

И все-таки цифровая...

ЧАСТЬ 1. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ



В данной статье вы найдете ответы на следующие вопросы:

- Каковы основные технические преимущества интеллектуальных микропроцессорных устройств РЗА перед устройствами предыдущих исполнений?
- Почему микропроцессорные устройства РЗА наиболее приспособлены к развитию энергосистемы, защиту которой они обеспечивают?

Авторы

Законьшек Я. В.
Нудельман Г. С.

ВВЕДЕНИЕ

Появление микропроцессорных (МП) устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) электроэнергетических объектов характеризует начало нового этапа развития РЗА. Отмечая это, важно указать, что **решающим фактором совершенствования релейной защиты и автоматики всегда было и остается развитие самой энергосистемы**, защищаемой устройствами РЗА, выдвигающее новые требования к системе РЗА, а не развитие технологии выполнения устройств РЗА (электромеханических, статических, цифровых, микропроцессорных), как это полагает ряд экспертов. Общее количество введенных в эксплуатацию МП устройств РЗА в России пока еще невелико, но это только вопрос времени, так как МП устройства все

больше используются в проектах развития и реконструкции электроэнергетических объектов. В то же время, целесообразность перехода РЗА на МП технику вызывает сомнение у некоторых релейщиков. Цель данной статьи – обосновать ту точку зрения, что электромеханические и статические устройства РЗА во многих случаях не могут обеспечить выполнение технических требований, диктуемых развитием электроэнергетической системы (ЭЭС) и развеять у релейщиков бытующие еще сомнения в правильности выбранного пути развития РЗА.

Наблюдаемое в настоящее время быстрое развитие ЭЭС, связанное с ростом установленной мощности и уровней номинального напряжения, изменением структуры и принципов функционирования ЭЭС (использование

FACTS, развитие систем постоянного тока высокого напряжения и т.д.), выдвигает новые требования к системе РЗА, в том числе к функциональности устройств РЗА. Эта функциональность либо отсутствует в устройствах РЗА предыдущих поколений, либо ее сложно и нерационально пытаться достичь с применением старых технологий, поскольку количество электромеханических (статических) элементов будет неприемлемо велико, а надежность системы окажется чрезвычайно низкой.

В настоящей статье на примерах отдельных типов защиты показаны неоспоримые технические преимущества интеллектуальных МП устройств РЗА перед устройствами предыдущих поколений.

ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Дистанционная защита (ДЗ) – и на сегодняшний день наиболее распространенная во всем мире защита высоковольтных линий (ВЛ) электропередачи в энергосистемах высокого и сверхвысокого напряжения (ВН и СВН). Дистанционная защита работает с использованием входных воздействующих величин (токов и напряжений), измеряемых только в месте ее установки. Дистанционная защита относится к классу защит, обладающих относительной селективностью, и обеспечивает быстродействующую защиту значительно участка (до 0,85 общей длины) ВЛ. Одновременно она является резервной защитой, действующей с выдержкой времени при замыканиях как на остальной части защищаемой линии, так и на смежных с ней ВЛ. При наличии канала связи между защитами, установленными по концам ВЛ, ДЗ обеспечивает реализацию функций защиты абсолютной селективности. Дистанционная защита применяется также в качестве резервных защит силовых трансформаторов, генераторов и т.д.

Не останавливаясь на проблемах, связанных с трудностями практического применения ДЗ, отметим, что использование информации, недоступной ранее для классических электромеханических или статических реле, обеспечило получение **новых свойств и характеристик** МП защит.

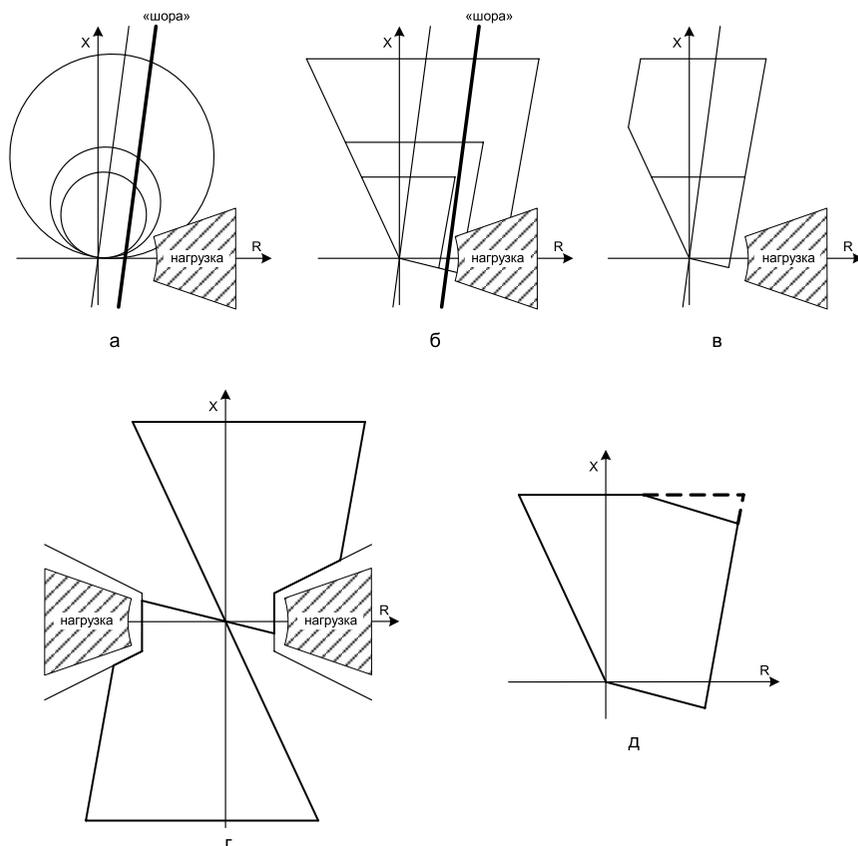


Рис. 1. Характеристики срабатывания ИО дистанционных защит

1а – Круговые характеристики срабатывания ИО;

1б – Многоугольные характеристики срабатывания статических ИО;

1в – Многоугольные характеристики срабатывания МП ИО;

1г – Многоугольная характеристика срабатывания ИО с зоной блокирования нагрузки;

1д – Многоугольная характеристика срабатывания ИО с наклонным участком для отстройки от неселективного срабатывания

Отстройка от нагрузочного режима

Необходимость отстроиться от нагрузочного режима должна учитываться при выборе уставок дистанционных измерительных органов. Как известно, при изменении уставки путем регулировки в цепях напряжения характеристика срабатывания реле сопротивления электромеханического и статического реле масштабно изменяется и, как результат, может вторгаться в область нагрузочного режима (рис.1 а, б). Для того, чтобы избежать излишнего срабатывания защиты, требуется принятие специальных мер, таких, например, как введение в схему защиты специального блокирующего реле, именуемого «шора» (рис.1 а, б). Многоугольные характеристики дистанционных органов МП

устройств обеспечивают **независимое регулирование уставки по активному и реактивному сопротивлению** (рис.1 в), что уже само по себе улучшает отстройку от нагрузочного режима.

В современных устройствах МП РЗА имеется также возможность отстройки от нагрузочного режима с помощью зоны блокирования нагрузки (рис.1 г), не снижая чувствительности к величине переходного сопротивления в месте повреждения при удаленных замыканиях.

Чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление

Наличие переходного сопротивления в месте повреждения влияет на работу дистанционных измерительных органов (ИО) [1]. Воздействие источника на про-

ПРАКТИКА

тивоположном конце защищаемой линии может приводить как к потере селективности ИО, так и к сокращению зоны действия ИО. Для исключения излишнего срабатывания предусматривают наклонный участок многоугольной характеристики срабатывания ИО, что неизбежно снижает чувствительность ИО к замыканиям через переходное сопротивление (рис.1 д). Благодаря методам адаптации [2,3] использование информации о предшествующем режиме позволяет сохранить горизонтальный участок характеристики срабатывания ИО. Такая возможность реализована, например, в интеллектуальных МП терминалах серии REL 5xx фирмы ABB.

Работа по «памяти» при замыканиях, близких к месту установки защиты.

Направленность дистанционных органов

Как известно, для обеспечения селективного срабатывания при КЗ, близких к месту установки защиты, в ДЗ используется запоминание напряжений (вводится напряжение «памяти»). В традиционных устройствах такая «память» не может существовать более нескольких периодов из-за возможного расхождения частот предшествующего и аварийного режимов. В интеллектуальных МП устройствах РЗА осуществляется «слежение» за частотой в системе и компенсация ее отклонения, благодаря чему обеспечивается работа по «памяти» даже при наличии замедления в цепях отключения (обычно до 2 с). Для «памяти» чаще всего используется напряжение прямой последовательности предшествующего режима. В современных цифровых ДЗ используется метод адаптивной поляризации, при котором в зависимости от системных условий, повреждения, величины напряжения и времени, прошедшего с момента возникновения замыкания выбирают предпочтительное напряжение поляризации [4]. Адаптивная поляризация является бесспорным преимуществом МП ДЗ перед ДЗ предыдущих поколений.

Независимое определение направленности по разным измерительным контурам играет важную роль в ДЗ ВЛ с продольной емкостной компенсацией, где измеряемый импеданс при замыкании в прямом направлении может достигать отрицательных значений. Простая реализация независимого регулирования уставок

срабатывания в прямом (вперед) и в обратном направлении, улучшающая возможность защиты, является преимуществом МП устройств РЗА.

Фазовая селекция

Независимая и улучшенная избирательность поврежденных фаз с использованием новых многокритериальных алгоритмов селекции [5, 6] обеспечивает возможность многополюсного отключения и последующего адаптивного повторного включения на многоцепных параллельных линиях ВН и СВН. Последнее не только повышает функциональность защит, но, что особенно важно, способствует повышению динамической устойчивости ЭЭС. И это только первые шаги по применению многомерной релейной защиты [7].

Учет распределенных параметров линий ультравысокого напряжения

Для дистанционных защит длинных линий (600 км и более) ультравысокого напряжения (1000 кВ и более) предлагается [8] использовать модель линии с распределенными параметрами. В этом случае вместо первичных параметров линии в уравнения вводятся вторичные параметры – характеристические сопротивления

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z^0}{Y^0}}$$

прямой и нулевой последовательности Z_{c1} , Z_{c0} и коэффициенты распространения $\gamma = \sqrt{Z^0 Y^0}$ прямой и нулевой последовательности γ_1 , γ_0

Переход к модели с распределенными параметрами позволяет снизить погрешность реле сопротивления (на 17 % – по данным [8] для рассматриваемого в статье случая). Распределенные параметры могут использоваться вместо традиционной компенсации емкостных токов линии в защитах, где такая компенсация необходима. Реализовать такие возможности в полной мере можно только в МП устройствах РЗА.

Реализация дальнего резервирования

Уникальные, недостижимые ранее результаты на основе методов одностороннего замера получены при разработке защит дальнего резервирования многоконцевых ВЛ. Защита дальнего резервирования предназначена для селективного

отключения ВЛ при коротких замыканиях в силовых отпаечных трансформаторах и на стороне низшего напряжения. Возможности повышения чувствительности традиционной ДЗ ограничены в связи с тем, что нагрузка линий, определяющая параметры срабатывания последних ступеней защиты, обычно превышает номинальную мощность трансформатора отпайки. Для повышения чувствительности необходимо расширить информационную базу защиты. В данном случае кроме токов и напряжений текущего режима в информационную базу добавляются токи и напряжения предшествующего режима, а дистанционный принцип защиты дальнего резервирования расширен благодаря методу виртуальных реле, привлекающему априорную информацию о защищаемой линии [9].

Рассмотренное выше касалось развития принципа ДЗ на основе замера сопротивления линии, пропорционального ее длине. Изменения алгоритмов измерительных органов ДЗ главным образом были связаны с применением более эффективных методов фильтрации. Это позволило уменьшить время срабатывания защит. По сравнению с электромеханическими и статическими реле улучшились также критерии принятия решения на отключение. Одно из направлений дальнейшего развития дистанционного принципа защиты линий электропередачи – создание новых устройств на базе искусственного интеллекта, имеющих в своей основе адаптивную нейро-нечеткую систему (adaptive neuro fuzzy inference system).

ТОКОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИИ

Преимущества токовой дифференциальной защиты линий (ДЗЛ) электропередачи перед другими видами защит с абсолютной селективностью известны. Однако реализация этих достоинств в ДЗЛ, выполненных на прежней аппаратной основе, затруднена. Устройства, использующие проводной канал связи, могут обеспечить защиту линий лишь небольшой протяженности. По экономическим соображениям в них нецелесообразно использовать пофазное сравнение токов по концам линии, вследствие чего сравниваемые сигналы формируются посредством специальных фильтров. Указанные ограничения снимаются в современных МП устройствах ДЗЛ [10], обладающих целым рядом достоинств:

1. Будучи нечувствительной к режиму качаний мощности и потере синхронизма в энергосистеме, ДЗЛ **полностью независима от цепей напряжения** (в отличие от дифференциально-фазной защиты (ДФЗ), у которой для отключения трехфазных замыканий используются реле сопротивления, а следовательно, предусмотрены цепи напряжения).

2. Преимуществом современных МП ДЗЛ перед ДФЗ и защитами другого типа является естественный и **надежный выбор поврежденных фаз** (благодаря пофазному сравнению токов) и **высокая чувствительность**. Так МП ДЗЛ имеет возможность обеспечивать более высокую чувствительность защиты при сквозных КЗ в схемах с подключением ВЛ к подстанции с более чем одной группой трансформаторов тока (ТТ). Характеризуясь малой зависимостью от тока нагрузки, ДЗЛ срабатывает при значениях величины переходного сопротивления в месте повреждения до 300 Ом без особой необходимости в компенсации емкостного тока линии.

3. Интеллектуальные МП ДЗЛ могут легко переключаться на резервный канал при отказе основного канала связи. Тем самым устраняется главная проблема ДЗЛ, присущая устройствам, выполненным на старых технологиях, а именно полная зависимость от канала связи между устройствами.

4. Интеллектуальные МП ДЗЛ характеризуются рядом других технических преимуществ, обеспечиваемых **микропроцессорной технологией и современной цифровой связью**, таких как:

- возможность включения в зону действия защиты силового трансформатора, установленного на линии;
- возможность применения ДЗЛ для защиты многоконцевых линий [10];
- обеспечение правильной работы ДЗЛ при насыщении трансформаторов тока;
- возможность контроля исправности токовых цепей защиты;
- применимость в качестве защиты ВЛ, в ЭЭС, оснащенной нелинейными элементами (FACTS) и др..

Практические исследования показали, что ДЗЛ будет функционировать должным образом даже в случае применения ее для защиты линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией с возможным инвертированием тока.

Современные тенденции выполнения систем защиты линий электропередачи

ВН и СВН характеризуются тем, что оба рассмотренных типа защит линий, ДЗЛ и ДЗ, входят в состав одного МП устройства. Сами системы защит предполагают использование двух таких устройств в качестве Основной № 1 и Основной № 2 защит соответственно. Эти одинаковые устройства подключаются к разным измерительным цепям тока и напряжения, а также к разным цепям оперативного постоянного тока, могут воздействовать на различные электромагниты отключения силовых выключателей или действовать одновременно на все доступные.

Развитие информационной теории релейной защиты открывает новые возможности для дальнейшего совершенствования ДЗ и ДЗЛ в части селективности, чувствительности и быстродействия. Обратим внимание еще на один факт, который пока является аксиомой: при использовании ДЗЛ в качестве защиты абсолютной селективности по обоим концам защищаемой линии должны устанавливаться комплекты защиты одного производителя. Стандарт IEC61850-90-1 («Communication between substations»), готовящийся к изданию, сделает возможным передачу оцифрованных сигналов тока и напряжения между подстанциями, а это означает, что существующие ограничения будут сняты, и по концам ВЛ можно будет использовать защиты различных производителей. Но, разумеется, прежде, чем принять такое решение, нужно будет произвести тщательное тестирование и убедиться в том, что все технические требования выполнены.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА

Дифференциальные защиты трансформаторов (ДЗТ) применяются практически для всех силовых трансформаторов, используемых в системах ВН и СВН. Тем не менее, чувствительность этих защит часто оказывается очень низкой, что повышает риск повреждения трансформатора и затраты на его ремонт. Поэтому ведется постоянный поиск новых дополнительных методов повышения чувствительности и быстродействия ДЗТ.

Внедрение микропроцессорной техники сделало возможным многие усовершенствования ДЗТ. Прежде всего, появилась возможность отказаться от промежуточных трансформаторов тока. Постоянный контроль положения регулятора напряжения снял проблему пониженной чувствительности защиты из-за несбалансированного коэффициента трансформации по напряжению у защищаемого трансформатора. Внедрение слежения за изменением частоты (присутствует также в других современных микропроцессорных защитных

Решающим фактором совершенствования релейной защиты и автоматики всегда было и остается развитие самой энергосистемы

функциях) и направленного сравнения расчетных токов обратной последовательности значительно повысило чувствительность защиты к межвитковым КЗ, которые практически нельзя было выявить посредством электромеханической или статической ДЗТ.

Традиционной практикой во многих устройствах защиты трансформаторов, в том числе и на микропроцессорной элементной базе, для целей отстройки от броска намагничивающего тока (БНТ) стало применение способа блокировки по второй гармонике. Однако с изменением характеристик электротехнической стали, применяемой при изготовлении современных трансформаторов, содержание второй гармоник в дифференциальном токе уменьшилось, что привело к снижению технического совершенства защит.

Использование микропроцессорной элементной базы позволило реализовать ряд новых алгоритмов, использующих дополнительные критерии для отстройки от БНТ (например, фазовое соотношение между током основной и второй гармоник), а также дало толчок к разработке новых алгоритмов, реализовать которые на прежней элементной базе было бы чрезвычайно сложно или невозможно (например, алгоритмы, основанные на применении вейвлет-анализа).

На сегодняшний день практически невозможно представить современную защиту фазорегулирующего трансформатора без МП терминалов. В алгоритме дифференциальной защиты применяется постоянно обновляемая информация о сдвиге фаз и положении регулятора на-

ПРАКТИКА 

пряжения, что обеспечивает высокую чувствительность защиты.

Благодаря вводу в МП устройства дифференциальной защиты нулевой последовательности (REF) полностью исчезла необходимость в дорогих трансформаторах тока, использовавшихся ранее для обеспечения высокоомной REF-защиты. Выполнение дифференциального алгоритма, основанного на прямом измерении тока наряду с направленным сравнением соответствующих токов нулевой последовательности, значительно улучшило ситуацию.

Следует отметить, что объем информации о состоянии силовых трансформаторов, доступной для МП устройств, увеличился. Это делает возможным выполнение различных вспомогательных функций, связанных с предоставлением ценной информации для систем мониторинга и диагностики.

ВЫВОДЫ

Переход на микропроцессорную элементную базу практически снял ограничения, накладываемые на

сложность используемых алгоритмов РЗА. Все большую актуальность приобретает принципиальный вопрос – как оптимально распорядиться имеющимися ресурсами и информационной базой для достижения максимального технического совершенства устройств РЗА.

В последующих публикациях серии «И все-таки цифровая...» предполагается осветить другие вопросы, связанные с применением интеллектуальных МП устройств РЗА, в том числе вопросы надежности систем РЗА. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г.И. Атабеков. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. Москва. Госэнергоиздат, 1957.
2. Arum G. Phadke and James S.Thorp. Computer Relaying for Power Systems. Research Studies Press Ltd, London, 1995.
3. Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, А.О. Павлов, Е.Б. Ефимов, Я. Закончек. Распозна-

ваемость повреждений электропередачи. В трех частях. Электричество 2001 № 2, № 3, № 12.

4. Г. Циглер. Цифровая дистанционная защита. Принципы и применение. Москва, Энергоатомиздат, 2005.

5. Е.Б. Ефимов, Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман. Пат. 2247456 РФ. Способ релейной защиты энергообъекта, Опубл. в БИ № 6, 2005.

6. Э.М. Шнейерсон. Цифровая релейная защита. Москва, Энергоатомиздат, 2007

7. Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман. «Об информационной теории релейной защиты./ Релейщик № 2, 2009.

8. Z. Y. Xu, Z. Q. Du, Q. X. Yang. Key technique problems of protection relays for 1000 kV UHV transmission lines. CIGRE, 2008.

9. А.О. Павлов, Д.С. Васильев. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи // «Энергетик», 2008, № 12. с. 5–7.

10. Г. Циглер. Цифровая дифференциальная защита. Москва. Знак, 2008.

МНЕНИЕ

Дони Н. А.
к.т.н., заведующий отделом перспективных разработок НПП «ЭКРА»

От устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА), независимо от элементной базы, на которой они выполнены, всегда требовалась высокая надежность функционирования, поскольку от правильности ее действия зависит надежность энергообъектов в эксплуатационных и аварийных режимах. В то же время правильность действия РЗ зависит от возможностей и функциональных свойств алгоритмов, заложенных в устройствах. Электромеханические устройства и устройства на статических элементах имеют очень ограниченные возможности по реализации необходимых функций при сохранении высокой надежности. Например, статическое реле защиты электродвигателя фирмы

«STROMBERG» типа SPAJ 3R5 (Финляндия, 1974 г.) содержит более 100 активных и более 200 пассивных компонентов. Его микропроцессорный аналог SPAM 110 (1985 г.) содержит несоизмеримо меньшее количество компонентов, а функциональные возможности шире.

Примером массового применения МП техники начиная с 80-х годов является автомобильная промышленность. Применение МП дало ощутимый скачок в двигателестроении и в дополнительном сервисе. Имеется положительная статистика по надежности автомобильной электроники.

Современная микропроцессорная база характеризуется еще более высокой интеграцией (встроенная периферия) и практически неограничен-

ными вычислительными возможностями, необходимыми для создания современных многофункциональных интеллектуальных устройств РЗА (IED) с высокой надежностью. В таких устройствах наряду с хорошо зарекомендовавшими себя принципами реализуются алгоритмы, которые до недавнего времени являлись сугубо теоретическими.

Опыт применения в России МП РЗА зарубежного и отечественного производства – около 15 лет. Недостатки МП защит, выявленные в результате эксплуатации на первых этапах их применения, разработчиками аппаратуры устранились и в целом опыт использования положительный. В современных IED принимаются специальные меры по обеспечению электромагнитной совместимости в реальных условиях на энергообъектах, что далеко не всегда делалось для устройств прошлых поколений.

В настоящее время ведется частичная реконструкция старых подстанций, полная реконструкция с введением системы АСУ ТП и строительство новых подстанций.

Во всех случаях предлагается аппаратура, выполненная на МП.

В части публикуемой статьи имеются замечания, касающиеся подраздела «Учет распределенных параметров линий ультравысокого напряжения». Следует исключить слова «вторичные параметры» в предложении: «В этом случае вместо первичных параметров линии в уравнения вводятся вторичные параметры – характеристические сопротивления...», поскольку у релейщиков понятия «первичные» и «вторичные» параметры – традиционно связаны с ТТ и ТН. Нет разъяснения, каким образом учет распределенных параметров повышает точность.

Авторы статьи «И все-таки цифровая...», имеющие огромный опыт работы с устройствами РЗА всех поколений, задались благородной целью отобразить новые свойства и преимущества современных МП защит с технической стороны и преодолеть недоверие и боязнь их применения у проектных организаций и эксплуатирующего персонала.

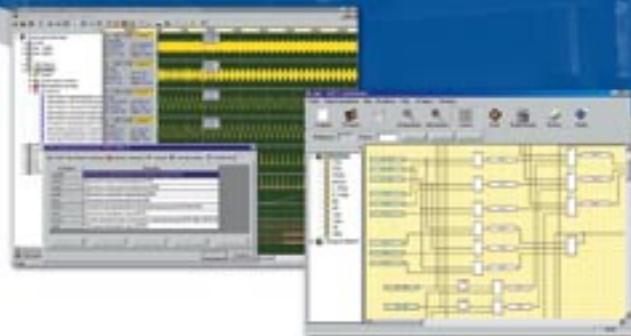
МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ КОМПЛЕКС ЛОКАЛЬНОЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ



МКПА

МКПА разработан для модернизации и замены существующих панелей противоаварийной автоматики высоковольтных линий и подстанций напряжением 110 кВ и выше.

Предназначен для контроля режимов работы электрической сети и реализует функции противоаварийной автоматики (ПА) энергосистем.



МКПА реализует следующие функции:

- Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР);
 - Автоматика частотной разгрузки (АЧР);
 - Автоматика ограничения повышения напряжения (АОПН);
 - Автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН);
 - Устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ);
 - Автоматика разгрузки линии (АРЛ);
 - Автоматика контроля предшествующего режима (КПР);
 - Автоматика сигнализации при витковых замыканиях в трансформаторах (СВЗТ);
 - Автоматика фиксации отключения линии (ФОЛ);
 - Автоматика фиксации отключения блока (ФОБ);
 - Автоматика фиксации включения и отключения автотрансформатора (ФОАТ);
 - Автоматика фиксации тяжести короткого замыкания (ФТКЗ);
 - Дополнительные функции ПА по заданию заказчика.
- Большой выбор типовых решений привязки к объекту на этапе проектирования;
 - Возможность реализации нескольких функций ПА на одном устройстве;
 - Широкий спектр регистрируемых событий;
 - Непрерывная самодиагностика основных узлов;
 - Интегрированная среда разработки алгоритмов противоаварийной автоматики;
 - Возможность интеграции в АСУ ТП объекта по стандартным протоколам OPC DA, IEC 60870-5-104, IEC 61850.

По экспертному заключению Департамента научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России», а также по экспертному заключению Аттестационного научно-технического комитета энергетики: МКПА рекомендован для применения в отрасли в качестве системы локальной противоаварийной автоматики.