первый взгляд, такой подход представляется вполне логичным, однако он не учитывает того обстоятельства, что в МУРЗ имеются общие узлы (источник питания, блок центрального процессора, входные аналоговые электронные цепи и т.п.), повреждения в которых приводят к отказу сразу всех этих 10 виртуальных реле. То есть весовой фактор одиночного повреждения в многофункциональном МУРЗ во столько же раз (в нашем примере в 10 раз) больше, чем в однофункциональном электромеханическом реле. В этой связи нам представляется возможным, во избежание усложнения картины, продолжать сравнивать интенсивность отказов микропроцессорных и электромеханических реле без учета разницы в количестве выполняемых ими функций. При этом, еще не учитывался такой важный фактор, как ошибки персонала (так называемый «человеческий фактор») в программировании реле и при рабо-

те с ним. Современные многофункциональные МУРЗ содержат сотни параметров и уставок, десятки входов и выходов, могут выдавать тысячи различного вида сообщений.

В таких условиях количество ошибок, связанных с «человеческим фактором», многократно возрастает. По данным [3.47] в 2000 г. доля виновности эксплуатационного персонала в неправильных действиях защиты составила 61.6%, включая 40.7%, которые произошли по причинам, зависящим от служб РЗА, 10.9% - по вине оперативного персонала, 10.0% - по вине прочего персонала эксплуатации. И тут же приводится объяснение одной из причин этого: «недостаточная квалификация персонала предприятий для обслуживания аппаратуры на новой элементной базе». Да, но ведь этой самой «новой элементной базы» сегодня в России менее 3%! Что же будет с возрастанием процента МУРЗ в релейной защите?

Дополнительно усугубляет положение наличие в одной энергосистеме многих типов МУРЗ разных изготовителей, очень существенно отличающихся друг от друга по виду интерфейса, принципам программирования и тестирования. Все это приводит к существенному осложнению процесса перехода от электромеханических к микропроцессорным защитам. В [3.48] прямо указывается, что «ситуация осложняется еще и тем, что цель такого перехода – значительное повышение эффективности функционирования – как правило, не достигается» и далее: «процент неправильных действий современных панелей и шкафов РЗ часто оказывается существенно выше, чем для старых защит, выполненных на электромеханических реле». По свидетельству [3.49] «статистика показывает, что внедрение цифровых устройств релейной защиты (УРЗ), несмотря на их существенно лучшие, по сравнению с предшествующими поколениями защит, технические характеристики, не повысило, а во многих случаях даже снизило показатели правильного действия релейной защиты энергообъектов».

При попытке проведения аналогичного приведенному выше анализа по повреждениям релейной защиты в России, мы столкнулись с непредвиденной проблемой, о которой уже упоминалось выше: оказалось, что в России базовым показателем при оценке надежности релейной защиты является процент ее правильных (или неправильных) действий, а не количество отказов, как в рассмотренном выше случае.

Предложенный нами выше показатель надежности мог бы послужить инструментом для оценки качества реле защиты при оценке ситуации и принятии решений.

В заключение хотелось бы процитировать известного в мире специалиста в области МУРЗ, бывшего ведущего специалиста ВНИИ Релестроения, долгое время работавшего в компании Siemens, доктора технических наук, профессора Э. М. Шнеерсона, который в своей монографии [3.50] на стр. 491 пишет:

«Само по себе повышение технического уровня УРЗ не обязательно ведет к повышению эффективности в части реагирования на возникающие повреждения. Так, например, устаревшие к настоящему времени электромеханические и отчасти электронные статические УРЗ при правильном выборе защитных функций и уставок безусловно обеспечат более эффективную защиту сети, чем микропроцессорные УРЗ без достаточно обоснованного выбора указанных параметров».

И далее, на стр. 508:

«Как показывает практика, процент неправильных действий, связанных с использованием цифровых МУР, на первоначальном этапе существенно не уменьшается, а в ряде случаев даже возрастает».

И в заключение, на стр. 522:

«...несмотря на существенно более высокое техническое совершенство цифровых УРЗ их реальная эксплуатационная эффективность, особенно на первоначальных этапах, оказывается ниже, чем у защит предыдущих поколений».

3.5. Проблемы оценки надежности МУРЗ

Как известно [3.51], в 25-28% случаев причиной возникновения крупнейших системных аварий, имевших место в мире, были отказы релейной защиты. А если добавить к этому, что в 50-70% случаев перехода обычного аварийного режима в тяжелую системную аварию повинна также релейная защита [3.51], то становится очевидной первостепенная важность такого параметра, как надежность релейной защиты (РЗ).

Что такое надежность? В соответствии с ГОСТ 27.002-89 «Надежность - свойство объекта сохранять во времени в установлен-

ных пределах значения всех параметров, характеризующих *способность выполнять* требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования» [3.52]. Мы специально выделили в этом определении слова, подчеркивающие, что надежность объекта заключается не только в «выполнении им требуемых функций», но и в свойстве «сохранять во времени способность выполнять требуемые функции». Совершенно очевидно, что «выполнение функций» и «способность выполнять функции» - не одно и то же. Поясим это на примере той же релейной защиты. Если оценивать надежность РЗ по «выполнению требуемых функций», то получится, что микропроцессорное устройство релейной защиты (МУРЗ), которое постоянно выходит из строя и требует частой замены внутренних блоков, но при этом ни разу не привело к ложному срабатыванию (или несрабатыванию) выключателя, которым оно управляет, является абсолютно надежным. С другой стороны, если оценивать надежность того же МУРЗ по «способности выполнять требуемые функции», как того требует стандарт, то окажется, что МУРЗ в нашем примере крайне не надежное устройство, поскольку оно много раз и в течение достаточно длительного времени *было не способно выполнять требуемые функции* из-за внутренних повреждений.

Как же в действительности оценивается надежность РЗ на практике?

На Западе надежность РЗ принято оценивать по трем показателям [3.53]:

Надежность срабатывания (Dependability) D:

$$D = \frac{N_C}{N_C + N_F}$$

Надежность несрабатывания (Security) S:

$$S = \frac{N_C}{N_C + N_U}$$

Общая надежность (Reliability) R:

$$R = \frac{N_C}{N_C + N_F + N_U},$$

где N_C - количество правильных срабатываний защиты; N_F - количество отказов в срабатывании; N_U - количество излишних (ложных) срабатываний.

Как видно из приведенных выше формул, они не достаточно корректно отражают показатель надежности РЗ, поскольку не учитывают повреждения РЗ, не приведшие к ее неправильным действиям.

В России, как оказалось, учет надежности РЗ вообще не предусмотрен. Вместо этого в руководящем документе РД 34.35.516-89 [3.54] указано, что «основным показателем работы устройств РЗА принимается процент их правильной работы, получаемый по формуле:

$$K = \frac{N_{PS}}{N_{PS} + N_{IS} + N_{LS} + N_{OS}} \cdot 100\%,$$

где N_{PS} - число правильных срабатываний; N_{IS} - число излишних срабатываний; N_{LS} - число ложных срабатываний; N_{OS} - число отказов срабатываний.

Как можно видеть из сравнения этих двух методик, они совершенно идентичны, вне зависимости от названия применяемого показателя оценки РЗ, и оба не способны корректно учитывать надежность РЗ.

Еще одной проблемой является то, что такой метод оценки РЗ оперирует абсолютными, а не нормализованными показателями. К чему это приводит можно судить из следующего примера.

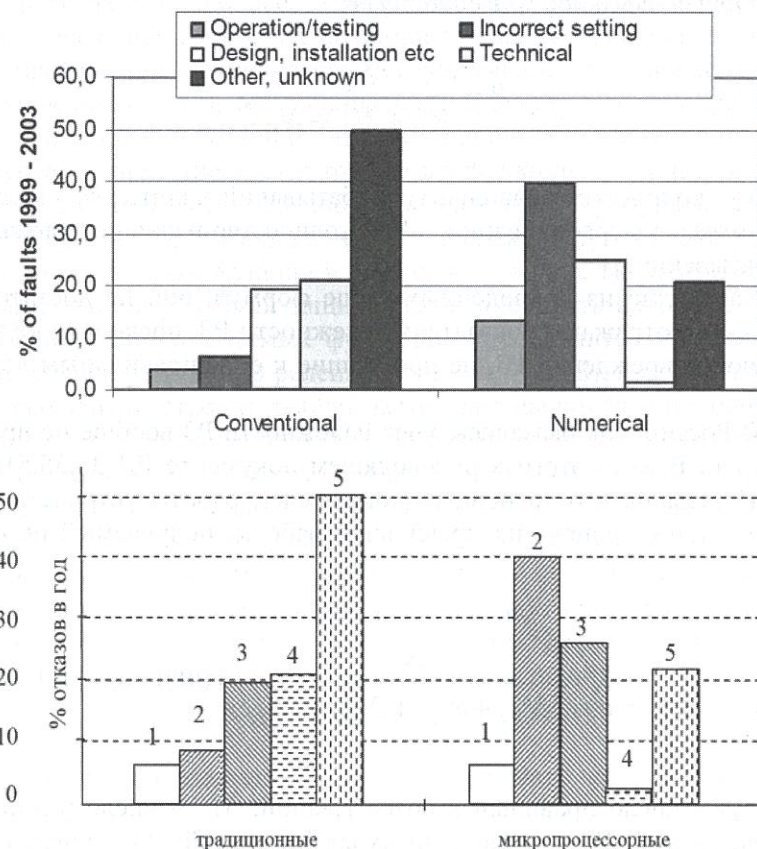


Рис. 3.34. Диаграммы отказов дистанционной защиты линий 132 – 420 кВ, вверху из [3.55], внизу из [3.56]: 1 – отказы из-за ошибок при тестировании и эксплуатации; 2 – отказы из-за ошибок в уставках и настройках; 3 – конструктивные недостатки; 4 – технические проблемы; 5 – отказы по неустановленным причинам

На рис. 3.34 приведены диаграммы с анализом причин повреждения реле защиты. На каждом из рисунков помещены две диаграммы: одна для электромеханических реле защиты (ЭМ), другая для МУРЗ. Какой вывод можно сделать из анализа этих диаграмм? В [3.56], например, делается такой вывод: «Как видно из диаграммы

на рисунке, частота отказов микропроцессорной дистанционной защиты сопоставима с частотой отказов традиционной защиты, хотя соотношение причин отказов различно». Иными словами, если перейти от частоты отказов к надежности, то можно говорить о том, что надежность ЭМ и МУРЗ сопоставимы. Значит ли это, что с переходом от ЭМ к МУРЗ никакого снижения надежности РЗ, как об этом утверждается в [3.57 – 3.59], не произошло? Можно ли делать такой вывод на основании сравнения этих диаграмм. Конечно же, нет! Ведь при составлении этих диаграмм никак не учитывалось количество установленных реле, для которых приведены численные значения по отказам, поэтому и сравнивать между собой левые и правые диаграммы нельзя. Это типичная ошибка учета абсолютных, а не нормализованных (то есть отнесенных к количеству рассматриваемых объектов) значений.

Есть и обратные примеры. Приведем цитату с данными, опубликованными зам. начальника службы релейной защиты Центрального диспетчерского управления ЕЭС России А. Н. Владимировым на российском форуме по релейной защите [3.60]:

«За 2000-2009 годы по ЛЭП и оборудованию напряжением 110-750 кВ зафиксировано 2913 случаев работы цифровых устройств релейной защиты. Из них правильно в 89,5% случаев, неправильно в 10,6% случаев. За этот же интервал времени электромеханические устройства релейной защиты работали 17529 раз. Из них правильно в 93,53%, неправильно в 6,48%. Микроэлектронные устройства релейной защиты работали 5685 раз. Из них правильно – в 92,91% случаев и в 7,07% случаев неправильно».

В этом примере приведены нормализованные данные по отказам (то есть число отказов каждого вида реле представлено в виде процентов от общего числа срабатываний каждого вида реле). При этом уже простое деление 10,6 на 6,48 позволяет получить реальную картину. Оказывается, что даже при существующей, не учитывающей всех факторов оценке надежности РЗ, получается, что МУРЗ на 60% менее надежные, чем ЭМ.

В связи с вышеизложенным совершенно очевидно, что корректный анализ диаграмм возможен только в части процентного соотношения причин, вызвавших отказы того или иного вида реле, но не в сравнении между собой абсолютных показателей надежности ЭМ и МУРЗ. Важный вывод, который можно сделать из анализа этих

диаграмм, заключается в резком возрастании процента отказов РЗ, связанных с так называемым «человеческим фактором» при переходе с ЭМ на МУРЗ:

- процент отказов, связанных с ошибками в уставках и настройках реле, возрос почти в 6 раз;
- процент отказов, связанных с ошибками при испытаниях и при эксплуатации РЗ, возрос в 4 раза.

Вывод о существенном влиянии «человеческого фактора» на состояние РЗ подтверждается также и данными российских специалистов, согласно которым уже сегодня «человеческий фактор» повинен в 52.8% случаев неправильных действий РЗ [3.61]. По данным [3.55] на Западе этот процент еще более высок и достигает до 78%. То есть, фактически, это фактор является основной причиной проблем с РЗ.

Почему переход от ЭМ к МУРЗ сопровождается резким увеличением веса «человеческого фактора»? Красноречивый ответ на это вопрос дает, как нам представляется следующая цитата [3.62]:

«В терминале Siprotec 7SJ642 (Siemens) заложена неоправданная техническая и информационная избыточность. В руководстве по эксплуатации (C53000G1140C1476, 2005 г.) отмечается «простота работы с устройством с помощью интегрированной панели управления или посредством подключения ПК с системной программой DIGSI», что не соответствует действительности. Например, требуется вводить около 500 параметров (уставок), не считая внесения неизбежных изменений в матрицу сигналов, а у каждого из сигналов есть «свойства», влияющие на работу устройства (распечатанная из DIGSI матрица сигналов занимает около 100 страниц англоязычного текста). Учитывая необходимость составления заданий на наладку и протоколов проверки терминалов, где должны указываться все параметры настройки, объем документации становится неподъемным. Большой объем вводимой информации усложняет настройку. Информационная избыточность повышает вероятность ошибок, связанных с «человеческим фактором». Техническая избыточность требует для работы с терминалом специалистов высокой квалификации. Документация фирмы по рассматриваемым терминалам – это тысячи

страниц, но при этом зачастую нет нужной информации, встречаются ошибки».

Комментарии, как говорится, излишни. Следует лишь отметить, что упомянутое выше изделия фирмы Siemens приведено лишь в качестве примера и не является чем-то из ряда вон выходящим. Такую же оценку можно дать и большинству изделий других производителей. К сожалению, сегодня это стало общей тенденцией.

В связи с вышеизложенным, возникает вполне закономерный вопрос: как же можно оценивать уровень технической эффективности, надежности, процента правильной работы (можно назвать это как угодно) современной РЗ без учета влияния «человеческого фактора»? Ведь для такой оценки РЗ не имеет никакого значения причина, по которой произошел отказ (неправильное действие) защиты. Неправильные уставки, ошибочная логика работы, программное отключение отдельных функций во время испытаний и невозврат их после окончания испытаний – все это и многое другое, что подпадает под определение «человеческий фактор», приводит к точно таким же неправильным действиям релейной защиты как и внутренние неисправности в электронных цепях. Более того, точно так же, как один тип реле отличается от другого элементной базой и схемотехническими решениями, что обуславливает и их разную надежность, различные типы МУРЗ отличаются также и программным интерфейсом. У одних типов МУРЗ он простой и понятный, у других чрезвычайно «навороченный» и «не дружелюбный». Совершенно очевидно, что в последнем случае вероятность неправильных действий РЗ будет выше из-за значительного увеличения веса «человеческого фактора».

Таким образом, как было показано выше, существующая методика оценки РЗ не отражает объективной картины и нуждается в серьезной корректировке.

По нашему мнению, при оценке надежности РЗ необходимо учитывать три типа отказов.

1. Отказы реле, не связанные с неправильными действиями РЗ, но требующие ремонта или замены вышедших из строя элементов, блоков и модулей (М_с).
2. Неправильные действия релейной защиты, то есть излишние срабатывания при отсутствии аварийного режима или несрабаты-

вания при аварийном режиме (M_D), не связанные с ошибками персонала.

3. Ошибки персонала, связанные с эксплуатацией, тестированием и программированием реле, влияющие на правильность действия релейной защиты, выявленные до наступления неправильного действия защиты (M_P) или после него.

Все эти составляющие должны войти, по нашему мнению, в обобщенный нормализованный показатель отказов M_{Σ} релейной защиты:

$$M_{\Sigma_i} = \left(\frac{M_{S_i} + M_{D_i} + M_{P_i}}{N_i} \right) \times 100\%,$$

где $M_{S_i}, M_{D_i}, M_{P_i}$ – количество отказов каждого типа для реле i – го вида за выбранный период времени; N_i – количество реле i – го вида, находящихся в эксплуатации в рассматриваемый период времени.

Совершенно очевидно, что при использовании предлагаемой методики мы увидим, что надежность МУРЗ существенно ниже надежности ЭМ. Из этого не следует, конечно, что нужно затормозить переход от ЭМ к МУРЗ. Однако, из этого следует, что имеется достаточно серьезная проблема, требующая своего решения. Некоторые пути решения этой проблемы уже предложены автором [3.63 – 3.67]. Кратко их можно сформулировать следующим образом:

- запрет на использования в МУРЗ функций, не свойственных релейной защите, например, таких, как мониторинг электрооборудования;
- существенное ограничение количества функций в одном микропроцессорном терминале; оптимизация количества таких функций по критерию не только стоимости РЗ, но и ее надежности;
- отказ от использования алгоритмов с недетерминированной логикой, допускающих непредсказуемые действия релейной защиты;

- максимальное упрощение программного интерфейса на основе некоей универсальной для всех МУРЗ программной платформы;
- выпуск ведущими производителями компьютеризированного испытательного оборудования МУРЗ набора программ, полностью совместимых с универсальной программной платформой МУРЗ и позволяющих полностью автоматизировать процесс испытания МУРЗ, существенно снизив влияние «человеческого фактора»;
- новые принципы конструирования МУРЗ, базирующиеся на универсальных взаимозаменяемых функциональных модулях, по типу персональных компьютеров; создание рынка универсальных функциональных модулей МУРЗ;
- проведение специальных исследований и разработок, обеспечивающих функционирование релейной защиты в условиях преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий, например, за счет повышения устойчивости МУРЗ к таким воздействиям, а также за счет введения резервного комплекта РЗ при чрезвычайных ситуациях, на роль которого подходят лишь электромеханические реле.

Еще одной фундаментальной ошибкой применяемой сегодня методики является, по нашему мнению, выбор в качестве критерия оценки надежности релейной защиты параметра, называемого «наработкой на отказ» (MTBF). Этот параметр предполагает многократные отказы оборудования с последующим его восстановлением (ремонт) и фактически равен частному от деления суммарной наработки на отказ на суммарное количество отказов, происшедших за весь период эксплуатации. По нашему мнению, этот показатель можно использовать во многих случаях, когда отказы оборудования не могут привести к каким-то катастрофическим последствиям (типа системных аварий в электроэнергетике) или к особо значительным убыткам. В случае же с релейной защитой существует опасность того, что даже единичный отказ многофункционального микропроцессорного терминала может привести к очень большим убыткам и даже к техногенным катастрофам. В этом случае, по нашему мнению, вместо показателя «наработка на отказ» должен использоваться показатель «наработка до отказа» (наработка до первого отказа), который больше подходит в качестве показателя надежности для релейной защиты в частности и для многофункционального

нальных МУРЗ особенно. Если быть более точным, то это должен быть показатель, называемый «гамма-процентной наработкой до отказа», представляющий собой наработку, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью, выраженной в процентах (например, 95 %). Некоторые авторы ранее уже приходили к выводу о том, что MTBF является не лучшим показателем для оценки надежности отдельных видов техники и предлагали использовать для такой оценки гамма-процентную наработку до отказа [3.68]. По нашему мнению, пришло время ввести в обращение этот показатель и для оценки надежности МУРЗ.

В заключение хотелось бы отметить недопустимость использования в такой чувствительной и важной области, как микропроцессорная релейная защита, упрощенных и удешевленных методов испытания на надежность, которые стали модными в последнее время и применяются некоторыми производителями МУРЗ с целью снижения собственных затрат.

Литература к Главе III

- 3.1. *Hunt R. K.* Hidden Failure in Protective Relays: Supervision and Control. Thesis to Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, 1998.
- 3.2. *Коновалова Е. В.* Основные результаты эксплуатации устройств РЗА энергосистем Российской Федерации. – Сборник докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», М. 2002
- 3.3. *Белотелов А. К.* Научно-техническая политика РАО «ЕС России» в развитии систем релейной защиты и автоматики – Сборник докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», М. 2002
- 3.4. *Johnson G., Thomson M.* Reliability Consideration of Multifunction Protection. – Basler Electric Corp.
- 3.5. *Гуревич В. И.* Как нам обустроить релейную защиту: мнения российских специалистов и взгляд со стороны. Вести в электроэнергетике, № 2, 2007.
- 3.6. *Projalkumar R.* Is the Era of Electromechanical Relays Over? - 5 Mar 2004.

- 3.7. *Гуревич В. И.* Микропроцессорные реле защиты: альтернативный взгляд. Электро-инфо, 2006, № 4.
- 3.8. *Heising C. R., Patterson R. C.* Reliability Expectations for Protective Relays. Developments in Power Protection. Fourth International Conference in Power Protection, 11 – 13 Apr., 1989, Edinburgh, UK.
- 3.9. *Mahaffey T. R.* Electromechanical Relays Versus Solid-State: Each Has Its Place. Electronic Design, September 16, 2002.
- 3.10. Electromechanical vs. Solid State Relay Characteristics Comparison. Application Note 13c3235. Tyco Electronics.
- 3.11. *Gurevich V.* Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering. Boca Raton – New York – London, CRC Press, 2008, 420 p.
- 3.12. *Clark O. M., Gavender R. E.* Lighting Protection for Microprocessor-based Electronic Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, No. 5, 1990.
- 3.13. *Uchimura K., Michida J., Nozu S., Aida T.* Multifunction of Digital Circuits by Noise Induced in Breaking Electric Contacts. Electronics and Communications in Japan, vol. 72, issue 6, 2007.
- 3.14. *Henderson I. A., McGhee J., Szaniawski W., Domaradzki P.* Incorporating High Reliability into the Design of Microprocessor-based Instrumentation. IEE Proceedings, vol. 138, No. 2, 1991.
- 3.15. *Phadke A. G.* Hidden failures in electric power systems. International Journal of Critical Infrastructures, vol. 1, No. 1, 2004.
- 3.16. *Ковалев Б. И., Наумкин И. Е.* Основные проблемы и задачи электромагнитной совместимости вторичных цепей высоковольтных подстанций. Сборник докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», М. 2002.
- 3.17. Information Notice No. 94-20: Common-Cause Failures Due to Inadequate Design Control and Dedication. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1994
- 3.18. *Matsuda T., Kovayashi J., Itah 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 Aug. – 5 Sept., 1992, Paris.
- 3.19. *He S., Shen L., Lui J.* Analyzing Protective Relay Misoperation Data and Enhancing Its Correct Operation Rate. IEEE/PES Trans-

- mission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- 3.20. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes
- 3.21. Шмурьев В. Я. Цифровые реле защиты. Библиотечка электротехника, вып. 1 (4), М. НТФ «Энергопрогресс», 1999.
- 3.22. Soft Errors in Electronic Memory – A White Paper, Terrazon Semiconductor, January 2004.
- 3.23. Soft Errors in Advanced Semiconductor Devices – Part I: The Three Radiation Sources. IEEE Transactions on Device and Material Reliability, vol. 1, No. 1, 2001.
- 3.24. Dodd P. E., Shaneyfelt M. R., Felix J. A., Schwank J. R. Production and Propagation of Single-Event Transient in High-Speed Digital Logic ICs. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 51, No. 6, 2004.
- 3.25. Johnson A. H., Miyahira T. F., Irom F., Edmonds L. D. Single-Event Transients in High-Speed Comparators. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, issue 6, part 1, 2002.
- 3.26. Gurevich V. Nonconformance in Electromechanical Output Relays of Microprocessor-Based Protection Devices Under Actual Operation Conditions, Electrical Engineering & Electromechanics, No.1, 2006.
- 3.27. Gurevich V. Peculiarities of the Relays Intended for Operating Trip Coil of the High-Voltage Circuit Breakers, Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 4, No. 2, 2007.
- 3.28. HEA Multicontact Auxiliary. GE Industrial - Multilin, General Electric, Co.
- 3.29. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория. М., «Энергия», 1977.
- 3.30. International Standard IEC 61810-7. Electromechanical elementary relays – Part 7: Test and measurement procedures.
- 3.31. Гуревич В. И. Повышение помехоустойчивости логических входов микропроцессорных устройств релейной защиты - Электроника-Инфо, 2008, № 11, с. 26 – 27.
- 3.32. Kumm J. J., Schweitzer E. O., Hou D., Assessing the Effectiveness of Self-Test and Other Monitoring Means in Protective Relays, 21st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA. Oct. 18-20, 1994

- 3.33. Advanced Digital Relay Systems - Is testing still needed? Omicron Electronics, vol. 5, issue 1, 2000.
- 3.34. Гуревич В. И. О надежности логических входов микропроцессорных устройств релейной защиты. – Электроника-инфо, 2009, № 2, с. 28 -30.
- 3.35. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем - РД 34.35.310-97, Москва, 1997.
- 3.36. Гуревич В. И. Отзыв на статью О. Г. Захарова «Комбинированные блоки питания. Характеристики выходных цепей» (<http://www.rza.org.ua/article/print-69.html>), 10.04.2009.
- 3.37. Борисов Р. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой. – Новости электротехники, 2001, № 6(12).
- 3.38. Матвеев М. Электромагнитная обстановка на объектах определяет ЭМС цифровой аппаратуры. - Новости электротехники, 2002, № 1(13).
- 3.39. Gurevich V. Electromagnetic Terrorism: New Hazards. Electrical Engineering & Electromechanics, No. 4, 2005.
- 3.40. IEEE Std 1686-2007, IEEE Standard for Substation Intelligent Electronic Devices (IEDs) Cyber Security Capabilities.
- 3.41. Пуляев В. И. Итоги работы устройств релейной защиты и автоматики ОАО «ФСК ЕЭС». Сборник докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», М., 2002.
- 3.42. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем - РД 34.35.310-97, Москва, 1997.
- 3.43. Heising C. R., Patterson R. C. Reliability Expectations for Protective Relays. Developments in Power Protection. Fourth International Conference in Power Protection, 11 – 13 Apr., 1989, Edinburgh, UK.
- 3.44. Гуревич В. И. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность. – Вести в электроэнергетике, 2008, № 4, с. 29 – 37.
- 3.45. Гуревич В. И. Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты. - Вести в электроэнергетике, 2009, № 3, с. 33 – 39.

- 3.46. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты: альтернативный взгляд – “Электро-инфо”, 2006, N 4 (30), с. 40 – 46.
- 3.47. Коновалова Е. В. Основные результаты эксплуатации устройств РЗА энергосистем Российской Федерации. – Сборник докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», М. 2002.
- 3.48. Шалин А.И. Об эффективности новых устройств РЗА. – Энергетика и промышленность России – избранные материалы, вып. 203.
- 3.49. Шнеерсон Э. М. Эксплуатационная эффективность устройств релейной защиты: реальность и возможности. – Энерго-эксперт, № 4 – 5, 2007, с. 70 – 77.
- 3.50. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита. Энергоатомиздат, М., 2007.
- 3.51. Саратова Н.Е. Анализ подходов к исследованию процессов протекания системных аварий - Системные исследования в энергетике. Материалы конф. молодых ученых. Иркутск: ИСЭМ, 2007. с. 31–39.
- 3.52. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
- 3.53. Moxley R. Analyze Relay Fault Data to Improve Service Reliability. <http://www.selinc.com>.
- 3.54. РД 34.35.516-89 Инструкция по учету и оценке работы релейной защиты и автоматики электрической части энергосистем. Союзтехэнерго, М, 1990.
- 3.55. Kjolle G.H., Heggset J., Hjartsjo B.T., Engen H. Protection System Faults 1999-2003 and the Influence on the Reliability of Supply // 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
- 3.56. Воронай Н. И., Саратова Н. Е. Анализ статистики отказов РЗА на микропроцессорной базе с точки зрения их учета при моделировании каскадных аварий. – Доклады 3-й Международной научно-технической конференции «Энергосистема: управление, конкуренция, образование», Екатеринбург, 13 – 16 ноября 2008.
- 3.57. Гуревич В. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность. – Проблемы энергетики, 2008, № 5 - 6, с. 47 - 62.

- 3.58. Гуревич В. И. Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты. - Электротехнический рынок, 2009, № 3 (29), с. 40 - 45.
- 3.59. Проблемы микропроцессорных устройств релейной защиты: мнения специалистов, нерешенные проблемы, публикации в прессе, <http://digital-relay-problems.tripod.com/>.
- 3.60. Интернет-форум «Советы бывалого релейщика», <http://rza.communityhost.ru/>.
- 3.61. Коновалова Е. В. Основные результаты эксплуатации устройств РЗА энергосистем Российской Федерации. – Сборник докладов XV научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем», М., 2002.
- 3.62. Беляев А.В., Широков В.В., Емельянцеv А.Ю. Цифровые терминалы РЗА. Опыт адаптации к российским условиям. – Новосты электротехники, 2009, № 5.
- 3.63. Гуревич В. И. Проблемы микропроцессорных реле защиты: кто виноват и что делать? – Электроника-инфо, 2009, № 9, с. 17 - 23.
- 3.64. Гуревич В. И. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты. – Компоненты и технологии, 2010, № 5, с. 12 – 15.
- 3.65. Гуревич В. И. Испытания микропроцессорных устройств релейной защиты. – Электро: Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность, 2009, №1, с. 31 – 33.
- 3.66. Гуревич В. И. Актуальные проблемы релейной защиты: альтернативный взгляд. – Вести в электроэнергетике, 2010, № 3, 2010, с. 30 – 43.
- 3.67. Гуревич В. И. Энергобезопасна ли релейная защита? - Энергобезопасность и Энергосбережение, 2010, № 2, с. 6 - 8.
- 3.68. Нетес В. Нарботка на отказ жесткого диска: истоки заблуждений и ошибок. – «PC Week/Russian Edition», №14 (572), 24 - 30 апреля 2007.
- 3.69. Гуревич В. И. Как не нужно оценивать надежность микропроцессорных устройств релейной защиты. - "Вести в электроэнергетике", 2010, № 5, с. 27 - 30.

Глава IV. ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МУРЗ

4. 1. Чувствительность МУРЗ к электромагнитным воздействиям

Проблема электромагнитной совместимости электронной аппаратуры (ЭМС) возникла вместе с самой этой аппаратурой, поскольку одни ее узлы функционально построены таким образом, что являются приемниками электромагнитного излучения, тогда как другие – источниками излучения. Проблемы возникали как из-за взаимного влияния одних узлов на другие внутри аппаратуры, так и при воздействии на электронную аппаратуру внешних излучений различного происхождения. Десятилетиями проблемы ЭМС были прерогативой специалистов в области электроники, радиотехники, связи. Неожиданно, в последние 10 – 15 лет, эта проблема стала весьма актуальной и в электроэнергетике. Конечно, довольно значительные электромагнитные поля на объектах электроэнергетики существовали всегда. Однако применявшиеся десятилетиями устройства автоматики, управления и релейной защиты электромеханического типа были мало подвержены этим полям, и никаких особых проблем с ЭМС не возникало. Последние два десятилетия характеризуются интенсивным переходом от электромеханических к микропроцессорным устройствам релейной защиты (МУРЗ) и автоматики в электроэнергетике. Причем переход этот осуществляется не только по мере строительства новых подстанций и электростанций, но и путем замены старых электромеханических реле защиты (ЭМЗ) на старых подстанциях, построенных еще в те времена, когда никто даже не предполагал использование на них микропроцессорной техники, на суперсовременные МУРЗ. Последние оказались весьма чувствительными к электромагнитным помехам, поступающим «из воздуха», по цепям оперативного тока, цепям напряжения и трансформаторов тока. Отмечались случаи ложного срабатывания МУРЗ даже от мобильного телефона [4.1] и не только. Другие характерные примеры - случаи ложного срабатывания микропроцессорных устройств на действующих объектах "Мосэнерго", Очаковской и Zubовской подстанциях. Алгоритм работы защит нарушался

из-за молнии, работающего поблизости экскаватора, электросварки и некоторых других помех. Во время ввода в действие Липецкой подстанции, которая потратила около полутора миллионов долларов на приобретение МУРЗ, проблемы с микропроцессорными устройствами полгода не позволяли запустить этот энергообъект. В итоге подстанцию запускали, используя комплект традиционных защит [4.2]. На практике приходилось сталкиваться со случаями, когда, например, короткие замыкания по стороне 110 кВ вызывали ложную работу защит по стороне 330 кВ, а помехи при коммутациях по одному классу напряжений проникали (через общие цепи оперативного тока) на входы аппаратуры РЗА, работающей по другому классу напряжения [4.3].

Неправильная работа релейной защиты по причине недостаточной ЭМС, по данным «Мосэнерго», составляет до 10% от всех случаев ложной работы и касается в основном только реле на микроэлектронной и микропроцессорной элементной базе [4.4]. Столь высокий процент случаев неправильной работы по причине недостаточной ЭМС вызван тем, что чувствительность к электромагнитным помехам МУРЗ на несколько порядков выше, чем у традиционных электромеханических защит. Например, по данным [4.4] если для нарушения работы электромеханического реле требуется энергия 10^{-3} джоуля, то для нарушения работы интегральных микросхем требуется всего 10^{-7} джоуля. Разница составляет 4 порядка или 10000 раз.

Степень повреждения зависит от устойчивости как каждого из компонентов схемы, так и от энергии мощной помехи в целом, которая может быть поглощена схемой без появления дефекта или отказа. Например, для электромагнитного реле с катушкой на напряжение 230 В переменного тока коммутационная помеха от индуктивной нагрузки с амплитудой 500 В хотя и является более чем двукратным перенапряжением, но вряд ли приведет к отказу реле в силу стойкости электромеханики к такого рода помехам и вследствие малой длительности такой помехи (в течение микросекунд). Иначе обстоит дело с микросхемой, питающейся от источника 5 В постоянного тока. Импульсная помеха с амплитудой 500 В в сто раз превышает напряжение питания этого электронного компонента и приводит к неизбежному отказу и последующему разрушению устройства. Стойкость микросхем к перенапряжениям на несколько

порядков ниже, чем электромагнитного реле [4.5]. Импульсные перенапряжения, возникающие при разрядах молний и при коммутации в силовых электроустановках, способны повреждать и разрушать как электронные устройства, так и целые системы.

Многолетняя статистика подтверждает, что число таких повреждений удваивается каждые три-четыре года [4.5]. Эта статистика хорошо согласовывается с так называемым Законом Мора [4.6], еще в 1965 году показавшем, что количество полупроводниковых компонентов в микрочипах удваивается примерно каждые два года и такая тенденция сохраняется уже много лет. Если каких-то десять лет тому назад микросхемы так называемой транзисторно-транзисторной логики (TTL) содержали 10-20 элементов на квадратный миллиметр и имели типичное напряжение питания 5 В, то сегодня популярные микросхемы могут содержать почти сто CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) транзисторов на каждом квадратном миллиметре поверхности и имеют напряжение питания только 1.2 В. Новейшие технологии твердого тела, например, SOS (Silicon-On-Sapphire), поднимают плотность элементов до 500 на одном квадратном миллиметре поверхности [4.7]. Очевидно, что для таких микросхем потребуется еще более низкое напряжение питания. При этом совершенно очевидно, что с повышением степени интеграции в микроэлектронике уменьшается устойчивость ее компонентов к высоковольтным импульсным перенапряжениям по причине уменьшения толщины изоляционных слоев и уменьшения рабочих напряжений полупроводниковых элементов.

Поскольку помехи, имеющие меньшую энергию, возникают чаще помех, имеющих большую энергию, наиболее частой реакцией МУРЗ на воздействие электромагнитных помех будет не разрушение устройства, а нарушение его работы или кратковременный сбой в работе с последующим восстановлением нарушенной функции (рис. 4.1).

Это означает, что сработавшее неправильно на подстанции МУРЗ покажет полностью исправную работу при его исследовании в лаборатории, и установить причину его ложного срабатывания на подстанции будет невозможно. Статистика, собранная представителями крупнейших японских компаний-производителей МУРЗ ярко подтверждает эту особенность МУРЗ (рис. 4.2) [4.8].

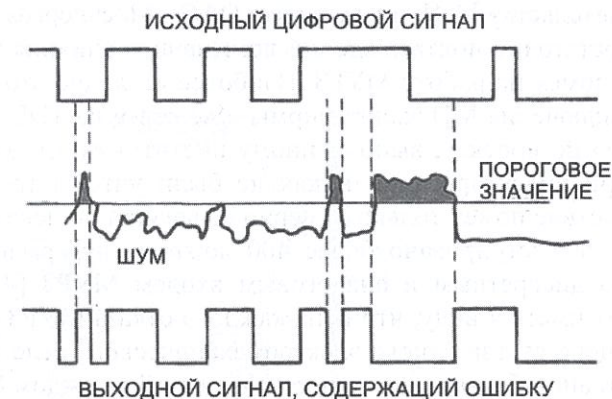


Рис. 4.1. Воздействие помехи малой энергии на работу цифрового устройства

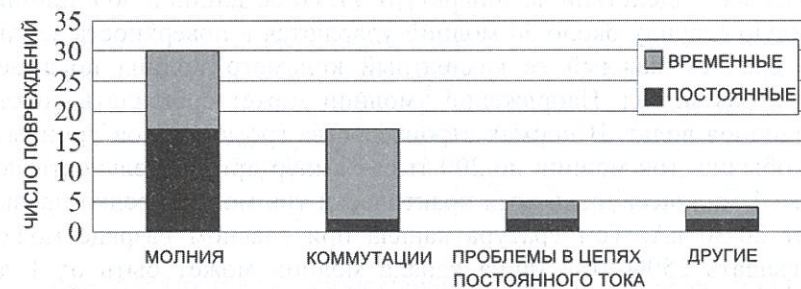


Рис. 4.2. Данные японских компаний-изготовителей по повреждаемости МУРЗ от электромагнитных воздействий

Как видно из представленной диаграммы, кратковременные не повторяющиеся нарушения функционирования (сбои в работе) МУРЗ являются преобладающими в большинстве случаев. Этот вывод подтверждается также и данными, полученными другой группой исследователей [4.9]. Согласно их данным, нарушения функционирования такого рода составляют почти 70 % от общего числа повреждений МУРЗ, причем до 80% этих сбоев происходит в интегральных микросхемах.

По свидетельству [4.4], и в практике ОАО «Мосэнерго» накопилось уже достаточно подтверждений негативного влияния электромагнитных помех на работу МУРЗ. Наиболее наглядно это показывает опыт включения МП защит фирмы «Siemens» на ТЭЦ-12 ОАО «Мосэнерго» по проекту, выполненному институтом «Атомэнергопроект». При проектировании никак не были учтены требования ЭМС. Вследствие помех только за период с августа по декабрь 1999 года было зарегистрировано более 400 ложных информационных сигналов по дискретным и аналоговым входам МУРЗ [4.4]. При этом следует иметь в виду, что цена каждого отказа МУРЗ раз в 10 выше, чем цена отказа одного электромеханического реле вследствие концентрации большого количества функций в каждом МУРЗ.

4.2. Грозовые разряды

Грозовые разряды являются самым мощным источником импульсных воздействий на аппаратуру электростанций и подстанций. Каждую секунду около 50 молний ударяются в поверхность земли, и в среднем каждый ее квадратный километр молния поражает шесть раз за год. Напряжение молнии может составлять до ста миллионов вольт. В нормах строительства громоотводов принимают, обычно, ток молнии до 200 тысяч ампер при длительности порядка 1 миллисекунды, хотя практически ток молнии редко превышает 20-30 кА. Температура канала при главном разряде может превышать 25000 °С. Длина канала молнии может быть от 1 до 10 км, диаметр — несколько сантиметров. При ударе молнии в молниеотвод электрический ток (в виде импульса колоколообразной формы) поступает в землю и растекается в грунте во все стороны на нескольких десятках и даже сотен метров, причем, из-за сопротивления грунта этот ток создает на нем падение напряжения. Поскольку наибольшее сопротивление оказывают слои почвы, лежащие вблизи места вхождения тока в землю, то именно здесь наблюдается самое высокое напряжение. По мере удаления от этой точки сопротивление прохождению тока уменьшается, при этом снижается и напряжение (рис. 4.3).

Для снижения потенциала, наводимого при протекании тока молнии в грунте, сопротивление растеканию тока в зоне расположения жилых и промышленных зданий и сооружений уменьшают с

помощью металлической сетки достаточно большой площади, размещенной в грунте под фундаментом зданий.

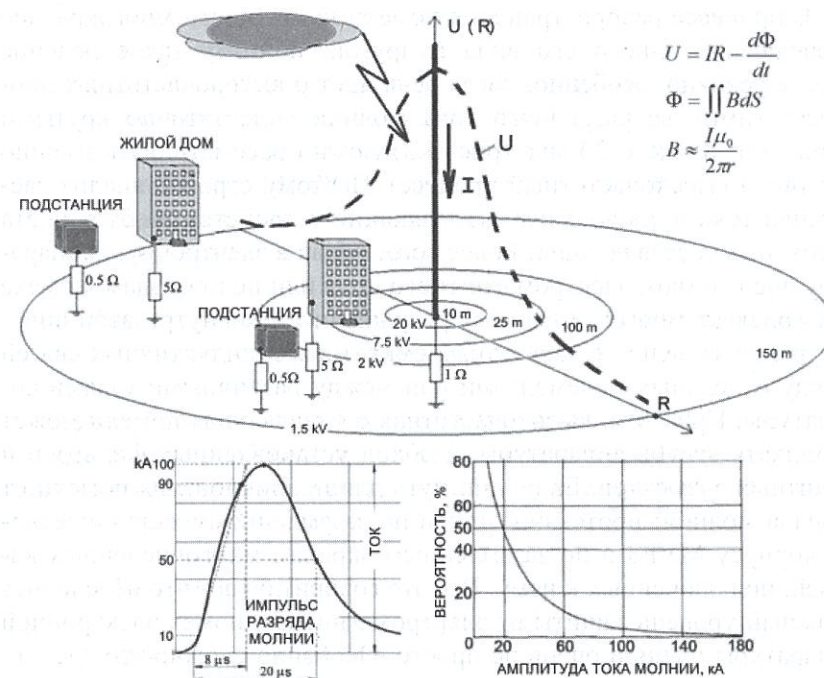


Рис. 4.3. Процессы, происходящие при попадании молнии в молниеотвод

Однако сопротивление таких заземляющих систем все еще весьма далеко от нуля, и поэтому даже остаточные импульсные потенциалы, наведенные в заземляющей системе и проникающие по кабелям на входы электронной аппаратуры, представляют для нее серьезную опасность. Помехи такого рода называются «кондуктивными». Кроме помех такого вида, импульс сильного тока, проходящий по молниеотводу, создает и помехи в виде электромагнитных полей, воздействующих на все близко расположенные проводники. Такое воздействие называется «индуктивным». Существуют еще и емкостные наводки, при которых короткие (то есть высокочастот-

ные) импульсы перенапряжения из высоковольтных линий электропередач попадают в низковольтные цепи через емкостные связи между обмотками трансформаторов.

В процессе распространения помехи имеет место многократное превращение одного его вида в другой, поэтому такое деление весьма условно, особенно, когда речь идет о высокочастотных процессах (импульс разрядного тока молнии с достаточно крутыми фронтами: 8 мкс и 20 мкс (рис. 4.3) можно рассматривать именно как такой высокочастотный процесс). Поэтому строгий анализ растекания тока в земле через заземляющие устройства требует учета обеих этих составляющих. Более того, попав в электронную аппаратуру посредством электромагнитного поля или по проводам, помеха претерпевает многочисленные превращения уже внутри этой аппаратуры из-за наличия паразитных емкостных и индуктивных связей между отдельными элементами или между различными узлами аппаратуры. При этом, высокочастотная составляющая помехи может проникать вглубь аппаратуры, в обход установленных фильтров и защитных элементов. Еще один путь для проникновения помехи от разряда молнии: протекание токов по заземленному металлическому корпусу МУРЗ и по заземленным экранам многочисленных кабелей, подключенных к нему. Все это говорит о том, что обеспечить должный уровень защиты от электромагнитных помех электронной аппаратуры очень и очень не просто. Особенно сложно это сделать на старых подстанциях, системы заземления которых проектировались для работы с электромеханической защитой, значительно более устойчивой к электромагнитным воздействиям, чем микропроцессорная. А если учесть, что опасные подъемы потенциала в цепях заземления возникают не только при ударах молнии, но и при аварийных коротких замыканиях в электрических сетях, то проблема станет еще более сложной. В некоторых случаях, для предотвращения такого подъема потенциала в цепях электронной аппаратуры, контуры заземления силового оборудования и электронной аппаратуры делают отдельными. Однако в реально существующих подстанциях выполнить такое разделение невозможно.

По нашему мнению, только комплексное решение проблемы позволит избежать влияния мощных электромагнитных помех на МУРЗ. Это решение должно включать в себя:

- использование МУРЗ только на подстанциях, спроектированных и построенных с учетом самых современных требований к электромагнитной совместимости и рассчитанных на эксплуатацию высокочувствительной электронной аппаратуры;
- совершенствование конструкции самих МУРЗ;
- размещение МУРЗ в металлических шкафах, специально предназначенных для защиты электронного оборудования и снабженных фильтрами на всех кабелях, входящих в шкаф.

4.3. Коммутационные процессы и электромагнитные поля от работающего оборудования

Коммутационные процессы и электромагнитные поля от работающего электрооборудования являются вторым по степени влияния источником импульсных помех, воздействующим на МУРЗ в обычных условиях эксплуатации.

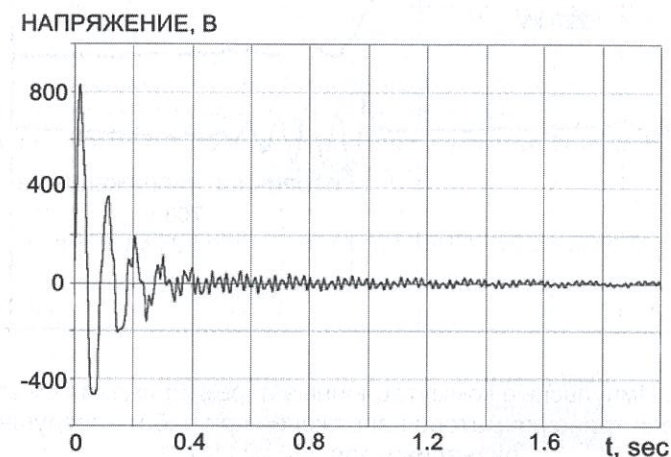


Рис. 4.4. Напряжение относительно «земли» наведенное в низковольтном контрольном кабеле в результате коммутационного процесса в высоковольтной цепи [4.10]

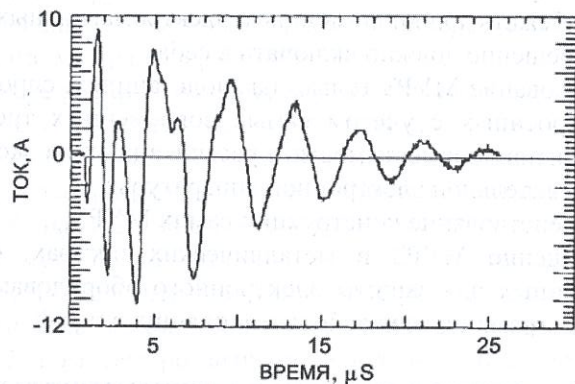


Рис. 4.5. Ток, наведенный во вторичной обмотке трансформатора тока при коммутации воздушного выключателя напряжением 500 кВ [4.11].

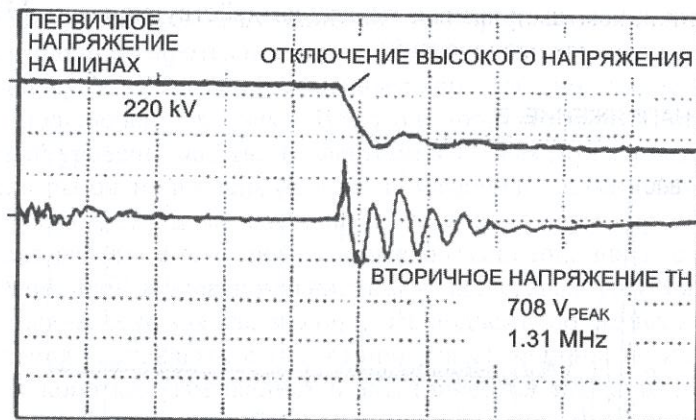


Рис. 4.6. Импульсные коммутационные перенапряжения во вторичной цепи трансформатора напряжения при работе воздушного разъединителя 220 кВ [12].

Источниками коммутационных помех в электроэнергетике являются, обычно, высоковольтные выключатели и разъединители, низковольтные реле и контакторы, управляемые батареи конденса-

торов. Мощные преобразователи частоты электроприводов, коронный разряд, электроискровые технологии являются источниками электромагнитных излучений, опасных для электронной аппаратуры. При этом, пути проникновения помех в МУРЗ могут быть самыми разными: от прямых индуктированных наводок на низковольтные провода и кабели вторичных цепей подстанции, до импульсных и высокочастотных перенапряжений, возникающих во вторичных обмотках трансформаторов тока и напряжения (рис. 4.5 - 4.7).

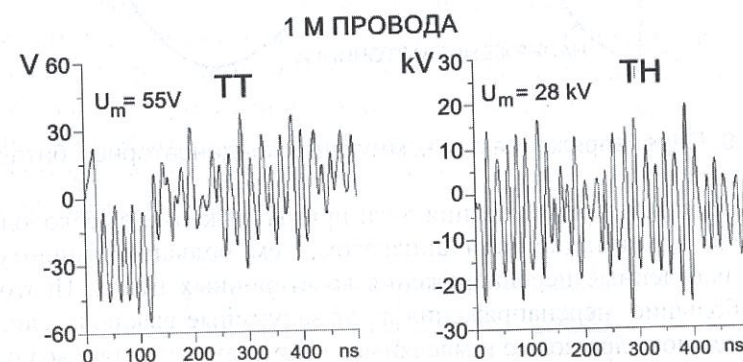


Рис. 4.7. Высокочастотные помехи на куске провода длиной 1 м, подключенного к вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения при коммутационных процессах в элегазе при напряжении 245 кВ [4.13]

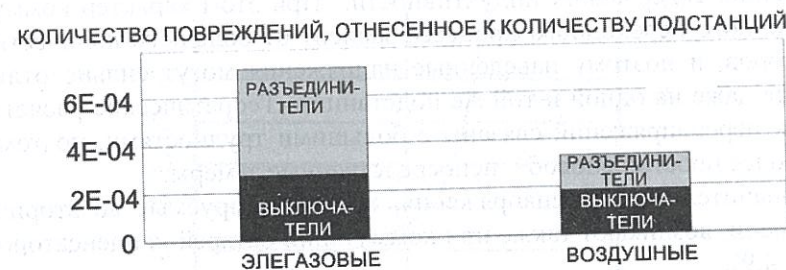


Рис. 4.8. Относительное количество повреждений МУРЗ от перенапряжений, возникающих при работе выключателей и разъединителей с элегазовой и воздушной изоляцией [4.8]



Рис. 4.9. Перенапряжения при коммутации конденсаторных батарей

Чем меньше время горения дуги при размыкании высоковольтной цепи коммутационным аппаратом, тем большую амплитуду имеют наведенные перенапряжения во вторичных цепях. Поэтому самые большие перенапряжения дают вакуумные выключатели, за ними следуют элегазовые и масляные, а замыкают этот ряд воздушные выключатели. Этим обусловлена и разница в количестве повреждений МУРЗ, возникающих при работе выключателей и разъединителей с элегазовой и воздушной изоляцией (рис. 4.8). Следует отметить, что высоковольтные помехи могут наводиться в контрольных кабелях также при коммутации низковольтных цепей, особенно, содержащих индуктивности. При этом характер коммутационного переходного процесса зависит от большого количества факторов, и поэтому наведенные напряжения могут сильно отличаться даже на одной и той же подстанции. Теоретические расчеты таких перенапряжений связаны с большими трудностями, поэтому наиболее простой способ — непосредственные замеры.

Значительные перенапряжения, трансформируемые во вторичные цепи, возникают также при коммутации батарей конденсаторов (рис. 4.9).

Эффективной мерой борьбы с наведенными перенапряжениями на входах электронной аппаратуры и на ее зажимах питания является широкое использование элементов с нелинейной характери-

кой: газовых разрядников, варисторов, специальных полупроводниковых элементов на основе стабилитронов, и т.д., включаемых параллельно защищаемому объекту (например, параллельно входу МУРЗ) и между каждой клеммой этого объекта и землей. Наилучшими характеристиками обладают на сегодняшний день резисторы с нелинейной характеристикой, выполненные из прессованного порошка оксида цинка ZnO (реже из карбида кремния, титаната бария и др. материалов) — варисторы, которые и получили наибольшее распространение. Выпускаются они сегодня в огромных количествах: без корпусов, в корпусах различных типов, часто снабжаются всякими вспомогательными элементами (предохранителями, сигнальными флажками и т.п.). Варисторы должны быть правильно выбраны. К сожалению, часто приходится наблюдать, ситуацию, при которой варисторы даже в аппаратуре ведущих мировых производителей выбраны неверно и, фактически, никакими защитными функциями не обладают.

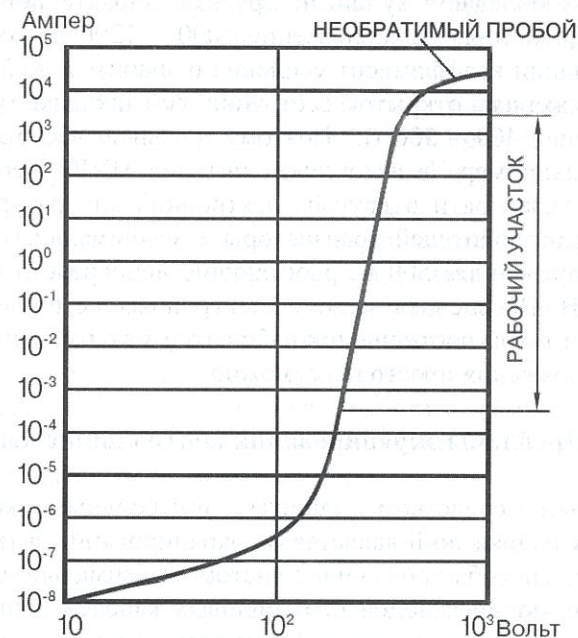


Рис. 4.10. Типовая ВАХ оксидноцинкового варистора

Поскольку вольтамперная характеристика (ВАХ) варистора далеко не идеальна (рис. 4.10), правильно выбрать его не так-то просто. С одной стороны, варистор не должен пропускать через себя ток более 1 мА (стандартное значение для современных варисторов западного производства) при максимальном рабочем напряжении (иначе он просто перегреется и сгорит), с другой - его напряжение «срабатывания» (clamping voltage) должно быть заметно меньше напряжения, выдерживаемого электронными компонентами защищаемого оборудования (в противном случае не варистор будет защищать электронные компоненты, а эти компоненты будут «защищать» варистор).

Из-за несовершенства ВАХ варисторов для выполнения этих условий максимальное выдерживаемое напряжение электронных компонентов, предназначенных для работы в сети 220 В, должно быть не менее 1000 В. Однако во первых, электронные компоненты на такое напряжение значительно дороже, чем низковольтные, во вторых, они обладают худшими другими характеристиками. Например, транзисторы на напряжение 1000 – 1200 В имеют значительно меньший коэффициент усиления и значительно большее падение напряжения в открытом состоянии, чем такие же транзисторы на напряжение 400 – 500 В. Поэтому довольно часто приходится встречать, например, в источниках питания МУРЗ, регистраторов аварийных режимов и в другой электронной аппаратуре ведущих мировых производителей транзисторы с максимальным выдерживаемым напряжением 500 В, работающие непосредственно в цепи 220 – 250 В. Обеспечить защиту электронных компонентов варисторами при таком соотношении рабочего и максимально выдерживаемого напряжения просто невозможно.

4.4. 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 от силовых кабелей, использование специальных кабельных лотков. Существует несколько типов таких лотков: пластмассовых со вставками из алюминия, пластмассовых с напылением металла, алюминиевых.

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 явления 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 достаточно стенка в 5 мм).

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

жет обеспечить прокладка контрольных кабелей в стальных водопроводных трубах.

Для успешного функционирования экранных 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 0.2λ (λ - длина волны электромагнитного поля).

При прокладке экранированных кабелей на подстанциях может использоваться 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. 4.11).

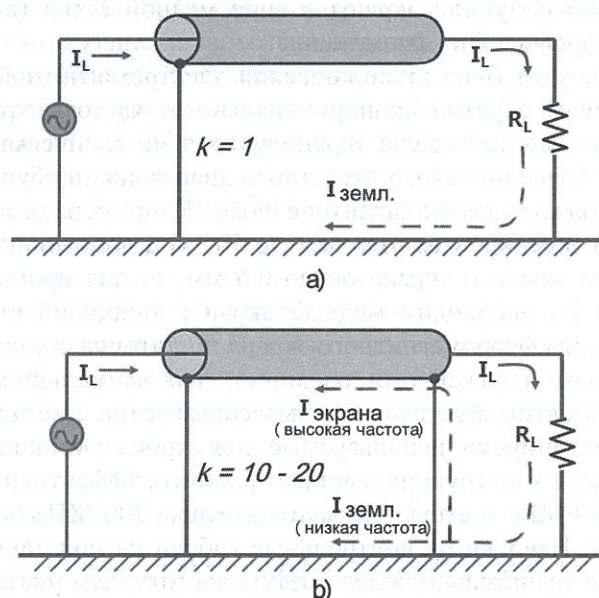


Рис. 4.11. Работа экрана, заземленного с одной и с двух сторон

Часто приходится слышать мнение релейщиков о целесообразности заземления экранов контрольных кабелей лишь с одной стороны. По-видимому, это мнение возникло под влиянием двух из-

вестных релейщикам фактов: заземления токовых цепей лишь с одной стороны, а также заземления экранов силовых высоковольтных кабелей с одной стороны. Эти известные факты иногда переносятся на заземление 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. 4.12) (так называемая электростатическая защита) и совершенно не эффективной мерой (коэффициент ослабления помехи $k = 1$) для индуктированных наводок, поскольку этот экран не обеспечивает цепи для замыкания тока помехи.



Рис. 4.12. Импульсная наводка через емкостную связь между проводниками

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 также 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 недопустимы, 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. 4.13), 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.

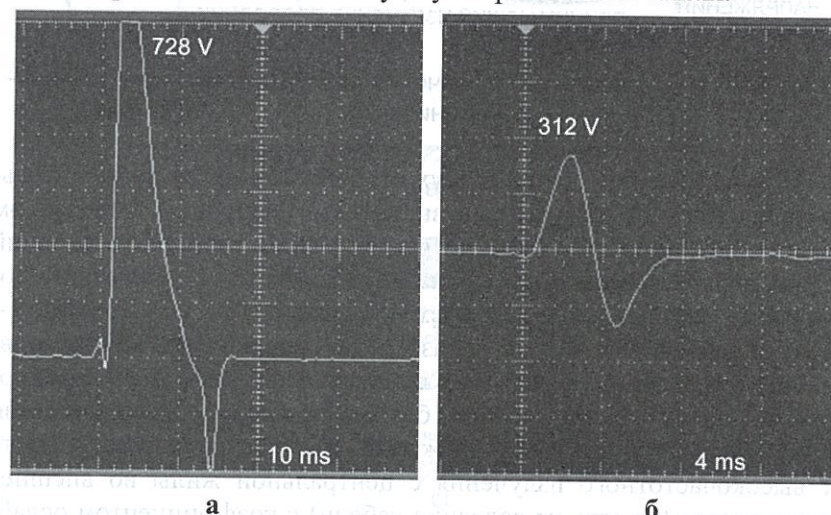


Рис. 4.13. Индуцированные наводки одного контрольного кабеля на другой: слева – не экранированные кабели; справа – один кабель экранирован с двух сторон

Длительность этого наведенного импульса иногда бывает такой, что приводит к ложному срабатыванию выключателя (рис. 4.13 а).

Возникновение столь мощной импульсной помехи в цепях управления вызывает 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 индуцированного импульса помехи на втором кабеле значительно уменьшилась (рис. 4.13 б), 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 токов (обычно, токов промышленной частоты), вызывающих в экране значительные индуцированные 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. 4.14). Как показано в [4.14], 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 заземленными концами экрана кабеля при воздействии на него мощной импульсной помехи.

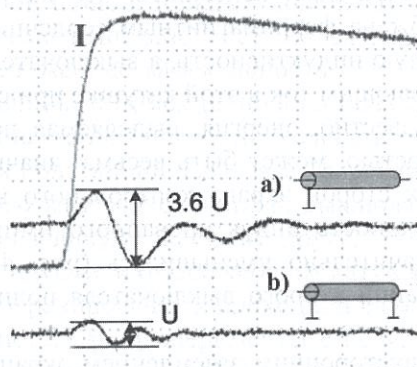


Рис. 4.14. Наводки напряжения на контрольные кабели с односторонним (а) и двусторонним (б) заземлением экрана при протекании импульса тока (I) молнии через заземлитель

Последнее решается путем прокладки вдоль кабелей медной шины, заземленной с двух сторон, которая так и называется «шиной 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. 4.15). Импеданс катушки, образованной одним или двумя витками контрольного кабеля, пропущенного через ферритовое кольцо очень мал для низкочастотных рабочих сигналов и для 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. 4.16).

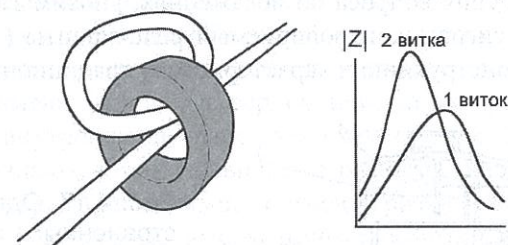


Рис. 4.15. Фильтр на основе ферритового кольца и его частотная характеристика

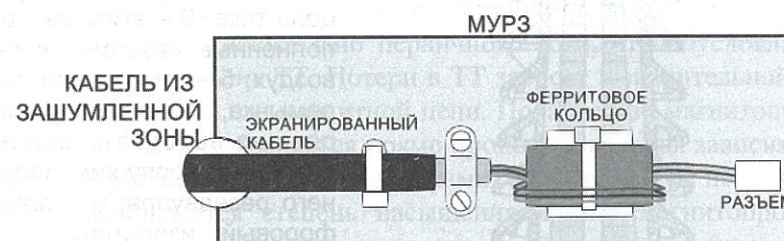


Рис. 4.16. Установка фильтра на основе ферритового кольца на контрольном кабеле, входящем в МУРЗ

Влияния 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 напряже-

ния 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.

4.5. 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.

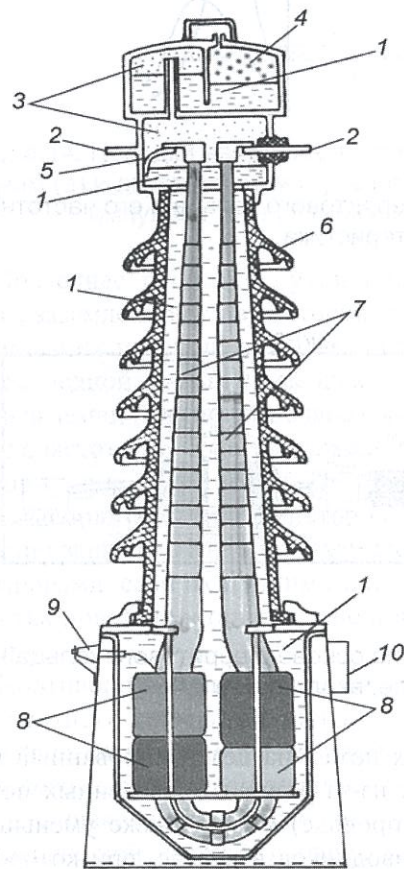


Рис. 4.17. Одна из распространенных конструкций высоковольтного трансформатора тока (160 кВ) с бумажно-масляной изоляцией: 1 – масло; 2 – медные пластины для включения в контролируемую цепь тока; 3 – емкости, заполненные азотом; 4 – воздух; 5 – внутренняя перемычка, соединяющая один из выводов с металлическим корпусом верхнего резервуара; 6 – фарфоровый изолятор; 7 – изолированный первичный проводник (первичный виток); 8 – четыре независимые вторичные обмотки с собственным магнитопроводом каждая; 9 – изолятор на внешней стенке бака с выводом, присоединенным к баку; 10 – клеммная коробка с выводами вторичных обмоток

Высоковольтные ТТ, предназначенные для установки в электрических сетях (рис. 4.17), имеют первичный проводник (виток) 7, включаемый в разрыв высоковольтной линии и несколько независимых вторичных обмоток, каждая из которых снабжена собственным сердечником (керном) 8. Основная изоляция в таких трансформаторах выполняется, обычно, путем обвивки первичного витка многими слоями специальной бумажной ленты, чередующейся с тонкой алюминиевой фольгой, с последующей заливкой всего свободного объема жидким трансформаторным маслом.

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 загибаться (рис. 4.18). Причем с увеличением нагрузки вторичной цепи ТТ (то есть увеличении импеданса нагрузки) степень загиба 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. 4.19).

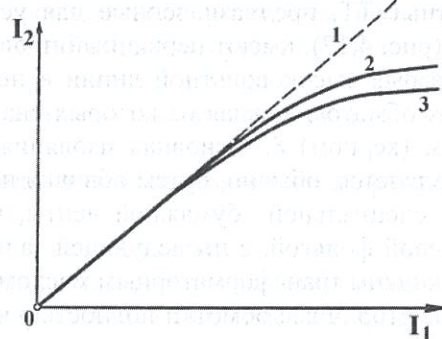


Рис. 4.18. Зависимость вторичного тока (I_2) от первичного (I_1) в трансформаторе тока: 1 – идеальная кривая; 2 – реальная кривая для номинальной нагрузки вторичной цепи $Z_{2\text{ ном}}$; 3 – реальная кривая для большой нагрузки вторичной цепи $Z_2 > Z_{2\text{ ном}}$

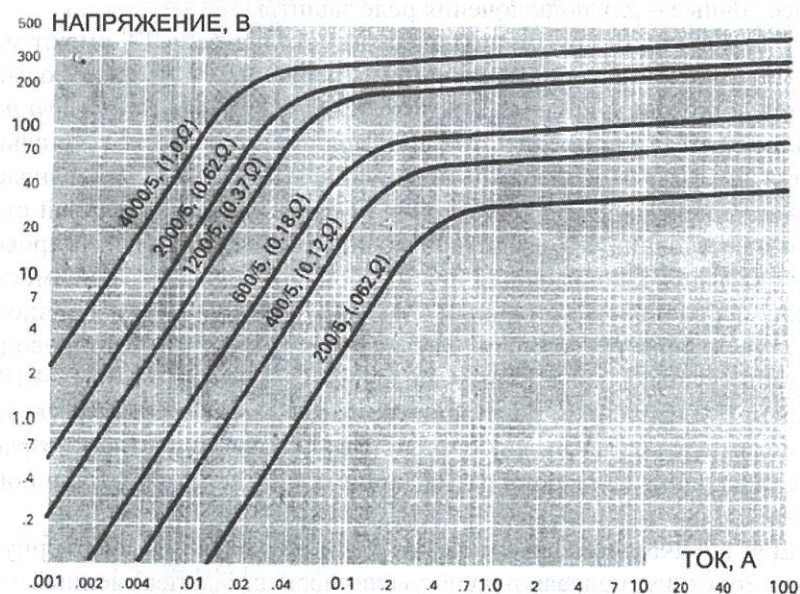


Рис. 4.19. Реальные вольт-амперные характеристики трансформаторов тока с различными коэффициентами трансформации, приводимые в документации компании-производителя

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, 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 значительно превышающих номинальные, то есть на криволинейном участке кривой намагничивания и их вторичный ток может быть искажен (рис. 4.20). Поэтому в обозначениях 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.

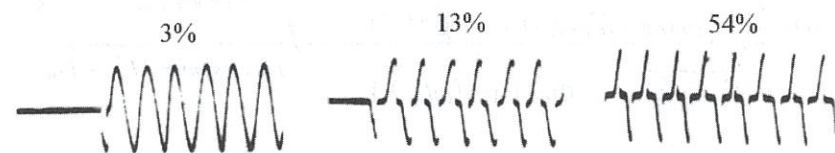


Рис. 4.20. Форма вторичного тока ТТ при аварийных режимах (сверхтоки). В процентах указана погрешность ТТ

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 5А, 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 тем меньше 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 характеристиках ТТ являются базовыми и их знание является обязательным 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.

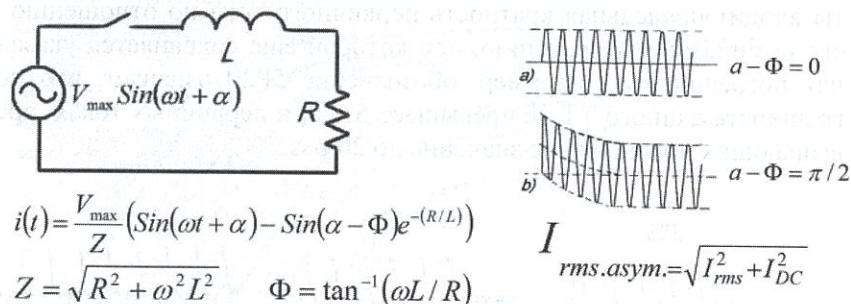


Рис. 4.21. Переходной процесс при включении под напряжение линии электропередач

В одном из докладов, представленных на Всероссийской научно-технической конференции по релейной защите, проводимой под эгидой ФСК ЕЭС [4.15], 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».

В действительности уже давно проведено множество исследований на тему об искажениях, вносимых ТТ. Известно, что при включении под напряжение линии электропередач возникает переходной процесс (рис. 4.21).

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. 4-21 а). Реальная линия электропередач обладает определенной индуктивностью L и поэтому аperiodическая составляющая не равна нулю.

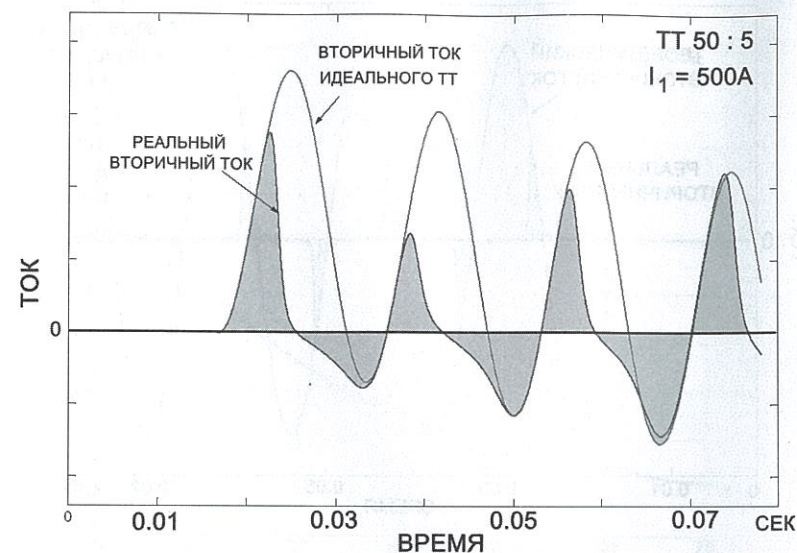


Рис. 4.22. Искажение тока во вторичной обмотке ТТ под действием постоянной составляющей тока короткого замыкания линии

Эта составляющая приводит к смещению синусоиды тока относительно нуля (рис. 19 б) 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 апериодической составляющей. Протекание постоянного тока через первичную обмотку трансформатора тока приводит к быстрому насыщению его сердечника и к существенному искажению формы периодической составляющей, следовательно, и вторичного тока (рис. 4.22). Аналогичный вид имеет и кривая вторичного тока ТТ при воздействии на него пускового тока намагничивания при включении мощного силового трансформатора.

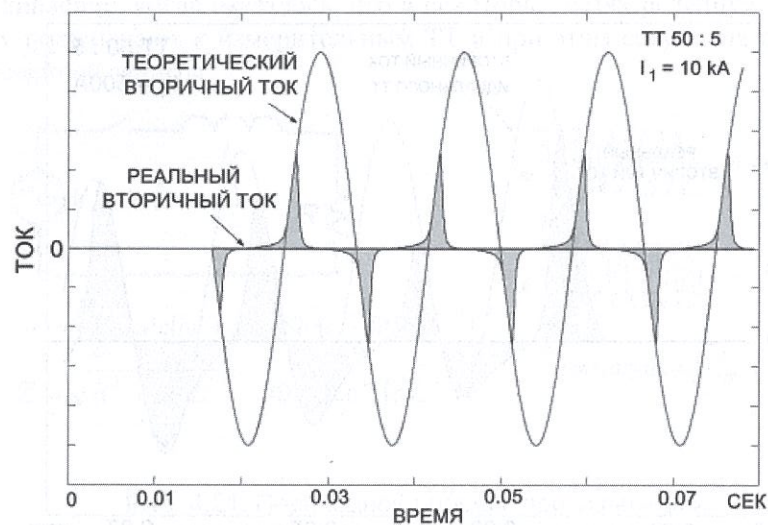


Рис. 4.23. Искажение тока во вторичной обмотке ТТ под действием его насыщения при большой кратности первичного тока

Значительные искажения вторичного тока ТТ имеют место также и при отсутствии постоянной составляющей. При этом насыщение сердечника возникает при очень больших кратностях первичного тока (рис. 4.23).

В мощных энергосистемах с большими кратностями токов короткого замыкания и значительной постоянной времени $L/R = 0.1$ сек (рис. 4.21) фактическая погрешность ТТ может достигать очень больших значений (рис. 4.24), а вторичный ток приобретает вид острых импульсов. Снижение нагрузки ТТ и другие меры мало влияют на эту погрешность. Единственное, что могло бы уменьшить эту погрешность, – это значительное увеличение сечения и массы железа магнитопровода ТТ. Однако расчеты показывают, что при этом размеры ТТ достигли бы совершенно неприемлемых значений [4.16].

Наиболее простым способом снижения погрешности ТТ в переходных режимах является применение трансформаторов тока с первичным номинальным током, превышающим значение, полученное при типовых расчетах.

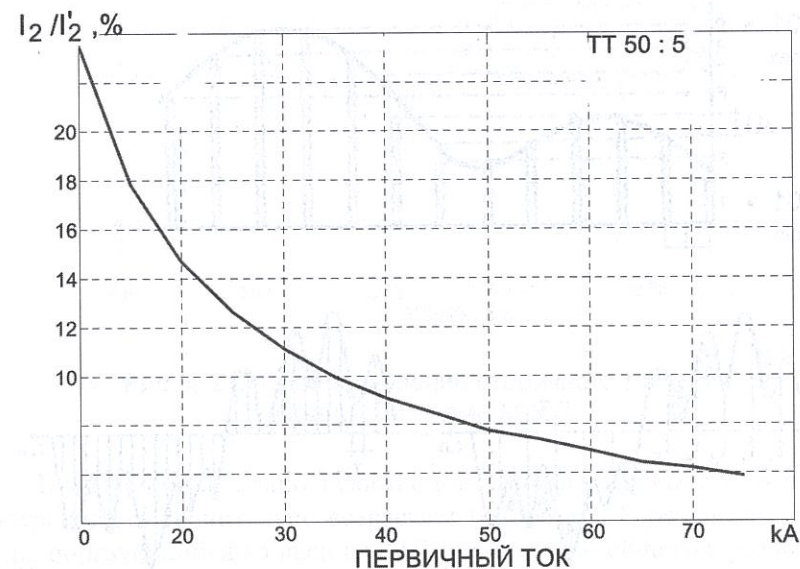


Рис. 4.24. Амплитудное значение реального вторичного тока (I_2) ТТ в процентах от идеального теоретического (I_2') в зависимости от первичного тока

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. 4.25).

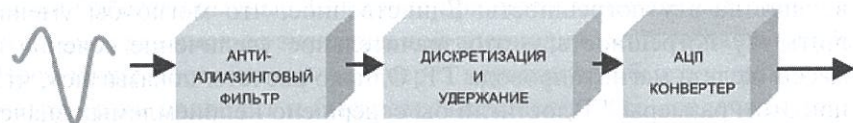


Рис. 4.25. Входная цепь МУРЗ для аналогового сигнала (ток, напряжение)

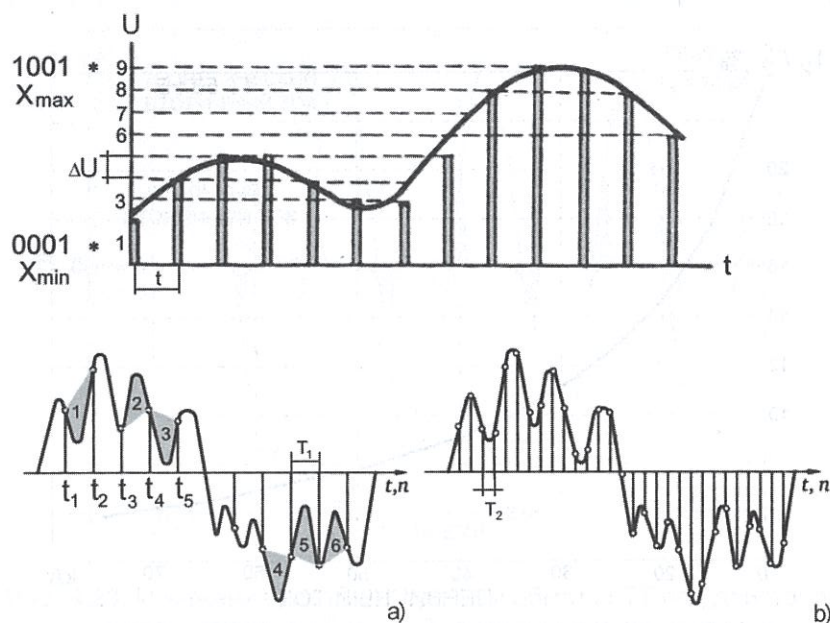


Рис. 4.26. Принцип работы АЦП и искажения, возникающие во время преобразования (дискретизации) сигнала

Фильтр подавляет высокочастотные сигналы, а поскольку искаженная кривая вторичного тока ТТ содержит значительную высо-

кочастотную составляющую, то, следовательно, этот фильтр уменьшает амплитуду сигнала. Далее вступает в действие АЦП, дискретно измеряющий периодический сигнал с определенными интервалами времени t (рис. 4.26).

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. 4.26 а).

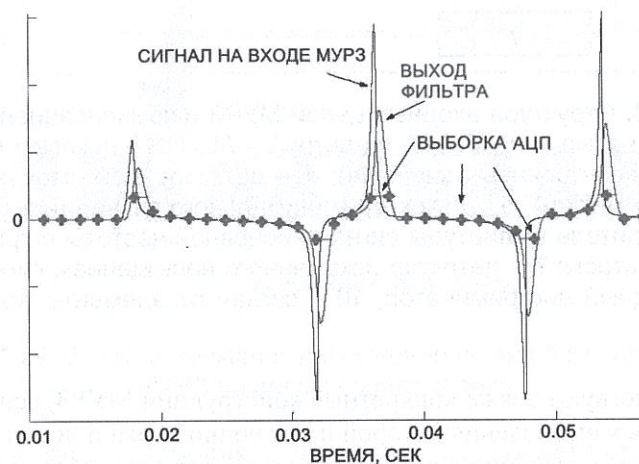


Рис. 4.27. Преобразование вторичного тока ТТ входными цепями МУРЗ

При наличии сильно искаженной кривой вторичного тока эта погрешность значительно возрастает (рис. 4.27). В результате, сигнал, 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. 4.28) [4.18].

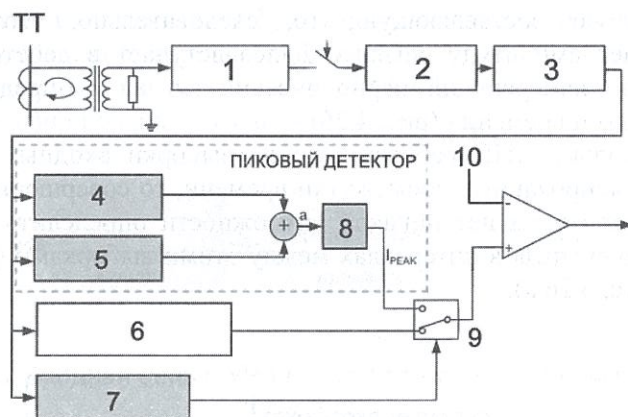


Рис. 4.28. Структура входных цепей МУРЗ с компенсацией погрешности от насыщения ТТ: 1 – фильтр; 2 – АЦП; 3 – накопитель 16 последних квантованных значений; 4 – детектор максимального значения амплитуды; 5 – детектор минимального значения амплитуды; 6 – измеритель амплитуды сигнала основной частоты с традиционным фильтром; 7 – детектор искаженного насыщением сигнала; 9 – амплитудный дискриминатор; 10 – сигнал от элемента токовой отсечки

Существуют также конкретные конструкции МУРЗ, основанные на быстрых вычислениях второй производной тока и использовании полученного значения для корректировки порога срабатывания при наличии в токе значительной апериодической составляющей [4.19].

4.6. Влияние на МУРЗ гармоник в измеряемом напряжении и токе

Поскольку гармоники в напряжении и токе, поступающих на вход МУРЗ, представляют собой составляющие, имеющие более высокую, по сравнению с основной, частоту, механизм их воздействия на МУРЗ аналогичен описанному выше и также связан с ошибками фильтрования и квантования сигнала в АЦП [4.20]. Исследованиями, выполненными рядом авторов, показано, что наибольшее влияние на МУРЗ оказывает третья гармоника. Из всех гармоник, именно эта гармоника имеет, как правило, наибольшее значение в

напряжении и токе, что только усугубляет ситуацию. При исследовании микропроцессорного реле напряжения с зависимой выдержкой времени [4.21] оказалось, что эта выдержка в сильной степени зависит от этой гармоники (рис. 4-29). Органы контроля напряжения применяются во многих типах МУРЗ, в том числе таких ответственных, как дистанционные защиты линий, что делает такую их зависимость от наличия гармоник весьма опасной.



Рис. 4.29. Влияние гармоник напряжения на аналоговом входе МУРЗ на время срабатывания

Что касается гармоник в питающем напряжении сети, то их влияние на МУРЗ значительно слабее, так как практически все типы МУРЗ снабжены импульсными источниками питания, на входе которых стоит выпрямитель с фильтром. Выпрямленное и отфильтрованное напряжение преобразуется в высокочастотное, изменяется по величине, стабилизируется, а затем снова выпрямляется и снова фильтруется [4.22]. Все эти преобразования, осуществляемые в импульсных источниках питания, практически сводят к нулю влияние на МУРЗ гармоник в питающей сети.

4.7. Качество напряжения в питающей сети

Как показано выше, на МУРЗ слабо влияют гармоники напряжения в питающей сети. Они также менее чувствительны и к

провалам напряжения, чем электромеханические контакторы и реле. К сожалению, некоторые авторы приводят некорректные данные о чувствительности МУРЗ к провалам напряжения [4.23] и на основании этих не проверенных ими лично данных делают далеко идущие выводы и прогнозы.

Мы специально провели некоторые исследования с целью проверить реальную устойчивость МУРЗ к провалам напряжения. Для этого нами были отобраны несколько типов микропроцессорных реле защиты ведущих мировых производителей. Результаты проверки приведены в таблице.

Таблица 4.1 Провалы напряжения питания, выдерживаемые некоторыми типами МУРЗ

Тип микропроцессорного реле защиты и его производитель	Выдерживаемая без нарушения работы максимальная длительность полного отключения напряжения питания реле, сек	Минимальное напряжение питания, при котором сохраняется работоспособность реле, с номинальным напряжением 230 В, В
SIPROTEC 7UT6135 Siemens	1.6	78
SIPROTEC 7UT6125 Siemens	1.6	36
SIPROTEC 7SJ8032 Siemens	3.8	44
T60 General Electric	-	80
P132 Areva	-	45

В последних двух случаях установить длительность провала напряжения не удалось из-за большого броска тока включения реле, превышающего мощность испытательного оборудования, применяющегося при испытании (Power System Simulator DOBLE 2253).

Как видно из таблицы, микропроцессорные реле защиты достаточно долго сохраняют работоспособность при полных (то есть до

нуля) провалах напряжения питания, а также сохраняют работоспособность при длительных глубоких снижениях уровней напряжения питания вплоть до 40–20% номинального значения. Такие свойства объясняются применением в микропроцессорных реле защиты внутренних импульсных источников питания, снабженных безинерционным стабилизатором напряжения с глубоким фазоимпульсным регулированием, большой емкостью электролитических конденсаторов на выходе и очень малым собственным потреблением современных микропроцессорных защит.

Что касается воздействия импульсных коммутационных перенапряжений со стороны питающей сети, то они менее страшны для МУРЗ, так как поступают на внутренний импульсный источник питания, содержащий на входе фильтры, высоковольтные электронные компоненты, варисторы. Следует лишь проверить, правильно ли выбраны параметры варисторов и входных компонентов. Обычные гармоники в питающем напряжении (имеются в виду гармоники до 25) также слабо влияют на импульсный источник питания, так как непосредственно на его входе установлены двухполупериодный выпрямитель и сглаживающий фильтр, превращающие любые переменные напряжения (не очень высокой частоты) в постоянные.

4.8. Преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия

4.8.1. Актуализация проблемы электромагнитной совместимости для современной электроэнергетики

Первыми на современные тенденции развития техники и постоянно растущую уязвимость национальных инфраструктур (энерго- и водоснабжение, системы связи и т.д.) от электромагнитных воздействий уже давно обратили внимание военные. В военных исследовательских центрах практически всех развитых стран мира ведутся интенсивные исследования и разработки в области создания специальных средств поражения электронной аппаратуры. В открытой печати опубликованы десятки материалов, в которых совершенно свободно обсуждаются методы повышения эффективности

воздействия электромагнитных излучений на электронную аппаратуру с целью выведения ее из строя [4.24 – 4.29].

Особенно сильным и мощным поражающим эффектом обладает высотный ядерный взрыв. Такой взрыв, произведенный на высоте 200-300 км, не может повлиять на человека непосредственно и останется практически не заметным, но воздействие сопровождающего его электромагнитного импульса (вернее целой серии импульсов, имеющих различные характеристики) на электронную и компьютерную аппаратуру целой страны окажется катастрофическим (табл. 4.2).

Положение дел в электроэнергетике будет особо тяжелым вследствие огромной протяженности воздушных линий электропередач, являющихся гигантскими антеннами, поглощающими энергию электромагнитного импульса с огромной территории и доставляющих ее прямо к аппаратуре электростанций и подстанций. Ввиду особой опасности такого взрыва для электроэнергетики, Международной электротехнической комиссией (МЭК) разработана серия специальных стандартов, посвященных описанию методов испытаний линий электропередач и другого энергетического оборудования на устойчивость к высотному ядерному взрыву [4.30-4.48].

Появившаяся в последние годы новая тенденция в электроэнергетике – концепция под названием «Интеллектуальная сеть» (“Smart Grid”), в случае ее широкого внедрения в практику будет означать, как показано в [4.49], конец национальной электроэнергетики даже при единичном высотном ядерном взрыве, что весьма заманчиво и привлекательно для противоборствующей стороны.

4.8.2. Классификация и особенности преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий

В англоязычной технической литературе преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия (ПДЭВ) называются “High Power Electromagnetic Threats (НРЕМ)” и подразделяются на два вида: высотный электромагнитный импульс (ВЭМИ) - “High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)” и преднамеренные электромагнитные помехи (ПЭМ) - “Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)”.

ВЭМИ – очень мощный электромагнитный импульс, являющийся следствием высотного ядерного взрыва. О мощном электромагнитном импульсе, возникающем при ядерном взрыве, было известно уже давно, как об одном из поражающих факторов такого взрыва. О том, что ядерный взрыв будет обязательно сопровождаться электромагнитным излучением, следовало из теоретических исследований воздействия рентгеновского излучения американского физика-теоретика Артура Комптона, выполненных им еще в 1922 г. (в 1927 г. за это открытие он был удостоен Нобелевской премии). В то время на этот эффект не обратили особо внимания и вспомнили о нем с началом испытательных ядерных взрывов. В [4.50] об этом рассказывается так: «В конце июня 1946 года в районе атолла Бикини (Маршалловы острова) под шифром “Операция Кроссродс” были проведены ядерные взрывы, в ходе которых исследовалось поражающее действие атомного оружия. В ходе этих испытательных взрывов было обнаружено новое физическое явление – образование мощного импульса электромагнитного излучения (ЭМИ), к которому сразу же был проявлен большой интерес. Особенно значительным оказался ЭМИ при высоких взрывах. Летом 1958 года были произведены ядерные взрывы на больших высотах. Первую серию под шифром “Хардтэк” провели над Тихим океаном вблизи острова Джонстон.

Таблица 4.2. Зона электромагнитного поражения высотного ядерного взрыва

Высота взрыва, км	Примерный диаметр зоны поражения, км
40	1424
50	1592
100	2.242
200	3.152
300	3.836
400	4.402

В ходе испытаний были взорваны два заряда мегатонного класса: “Тэк” - на высоте 77 километров и “Ориндж” - на высоте 43

километра. В 1962 году были продолжены высотные взрывы: на высоте 450 км под шифром "Старфиш" был произведен взрыв боеголовки мощностью 1,4 мегатонны. Советский Союз также в течение 1961-1962 гг. провел серию испытаний, в ходе которых исследовалось воздействие высотных взрывов (180-300 км) на функционирование аппаратуры систем ПРО. При проведении этих испытаний были зафиксированы мощные электромагнитные импульсы, которые обладали большим поражающим действием на электронную аппаратуру, линии связи и электроснабжения, радио- и радиолокационные станции на больших расстояниях».

Зависимость зоны эффективного поражения электронной аппаратуры от высоты подрыва заряда мощностью 10 Мт приведена в табл. 4.2.

В соответствии с классификацией Международной электротехнической комиссии (МЭК) Выделяют три компонента ВЭМИ: E1, E2 и E3.

E1 – самый «быстрый» и самый «короткий» компонент ВЭМИ, обусловленный мощным потоком комптоновских электронов высокой энергии (являющихся продуктом взаимодействия γ -квантов мгновенного излучения ядерного взрыва с атомами газов воздуха), движущихся в магнитном поле Земли с околосветовой скоростью. Это взаимодействие очень быстро движущихся отрицательно заряженных электронов с магнитным полем производит импульс электромагнитной энергии, сконцентрированной магнитным полем Земли и направленной с высоты на Землю. Амплитуда импульса обычно нарастает до своего пикового значения в течение 5 наносекунд и спадает вдвое в течение 200 наносекунд. По определению МЭК, полная продолжительность импульса E1 может составлять около одной микросекунды (1000 наносекунд). Компонент E1 обусловлен самым интенсивным электромагнитным полем, вызывающим очень высокие напряжения в электрических цепях, он создает вблизи уровня земли на умеренно высоких широтах импульсные напряжения до 50 кВ/м при плотности мощности 6,6 МВт на квадратный метр. Компонентом E1 обусловлено большинство повреждений электронного оборудования, связанных с воздействием перенапряжений и электрическим пробоем *p-n*-переходов полупроводниковых элементов и изоляции. Обычные разрядники, эффективные для защиты от атмосферных перенапряжений, не всегда успевают

сработать и защитить оборудование при воздействии компонента E1, а рассеиваемая ими мощность далеко не всегда достаточна для поглощения энергии компонента E1 импульса, в результате чего обычные разрядники могут просто разрушиться.

E2 – это «промежуточный» по скорости нарастания и длительности компонент ВЭМИ который, по определению МЭК, длится примерно от 100 мкс до 1 мс. Компонент E2 имеет много общего с электромагнитными импульсами, атмосферного происхождения (близкой молнией). Напряженность поля может достигать 100 кВ/м. Из-за сходства параметров компонента E2 с молнией и хорошо отработанными технологиями защиты от молнии считается, что защита от компонента E2 не представляет проблемы. Однако при совместном воздействии компонентов E1 и E2 появляется проблема другого рода, когда под действием компонента E1 разрушаются защитные элементы, после чего компонент E2 беспрепятственно проникает в аппаратуру.

Компонент E3 очень отличается от двух других основных компонентов ВЭМИ. Это очень «медленный» импульс, длящийся десятки-сотни секунд, что обусловлено смещением и последующим восстановлением магнитного поля Земли. Компонент E3 имеет сходство с геомагнитной бурей, вызванной очень интенсивной солнечной вспышкой. Напряженность индуцированного поля может доходить до 1 В/км. Как и геомагнитная буря, E3 приводит к возникновению значительных геомагнитных индуцированных токов в длинных электрических проводниках, включая протяженные ЛЭП, которые, проникая в силовые трансформаторы, могут вызвать их насыщение, сопровождающееся резким снижением импеданса и ростом токов, вплоть до перегорания обмоток.

С 80-х годов прошлого столетия в ряде стран мира усиленно работают над созданием так называемого «Супер-ЭМИ» ядерного заряда с усиленным выходом электромагнитного излучения. Работы ведутся в основном в двух направлениях: за счет создания вокруг заряда оболочки из вещества, испускающего γ -излучение высокой энергии при облучении его нейтронами ядерного взрыва, а также за счет фокусировки γ -излучения. По расчетам специалистов, с помощью «Супер-ЭМИ» можно будет создать напряженность поля у поверхности Земли порядка сотен и даже тысяч киловольт на метр. Причем, военные и не скрывают, что главными целями такого ЭМИ

оружия в будущих конфликтах будут системы государственного и военного управления, национальная инфраструктура, включающая системы электро- и водоснабжения, связи.

Мощный ЭМИ можно создать не только в результате ядерного взрыва. Современные достижения в области неядерных генераторов ЭМИ позволяют сделать их достаточно компактными для использования с обычными и высокоточными средствами доставки. Поэтому вопросы защищенности от воздействия ЭМИ будут оставаться в центре внимания специалистов при любом исходе переговоров о ядерном разоружении.

ПЭМ – второй тип преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий, не связанный с ядерным взрывом. Первые теоретические идеи о возможности создания неядерных ударно-волновых излучателей сверхмощных электромагнитных импульсов (УВИ) были высказаны в начале 50-х годов прошлого столетия академиком Андреем Сахаровым при работе над ядерным боезарядом.

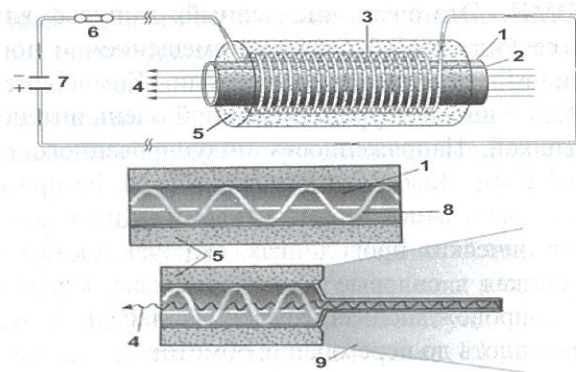


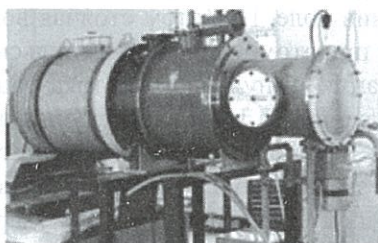
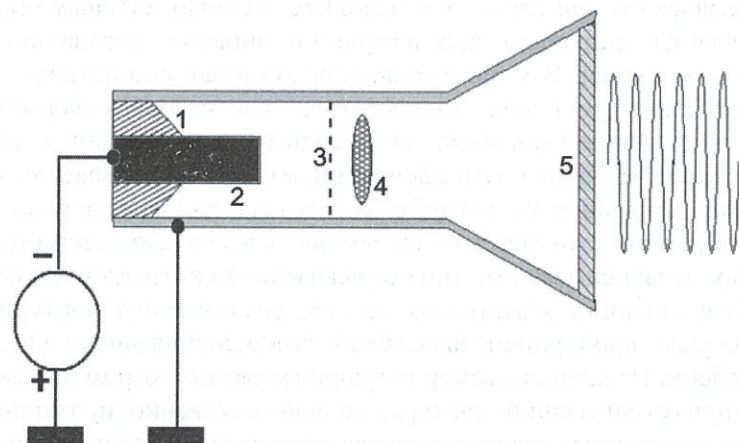
Рис. 4.30. Ударно-волновой излучатель:

1 - электромагнитный резонатор; 2 - разрез; 3 - катушка, обтекаемая током; 4 - направленное электромагнитное излучение; 5 - взрывчатое вещество; 6 - коммутатор; 7 - накопитель энергии (конденсатор); 8 - стоячая волна; 9 - разлетающиеся продукты взрыва

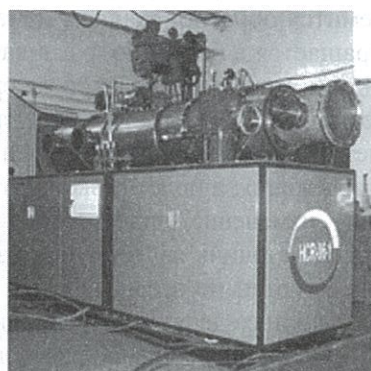
Для получения первичных нейтронов, «запускающих» процесс деления в ядерном боезаряде, потребовался сверхмощный источник импульса тока. Генератор А. Д. Сахарова представлял собой кольцо

из взрывчатого вещества, окружающего медную катушку. Набор подрываемых синхронно детонаторов инициировал детонацию, направленную к оси. В момент, синхронизированный с подрывом, происходит разряд мощного конденсатора, ток которого формирует магнитное поле внутри катушки. Ударная волна огромным давлением (около миллиона атмосфер) сминает и «закорачивает» витки катушки, превращая ее в трубку и замыкая это поле внутри нее. Контур с током сжимается со скоростью в несколько километров в секунду, в зависимости от типа взрывчатки. Как известно из физики, интенсивность магнитного потока, создаваемого контуром в этом случае, пропорциональна скорости изменения индуктивности по времени. Поскольку размер катушки меняется с огромной скоростью при схлопывании контура, то соответственно и амплитуда магнитного потока получается также огромной (десятки миллионов ампер). В этот момент с помощью пиропатрона разрушают один из торцов резонатора, а ударная волна, сойдясь в точку и отразившись, устремится обратно, скачком изменив поле. При этом стоячая волна превращается в бегущую, развивая при этом огромную импульсную мощность, что и приведет к генерации импульсного потока радиочастотного электромагнитного излучения. За доли наносекунды поле меняется, но не по закону синуса с периодом, равным времени сжатия-разрежения, а более резко, и это значит, что в функции, описывающей его изменение, присутствуют многие частоты. Поэтому ударно-волновой источник является сверхширокополостным и излучает в диапазоне от сотен мегагерц до сотен гигагерц при продолжительности этого импульса десятки-сотни микросекунд.

По данным американских ученых, ударно-волновые излучатели были впервые продемонстрированы Кларенсом Фоулером в Лос-Аламосской национальной лаборатории США в конце 50-х годов [4.51]. Уже в 60-е годы не только ученым в США и СССР, но и политикам стало понятно, что такого рода источники сверхмощных электромагнитных импульсов могут стать основой для создания нового вида оружия.



Виркаторы с индуктивным (слева) и емкостным (справа) накопителями энергии



1. Напряжение	400 кВ	1. Напряжение	600 кВ
2. Ток в виркаторе	12 кА	2. Ток в виркаторе	18 кА
3. Длительность импульса напряжения	300 нс	3. Длительность импульса напряжения	100 нс
4. Мощность излучения	350 МВт	4. Мощность излучения	500 МВт
5. Длительность импульса излучения	200 нс.	5. Длительность импульса излучения	80 нс.
6. Частота излучения	3.1 ГГц	6. Частота излучения	3.1 ГГц.

Рис. 4.31. Мощные виркаторы, разработанные в Томском политехническом институте: 1 – изолятор; 2 – металлический катод; 3 – сеточный анод; 4 – виртуальный катод; 5 – диэлектрическое окно

Свидетельством этому стали выступления Н. С. Хрущева в 60-х годах с его упоминаниями некоего «фантастического оружия».

Конечно, для создания нового оружия на основе чисто теоретических разработок потребовалось время. Об УВИ, как о самостоятельном устройстве для создания сверхмощных электромагнитных импульсов, в качестве оружия, впервые было официально заявлено начальником Лаборатории боеприпасов специального назначения ЦНИИ химии и механики доктором технических наук А.Б. Прищепенко после успешных испытаний 2 марта 1984 г. на полигоне Красноармейского научно-исследовательского института «Геодезия» (ныне ФКП НИИ «Геодезия»). Позднее А. Б. Прищепенко были сформулированы общие принципы боевого применения электромагнитных боеприпасов.

Сегодня интенсивные исследования в области ПЭМ ведутся в нескольких направлениях, и неядерные ударно-волновые излучатели (УВИ) уже не являются единственным видом неядерного электромагнитного оружия.

Существует широкий набор микроволновых устройств высокой мощности. Релятивистские клистроны и магнетроны, рефлексотриоды, лампы обратной волны (ЛОВ), гиротроны, осцилляторы с виртуальным катодом – виркаторы (Virtual Cathode Oscillator – Vircator) и др. (рис. 4.32). Виркаторы способны произвести очень мощные одиночные импульсы энергии, конструктивно простые, небольшие по размерам, прочные и способные работать в относительно широкой полосе частот микроволнового диапазона. Фундаментальная идея, лежащая в основе виркатора, заключается в ускорении мощного потока электронов сетчатым анодом. Этот мощный поток электронов изначально вырывается из катода (металлического цилиндрического стержня диаметром в несколько сантиметров) (рис.4.31) под действием импульса высокого напряжения (сотни киловольт), придающего эмиссии электронов взрывной характер.

Значительное число электронов проходит через сетчатый анод, формируя облако пространственного заряда за анодом. При определенных условиях, эта область пространственного заряда будет осциллировать в области анода. Образованное на частоте колебаний электронного облака СВЧ-поле излучается в пространство через диэлектрическое окно. Стартовые токи в виркаторах, при которых возникает генерация, составляют 1–10 кА. Виркаторы наиболее

приемлемы для генерации импульсов наносекундной длительности в длинноволновой части сантиметрового диапазона. Экспериментально на них получены мощности от 170 кВт до 40 ГВт в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

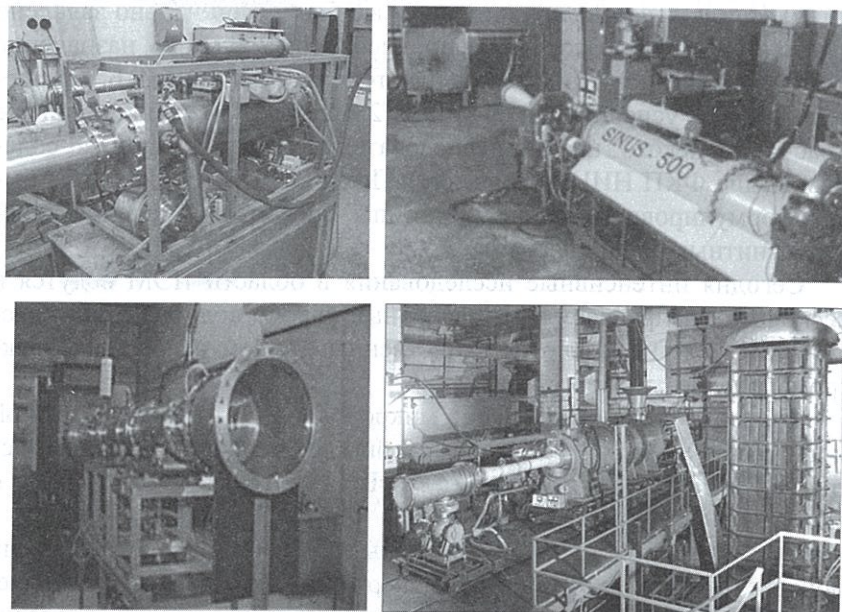


Рис.4.32. Релятивистские микроволновые генераторы большой мощности на базе гиротронов, виркаторов и ламп обратной волны, разработанные в различных российских НИИ

По опубликованным данным, экспериментальная установка, развивающая импульсную мощность около 1 ГВт (265 кВ, 3,5 кА), способна поражать электронную аппаратуру на расстоянии 800 - 1000 м. Даже такие хорошо известные устройства, как высоковольтные импульсные генераторы Маркса (рис. 4.33), содержащие набор высоковольтных конденсаторов и разрядников (80 одинаковых боков), могут использоваться как мощные источники микроволнового излучения.

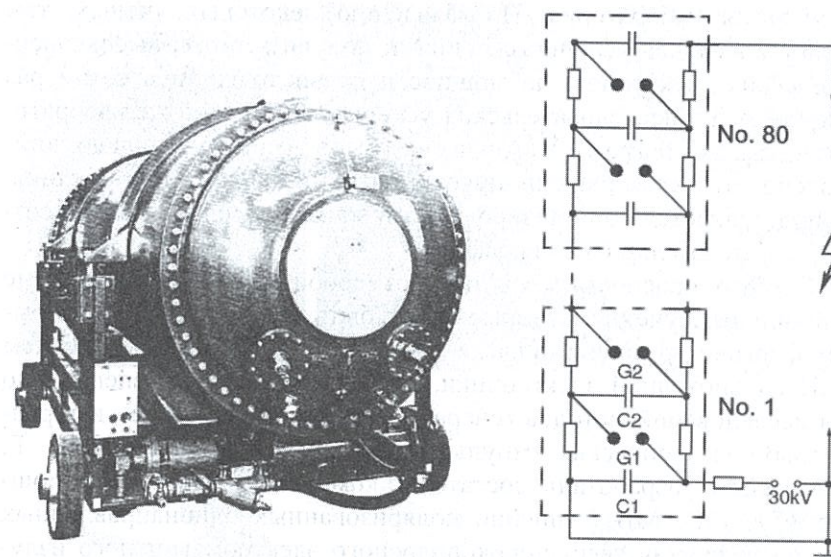


Рис. 4.33. Американский FEBETRON-2020 на базе генератора Маркса и его упрощенная схема.

В этом устройстве все конденсаторы сначала заряжаются параллельно от высоковольтного источника, а в момент синхронного пробоя управляемых разрядников все конденсаторы оказываются соединенными последовательно. В передвижном генераторе FEBETRON-2020 (рис. 4.33), генерируются импульсы тока в 6 кА при напряжении 2.3 МВ, в результате чего излучаются мощные электромагнитные импульсы.

Еще одним направлением развития ПЭМ является так называемое «пучковое оружие» (beam weapon). Это оружие основано на использовании узконаправленных пучков заряженных или нейтральных частиц, генерируемых с помощью различных типов ускорителей как наземного, так и космического базирования. Работы по созданию пучкового оружия получили наибольший размах вскоре после провозглашения в 1983 г. президентом США Рональдом Рейганом программы Стратегической Оборонной Инициативы (СОИ). Центром научных исследований в этой области стала Лос-Аламосская национальная лаборатория, а также Ливерморская на-

циональная лаборатория. По заявлению некоторых ученых, там предпринимались успешные попытки получить поток высокоэнергетических электронов, по мощности превосходящий в сотни раз получаемый в исследовательских ускорителях. В этой же лаборатории в рамках программы «Антигона» было экспериментально установлено, что электронный пучок почти идеально, без рассеяния, распространяется по ионизированному каналу, предварительно созданному лучом лазера в атмосфере.

Особую опасность представляют собой мощные компактные источники излучения, которые могут быть смонтированы в закрытом фургоне грузовика и даже в микроавтобусе. Так, в Томском НИИ сильноточной электроники, созданном в 1977 г. специально для исследований методов генерации сверхмощных (гига- и тераваттных) электрических импульсов возглавляемом академиком Г. А. Месяцем, разработаны достаточно компактные генераторы мощных (100-1000 МВт) линейно поляризованных однонаправленных волновых пучков сверхширокополосного электромагнитного излучения с наносекундной и субнаносекундной длительностью импульса специально для воздействия на электронную аппаратуру (рис. 4.34).

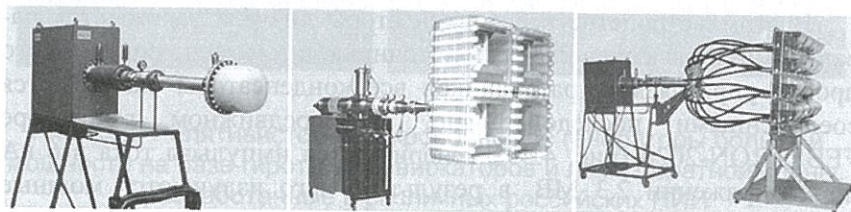


Рис. 4.34. Компактные мощные сверхширокополосные источники излучения мощностью до 1 ГВт, разработанные в Томском НИИ сильноточной электроники

Причем такие источники можно сегодня совершенно свободно приобрести непосредственно в Институте сильноточной электроники за совсем не «космическую» цену в 40-60 тысяч долларов и установить в микроавтобусе или в небольшом фургоне.

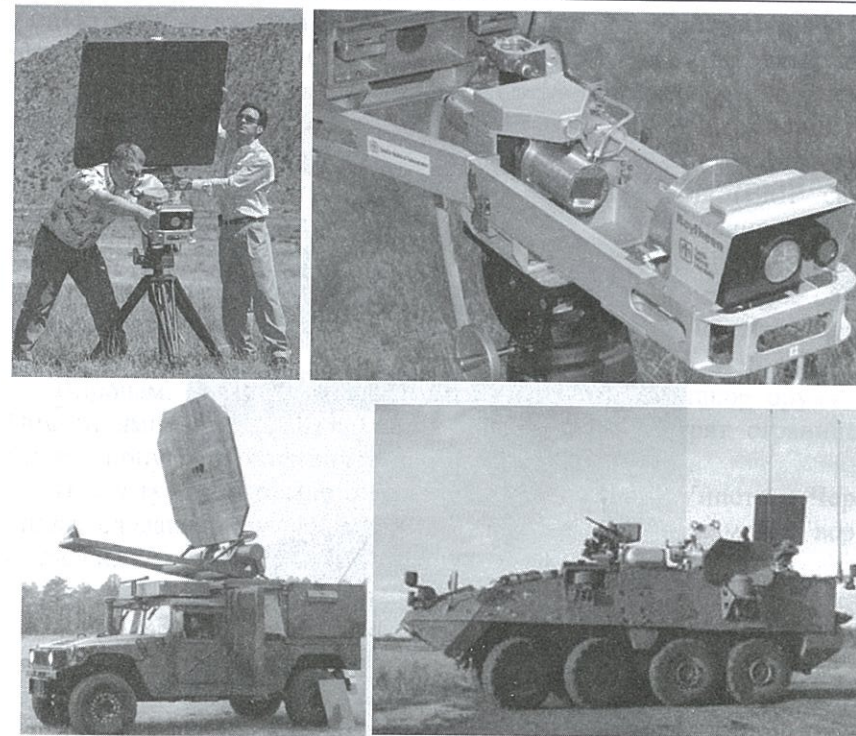


Рис. 4.35. Компактный источник мощного направленного ультракотковолнового (95 ГГц) излучения, разработанный американской Sandia National Laboratories, с использованием технологий компании Raytheon (вверху), а также мощные источники направленного излучения, смонтированные на шасси джипа Hummer и на шасси БТР Stryker. Еще более мощный комплекс планируется установить на борту самолета AC-130

Все координаты для заказа этой аппаратуры приведены на официальном сайте Института.

Аналогичные переносные и передвижные источники разрабатываются и производятся в США (рис. 4.35).

В некоторых странах (США, Израиль и др.) ведутся разработки компактных электромагнитных ружей относительно не-

Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы большой мощности, способных, однако, поражать электронику на расстояниях до 100 м.

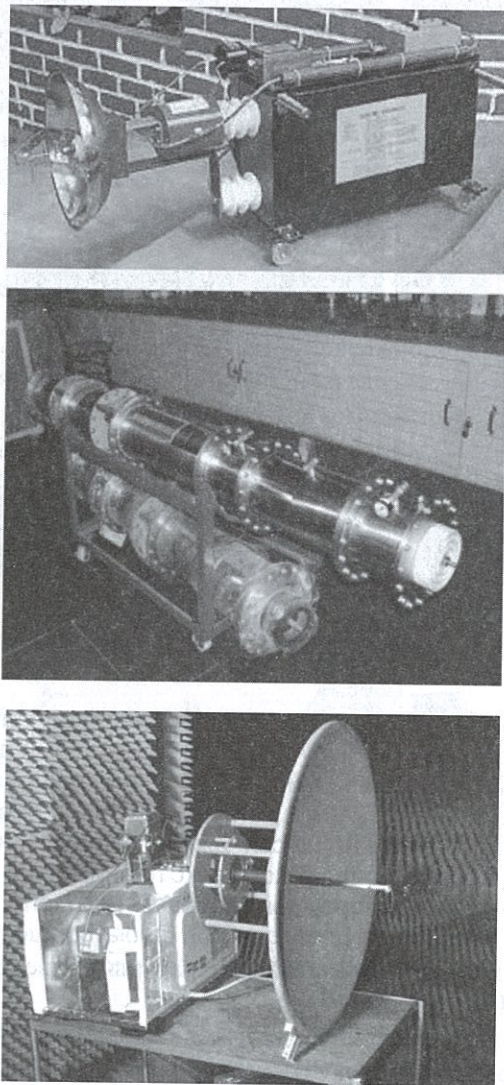


Рис. 4.36. Направленные микроволновые генераторы самодельного изготовления, описания которых приведены в популярных технических журналах

Интерес к устройствам такого рода проявляют не только военные, но и полицейские. Современный автомобиль, напичканный электроникой, представляет собой такой же объект поражения, как и любая другая современная система. Американская компания Eureka Aerospace разработала и запустила в производство электромагнитный «остановитель» движущегося автомобиля (EMP car-stopper). Действие такого оружия основано на повреждении микропроцессора, системы зажигания, впрыска топлива и др. электронных систем современного автомобиля. Что будет, когда такое оружие попадет в руки террористов (рано или поздно, но это обязательно произойдет)?

Впрочем, им даже не нужно особенно искать такое оружие. Описаниями самодельных систем такого рода пестрят страницы многих популярных технических журналов (рис. 4.36).

И как тут не вспомнить пророческое изречение Уинстона Черчилля, сделанное им много лет назад: «Каменный век может вернуться на сияющих крыльях науки».

4.8.3. Воздействие ПДЭВ на микропроцессорные устройства релейной защиты

Пути проникновения электромагнитных излучений в электронную аппаратуру являются, прежде всего, различные антенные устройства и кабельные вводы, системы электропитания, а также токи, наводимые в обшивке, и излучения, проникающие через окна и двери, выполненные из неэлектропроводных материалов, вентиляционные каналы. Токи, наводимые ЭМИ в наземных и заглубленных кабелях электропитания протяженностью в сотни и тысячи километров, могут достигать тысяч ампер, а напряжение в разомкнутых цепях таких кабелей миллион вольт. В антенных вводах, длина которых не превышает десятков метров, наводимые ЭМИ токи могут иметь силу в несколько сотен ампер. ЭМИ, проникающий непосредственно через элементы сооружений из диэлектрических материалов (неэкранированные стены, окна, двери и т.п.), может наводить во внутренней электропроводке токи силой в десятки ампер. Особую опасность представляют собой длинные воздушные линии электропередач, поглощающие излучение с больших площадей и доставляющих его прямо к месту назначения – на входы

высокочувствительной электронной аппаратуры. Наличие на этом пути трансформаторов (измерительных и силовых) практически не сказывается на этом процессе из-за значительной внутренней емкости между первичной и вторичной обмотками. А поскольку слаботочные цепи и радиоэлектронные приборы нормально действуют при напряжениях в несколько вольт и токах силой до нескольких десятков миллиампер, то для их надежной защиты от ЭМИ требуется обеспечить снижение величины токов и напряжений на их входах на несколько порядков. Помимо собственно МУРЗ, повышенной чувствительностью к ЭМИ обладают, как это ни странно, оптические системы передачи данных, широко используемые в релейной защите. Вернее, контроллеры, преобразующие электрические сигналы в оптические на одном конце волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) и восстанавливающие их из оптических на втором конце ВОЛС. Например, испытания на соответствие стандартам IEC по электромагнитной совместимости мультимплексора типа FOCUS [4.52] показали, что они не всегда выдерживают без сбоев и повреждений даже стандартные воздействия. Система SCADA с ее большим количеством микропроцессорных датчиков и измерительных преобразователей, объединенных в компьютерную сеть, – еще один объект воздействия даже ослабленных ЭМИ.

Если к возможности использования мощного высотного ядерного взрыва для электромагнитного поражения национальной энергосистемы еще можно относиться как гипотетической, то поражение террористическими структурами отдельных локальных энергосистем с помощью одновременного воздействия на несколько наиболее важных узлов энергосистемы с помощью неядерных источников ЭМИ – вполне возможно в любой момент.

Наиболее уязвимы для воздействия преднамеренных электромагнитных воздействий оказываются системы передачи данных, использующие протоколы с широкой полосой частот. К ним относятся ATM 155, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet и другие. Последнее объясняется незначительной разницей мощности полезного сигнала и помех в верхней области спектра. Переход от коаксиального кабеля к простой витой паре с целью удешевления кабеля (что наблюдается сегодня повсеместно) ведет к еще большей уязвимости системы. А ведь Ethernet на базе витой пары уже сегодня начинает использоваться в релейной защите и, в соответствии со стратегией

Smart Grid, его использование для управления всеми объектами в электроэнергетике будет только расширяться.

Дискретные электронные элементы имеют гораздо более высокую устойчивость к перенапряжениям и другим неблагоприятным воздействиям, чем интегральные микросхемы [4.53]. По данным [4.54], 75% всех повреждений микропроцессорных устройств происходит по причине воздействия перенапряжений. Такие перенапряжения с амплитудой от десятков вольт до нескольких киловольт, возникающие вследствие коммутационных процессов в цепях или при воздействии электростатических разрядов, являются «смертельными» для внутренних микроэлементов микросхем и процессоров. По данным [4.54], обычные транзисторы (дискретные элементы) могут выдерживать напряжение электростатического разряда почти в 70 раз более высокое, чем, например, микрочип памяти (EPROM) микропроцессорной системы. Компьютеризированное промышленное оборудование (в том числе и МУРЗ) особенно уязвимо к действию ЭМИ, так как оно в основном построено на МОП-приборах высокой плотности, которые очень чувствительны к воздействию высоковольтных переходных процессов. Особенностью МОП-приборов является очень малый уровень энергии (напряжения порядка десятков вольт), необходимый для их повреждения или полного уничтожения.

Известны три степени деградации полупроводниковых приборов при воздействии на них мощного ЭМИ: сбой функционирования, устойчивые изменения параметров, катастрофические необратимые отказы. Необратимый выход из строя полупроводников в основном происходит за счет их перегрева или полевого пробоя. [4.55 – 4.57]. Повреждения микропроцессора или элементов памяти, вызванные ослабленными электромагнитными воздействиями, могут носить скрытый характер [4.58]. Такие повреждения не выявляются никакими тестами и могут проявляться в самые неожиданные моменты. Кроме того, под действием ослабленного защитными мерами ПЭМ могут произойти случайные, обратимые сбои, обусловленные самопроизвольным изменением содержания ячеек памяти, называемые «мягкими ошибками» (“soft-failures” или “soft errors”). Ошибки такого рода (обратимые, самовосстанавливающиеся нарушения работоспособности) были неизвестны ранее для элект-

тронных устройств, выполненных на дискретных полупроводниковых элементах или на обычных микросхемах.

Прогресс последних лет в области нанотехнологий привел к существенному снижению размеров полупроводниковых элементов (речь идет о единицах и даже долях микрона), уменьшению толщины слоев полупроводниковых и изоляционных материалов, уменьшению рабочих напряжений, увеличению рабочей скорости, уменьшению электрической емкости отдельных ячеек памяти, увеличению плотности размещения элементарных логических ячеек в одном устройстве. Все это вместе взятое привело к резкому повышению чувствительности элементов памяти к электромагнитным воздействиям. Проблема усугубляется тем, что в современных микропроцессорных структурах наблюдается устойчивая тенденция расширения использования элементов памяти. Многие современные интегральные микросхемы высокого уровня интеграции, входящие в состав микропроцессорного устройства, содержат встроенные элементы памяти достаточно большого объема, исправность которых вообще никак не контролируется. Проблема резкого увеличения чувствительности к электромагнитным воздействиям актуальна не только для элементов памяти, но также и для высокоскоростных логических элементов, компараторов и т. д., то есть, практически, для всей современной микроэлектроники.

Хорошо известно защитное действие от электромагнитных воздействий клетки Фарадея. Здания из железобетона содержат заземленную сетку, реле защиты располагаются в металлических шкафах, сами МУРЗ имеют металлический корпус. Казалось бы — не клетка, а настоящая «матрешка Фарадея». Однако, все не так просто. Во-первых, импульсы высокой частоты свободно проникают сквозь отверстия в клетке Фарадея, сквозь любые неметаллические вставки и окошки, сквозь стеклянные окна зданий и систему вентиляции. При таком частично ослабленном воздействии ЭМИ на полупроводниковые приборы наблюдались случаи частичного разрушения их $p-n$ -переходов, что вело к изменениям их характеристик и появлению «мерцающих» сбоев в работе аппаратуры. Такие неисправности связывают значительное количество ресурсов, предназначенных для технического обслуживания и, кроме того, ограничивают уверенность в надежности аппаратуры. Такие «мерцающие» неисправности порой очень сложно выявить, что вызывает необхо-

димость повторного многократного выведения оборудования из эксплуатации со значительными потерями эксплуатационного времени на диагностику повреждений. Этот фактор также должен приниматься во внимание при оценках степени защиты аппаратуры от электромагнитной атаки, так как частичная или неполная защита может привести к дополнительным проблемам.

Вторая проблема известна под названием «запаздывающего действия ЭМИ» и представляет собой очень опасное свойство ПДЭВ. Этот эффект проявляется в течение первых минут после детонации ядерного заряда или заряда электромагнитной бомбы. В это время ЭМИ, проникнув сквозь электрические системы, создает в них локализованные электромагнитные поля. При спадании полей возникают резкие перепады напряжения, которые распространяются в виде волн по проводам систем электропитания на довольно большие расстояния от места возникновения первичного ЭМИ. В-третьих, внешние кабели и провода, выходящие из шкафа релейной защиты (РЗ) и из здания, и тянущиеся на многие километры, практически лишают даже ослабляющего эффекта и здания, и шкафы РЗ.

4.8.4. Возможные пути решения проблемы защиты микропроцессорной РЗ от ЭМИ

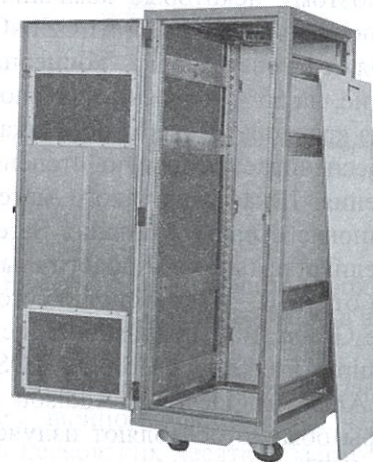


Рис. 4.37. Монтажный шкаф с усиленной защитой от ЭМИ, снабженный специальными петлями, прокладками из электропроводной резины, специальными стыковочными и соединительными элементами, экранированными вентиляционными окнами и т.д. (Equipto Electronics Corp.)

Идеальной защитой от ЭМИ явилась бы полная изоляция электронной аппаратуры от внешнего мира и укрытие помещения, в котором она размещена сплошным толстостенным ферромагнитным экраном. Вместе с тем ясно, что практически реализовать такую защиту для МУРЗ невозможно.

Поэтому на практике приходится использовать менее надежные средства защиты, такие, как токопроводящие сетки или пленочные токопроводящие покрытия для окон, сотовые металлические конструкции для воздухозаборников и вентиляционных отверстий и специальные электропроводные смазки и прокладки из электропроводной резины, размещаемые по периметру дверей и люков.

Сегодня на рынке широко представлены металлические шкафы (рис. 4.37) специальной конструкции, обеспечивающие существенное ослабление электромагнитного излучения. Стандартные шкафы из листовой стали, не содержащие окон или щелей, существенно ослабляют ЭМИ. Однако использование оцинкованных монтажных панелей для изготовления шкафов, а также специальных электропроводных уплотнителей и прокладок существенно повышают эффективность таких шкафов, поскольку покрытие цинком позволяет выровнять потенциалы на большой площади (удельное сопротивление стали $0.103\text{--}0.204 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$, а удельное сопротивление цинка $0.053\text{--}0.062 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$). Еще более низким сопротивлением ($0,028 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$) обладает алюминий. Поэтому некоторые компании выполняют моноблочные шкафы из специального сплава ALUZINC 150 (Aluzinc® - зарегистрированная торговая марка концерна Arcelor) - это сталь, имеющая покрытие, на 55% состоящее из алюминия, на 43,4% из цинка и на 1,6% из кремния.) Поверхность шкафа, содержащая такое покрытие, обеспечивает высокую степень отражения электромагнитного излучения. Шкафы из такого материала производит и поставляет во многие страны компания Sarel (сегодня - Schneider Electric Ltd., Великобритания). Аналогичные шкафы, предназначенные для защиты от ЭМИ, выпускаются сегодня и другими компаниями: Canovate Group, R.F. Installations, Inc.; Universal Shielding Corp.; Eldon; Equipto Electronics Corp.; ATOS; MFB; European EMC Products Ltd; Amco Engineering; Addison и многими другими. Такого рода шкафы обычно ослабляют излучение на 80-90 дБ на частотах 100 кГц - 1 ГГц.

Контрольные кабели, естественно, должны быть экранированными и с витыми парами. Самым минимальным требованием к экрану является высокая плотность оплетки (не менее 85%).

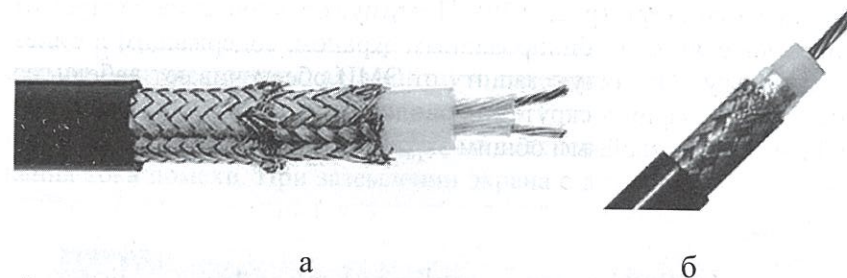


Рис. 4.38. Кабели с двойным экраном: а – с двойной плетеной оплеткой; б – с двойным комбинированным экраном (плетеная оплетка и фольга)

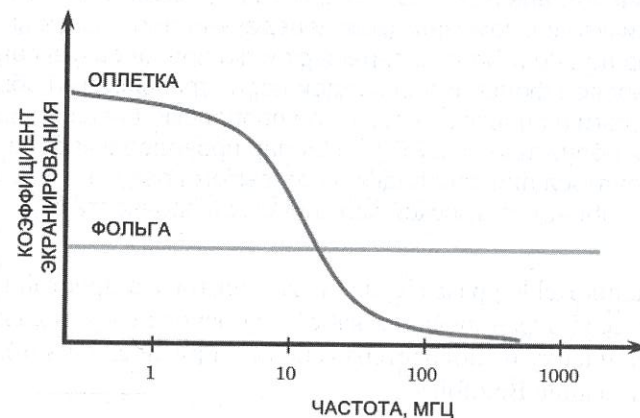


Рис. 4.39. Зависимость коэффициента экранирования от частоты для экранов в виде оплетки и фольги

Значительно лучшим экранирующим эффектом обладают кабели с двойной оплеткой (рис. 4.38). На относительно низких частотах до нескольких десятков мегагерц оплетка обеспечивает лучшее экранирование, чем фольга, главным образом за счет своей толщины.

Однако затем экранирующие свойства оплетки резко ухудшаются и становятся почти неприемлемыми ещё до частоты 100 МГц. В то же время фольга имеет плоскую АЧХ, сохраняя удовлетворительные экранирующие способности в очень широком диапазоне частот, вплоть до гигагерц (рис. 4.39). Поэтому, предпочтение следует отдавать кабелям с комбинированным экраном, содержащим и оплетку, и фольгу. Отличную защиту от ЭМИ обеспечивают кабели, совмещающие парную скрутку проводов, экраны из фольги для каждой пары с трехслойным общим экраном из фольги (рис. 4.40).

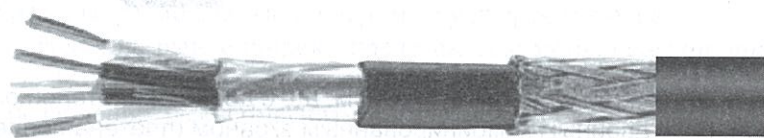


Рис. 4.40. Кабель RE-2X(ST)2Y(Z)Y PIMF, характеризуемый как сверхустойчивый к помехам (для передачи аналоговых и цифровых сигналов до 200 Кбит/сек; парная скрутка проводов с экраном из полиэстеровой фольгой для каждой пары; трехслойный общий экран из фольги и оплетка из стальной проволоки; внешняя изоляция - сшитый полиэтилен (XLPE); до 24 пар проводов в кабеле; может применяться для прокладки на открытом воздухе и в почве; обладает высокой механической прочностью)

Компания Belden разработала и запатентовала простой и эффективный способ экранирования кабеля на основе слоя фольги, нанесенного на пленку из полиэстера («полиэфирный сэндвич»). Способ получил название Beldfoil®.



Рис. 4.41. Конструкция многослойного экрана типа «полиэфирный сэндвич» компании Belden

Компания выпускает кабели, которые имеют два слоя экрана из фольги и оплетки либо даже четыре слоя, где фольга чередуется с

оплеткой дважды, что позволяет сочетать в одном кабеле лучшие свойства фольги и оплетки (рис. 4.41).

Для успешного функционирования кабельных экранов чрезвычайно важно наличие их эффективного заземления. Как показано в [4.59], заземление экрана контрольного кабеля с одной стороны является эффективным лишь против емкостных наводок (так называемая электростатическая защита) и совершенно не эффективной 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 также 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 недопустимы, 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. При прокладке экранированных кабелей на подстанциях может использоваться такое дополнительное решение, повышающее эффективность экранирования, как прокладка параллельно трассе кабелей медной шины выравнивания потенциалов, заземленной с двух сторон. 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.

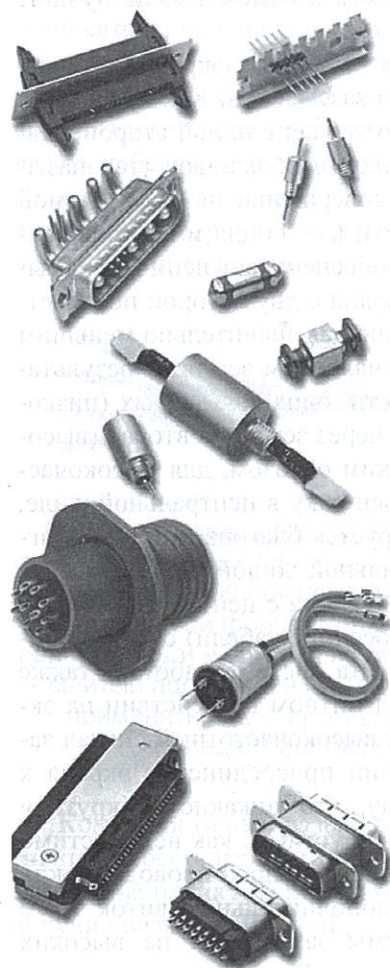


Рис. 4.42 а. Некоторые из соединителей вводов со встроенными фильтрами, выпускаемые компанией Spectrum Control Inc.

Если новые кабели с многослойными экранами из фольги способны эффективно ослаблять внешние электромагнитные воздействия, то этого не скажешь о кабелях старого типа, снабженных жиденькой оплеткой.

При наличии таких старых кабелей эффективного ослабления воздействия внешнего электромагнитного поля можно добиться за счет прокладки их в металлических лотках и трубах. Наименьшим экранирующим эффектом обладают пластмассовые лотки с металлическим напылением, широко используемые для прокладки контрольных кабелей. Из-за очень тонкого электропроводного слоя такая конструкция начинает работать эффективно лишь на частотах 600 МГц и выше. На частотах ниже 200 МГц она вообще не работает [4.59]. Вместе с тем, алюминиевые лотки в сочетании с медной оплеткой на кабелях способны ослабить наводимые напряжения в десятки раз, и поэтому они могут найти широкое применение в качестве эффективного средства защиты от ЭМИ.

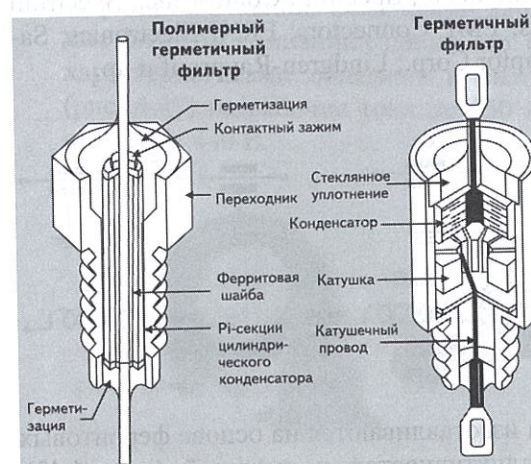
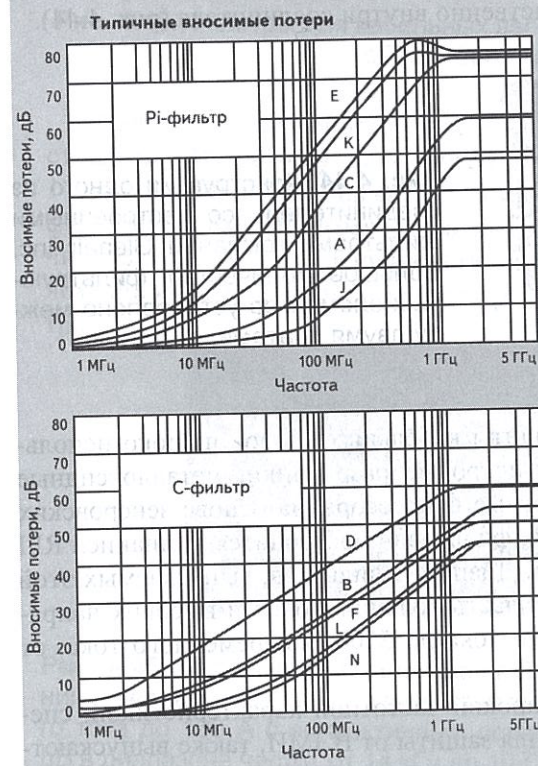


Рис. 4.42 б. Некоторые из соединителей вводов со встроенными фильтрами, выпускаемые компанией Spectrum Control Inc.

Однако наибольшее ослабление наводок в широком диапазоне частот может обеспечить прокладка контрольных кабелей в стальных водопроводных трубах.

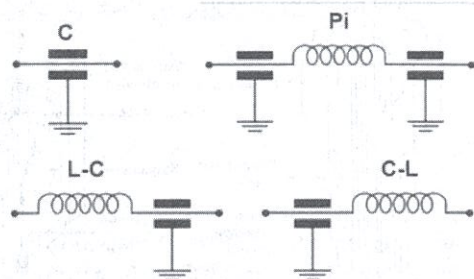
Значительно более сложной технической проблемой, чем экранирование кабелей, считается защита от проникновения ЭМИ в аппаратуру через различные кабельные вводы и соединители (разъемы).

Сегодня на рынке достаточно широко представлены специальные соединители, снабженные встроенными ЭМИ фильтрами (рис. 4.42). Такие соединители выпускают-



ся многими компаниями: Amphenol; Spectrum Control Inc., Spectrum Advanced Specialty Products; EMP Connectors; ERNI Electronics; Sabritec; MPE; Glenair Inc.; Captor Corp.; Lindgren-Rayproof и др.

Рис. 4.43. Типовые схемы фильтров, встроенных в соединители



Обычно, такие фильтры изготавливаются на основе ферритовых колец или комбинации индуктивностей и емкостей (рис. 4.43), смонтированных непосредственно внутри соединителя (рис. 4.44).

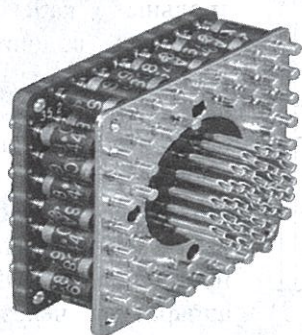


Рис. 4.44. Конструкция одного из соединителей со встроенными фильтрами компании Glenair Inc. Большое количество фильтрующих элементов установлено между двумя платами.

В качестве средств защиты кабельных вводов широко используются фильтры, а также искровые разрядники, металлоксидные варисторы и высокоскоростные супрессоры на основе зенеровских диодов. Целый спектр таких фильтров производится компанией RFI Corporation (рис. 4.45) и др. Диапазон фильтров, выпускаемых этой компанией, охватывает и область больших токов и высоких напряжений: от 12 В постоянного тока до 5500 В переменного тока; от 0.01 до 5000 А.

Силовые фильтры с широкой частотной характеристикой, специально предназначенные для защиты от ВЭМИ, также выпускают

ся рядом компаний. Отличными характеристиками обладают силовые фильтры компании Captor Corp. (рис. 4.46). Не менее хорошими характеристиками обладают и силовые фильтры фирмы EPCOS (рис. 4.47) на рабочие токи до 150 А (ударный ток до 12 кА), напряжение 440 В.

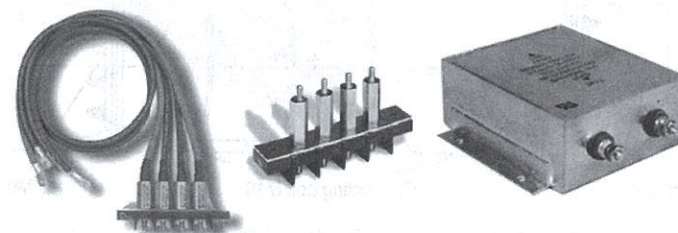


Рис. 4.45. Фильтры для кабельных вводов, производимые компанией RFI Corporation

Падение напряжения в этих фильтрах для рабочих токов составляет <1% на фазу. Затухание 100 дБ в частотном диапазоне от 14 кГц до 40 ГГц. Фирма EPCOS выпускает также трехфазные фильтры с аналогичными частотными характеристиками на рабочие токи до 1600А, имеющие вид шкафов, а также небольшие маломощные многоканальные фильтры для цепей управления и контроля.

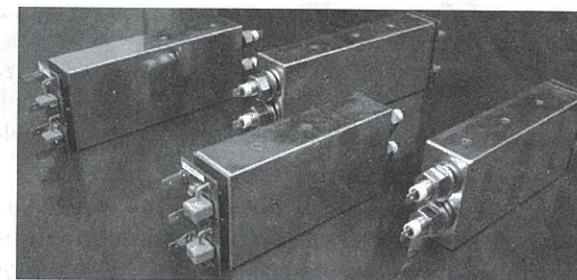


Рис. 4.46. Силовые фильтры Captor Corp. в герметичном исполнении, предназначенные для цепей питания постоянного и переменного тока до 100 А с эффективным ослаблением ЭМИ не менее 100 дБ в диапазоне частот от 14 кГц до 10 ГГц

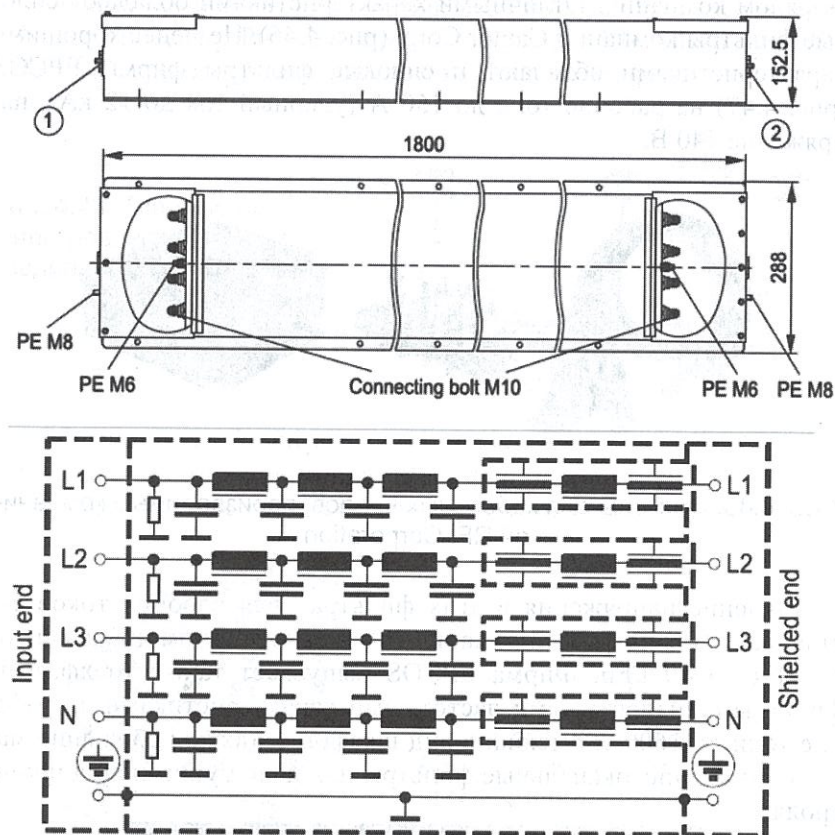


Рис. 4.47. Габаритные размеры и схема силового трехфазного фильтра фирмы EPCOS на ток 150 А и напряжение 440 В

Для защиты силовых цепей и цепей питания многими компаниями выпускаются ограничители перенапряжений на основе оксидноцинковых варисторов, предназначенные для подключения к сетям с напряжением 220/380/660 В и допускающие протекание разрядных токов до 80 кА. Часто такие устройства содержат последовательно включенные предохранители, защищающие сеть от короткого замыкания при повреждении варистора и индикатор перегорания предохранителя.

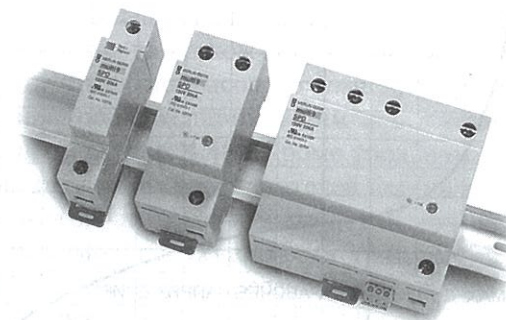


Рис. 4.48 а. Защитные устройства большой мощности на основе металлооксидных варисторов компании Square D (Schneider Electric)

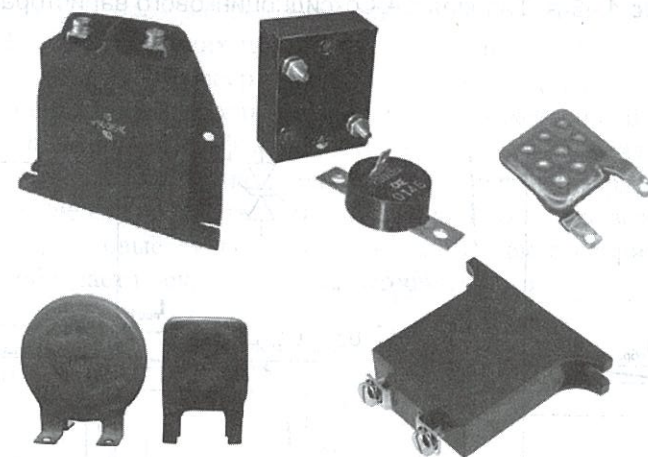


Рис. 4.48 б. Мощные варисторы различных типов с номинальным напряжением 130 – 1100 В и разрядным током от 3 - 100 кА

Металлоокисные варисторы обладают большой мощностью, однако имеют недостаточно высокое быстродействие (для целей защиты от ВЭМИ). Их характеристики ухудшаются (деградируют) при неоднократном воздействии мощных импульсных нагрузок.

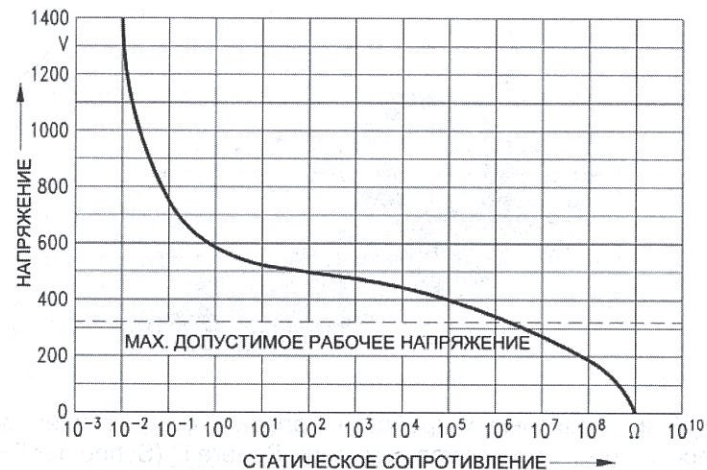


Рис.4.48 в. Типовая ВАХ оксидноцинкового варистора

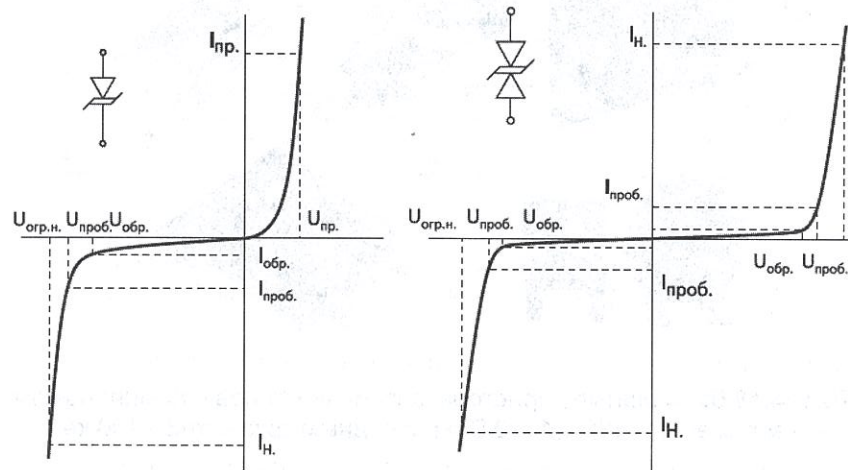


Рис. 4.49. Вольт-амперные характеристики однонаправленных (для постоянного тока) и двунаправленных (для переменного тока) диодных супрессоров

Эти недостатки отсутствуют у высокоскоростных кремниевых ограничителей перенапряжений, выполненных на базе зенеровских диодов (Transient Voltage Suppressor Diodes или TVS Diodes), действие которых основано на резком лавинообразном изменении сопротивления от относительно высокого значения практически до нуля при превышении приложенного к ним напряжения определенной пороговой величины (рис. 4.48). Кроме того, в отличие от варисторов характеристики таких ограничителей перенапряжений – супрессоров, после многократных воздействий высоких напряжений и переключений режимов не ухудшаются (рис. 4.49). К сожалению, большинство современных супрессоров такого типа имеют ограниченную импульсную мощность (до 1500 Вт при напряжениях до 600 В) и пригодны для защиты входов электронной аппаратуры, но не для защиты силовых цепей и цепей питания. Однако широко известной компанией Littelfuse, специализирующейся на разработке и производстве элементов защиты от перенапряжений, был налажен выпуск супрессоров значительно большей импульсной мощности: до 30 кВт, допускающих протекание разрядных импульсных токов до нескольких сотен ампер. Диодные супрессоры, как и варисторы, можно соединять параллельно для увеличения разрядного тока.

Для повышения эффективности защиты от перенапряжений можно использовать также параллельное соединение разнотипных ограничителей перенапряжения, например таких, как варисторы и полупроводниковые супрессоры (рис. 4.50). Такое гибридное устройство обладает прекрасными характеристиками.

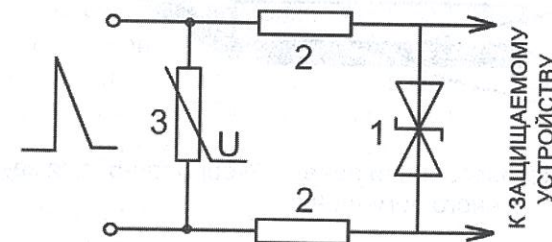


Рис. 4.50. Гибридное защитное устройство: 1 – полупроводниковый супрессор; 2 – токоограничивающие резисторы; 3 – мощный варистор

Первым в нем всегда срабатывает быстродействующий супрессор 1, реагирующий на импульс даже с очень крутым передним фронтом и поглощающий часть его энергии. Разрядный ток ограничивается резисторами 2, что предотвращает разрушение супрессора. Падение напряжения на резисторах 2 повышает напряжение на варисторе 3, что приводит к резкому уменьшению его сопротивления и шунтированию резисторов. Оставшаяся (большая) часть энергии поглощается мощным варистором.

При разработке средств защиты от воздействия интенсивных ЭМИ всегда следует иметь в виду, что только один из видов защит не в состоянии обеспечить эффективную защиту. И лишь совместное, комплексное использование всех возможных видов защит может обеспечить наиболее полную защиту.

Одним из таких видов защит является защита зданий и отдельных помещений от проникновения ЭМИ. Наиболее мощной является защита с использованием специальных панелей, содержащих и отражающие и поглощающие ЭМИ слои (рис. 4.51).

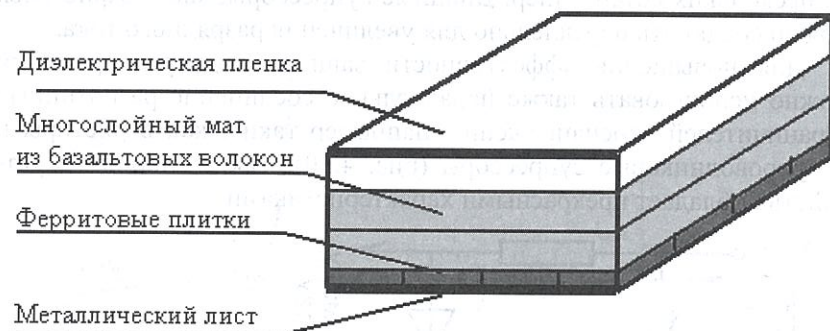


Рис. 4.51. Структура интегрированной панели «Феррилар-5» для защищенного помещения.

Однако создание полностью экранированного помещения является достаточно дорогим мероприятием. Поэтому на практике представляют определенный интерес более дешевые промежуточные варианты с использованием, например, защитной краски, пленки, штор, драпировок и т.п. За последние годы существенные результа-

ты достигнуты в области создания электропроводных лакокрасочных и строительных материалов с уникальными свойствами и широкими возможностями применения, а также прозрачных токопроводящих покрытий, которые могут быть нанесены на стекло. Электропроводные краски, лаки и спреи на основе меди, алюминия, бронзы, никеля и графита выпускаются многими фирмами, например, Caswell, YSHIELD EMR-protection Company, Less EMF Inc, Gold Touch, Inc., Spraylat Corp., Cybershield, Applied Coating Technologies Ltd, BM Industria Bergamasca Mobili S.p.A. Хорошими показателями обладает защитная краска «Тиколлак» московской фирмы «Тико». «Тиколлак» - новый универсальный неметаллический электропроводный лакокрасочный материал, защищенный патентом Российской Федерации, представляющий собой смесь углеродосодержащего наполнителя и полимерного связующего в соотношении: эпоксидное связующее - 8-20% наполнитель смесь графита с сажей при массовом соотношении 0,1:1,0:11-39% - отвердитель 0,5-1,5% органический растворитель остальное. По данным фирмы Тико лак способен экранировать электромагнитные излучения в широком диапазоне частот вплоть до 300 ГГц. Нанесенный на внутренние или внешние поверхности зданий, он во много раз снижает проникающую способность электромагнитного излучения (по данным разработчика один слой «Тиколака» толщиной всего в 70 мкм снижает интенсивность ЭМИ в 3 - 3,5 раза). «Тиколлак» можно наносить на различные строительные материалы - ДСП, дерево, фанеру, гипсовые плиты, а также на любой гибкий материал - ткань, кожу, пленки, бумагу и др. На покрытие из «Тиколак» можно наносить любой отделочный материал - обои, краску, керамическую плитку и т.д., при этом «Тиколлак» намного дешевле зарубежных аналогов (около 70 долларов США за 1 кг).

Для получения прозрачного электропроводного стекла, отражающего ЭМИ, используют полупроводниковые пленки оксидов различных металлов: олова, индия, цинка и др. Технология изготовления таких стекол очень сложная, трудоемкая и требует дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала. Уже упомянутой фирмой «Тико» разработан и запатентован (патент РФ № 2112076) высокотехнологичный и экономичный способ нанесения на стекло электропроводящих покрытий на основе оксидов индия и олова. Прозрачное электропроводящее стекло производится

многими компаниями, например, Tycon Technoglass, Pilkington, Shenzhen Wanyelong Industry Co., Ltd, InkTec и др.

Компанией «Альфапол» из Санкт-Петербурга на основе шунгитовых пород созданы стройматериалы, совмещающие в себе свойства обычных стройматериалов и достаточно высокую электропроводность. Это определяет способность материала экранировать электромагнитные излучения [4.60]. По данным компании «Альфапол», шунгитовые композиционные радиоэкранирующие материалы по способам реализации из них экранов могут быть разделены на два класса:

- конструкционные материалы, к числу которых относится бетон, кирпич, кладочный раствор. Материалы способны обеспечить ослабление электромагнитной энергии в диапазоне частот более 100 МГц на уровне не менее 100 дБ. По физико-механическим характеристикам шунгитовые конструкционные материалы не уступают традиционным строительным аналогам. Шунгитовые материалы прошли испытания в конструкциях (бетон в панелях перекрытий, кирпич в кладках) и признаны соответствующими существующим требованиям;

- материалы для реконструкции, такие как штукатурные растворы и мастики, позволяющие переоборудовать обычные сооружения в экранированные. Мастики способны обеспечить экранирующий эффект на уровне не менее 30 дБ в диапазоне свыше 30 МГц при толщине слоя в 2-3 см. А штукатурный состав «Альфапол ШТ-1» при толщине слоя штукатурки 15 мм в диапазоне частот от 10 кГц до 35 ГГц обеспечивает ослабление ЭМИ на 10 – 15 дБ.

Шунгит - группа твердых углеродистых минеральных веществ, представляющих в главной массе аморфные разновидности углерода, близкие по составу к графиту. Химический состав шунгита непостоянен: в среднем содержит 60 - 70 % углерода и 30-40% золы. В золе содержится: 35-50% окиси кремния, 10-25 % окиси алюминия, 4-6% окиси калия, 1-5 % окиси натрия, 1-4% окиси титана, а также примеси других элементов.

В качестве дополнения к стенам помещений, содержащих шунгит, можно использовать электропроводные шторы и ткани, напольные покрытия, производимые некоторыми фирмами (рис. 4.52)



Рис. 4.52. Электропроводные пленки, нити и ткани, ослабляющие ЭМИ (до 80 дБ), производимые компанией Koolon Fiber Tech. Corp.

4.8.5. Повышение живучести МУРЗ

Меры по повышению живучести МУРЗ должны предусматривать, по нашему мнению, как чисто технические усовершенствования, так и организационные мероприятия.

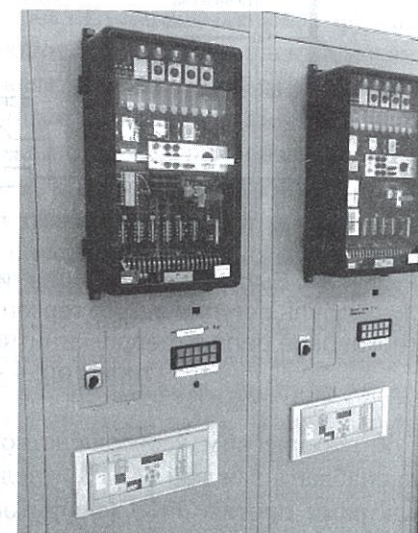


Рис. 4.53. Дистанционная защита линий, выполненная на МУРЗ типа MiCOM P437 (внизу) и электромеханических реле типа LZ-31 (вверху), включенных на параллельную работу.

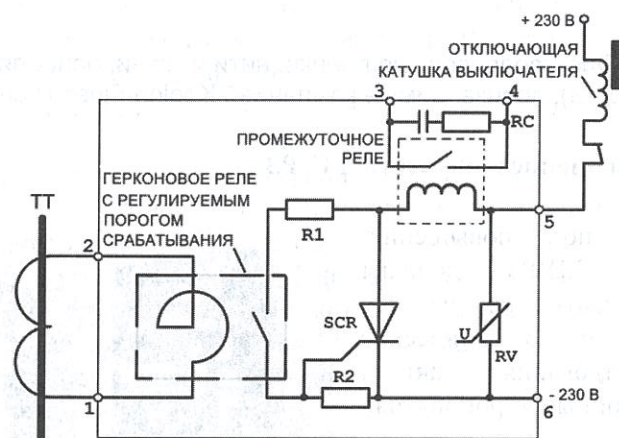
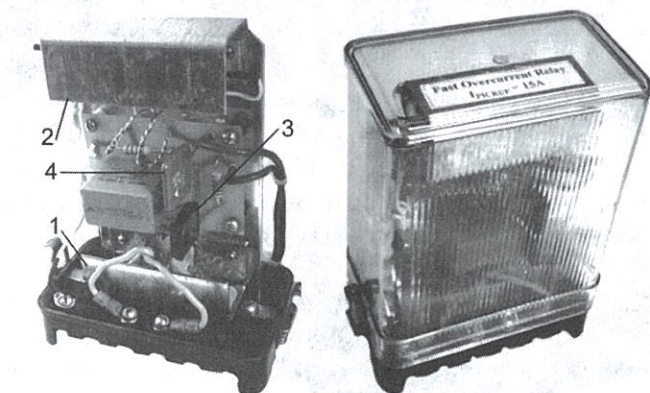


Рис. 4.54. Быстродействующее гибридное реле токовой отсечки: 1 – модуль регулируемого герконового реле; 2 – промежуточное герконовое реле в ферромагнитном экране; 3 – высоковольтный тиристор; 4 – варистор

К техническим усовершенствованиям можно отнести требование снабжать каждый МУРЗ отдельным модулем со специальными фильтрами против ЭМИ (ферритовые кольца, комбинация различных разрядников и т.п.). Через этот модуль должны проходить все

входные и все выходные цепи МУРЗ. Необходимо обязать всех производителей МУРЗ снабжать свои изделия такими модулями. Такой модуль хорошо вписывается в концепцию модульной конструкции МУРЗ, предложенной нами [4.61], а также позволяет легко заменять его в течение всего периода эксплуатации МУРЗ при появлении на рынке новых технологий защиты и новых модулей фильтров. Этой концепцией предусмотрено, в частности, введение стандарта на модульную конструкцию МУРЗ и переход на производство МУРЗ в виде стандартизованных плат-модулей, которые заказчик мог бы компоновать по своему усмотрению в шкафах релейной защиты, снабженных усиленной защитой от ЭМИ.

В настоящее время в России предпринимаются попытки повысить устойчивость системы РЗ за счет введения двухуровневой РЗ. Согласно предложению Б. Д. Щедрикова [4.62], первый уровень РЗ должен быть образован МУРЗ, а второй – электромеханическими реле тока типа РТ-40 и реле времени типа РВМ-12. Оба комплекта реле (МУРЗ и электромеханика) включены на параллельную работу, причем время срабатывания электромеханической защиты выбрано на 0.1 сек больше времени срабатывания МУРЗ. По мнению автора предложения, электромеханика должна подстраховывать МУРЗ в случае ее несрабатывания при аварийном режиме (то есть, фактически, таким включением реализуется логическая функция «ИЛИ»). Следует заметить, что включение МУРЗ и электромеханики на параллельную работу не является чем-то новым и давно используется на практике [4.63]. Однако при таком включении не решена проблема ложных срабатываний МУРЗ при воздействии на них ЭМИ, которые могут привести к не менее серьезным проблемам в энергосистеме, чем несрабатывание. В своей последующей статье тот же автор предлагает вместо параллельного включения электромеханики и МУРЗ использовать их включение таким образом, чтобы электромеханическое реле типа КРБ-126 давало разрешение на выполнение операции включения отключающей катушки выключателя микропроцессорным реле (то есть, по сути дела, в этом случае реализуется логическая функция «И»). Такое включение обеспечивает, конечно, гораздо лучшую устойчивость РЗ к ПДЭВ, однако снизит общую надежность РЗ (это неизбежная цена за повышение устойчивости защиты к ПДЭВ).

Справедливости ради следует отметить, что принцип повышения устойчивости МУРЗ к мощным ЭМИ путем использования электромеханических реле, разрешающих действие МУРЗ, был предложен нами в [4.64] за 15 лет до публикации предложения о двухуровневой РЗ, а идея о необходимости создания гибридного (механо-полупроводникового) устройства РЗ была предложена нами почти 20 лет тому назад [4.65]. Причем речь идет не о голых абстрактных идеях, а о реально разработанных конструкциях [4.66 – 4.69].

Сегодня, с появлением новой элементной базы такой, как миниатюрные высоковольтные герконы, мощные герконы с большими коммутируемыми токами, небольшие по размерам транзисторы и тиристоры с рабочим напряжением 1200 – 1600 В и коммутируемыми токами в десятки ампер появились, естественно, и новые возможности по созданию гибридных реле (в качестве самостоятельных реле защиты или в качестве пусковых органов для МУРЗ).

В публикации [4.69] нами предпринята попытка продемонстрировать на конкретных схемных решениях возможности современных гибридных реле. В качестве электромеханической части во всех этих конструкциях нами рекомендуется использовать герконы. Их отличительными особенностями являются высокая надежность (при соблюдении нормируемых ограничений по току и напряжению), высокое быстродействие (доли и единицы миллисекунд), отличная защита от пыли и влаги, отсутствие необходимости зачистки и регулировки в процессе эксплуатации, малые размеры, полная гальваническая развязка цепи управления (катушка) от выходной цепи (контактов), возможность очень простыми средствами получить высоковольтную изоляцию между цепью управления и выходной цепью [4.70]. Еще одним конкретным примером такого гибридного реле защиты может служить быстродействующее реле токовой отсечки, специально разработанное нами для делительной автоматики сети (рис. 4.54) [4.71]. Это очень простое устройство, содержащее минимальное количество элементов, выбранных с большими запасами по напряжению. Так, например, тиристор рассчитан на напряжение 1200 В, а миниатюрный вакуумный геркон – на 2000 В. Изоляция между входной катушкой и герконом выдерживает напряжение в 5 кВ, которое может быть при необходимости свободно

увеличено. Параллельно защитному варистору может быть дополнительно установлен супрессор.

Как следует из вышеизложенного, в связи с новыми опасностями, возникшими в последние годы, еще рано списывать со счетов электромеханические реле защиты, устойчивые к воздействию мощных ЭМИ. Наоборот, должны быть развернуты работы по разработке новых типов электромеханических реле, специально предназначенных для использования в качестве резервных защит, на основе современных материалов и технологий.

Как было упомянуто выше, методы повышения живучести МУРЗ не сводятся к чисто техническим усовершенствованиям конструкции МУРЗ. К организационным мероприятиям можно отнести организацию запасов комплектов печатных плат (модулей) МУРЗ и их хранение. Поскольку повреждаться могут электронные устройства, даже не находящиеся в работе, хранение печатных плат МУРЗ должно осуществляться в специальных хорошо экранированных металлических ящиках. Модули центрального процессора должны быть полностью готовыми к запуску без необходимости программирования и введения уставок. Поскольку обеспечить комплектами запасных плат абсолютно все МУРЗ в энергосистеме невозможно по экономическим причинам, должны быть заранее определены наиболее важные для энергосистемы МУРЗ и именно они должны быть снабжены комплектами запасных плат. Для МУРЗ, не имеющих комплектов запасных плат, должны быть предусмотрены методы корректного выведения их из работы. На подстанциях и электростанциях должны храниться также укомплектованные и настроенные комплекты панелей защит на базе электромеханических реле, которые можно было бы быстро ввести в работу в случае возникновения массовых проблем с МУРЗ.

4. 9. Кибербезопасность

В 2010 г. в Иране в результате атаки вируса win32/Stuxnet были выведены из строя сотни центрифуг, используемых для обогащения урана. Впоследствии атакам вируса были подвержены и другие сложные системы, в первую очередь автоматические, управляющие целыми заводами, а также объектами городской инфраструктуры, включая водопровод и системы электроснабжения. Это был первый

известный компьютерный червь, перехватывающий и модифицирующий информационный поток между программируемыми логическими контроллерами марки SIMATIC S7 и рабочими станциями SCADA-системы SIMATIC WinCC фирмы Siemens. Этот червь был специально разработан в качестве средства несанкционированного сбора данных (шпионажа) и диверсий в АСУ ТП промышленных предприятий, электростанций, аэропортов и т.п. Путем изменения кода логических контроллеров (Programmable Logic Controllers - PLC) вирус Suxnet пытается перепрограммировать устройства управления промышленных систем, в особенности, контроллеры фирмы Siemens, чтобы, незаметно от операторов систем, захватить над ними контроль. По некоторым опубликованным данным этот вирус совершает по всему миру несколько тысяч атак в сутки на контроллеры, работающие под управлением программ Siemens.

На эти факты следовало бы обратить пристальное внимание руководителей энергетической отрасли, восхищенно и без оглядки ринувшихся в освоение технологий так называемых Интеллектуальных Сетей (Smart Grid), широкое развитие которых в России приобрело статус Государственной программы. Тем более, что случай с заражением опасным вирусом системы управления энергосистемой уже имел место. В 2009 г. власти США признали, что обнаружили вирус, который мог отключить энергетические объекты страны.

Речь идет о резком увеличении уязвимости энергосистем, выполненных по технологии Smart Grid, хакерским атакам [4.49]. Действительно, если все элементы Smart Grid, включая МУРЗ, будут управляться по командам, передаваемым по сети Ethernet по протоколам TCP/IP или по беспроводным радиоканалам Wi-Fi (как это и предусмотрено концепцией Smart Grid), то возникает огромная потенциальная опасность внешнего вмешательства в работу энергетической системы. На это обращают внимание многие эксперты. Этой теме посвящаются многие международные конференции. Одни лишь апологеты Smart Grid «не замечают» этих проблем. Что же мы слышим в ответ от апологетов Smart Grid? Обычные отговорки о необходимости изоляции внутренней сети управления Smart Grid от внешней сети интернет (как это и было сделано, между прочим, в Иране), об использовании паролей доступа и т.п. тривиальных мер по обеспечению безопасности. Все мы хорошо понимаем, что все

эти меры защиты могут ограничить доступ к Smart Grid рядовых обывателей, но отнюдь, не опытных хакеров, проникающих даже в очень хорошо защищенные сети министерств обороны и банков. Да что там хакеры, если в армиях многих стран мира появились специальные подразделения, состоящие из высокочеловеческих профессионалов, предназначенные для ведения кибернетических войн, то есть для проникновения в защищенные компьютерные сети противника и выведение их из строя. Можно с уверенностью утверждать, что компьютерная сеть Smart Grid будет целью номер один для таких подразделений. «Добро пожаловать на войну XXI века, - говорил в одном из своих вступлений Ричард Кларк, в недавнем прошлом советник бывшего президента США Джорджа Буша по вопросам кибербезопасности. - Вообразите себе вспыхивающие электрогенераторы, сходящие с рельсов поезда, падающие самолеты, взрывающиеся газопроводы, системы вооружения, вдруг перестающие работать, и войска, которые не знают, куда им двигаться» [4.72]. Перед вами не пересказ эпизода из очередного голливудского блокбастера - это краткое описание высокочеловеческого американского эксперта тех последствий, к которым может привести война нового формата - кибервойна.

Активнее всех здесь действуют американцы. В октябре 2010 г. в полную силу заработало Киберкомандование США (US Cyber Command - USCYBERCOM), возглавляемое генералом Китом Александером (Keith B. Alexander).

Структура, ставшая частью сверхсекретного Агентства Национальной Безопасности - АНБ (National Security Agency), объединила все существовавшие ранее подразделения киберзащиты Пентагона. Уже сейчас в системе Киберкомандования работают около тысячи человек, но военные уже объявили о начале масштабной программы рекрутирования специалистов соответствующего профиля. Часть из них будут обеспечивать безопасность не только военной и государственной инфраструктуры, но и наиболее важных коммерческих объектов страны. Об этом было сообщено накануне запускной программы «Кибервызов для США», в рамках которой планируется отыскать 10 тысяч юных компьютерных гениев [4.73].

Нынешний глава Киберкомандования, он же директор АНБ генерал Александер даже заявил на слушаниях Комитета по делам Вооруженных Сил США Палаты Представителей Конгресса, что

кибероружие имеет эффект, сравнимый с эффектом применения оружия массового уничтожения. "Кибероружие развивается с большой скоростью. Многие страны - включая США, Россию, Китай, Израиль, Великобританию, Пакистан, Индию, Северную и Южную Корею - развили сложное кибероружие, которое может неоднократно проникать в компьютерные сети и способно разрушать их, утверждают специалисты по кибербезопасности", - пишут авторы статьи Шивон Горман и Стивен Фидлер [4.73]. Некоторые представители американской разведки и аналитики опасаются, что кибероружие может попасть в руки террористов. "Вопрос стоит так: когда это попадет к "Аль-Каиде"? - говорит Джеймс Льюис, специалист по кибербезопасности Центра стратегических и международных исследований [4.74].

А один из бывших сотрудников АНБ - Чарльз Миллер даже подсчитал, что на организацию киберструктуры, способной успешно атаковать Америку и полностью парализовать деятельность США, потребуется всего лишь 98 млн. долларов. «Для нас это одно из основных перспективных направлений, - подчеркнул на брифинге с журналистами вице-президент подразделения по разработке разведывательных и информационных систем компании Raytheon Стивен Хокинс. - Мы прогнозируем рост объемов рынка на два порядка, его стоимость составит миллиарды долларов» [4.72]. Бороться есть за что - кибербюджет достиг 8 млрд долларов, а к 2014-му вырастет до 12 млрд. При этом если ежегодное увеличение расходов по другим направлениям в среднем в ближнесрочной перспективе будет на 3 - 4%, то в отношении кибербезопасности - не менее 8% ежегодно. Ведущая роль в войне нового типа, естественно, отведена военным, им же достанется и львиная доля кибербюджета: более 50% из 8 млрд. долларов 2010 г. получит Пентагон. В 2011 г. США планируют принять новую доктрину кибербезопасности. О ее направленности можно судить по опубликованной в сентябре программной статье заместителя главы Пентагона Уильяма Линна III с символическим названием «Защищая новое пространство». Ее главная мысль: отныне США будут считать киберпространство таким же потенциальным полем боя, как сушу, море и воздух. Параллельно над созданием концепции коллективной киберобороны начали работать и в НАТО. На ноябрьском 2010 г. саммите альянса было решено разработать «План действий в области киберобо-

роны». Важное место в нем будет отведено созданию центра НАТО по реагированию на киберинциденты. Изначально его предполагалось запустить в 2015 году, но, по настоянию США, срок сократили на три года, пишет «Коммерсант».

Парализация систем управления, масштабные отключения целых энергосистем, хаос в системах контроля за воздушным и наземным транспортом, нарушение работы банков и бирж, отключение интернета и сотовой связи – так, по мнению американских апологетов, выглядит сценарий применения кибероружия.

Еще более осложняет ситуацию тот факт, что современные технологии позволяют создать микрочипы или записать специальные тайные команды в управляющих программах электронной аппаратуры, работающей на основе микропроцессоров, которые по определенному сигналу сделают ее эффективное использование невозможным. Приобретая и устанавливая ответственные импортные электронные системы управления для промышленности и энергетики на основе микропроцессоров сегодня уже нельзя быть абсолютно уверенным, что оно не перестанет функционировать при определенных обстоятельствах или, что еще хуже, не станет функционировать разрушающе на управляемое им оборудование, как это произошло недавно в Иране.

Никакие международные договоры по ограничению кибернетического оружия (такое предложение уже высказывалось Россией и было вежливо отклонено США) не могут быть эффективными по той простой причине, что контролировать их выполнение невозможно. Что же остается? Необходимость оценивать не только преимущества модных технологий, но и тщательно изучать последствия широкого распространения таких технологий, трезво взвешивать потенциальные опасности, особенно в такой чувствительной и важной области, как электроэнергетика, загодя разрабатывать меры по предотвращению преднамеренных разрушающих воздействий и восстановлению поврежденных систем.

Литература к Главе IV

- 4.1. Шалин А. И. Об эффективности новых устройств РЗА. – Энергетика и промышленность России, № 1 (65), 2006.
- 4.2. Прохорова А. Интеллект - наше главное конкурентное преимущество (интервью с генеральным директором ОАО ЧЭАЗ М. А. Шурдовым) - Оборудование, рынок, предложения, цены, № 4, 2003.
- 4.3. Кузнецов М., Кунгуров Д., Матвеев М., Тарасов В. Входные цепи устройств РЗА. Проблемы защиты от мощных импульсных перенапряжений – Новости электротехники, №6 (42), 2006.
- 4.4. Борисов Р. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой. – Новости электротехники, 2001, № 6 (12).
- 4.5. Правосудов П. Trabtech – технология для защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений. – Компоненты и технологии, 2003, № 6.
- 4.6. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits "Electronics", Vol. 38, No. 8, 1965.
- 4.7. Nailen R. L. How to Combat Power Line Pollution. – Electrical Apparatus, December 1984.
- 4.8. Matsumoto T., Kurosawa Y. Usui M., Yamashita K., Tanaka T. Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment With High-Frequency Switching Surge in Japan. – "IEEE Transactions On Power Delivery", vol. 21, No. 1, 2006.
- 4.9. Matsuda T., Kobayashi 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. – Paper 34-104 on SIGRE Session 1992, Paris (30 August – 5 September).
- 4.10. Sowa A. W., Wiater J. Overvoltages in Protective and Control Circuits due to Switching Transient in High Voltage Substation. – Electrical Department, Bialystok Technical University, Poland.
- 4.11. Wiggins C. M., Thomas D. E., Nickel F. S., Wright S. E., Salas T. M. Transient Electromagnetic Interference in Substations. – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, No. 4, 1994.
- 4.12. Carsimanovic S., Bajramovic Z., Ljevak M., Veledar M., Halilhodzik N. Current Switching with High Voltage Air Disconnecter. –

- International Conference on power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada, June 19-23, 2005, paper no. 229.
- 4.13. M. Mohana Rao, M. Joy Thomas, and B. P. Singh. "Transients Induced on Control Cables and Secondary Circuit of Instrument Transformers in a GIS During Switching Operations", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July, 2007, pp. 1504-1513.
 - 4.14. Кузнецов М. Б., Кунгуров Д. А., Матвеев М. В., Тарасов В. Н. Проблемы защиты входных цепей аппаратуры РЗА от мощных импульсных перенапряжений. – Relay Protection and Substation Automation of Modern EHV Power Systems (Moscow – Cheboksary, September 10–12, 2007).
 - 4.15. 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 – 2006», М., ФСК ЕЭС, 16-19 мая 2006.
 - 4.16. Афанасьев В. В., Адоньев Н. М., Жалалис Л. В. и др. Трансформаторы тока. – Л.: Энергия, 1980.
 - 4.17. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты. Как они устроены? – Электротехнический рынок, 2009, № 4.
 - 4.18. Benmouyal G., Zocholl S. E. The Impact of High Fault Current and CT Rating Limits on Overcurrent Protection. – SEL Publications, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
 - 4.19. Zisman L, Gurevich V. Fast Over Current Microprocessor Protective Relay: Theory and Practice. – Thesis on International Scientific-Technical Conference "Electricity 2007", SEEI, Israel, Eilat, 2007.
 - 4.20. Zamora I., Mazón A.J, Valverde V., Torres E., Dyško A. Power Quality and Digital Protection Relays. – International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'04), Barcelona, 2004.
 - 4.21. Gencer Ö. Ö., Basa Arsoy A., Öztürk S., Karaarslan K. Influence of Voltage Harmonics on Over/Under Voltage Relay. – Department of Electrical Engineering, Kocaeli University, Izmit.
 - 4.22. Гуревич В. И. Вторичные источники электропитания: анатомия и опыт применения. – Электротехнический рынок, 2009, № 1.
 - 4.23. Карташев И. Провалы напряжения. Реальность прогнозов и схемные решения защиты. – Новости электротехники, № 5(29) 2004.

- 4.24. Гуревич В. И. Электромагнитный терроризм - новая реальность 21 века. – Мир техники и технологий, 2005, N. 12, с. 14 – 15.
- 4.25. Панов В.В. и др. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения. Зарубежная радиоэлектроника, 1993, N 10, 11, 12, с.3-10.
- 4.26. Блудов С.Б. и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники. Физика плазмы, 1994, том 20, N 7, 8, с.712-717.
- 4.27. Панов В.В., Саркисян А. П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения. Зарубежная радиоэлектроника, 1993, 10, 11, 12, стр. 3-10.
- 4.28. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д. В. , Кожевников А. С., Раваев А.А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы. Зарубежная радиоэлектроника, 1995, 1, стр. 37-53.
- 4.29. Диденко А.Н.; Сулакишин А.С.; Фортков В.Е.; Юшков Ю.Г. Способ функционального поражения радиоэлектронных средств. – Патент РФ 2154839, G01S13/00, 2000.
- 4.30. IEC/TR 61000-1-3 (2002-06) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General - The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
- 4.31. IEC/TR 61000-1-5 Ed. 1.0 (2004-11) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-5: General - High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
- 4.32. IEC 61000-2-9 (1996-02) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance.
- 4.33. IEC 61000-2-10 (1998-11) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment - Conducted disturbance.
- 4.34. IEC 61000-2-11 (1999-10) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
- 4.35. IEC 61000-4-23 (2000-10) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.

- 4.36. IEC 61000-4-24 (1997-02) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance.
- 4.37. IEC 61000-4-25 (2001-11) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.
- 4.38. IEC/TR 61000-4-32 (2002-10) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-32: Testing and measurement techniques – High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.
- 4.39. IEC 61000-4-33 Ed. 1.0 (2005-09) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high power-transient parameters.
- 4.40. IEC/TR 61000-5-3 (1999-07) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-3: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection concepts.
- 4.41. IEC/TS 61000-5-4 (1996-08) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 4: Immunity to HEMP - Specification for protective devices against HEMP radiated disturbance.
- 4.42. IEC 61000-5-5 (1996-02) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance.
- 4.43. IEC/TR 61000-5-6 (2002-06) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-6: Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external influences
- 4.44. IEC 61000-5-7 (2001-01) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-7: Installation and mitigation guidelines – Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code).
- 4.45. IEC 61000-6-6 (2003-04) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-6: Generic standards – HEMP immunity for indoor equipment.
- 4.46. IEC/TR 61000-4-35 (CD produced 2007-06) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-35: Testing and measurement techniques – High power electromagnetic (HPEM) simulator compendium.
- 4.47. IEC/TS 61000-5-8 (CD expected 2008-02) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-8: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection methods for distributed infrastructure.

- 4.48. IEC/TS 61000-5-9 (CD produced 2007-06) Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-9: Installation and mitigation guidelines – System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM.
- 4.49. Гуревич В. И. Интеллектуальные сети (Smart Grid): новые перспективы или новые проблемы? - Электротехнический рынок, 2010, № 6 (часть 1); 2011, № 1 (часть 2).
- 4.50. Белоус В. Угроза использования ЭМИ оружия в военных и террористических целях. - Ядерный контроль, 2005, № 1 (75), том 11, с. 133 – 140.
- 4.51. Kopp C. The E-bomb – a Weapon of Electronical Mass Destruction. – Information Warfare: Thunder's Month Press, New York, 1996.
- 4.52. Гуревич В. И. Оптоэлектронные трансформаторы: панацея или частное решение частных проблем. - "Вести в электроэнергетику", 2010, № 2, с. 24 - 28.
- 4.53. Гуревич В.И. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность. – Проблемы энергетики. – 2008. – №5-6. – С. 47-62.
- 4.54. Clark O. M., Gavender R. E. Lighting Protection for Microprocessor-based Electronic Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, No. 5, 1990.
- 4.55. Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А. и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники. Физика плазмы, 1994, том 20, N 7, 8, с. 712- 717.
- 4.56. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения. Зарубежная радиоэлектроника, 1993, 10, 11, 12, стр. 3-10.
- 4.57. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д. В. , Кожевников А. С., Раваев А.А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы. Зарубежная радиоэлектроника, 1995, 1, стр. 37-53.
- 4.58. Phadke A. G. Hidden failures in electric power systems. International Journal of Critical Infrastructures, vol. 1, No. 1, 2004.
- 4.59. Гуревич В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч. 2. - "Компоненты и технологии", 2010, № 3, с. 91-96.

- 4.60. Байдин Ф.Н., Никитина В.Н., Сафронов Н.Б. Электрофизические характеристики и радиоэкранирующие свойства магнетитно-шунгитовых композиционных строительных материалов. Сборник докладов Девятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности – СПб. –2006, С. 292-294.
- 4.61. Гуревич В. И. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты. - Компоненты и технологии, 2010, № 6, с. 12-15.
- 4.62. Щедриков Б. Д. Электромеханические устройства релейной защиты и автоматики в энергетике: настоящее и будущее. - Релейная защита и автоматизация, 2010, № 1, стр. 61 – 63.
- 4.63. Ответ В. И. Гуревича оппонентам релейщикам. - Вести в электроэнергетику, 2009, №1, с. 41 - 42.
- 4.64. Гуревич В. И. О некоторых путях решения проблемы электромагнитной совместимости релейной защиты в электроэнергетике. - Промышленная энергетика, 1996, N 3, с. 25 – 27.
- 4.65. Гуревич В. И. Принципы повышения помехоустойчивости статических реле тока. Энергетика и электрификация, 1992, N 2, с.16-18.
- 4.66. Гуревич В.И. Пути повышения электромагнитной совместимости релейной защиты в электроэнергетике. - Промышленная энергетика, 1995, N 2, с. 48 – 50.
- 4.67. Гуревич В. И. О развитии средств релейной защиты электрических сетей. - Энергетическое строительство, 1994, N 1, с. 48-51.
- 4.68. Гуревич В. И. Универсальные защитные реле максимального тока нового поколения. "Электротехника", 1994, N 1, с. 61 - 66.
- 4.69. Гуревич В. И. Гибридные герконо-полупроводниковые устройства - новое поколение реле защиты. - Проблемы энергетики, N. 9-10, 2007, с. 27 - 36.
- 4.70. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. – Marcel Dekker Inc., New York – Basel, 2003, 292 p.
- 4.71. Гуревич В. И. Высокостабильное герконо-полупроводниковое реле тока с повышенным быстродействием - Энерго-Инфо, 2007, № 2, с. 84 - 88.
- 4.72. Щербаков В. Пространство виртуальное, борьба реальная. – Военно-промышленный курьер, № 40 (356), 13.10.2010.

4.73. Усов А. США и НАТО мобилизуют 10 тысяч юных хакеров. Гонка кибервооружений стала новым хобби Пентагона. – РИА Новый Регион, 15 февраля 2011.

4.74. Gorman S., Fidler S. Cyber Attacks Test Pentagon, Allies and Foes. – Wall Street Journal, September 25, 2010.

Для заметок

3.1.5. Существование электроэнергетики сегодня невозможно без МУРЗ.....	184
3.1.6. Еще один класс проблем, о которых умалчивается	189
3.2 Выходные электромагнитные реле: проблемы и решения	190
3.3. Логические входы: проблемы и решения	213
3.4. Реальные данные о надежности МУРЗ	223
3.5. Проблемы оценки надежности МУРЗ	233
Литература к главе III	242

Глава IV. Проблема электромагнитных воздействий на МУРЗ 248

4.1. Чувствительность МУРЗ к электромагнитным воздействиям	248
4.2. Грозовые разряды	252
4.3. Коммутационные процессы и электромагнитные поля от работающего оборудования	255
4.4. Проблемы экранирования контрольных кабелей	260
4.5. Искажения сигналов в цепях трансформаторов тока	268
4.6. Влияние на МУРЗ гармоник в измеряемом напряжении и токе ...	278
4.7. Качество напряжения в питающей сети	279
4.8. Преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия	281
4.8.1. Актуализация проблемы электромагнитной совместимости для современной электроэнергетики	281
4.8.2. Классификация и особенности преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий	282
4.8.3. Воздействие ПДЭВ на МУРЗ	295
4.8.4. Возможные пути решения проблемы защиты МУРЗ от ЭМИ	299
4.8.5. Повышение живучести МУРЗ	315
4.9. Кибербезопасность	319
Литература к главе IV	324

КНИГИ ПОЧТОЙ

Заказ можно сделать
на сайте издательства

www.infra-e.ru

№ п/п	Наименование книги	Кол- во
1	Справочник бурового мастера в 2-х томах	
2	Справочник мастера строительно – монтажных работ	
3	Справочник мастера погрузочно – разгрузочных работ	
4	Справочник инженера предприятия технологического транспорта и спецтехники в 2-х томах	
5	Справочник цехового энергетика	
6	Справочник инженера по контрольно – измерительным приборам и автоматике	
7	Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка	
8	Справочник инженера по пожарной охране	
9	Справочник инженера по охране труда	
10	Справочник инженера по охране окружающей среды (эко- лога)	
11	Справочник инженера по наладке, совершенствованию тех- нологии и эксплуатации электрических станций и сетей	
12	Справочник дорожного мастера	
13	Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию	
14	Справочник по строительному материаловедению	
15	Экспертные методы управления технологичностью про- мышленных изделий. Монография	
16	Энциклопедия народной мудрости: (подарочное издание) пословицы, поговорки, афоризмы, крылатые выражения, сравнения, устойчивые словосочетания, встречающиеся в русском живом языке во второй половине XX - начале XXI веков.	
17	Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации	
18	Государева дорога	
19	Конструирование источников питания звуковых усилителей	
20	Строительные минеральные вяжущие материалы	
21	Методы рациональной автоматизации производства	
22	Англо-русский словарь дорожника	
23	Логистика: персонал, технологии, практика	
24	Порядок создания, модернизации и сопровождения АСУТП	
25	Управление потенциально опасными технологиями	
26	Методы проектирования электронных устройств	
27	Фасовочное оборудование малых предприятий	
28	Компьютерные технологии в подготовке и управлении строительством объектов	

ГУРЕВИЧ Владимир Игоревич

**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ РЕЛЕ ЗАЩИТЫ.
Устройство, проблемы, перспективы**

Учебно-практическое пособие

Руководитель проекта
К.Н. Уваров

Главный редактор
О.М. Зеленина

Подписано в печать 18.08.2011.
Формат 60х84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».
Тираж 2000 экз.
Заказ № 96.

Издательство «Инфра-Инженерия»
Тел.: 8(911)512-48-48
E-mail: infra-e@yandex.ru
www.infra-e.ru

**Издательство «Инфра-Инженерия»
приглашает к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы.**

Отпечатано ООО ПФ «Полиграф-Книга»,
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3,
тел. (8172) 72-61-75,
E-mail: forma@pfpoligrafist.com

724



ЖУРНАЛ НЕКОММЕРЧЕСКОГО ПАРТНЕРСТВА «СОДЕЙСТВИЕ РАЗВИТИЮ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ»

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

Журнал для специалистов, работающих в сфере разработки, производства, инжиниринга и эксплуатации релейной защиты и автоматики, противоаварийной автоматики и автоматизированных систем управления в электроэнергетике

Более подробную информацию
о журнале и подписке на него
Вы можете узнать на сайтах:
www.srzau-ric.ru, www.srzau-np.ru



Рекламно-издательский центр
«Содействие развитию релейной защиты,
автоматики и управления в
электроэнергетике» (ООО «РИЦ «СРЗАУ»)

428003, РФ, Чувашская Республика,
г. Чебоксары, пр-кт И. Яковлева, 3

тел.: (8352) 226-394, 226-395

e-mail: ina@srzau-ric.ru



АППАРАТУРА ПЕРЕДАЧИ КОМАНД РЗ и ПА УРАЛЭНЕРГОСЕРВИС

ИССЛЕДОВАНИЯ - РАЗРАБОТКА - ПРОИЗВОДСТВО - ПРОДАЖА
СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ - МОДЕРНИЗАЦИЯ



ПВЗУ-Е

Приемопередатчик
высокочастотных
защит



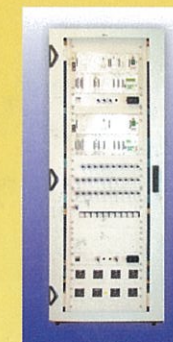
АКА КЕДР

Аппаратура
передачи сигналов
- команд РЗ и ПА



АК ТРИТОН

Аппаратный
комплекс



ШЭ-200АК

Шкаф управления
аппаратурой связи
с функцией
передачи команд
РЗ и ПА

www.uenserv.ru

ISBN 978-5-9729-0043-5



9 785972 900435