

УДК 621.713.13: 621.313

А.П. НИКИФОРОВ (канд.техн.наук), **М.А. СМИРНОВА** (канд.техн.наук, доц.)
Донецкий национальный технический университет
apnikiforov@yandex.ua

СКВОЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В САПР АВТОМАТОВ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ УСТРОЙСТВ РЗиА

Рассматривается возможность совершенствования устройств РЗиА за счет реорганизации автоматов селективности, блокировки, самоконтроля в динамическую экспертную систему. Предлагается способ автоматизированного проектирования экспертных систем, основанный на иерархическом, структурно-лингвистическом методах и организации системы стабилизации нормального режима работы защищаемого объекта по смыслу. Моделирование на известном примере показывает эффективность предлагаемого способа.

Актуальность темы. Специалисты, работающие на предприятиях, констатируют большое количество поврежденных изоляции фаз высоковольтного оборудования в распределительных электрических сетях 6-35 кВ со значительными затратами на ремонт и простой технологических процессов. Направленные защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) имеют большое количество ошибочных срабатываний и низкую чувствительность. Отключения присоединений сети часто носят групповой характер. Как следствие дальнейшего развития повреждения изоляции в сетях с большим током ОЗЗ высоковольтное оборудование отключается защитами от коротких замыканий. Исследования [1] показывают, что можно говорить о несоответствии обобщенной структурной схемы известных селективных устройств "сложности" решаемой ими задачи. В следствие этого введем расширение понятия ОЗЗ до однофазного дефекта изоляции (ОДИ), а селективные устройства – до устройств селективного поиска (СП) поврежденного участка контура нулевой последовательности сети (КНПС). Становится очевидной задача устранения неустойчивой и неэффективной работы устройств СП.

В [2] показано, что абсолютный подход к обработке информационных составляющих переходных процессов (ПП) в сети приводит к формированию слишком простых моделей таких важных элементов, как причина повреждений КНПС, всей цепочки устройств защиты сети. Понятия эффективности и устойчивости применимы также и для других задач релейной защиты и автоматики (РЗиА). Поэтому поставленную задачу предлагается решать в общем виде [2], заменяя КНПС на объект управления и защиты (ОУЗ). Под устойчивостью работы устройств РЗиА будем понимать возможность возвращения ОУЗ в исходное состояние за наименьшее время при любых отклонениях от заданного нормального режима работы ОУЗ. Таким образом, роль устройств РЗиА сводится к контролю отклонения ОУЗ от смысловой ситуации "Нормальный режим работы". Дополнительно задача совершенствования устройств включает реализацию функции самоконтроля и частичной диагностики под напряжением, обеспечения качества электроснабжения потребителей и эффективной работы ОУЗ в условиях его сокращающихся остаточных ресурсов.

Обоснование необходимости задействования экспертной системы в устройствах РЗиА. В качестве примера совершенствования устройств РЗиА будем рассматривать устройства СП и централизованного СП. Источником селективной информации для входных координат устройств СП (рис. 1) являются фильтры нулевой последовательности Z_{i0} , $Z_{i\phi}$ всего высоковольтного оборудования гальванически связанной распределительной сети. Посторонняя информация связана с технологическими процессами I_T в сети и у потребителя, а также с искажениями I_{Γ} на входах устройств СП. Амплитудно-частотно-временные параметры сигналов посторонней информации находятся в том же диапазоне изменений, что и селективная информация об ОДИ, но имеют не регулярное, хотя и повторяющееся смысловое многообразие. Вследствие этого количество селективной информации на входах устройств СП оказывается недостаточным для надежного определения поврежденного участка КНПС [1, 3]. Возникает смысловая ситуация "Нечеткое определение". Смысловая ситуация "Нечеткое определение" возникает также и в случаях неустойчивого развития ОДИ.

Исследования, выполненные в работах [1, 2], показывают, что повышение устойчивости известных устройств РЗиА (в том числе устройств СП, централизованного СП, терминалов РЗиА) идет в направлении увеличения правил P селективности и блокировки. При совершенствовании элементной базы микроконтроллерных (МК) устройств с графическими интерактивными дисплеями препятствия для увеличения правил P сокращаются. МК не только позволяют реализовать необходимое количество правил P , но и своим внутренним устройством (работа операционной системы RTW и др.) задают такое исполнение устройств для широкого круга задач РЗиА. Это приводит к более четкой организации обработки информационных составляющих ПП на разных иерархических уровнях получения результата прежде всего в самих устройствах РЗиА и привлечению соответствующих методов [2, 3] оперирования смысловыми информационными составляющими. Предварительный анализ и моделирование [2] показывают, что при наличии в ПП ОУЗ ситуации "Нечеткое определение" автоматы обработки информации и принятия решения правильнее преобразовать в экспертную систему (ЭКС), которая может быть реализована на выбранной платформе МК. То же относится к "простым" устройствам РЗиА.

© Никифоров А.П., Смирнова М.А., 2011

Обращаясь к опыту, наработанному в области ЭкС, находим подтверждение этому. Так, например, в [4] делается вывод, что ЭкС эффективны в практических "экспертных" областях, где важен эмпирический опыт специалистов. ЭкС характеризуется наличием следующих признаков: а) контролирует не столько физическую природу ПП в ОУЗ, сколько механизм мышления человека относительно решения задачи стабилизации нормального режима работы ОУЗ; б) ЭкС формирует диагностические сообщения и рекомендации.

ЭкС позволяет оперативно решать существенную часть задач, связанных с принятием решений. К ним относятся: анализ состояния ОУЗ и выявление ненормальных ситуаций и диагностирование причин их появления; представление текущего состояния ОУЗ, временных и параметрических графиков текущей или архивной информации; представление инструкций по эксплуатации; ведение оперативных архивов; помощь при пошаговом программно-логическом управлении ОУЗ.

Дополнительные функции ЭкС (диагностические сообщения и визуальный контроль состояния КНПС) позволяют: а) повысить качество принимаемых решений по управлению работой оборудования сети, самоконтроль и диагностику работы гальванически связанного высоковольтного оборудования под напряжением; б) оценить показатели и эффективность работы устройств системы автоматической стабилизации нормального режима (АСНОР); в) эффективно настроить и контролировать характеристики устройств системы для текущей и долгосрочной перспектив.

Возможна следующая функциональная структура ЭкС: интерактивный интерфейс; блок извлечения знаний; блок тестирования знаний; базы знаний и базы данных; блок дедуктивного вывода решений; блок индуктивного обобщения знаний; блок образного представления; блок диалогового взаимодействия с пользователями.

В самых "простых" конструктивных реализациях устройств РЗиА могут задействоваться некоторые функции ЭкС (их упрощения) при возможности передачи подготовленной ими информации на более высокий иерархический уровень ЭкС.

Синтез структурной схемы ЭкС. Построение системы АСНОР основано на работе оборудования и устройств в условиях помеховых ситуаций и наличия смысловой ситуации "Нечеткое определение". Для сохранения работоспособности системы в помеховых ситуациях выполняется замена информационного обеспечения системы с параметрического на структурно-смысловое. Таким образом, система АСНОР становится, прежде всего, информационной системой управления. В работах [1, 2] приведен способ формирования системы АСНОР КНПС структурно-информационным методом. В [3] показано, что поток информационных составляющих преобразуется морфологическим, синтаксическим и семантическим иерархическими уровнями, которые реализуются соответственно синтаксическим (СинА) и семантическим (СемА) автоматами. Здесь, обобщая полученные результаты на более широкий круг задач, разрабатываются способы синтеза СемА динамической ЭкС системы АСНОР ОУЗ.

Согласно «Теореме о наличии смыслового сигнала в устройствах РЗиА» [5] выполняется сравнение смыслового сигнала $S(t)$, формируемого каждым устройством, с пороговым значением «Нормальный режим» (рис.1). Получаем систему АСНОР ОУЗ с общей смысловой ошибкой стабилизации ϵ . В динамической ЭкС выполняется сравнение величины $\epsilon(t)$ с рядом пороговых областей. Изменение сигнала $S(t)$ пропорционально такому изменению смысловых ситуаций в ОУЗ, каким бы его представлял оператор, если бы управлял ОУЗ в ручном режиме. Изменение величины смыслового сигнала $S(t)$ находится в пределах (0-100)%, характеризует суть событий, которые происходят в ОУЗ и отражаются сигналами входных координат $I_{ф}$, $Z_{ио}$, $Z_{ю}$. Среди характерных свойств смыслового сигнала $S(t)$ можно выделить наличие эффективного сжатия параметрической информации (в 1000 раз), представление любой сложной смысловой ситуации, простота его задействования для задач анализа, синтеза и построения простых и иерархических устройств РЗиА.

Формирование сигнала $S(t)$ выполняется непрерывно в нормальном и аварийном режимах работы ОУЗ.

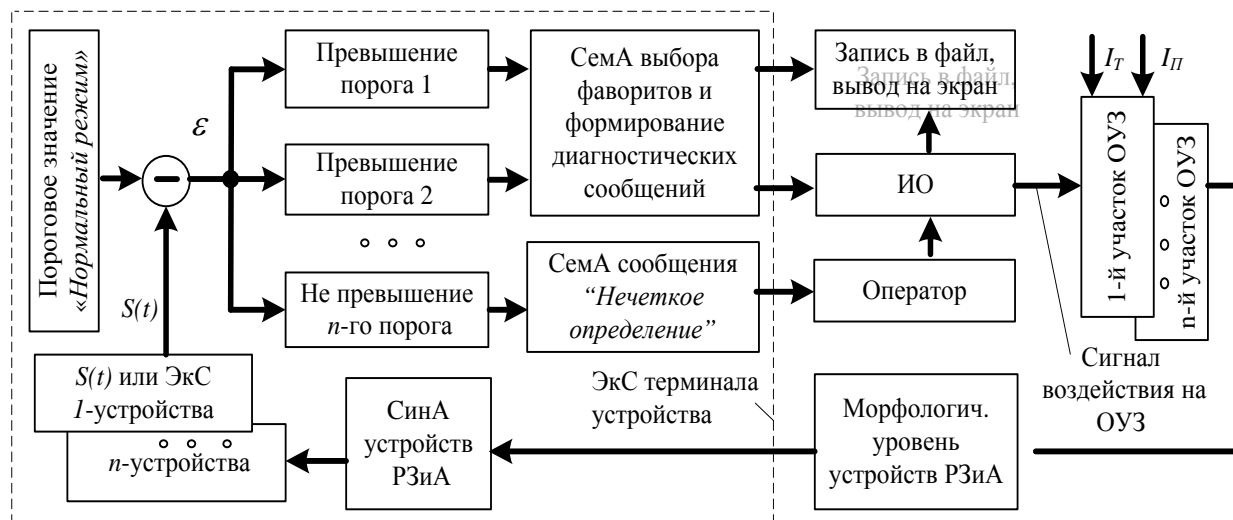


Рисунок 1 - Структурная схема динамической ЭкС устройств РЗиА и терминала ОУЗ

Разработка системы АСНОР привела к новому построению устройств СП, а также привлечению устройств автокомпенсации токов ОЗЗ и аварийной регистрации для реализации системы поиска неисправности ОУЗ под напряжением. Центральным элементом системы АСНОР становится "сканер-анализатор", конструктивно расположенный в новом типе терминала РЗиА "Т-КНПС".

Терминал системы АСНОР КНПС (рис. 1, 2) выполняет анализ данных, непрерывно поставляемых информационными датчиками устройств, входящих в систему. Терминал определяет поврежденный участок ОУЗ на основе абсолютного и относительного критериев сравнения. По абсолютному критерию контролируется величина смысловых сигналов $S_{СП}(t)$. По относительному критерию - отсутствие совпадения нескольких сигналов $S_{СП}(t)$, а также принимается решение об отключении поврежденного участка ОУЗ в случае определения смысловой ситуации "Нечеткое определение". При качественном развитии ПП в ОУЗ, когда отсутствуют I_T и I_D , сигнал $\varepsilon(t)$ попадает в первую, самую значимую, из пороговых областей (рис. 1). Пороги также показывают достоверность определения поврежденного участка. Автоматы Сина и СемА ЭкС с помощью дополнительных относительных правил $P_{Отн}$ проверяют отсутствие возможности неправильного принятия решения. Автоматически выдается сигнал воздействия на ОУЗ, например, отключается участок ОУЗ. В случае невозможности принятия правильного решения (сложный случай развития ПП или искажения входных сигналов устройств другими составляющими) задействуются правила $P_{Доп}$ доопределения Сина для продолжения определения и уточнения принимаемого решения. В случае непревышения порога "Нечеткое определение" задействуется СемА, который формирует правилами $P_{Диаг}$ диагностическое сообщение о рекомендуемых действиях оперативному персоналу для устранения этой ситуации. Соответствующие диагностические сообщения также формируются во всех случаях работы ЭкС.

В терминале Т-КНПС (рис. 1) элементы Сина и СемА конструктивно располагаются на разных иерархических уровнях. Первый и второй уровни находятся соответственно в ПЛИС и МК-устройствах системы. Третий уровень находится в терминале.

ЭкС обрабатывает сигналы $S(t)$ согласно схеме (рис.1), отображает результаты на экране графического дисплея интерфейса терминала «Т-КНПС» и направляет в определенное устройство СП сигнал "Срабатывание/несрабатывание СП". Также через файл обмена по запросу устройства СП программа терминала выдает подтверждение сигнала "Срабатывание/несрабатывание СП".

Задачи синтеза и моделирования работы ЭкС. ЭкС предназначена для работы в составе автоматической системы, которая обеспечивает его функционирование на единой информационной модели ОУЗ и интеграцию с другими задачами защиты, управления (АСУ ТП ГЩУ). Целью этой работы является разработка способа синтеза динамических ЭкС для МК устройств, регистраторов и терминалов РЗиА, работающих в режиме реального времени (Real-Time Workshop - RTW).

К способам синтеза динамической ЭкС предъявляется ряд требований: а) простота, наглядность синтеза и освоения способа синтеза ЭкС; б) разработка ЭкС в САПР сквозного проектирования; в) совместная разработка принципиальной схемы устройств, ЭкС, их взаимосвязей в системе АСНОР при подаче на входы устройств презентабельной выборки реальных аварийных высокочастотных (ВЧ) файлов переходных процессов в ОУЗ; г) автоматизированный перевод синтезированной ЭкС в исходный код программного обеспечения МК и ПЛИС устройств и терминала РЗиА; д) малая затратность времени на совершенствование и модификацию ЭкС при последующих возможных адаптациях под требования конкретного ОУЗ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: а) формализация знаний о действии устройств РЗиА; б) составление обобщенного структурного дерева определения поврежденного участка ОУЗ; в) разработка ЭкС устройств СП при повреждении участка ОУЗ; г) разработка ЭкС терминала централизованного СП при ОЗЗ; д) сквозное проектирование устройств с ЭкС в САПР.

Этапы моделирования устройств согласно СЛ-методу: а) разложение сигналов входных координат устройств на структурные информационные составляющие – терминальные символы (ТС) [2]; б) составление и анализ обобщенного дерева определения смысловых ситуаций известных устройств [1], построенного на основе нетерминальных символов (НТС) и правил P их соединения; в) построение обобщенного дерева устойчиво работающего устройства [1]; г) проверка работы обобщенного дерева [1]; д) синтез принципиальной схемы, конструктива устройства.

На рис. 2 показана схема многоуровневой иерархии обработки смысловой информации - морфологический, синтаксический и семантический уровни. Моделирование работы ЭкС системы АСНОР относится к функциональному имитационному динамическому моделированию, то есть получению последовательных во времени реакций контрольных точек системы на сигналы ПП в ОУЗ. Презентабельная выборка сигналов ВЧС ПП, накопленных аварийными регистраторами в реальных, различных по протяженности, конфигурации и назначению распределительных сетях, подается на элементы информационных датчиков морфологического уровня устройств СП (рис. 2). Информационные датчики состоят из цифровых фильтров и пороговых элементов. Дециматоры позволяют уменьшить количество коэффициентов СЧС-, НЧС-КИХ-фильтров и улучшить их динамические показатели. Пороговые выходы ТС информационных датчиков являются входной информацией для Сина каждого из устройств СП.

Сина устройств СП реализуются согласно обобщенному дереву устойчиво работающего устройства СП [1]. Согласно СЛ-методу и унифицированному для системы АСНОР подходу к обработке информационных составляющих "За-Против" каждому ТС, НТС, P присваивается свой весовой коэффициент K , согласно

соответствующего вклада в смысловой сигнал $S(t)$. Sf-диаграмма Сина (рис. 2) в САПР "Matlab" была создана, исходя из обобщенной структурной схемы устройств. Ее можно условно разделить на: а) блоки булевой алгебры, реализующие сравнение входных сигналов; б) блоки контроля появления $3Uo$, $3Io$ и сравнения их по фронту сигналов; в) блоки контроля сигнала ТС "НЧС3U15B".

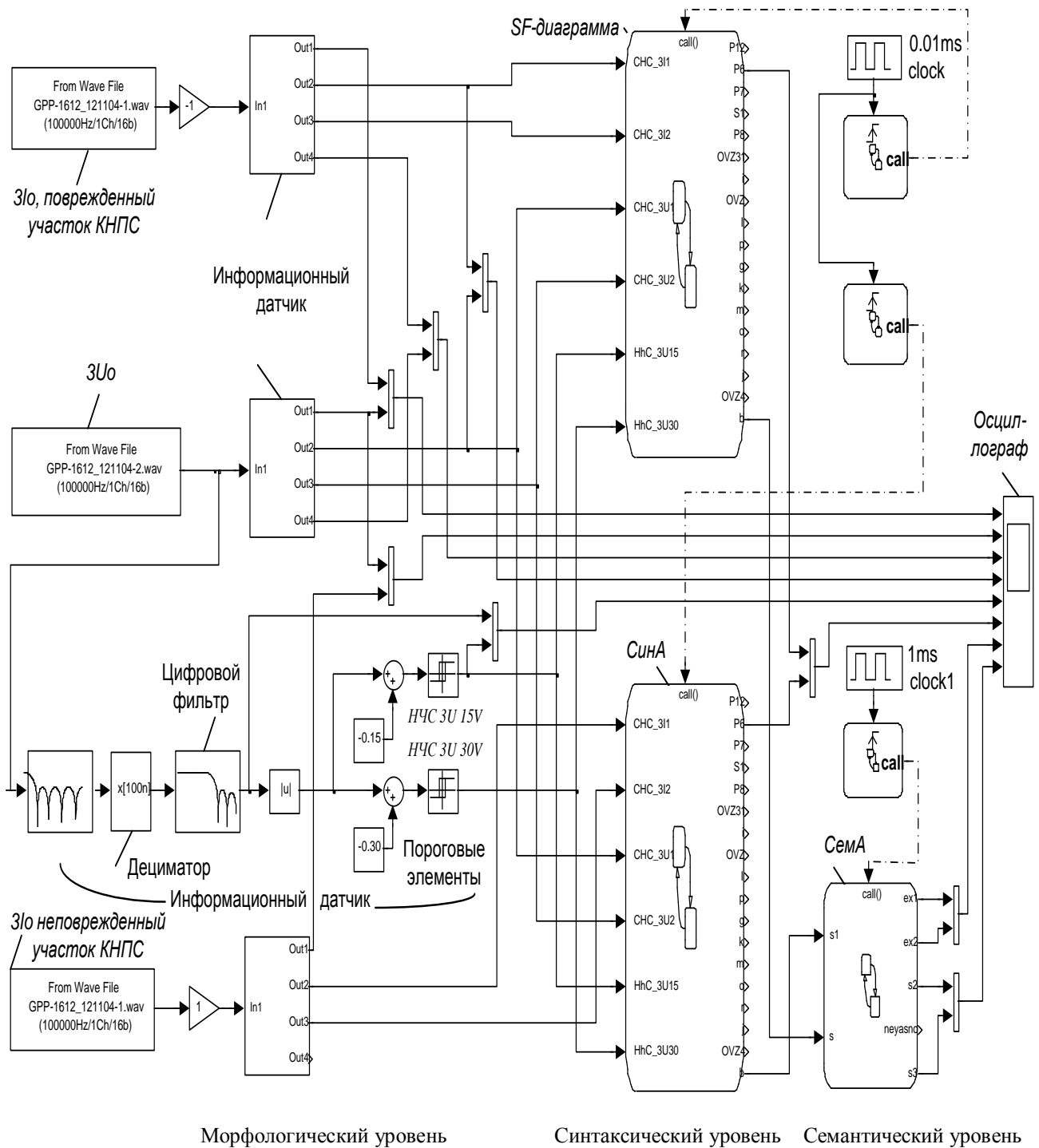


Рисунок 2 - Simulink-модель системы АСНОР КНПС

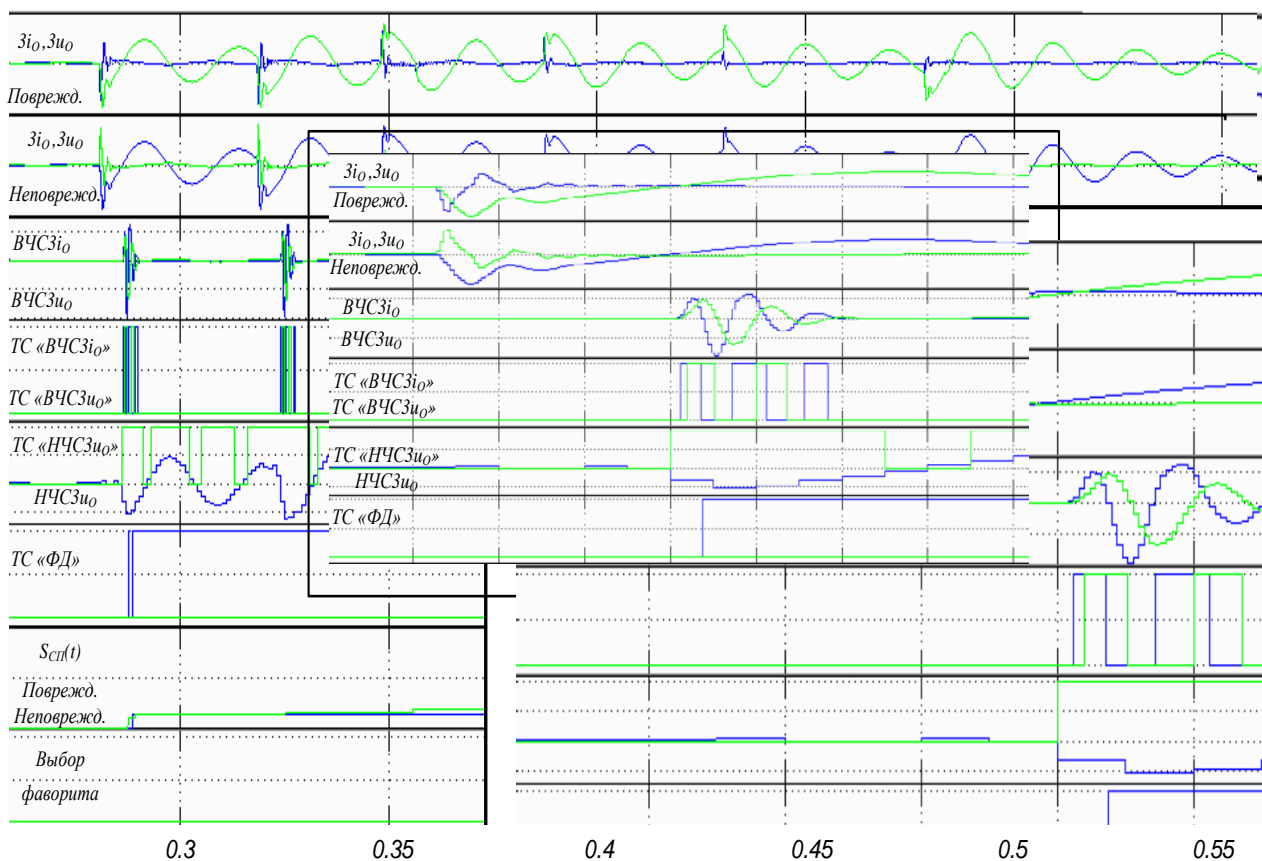
Важной задачей моделирования является оптимизация ЭКС. Одной из задач оптимизации является выбор количества, эффективности и простоты реализации ТС, НТС, а также величин весовых коэффициентов K для правил P , позволяющих получить градации в смысловом сигнале $S(t)$, достаточные для отличия текущей смысловой ситуации от заданной (100%). Другой задачей моделирования является формирование правил P_{OTH} относительных критериев сравнения смысловых сигналов $S(t)$ каждого из участков ОУЗ между собой. Для синтеза

$P_{отн}$ необходимо моделирование устройств СП не только поврежденного и неповрежденного участков ОУЗ, чем по обыкновению ограничивались при синтезе известных устройств СП, а моделирование минимум 2-4-х устройств СП. Ведь задачей моделирования системы АСНОР КНПС есть определение однозначности очереди фаворитов на отключение в том числе и в случаях смысловой ситуации "Нечеткое определение". Третьей задачей оптимизации моделирования является построение СемА принятия конечного решения об отключении фаворитов, принятие решения в случае смысловой ситуации "Нечеткое определение", выбора и заполнение текстовых диагностических сообщений, ведение архива событий.

Для построения ЭКС рассмотрен ряд САПР. Моделирование устройств СП показало, что по совокупности предъявляемых требований большинство этапов СЛ-метода успешно реализуются в САПР "OrCAD". Однако семантический уровень моделируется с затруднениями [1]. В этой части эффективным оказался "Matlab-Simulink-Stateflow". "Stateflow" - событийное моделирование. Объединение САПР в рамках одного рабочего места позволило решить задачу синтеза ЭКС в полной мере. Для построения СемА, СинА отдельных устройств системы АСНОР (устройства СП, регистратор-наблюдатель, автокомпенсатор) и терминала системы "Т-КНПС", а также ЭКС терминала.

Среди полезных инструментов САПР "Matlab-Stateflow" можно выделить возможность графического набора известных логических функций и программных процедур языков высокого уровня (С++, VHDL) с помощью заполнения соответствующих графических шаблонов. Шаблоны автоматически преобразуются в стандартную автоматную граф-модель. Графическое представление позволяет визуальное контролировать структуру синтезируемых автоматов и их работу в динамике, что резко снижает возможность появления ошибок.

Моделирование морфологического уровня. Остановимся более подробно на важной и необходимой части автоматизированного проектирования устройств - синтезе информационных датчиков. С точки зрения структурно-информационного метода это морфологический уровень определения (рис. 2), главным элементом которого является цифровая фильтрация. САПР "Matlab-Simulink" позволяет получить заданные качества цифровых фильтров для синтезируемых устройств. Оптимизация фильтров включает определение минимального количества коэффициентов при допустимом качестве фильтрации, исходя из производительности сигнального МК. В работе [1] приведены результаты моделирования морфологического и синтаксического уровней, полученные в САПР "OrCAD" для аналоговой фильтрации и ШИМ схемной реализации уровней. На рис. 3 показан результат моделирования в САПР "Matlab"



Примечание. Дуговое ОЗЗ. Правильная работа фазового детектора ФД в СинА. Правильная выдача сигналов $S_{СП}(t)$ для поврежденного и неповрежденного участков КНПС. В момент времени $t=0,51$ с принимается решение в СемА об отключении поврежденного участка.

Рисунок 3 – Моделирование работы морфологического уровня устройства СП

информационных датчиков на основе цифровой КИХ-фильтрации. Такой тип фильтров имеет линейную ФЧХ, устойчивую конечную переходную характеристику, что важно при неустойчивом прерывистом развитии ОДИ. Для эффективной работы НЧС-фильтров включены дециматоры (рис. 2), которые уменьшают частоту дискретизации входных сигналов до приемлемого по точности значения. Это позволяет синтезировать КИХ-фильтры с требуемой динамикой собственных ПП, минимальным количеством внутренних коэффициентов и операций перемножения, что необходимо для аппаратной реализации на МК. На рис. 3 показаны осциллограммы моделирования КИХ-фильтров информационных датчиков ТС.

С помощью "Matlab" можно оперативно переводить элементы морфологического уровня в рабочую программу на языке Си для записи в МК-устройства. Эта возможность позволяет в дальнейшем совершенствовать и адаптировать работу устройств РЗиА. Сина конструктивно реализуется на основе ПЛИС, которая позволяет выполнить требования, связанные с быстродействием параллельной работы каналов обработки информации и работе с логическими функциями.

Выводы.

1. Для повышения устойчивости работы устройств РЗиА предлагается переорганизовать их логические части в экспертные системы для повышения "живучести" устройств при различных сложных смысловых ситуациях в объекте управления и защиты. Причиной ограничения повышения устойчивости устройств РЗиА является недостаточность количества смысловой информации при развитии ПП в ОУЗ для выделения селективных и блокирующих информационных составляющих. Повышение устойчивости работы МК устройств эффективно выполняется структурно-информационным методом в рамках системы АСНОР.

2. Показана возможность эффективной автоматизированной разработки ЭкС специально для МК, ПЛИС устройств РЗиА, в том числе и для "простых" устройств. Предлагается разрабатывать такие экспертные системы в САПР "OrCAD", "Matlab-Simulink-Stateflow".

3. Моделирование способов повышения устойчивости показывает, что дальнейшее повышение устойчивости работы устройств СП следует выполнять в рамках более высокого иерархического уровня централизованного СП. Этот уровень реализуется в динамической ЭкС терминала "Т-КНПС-1" системы АСНОР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров А. П. Выбор между "простыми" и "совершенными" конструктивными решениями, которые формируют объект управления и защиты, структурно-лингвистическим методом / А. П. Никифоров // Научные работы Кременчугского национального технического университета. Серия: Электроэнергетика и электротехника. - 2009. - Вып. 8 (140). - С. 236-240.

2. Никифоров А. П. Применение структурно-лингвистического метода для задач, связанных с исследованиями, усовершенствованием и преподаванием релейной защиты / А. П. Никифоров // Зб. науч. раб. ДонНТУ. Серия: Электроэнергетика и электротехника. - 2008. - Вып. 8(140).

3. Джарратано Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирование: 4-е изд.; пер. с англ. / Дж. Джарратано, Г. Райли. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. - 1152 с.

4. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. - М.: Мир, 1978. - 411 с.

5. Никифоров А. П. Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты / А. П. Никифоров // Научно-производственный журнал «Техническая электродинамика» и Материалы 10 научно-технической конференции «Проблемы современной электротехники 2010». Ч. 2. НАН Украины. Институт электродинамики - К., 2010. - С. 73-76.

Надійшла до редколегії 01.11.2010

Рецензент: І.П.Заболотний

А.П. НИКИФОРОВ, М.О. СМІРНОВА
Донецький національний технічний університет

A. NIKIFOROV, M. SMIRNOVA
Donetsk National Technical University

Крізне проектування в САПР семантичних автоматів експертних систем пристроїв РЗА. Розглядається можливість вдосконалення пристроїв РЗА за рахунок переорганізації автоматів селективності, блокування, самоконтролю в динамічну експертну систему. Пропонується спосіб автоматизованого проектування експертних систем, який базується на ієрархічному, структурно-лінгвістичному методах та організації системи стабілізації нормального режиму роботи об'єкта, що захищається. Моделювання на відомому прикладі показує ефективність запропонованого способу.

Through Design of Semantic Automats of Expert Systems of Relay Protection and Automatic Devices in CAD. The possibility of improving relay protection and automatic devices by reconstructing the automats of selectivity, blocking, self-control into a dynamic expert system is considered. We propose a method of automated design of expert systems based on hierarchical, structural linguistic methods and organizations of normal mode stabilization system of a protected object. Modeling of well-known example shows the effectiveness of the proposed method.