

УДК 621.713.13: 621.313

А.П. НИКИФОРОВ (канд. техн. наук, доц.)
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
apnikiforov@yandex.ua

АУТСОРСИНГ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСЕТЯХ SMART-GRID. ЧАСТЬ 1. ТЕОРИЯ

Решаются задачи организации рабочего места для аутсорсингового контроля службы релейной защиты и управления. Решения основаны на обеспечении устойчивого совместного моделирования объектов управления с их устройствами релейной защиты и управления. Рассматривается задача распознавания, хранения и передачи на расстояние смысла переходных процессов во множестве совместно работающих участков сети smart-grid. Актуальность задач сохраняется в виду непрерывного совершенствования элементной базы, программного обеспечения, технологического оборудования и требований к построению электроэнергетических сетей. Особенно это критично, когда алгоритмы настраиваемых или совершенствуемых устройств предназначены для списывания в программируемые микросхемы. Предложения основаны на решении задач моделирования устройств реального времени, структурном распознавании образов, разделении движений по частотам и по смыслу. Показывается, что к неустойчивости моделирования приводят — большое количество отсчетов входной, промежуточной, накапливаемой и представительной информации. Достигается сокращение времени единичного расчета при сохранении устойчивости моделирования. Решаются задачи «Информационного горла» для энергетических сетей smart-grid.

Ключевые слова – smart-grid, диагностика под напряжением, мониторинг, переходные процессы, релейная защита, автоматика, структурно-информационный метод, структурно-лингвистический метод, технический интеллект, детектирование, моделирование реального времени, аутсорсинг

Постановка проблемы. Стремление хозяйствующих субъектов к минимизации затрат на эксплуатацию электросетей приводит к новому этапу автоматизации вплоть до полной автоматической роботы источников

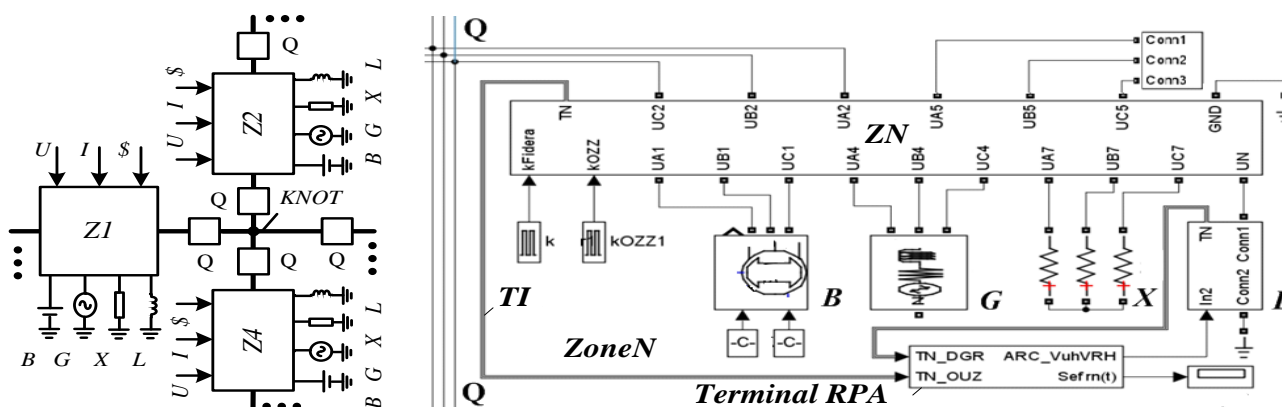


Рисунок 1 – Унифицированная структура сети smart-grid

Рисунок 2 – Структурная схема одного участка ZN сети smart-grid с устройствами PЗиА реального времени

генерации G , накопления B , потребления X электроэнергии, а также элементов поддержания работоспособности сети L (рис. 1). Естественно, это справедливо для технологических процессов, для которых возможен такой режим работы. В сетях smart-grid это возможно в силу применения соответствующих технологий [3–4]. В сетях традиционного построения речь ведется о реструктуризации обслуживающих служб электростанций и тенденции их сокращения вплоть до реализации оперативно-хозяйственного режима работы. Для этого требуются специальные алгоритмы и технологии. Среди таких технологий можно выделить аутсорсинг типичных услуг [1–4]. Аутсорсинг получил широкое распространение, поэтому рассмотрим возможность его применение в энергетике. Интенсивность развития современных требований и стандартов приводит к необходимости соответствия уровня квалификации в каждой специализированной деятельности. Эта задача решалась совместной работой разных служб на одном предприятии. С повышением надежности работы оборудования и

технологических процессов происходит минимизация затрат на поддержание работы генерирующих и сетевых предприятий. В таком случае службы могут быть организованы в специализированные аутсорсинговые предприятия. Одной из таких служб может быть служба релейной защиты и автоматики (РЗА).

Контролируемая информация о состоянии сети (рис. 1) будет передаваться на РС хозяйствующих субъектов или на более высокий уровень автоматизированного управления. Условия представления необходимого и достаточного минимума такой информации можно выполнить на основе получения информации о сути переходных процессов (ПП) в сети. Оперирование смысловыми информационными потоками позволяет предложить способ построения сетей классов напряжения U до 1 кВ, 6–35 кВ, более 110 исходя из конечного смыслового результата — уверенности в эффективности работы сети. Уверенность можно выразить через обобщенный смысловой критерий работы контролируемого оборудования — ‘Не произошло ли ухудшение работы оборудования?’. Это критерий относительного действия. Поэтому общая цель статьи состоит в обеспечении сквозного конструирования устройств РЗА для реализации смыслового критерия работы и на его основе возможности организации аутсорсинга службы РЗА.

К настоящему времени известны задачи построения сетей smart-grid — 1. Управление генерацией, накоплением и потреблением электроэнергии; 2. Оптимизация режимов работы сетей; 3. Мониторинг, самодиагностика оборудования ‘Под напряжением’; 4. Системы передачи данных между электроэнергетическими объектами; 5. Совершенствование устройств РЗА согласно принципам smart-grid. Задачи №3–4 smart-grid были известны при построении традиционных сетей, но их решения оказывались громоздкими. В рамках аутсорсинга задачи могут быть решены более лаконично.

Будем рассматривать гальванически связанные элементы сети в качестве объекта управления и защиты (ОУЗ). В энергетике ОУЗ характеризуется нерасчленяемостью, распределенностью параметров элементов и оборудования, многообразием происходящих внешних и внутренних процессов в различных режимах работы ОУЗ [1–5]. Далее в статье рассмотрим разработку алгоритмов устройств РЗА в системах автоматизированного проектирования (САПР) для решения перечисленных задач.

Анализ последних исследований и публикаций. Под аутсорсингом понимается передача производственных функций компании, специализирующейся в области задач, выполняющей дистанционный контроль и сопровождение своей техники, выявляющее неправильную работу устройств или неэффективную работу ОУЗ [1–4]. Это отличается от деятельности внедренческого предприятия, выполняющего сервис разовым, эпизодическим образом. Заказчики платят не за владение, а за аренду информационного обеспечения сетей, ПО, САПР, технических средств, фрагментов инфраструктуры, использование их через веб-интерфейс и др.

Выгоды для хозяйствующих субъектов. На надежно работающем оборудовании сетей, при новейших технологиях аварийные ситуации возникают не часто, и персонал занят другой деятельностью. Ряд известных функций технических служб выполняются реже. Поддерживать уровень таких работ на одном предприятии затруднительно. Вынесенный контроль позволит сосредоточиться на обслуживании и эксплуатации оборудования сетей, получать качественный контроль и сопровождение работающих устройств сети, реструктурировать стоимость обслуживания, выполнять мобильную оценку ремонта (виджет). Следовательно, сетям экономичнее воспользоваться периодической (или по необходимости) работой высококвалифицированных специалистов аутсорсингового предприятия в конкретной области задач. При разборе произошедших аварийных ситуаций в сети — получать доказательный документированный отчет о событии и мерах его профилактики. Таким образом, заказчик несет сравнительно небольшие периодические затраты, и ему не требуется инвестировать средства в приобретение систем или устройств. Взаимная ответственность сторон за выполнение обязательств оговаривается заранее.

Выгоды для аутсорсингового (внедренческого) предприятия. Контроль работы внедренных устройств в реальном масштабе времени. Поддержка бесперебойной работы отдельных систем и инфраструктуры на основе длительного контракта. Настройка и обновление аппаратной части оборудования, программного обеспечения устройств РЗА, оперативный ремонт, замена, профилактика отказа и износа оборудования, резервное копирование информации, консультирование и обучение персонала. Повышение своей квалификации и опыта внедрения, эксплуатации и надежности работы ОУЗ и устройств РЗА.

Рассмотрим аутсорсинг задачи РЗА. Так предприятие по локальной сети получает аварийные файлы от многих сетей или ОУЗ и выполняет мониторинг работы устройств РЗА. К задачам мониторинга относятся — контроль правильности срабатывания устройств РЗА, устойчивость их работы, самоконтроль устройств и через них контроль ОУЗ и оборудования ‘Под напряжением’, разбор аварий, профилактика работы, периодическая экспертная оценка состояния сети и оборудования на конкретный момент времени, экспертная оценка причин появления аварий, с выяснением причин, фиксацией последствий. Результатами становятся выдача рекомендаций, обобщение и накопление опыта эксплуатации, сравнительный анализ ОУЗ и выдача общих рекомендаций по повышению качества работ ОУЗ. Для выполнения таких работ требуется необходимое время для получения результатов. Для аутсорсингового предприятия важен объем получаемой информации от многих предприятий с целью сравнительного анализа информации и окупаемости затрат. Это позволит строить качественные модели сети, ОУЗ, устройств РЗА и проводить их совершенствование, устранять старые проблемы неустойчивости работы устройств, сети и др.

Решать задачи, связанные с передачей, хранением и осмыслением информации можно на основе моделирования в САПР [5–14]. Аутсорсинговое предприятие возвращает хозяйствующему субъекту результат в виде отчета с протоколами состояния сети и работе устройств РЗА на конкретный момент времени. Хозяйствующие субъекты могут делать выводы об эффективности работы своей сети, затратах и о планировании дальнейшего развития сети.

Постановка задач, решаемых в статье. Дистанционный контроль ОУЗ выполняется исходя из информации, поставляемой регистраторами аварийных процессов. Регистраторы могут быть общесетевыми, встроенными в устройства РЗА или организованными в устройствах РЗА специально для задач аутсорсинга. Протоколы проверки работоспособности, формирование отчета по анализу аварийных файлов автоматизируются или доводятся до автоматизации. Результаты оцениваются специалистами по конкретной теме РЗА. Оценка может выполняться дистанционно методом экспертной оценки. Задача аутсорсингово предприятия — организовать процесс, подобрать специалистов в областях знаний по конкретному устройству. Организовать такой вид деятельности поможет рабочее место в САПР ‘*Аутсорсинг РЗА*’. А также известные программы для организации общего рабочего стола между удаленными специалистами.

В САПР реализуется модель сети, ОУЗ, устройств РЗА [2–3]. Модели приближаются к реальным рядом действий — измерением параметров сети в реальном масштабе или периодически, реальными моделями элементов устройств РЗА и др. Возникающие вопросы при аутсорсинге службы РЗА решаются на таких моделях для каждой сети или участку сети каждого хозяйствующего субъекта.

Анализ способов устранения причин неустойчивой работы устройств РЗА. Причины неустойчивости можно выразить следующими аналогиями. ОУЗ порождает связанные воедино информационные потоки, состоящие из ряда событий. Их можно представить текстовой последовательностью. Таким образом, работа алгоритмов устройств РЗА является распознаванием смысла динамической последовательности событий в ОУЗ. Под распознаванием будем понимать детектирование смысловой информации из сигналов ПП. Известно, что алгоритм состоит из автомата (А) с известными состояниями и правилами *P* переходов по определенным условиям (рис. 3). Различаются альтернативные действия алгоритмов — селективность и блокировка. Помеховые ПП сравнимы с отмычками, постоянно взламывающими замки селективных автоматов устройств. Взлом не допускается автоматами блокировки. Также алгоритм можно представить трафаретом с окнами, расположенными в определенных местах (условия переходов). Правила считывания информации для трафарета заранее определены. Накладывая трафарет на последовательности знаков, наблюдатель может прочесть и определить смысл информации. Обозначим каждый такой трафарет смысловой ситуацией *SN*, $N=1, 2, \dots$ возникающей в ОУЗ. Например, *S1* ‘*Нормальный режим*’ (‘*NR*’), *S2* ‘*Не распознаваемая*’ (‘*Not*’), *SN* ‘*Аварийный режим*’ (‘*AR*’), *SN* ‘*Однофазное замыкание*’, *SN* ‘*Короткое замыкание*’, т.д. [2–3].

Из аналогий следует, что неустойчивость алгоритмов распознавания может появляться по следующим причинам — а) Не правильно формируются символы информационными датчиками (морфологический уровень распознавания); б) В окна трафарета попадают сторонние символы, не связанные с работой ОУЗ (синтаксический уровень распознавания); в) Совокупность ошибок не позволяет однозначно распознавать смысл ПП (семантический уровень распознавания); г) Конечный смысл ПП определяется внешним способом по отношению к трафарету (синтаксическому уровню); д) Недостаточное количество трафаретов возникает при недостаточности исходной информации о сигналах ПП в ОУЗ. ‘Сложность’ трафарета должна соответствовать ‘сложности’ решаемой задачи и объему обрабатываемой информации. Несоблюдение этого может приводить к неоднозначности трактовки полученной смысловой информации.

Моделирование в САПР позволит гибко подходить к решению задач smart-grid [5–14]. Известны другие задачи моделирования, например, экономия затрат, устранение опасных режимов, тренажеры, обучение и т.д. Можно отметить, что объем задач для моделирования в САПР всегда ограничивался временем и неустойчивостью расчета [3, 12]. Так выявляются задачи, относящиеся только к процессу моделирования в САПР [3–12]. Время расчета пропорционально тактовой частоте вычислительной системы. Однако ее наращивание вышло на физические ограничения, а количество работающих вычислительных ядер ограничено законом Амдала. Эта ситуация сохраняется несмотря на интенсивное развитие вычислительной техники. Так выявляются задачи (время и устойчивость единичного расчета), относящиеся только к процессу моделирования в САПР.

Обобщение применения методов привело к пониманию их универсальности для задач, оперирующих структурой информации, которая содержится в динамических потоках информации. Далее в статье приводится решение задач моделирования на примере решения задач smart-grid.

Анализ способов решения поставленных задач в САПР. Процесс разбора аварий можно автоматизировать. Для этого соответствующее рабочее место в САПР должно сопрягаться с рабочим местом разработчика устройств РЗА [11–14]. В него включаются модели ОУЗ и устройств РЗА, модель анализа и формирования диагностических сообщений, шаблоны для составления плакатов, альбомов для сравнительного анализа аварийных файлов, базы хранения и систематизации исходных аварийных файлов и результатов их моделирования [3–14]. Покажем, каким образом можно построить рабочее место мониторинга устройств РЗА сетей, на примере одного из наиболее ‘сложных’ ОУЗ — контура нулевой последовательности сети (КНПС).

Построение модели ОУЗ. Специализированное предприятие может отслеживать изменения и развитие ОУЗ по сигналам аварийных файлов. В модель ОУЗ входят источник возмущений, превращая ее в реальную модель ОУЗ, либо сигнал аварийного файла непосредственно подается на модель устройства РЗиА. Выход устройства сравнивается с выходом в аварийном файле. При несоответствии работы устройств и модели ситуация подлежит выяснению причины и принятию соответствующего решения, например, по совершенствованию алгоритма, адаптации его под условия конкретного ОУЗ и так далее. Через устройства РЗиА может выполняться контроль части ОУЗ и его оборудования (исправность и эффективность) и качество технологического процесса, частичные отказы, разбор сложных или старых, редко следующих ситуаций, могущих повлечь усугубление аварий или не позволяющие повышать качество выпускаемой продукции на длительных интервалах времени эксплуатации оборудования.

Далее приводится решение задач моделирования на примере решения задач smart-grid. Обычно решения задач сквозного моделирования подразумевает выполнение анализа, синтеза, конструирования с помощью многократных перерасчетов модели в САПР [3–12]. Выводы делаются на основе сравнения полученным результатам моделирования с вводимыми в модель изменениями параметров или структуры. К элементам моделирования относятся кроме высоковольтного оборудования B, G, X , также терминал РЗиА, измерительные трансформаторы TN , системы поддержания работоспособности сети L 'Под напряжением' на длительных интервалах времени эксплуатации (рис. 1–2).

В модели ОУЗ можно выделить алгоритмы РЗиА (рис. 4), работающие в разных частотных диапазонах сигналов ПП [3–4]. В связи с этим применяется понятие разделение движений по частотам. При условном разделении по частотам будем ориентироваться на восприятие времени оперативным персоналом. Например, для устройств селективной защиты SP — среднечастотные составляющие (СЧС) находятся в полосе 0.3–3 кГц, высокочастотные (ВЧС) — в полосе 2–10 кГц. Для устройств автоматики нормального режима низкочастотные (НЧС) — в полосе 25–50–75 Гц. Для системы стабилизации ситуации SI 'NR' медленные огибающие (envel-НЧС) — секунды–часы. Для контроля конечного результата работы сети инфра медленные НЧС (infra-НЧС) — на интервале суточного цикла (24 часа). Для систем самоконтроля 'Под напряжением' накопительные сверхмедленные (super-НЧС) информационные циклы — неделя, месяц и т.д. В итоге задача моделирования в САПР сводится к отслеживанию совместной работы ВЧС сигналов ПП на интервалах infra-НЧС или super-НЧС. Будем считать моделированием в реальном времени в САПР многократный перерасчет элементов, работающих синхронно с частотой дискретизации f_{DISCR} входных сигналов.

По мере развития проекта проявляются затруднения моделирования — а) Большое время единичного расчета (может доходить до 24 часов); б) Неустойчивость и прекращение расчета; в) Невозможность одновременного отображения необходимого числа точек результата и др. Как следствие, задача оказывается не решаемой или решаемой с упрощениями. Поскольку информация о сути ПП имеет конкретные параметры, ее нужно обрабатывать на основе конкретных алгоритмов, приближенных к реальным устройствам РЗиА. Следовательно, получаем модель системы реального времени. Попытки реализовать в САПР совместное моделирование smart-grid сети с алгоритмами РЗиА реального времени практически не позволяют производить устойчивые расчеты и реализовать сквозное проектирование.

Согласно теоремам [4–5] способом решения задач становится моделирование ОУЗ и устройств РЗиА для всех частотных контуров согласно соответствию $G_{OCP} \approx \sum G_{RPA} = G_{GES}$, а также применение способа разделения движений по смыслу. Для моделирования в САПР можно использовать модели устройств РЗиА реального времени. Тогда, согласно SI-методу [4–11] организуется система автоматической стабилизации нормального режима работы (АСНОР), в которой обмен информацией выполняется на основе смысловых сигналов $S(t)$ (рис. 3). Главным смысловым сигналом оказывается $S_{DISPATCHER}(t)$ (рис. 3). Главным критерием становится критерий относительного действия — устранение отклонения от SI 'Нормальный режим' ('NR'). Формирование информации в системе АСНОР можно представить деревом иерархического подчинения S-детекторов устройств РЗиА и моделей ОУЗ.

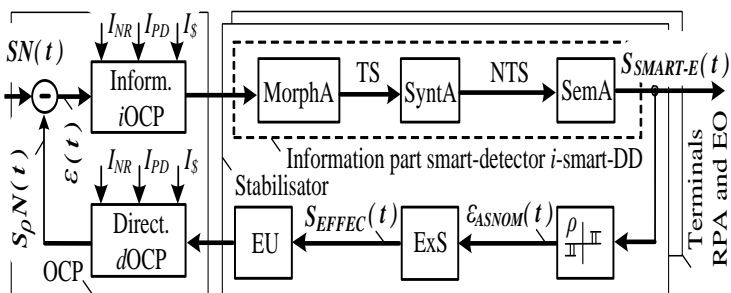


Рисунок 3 – Структурная схема системы АСНОР, преобразованная относительно смысловой ситуации $SN(t)$

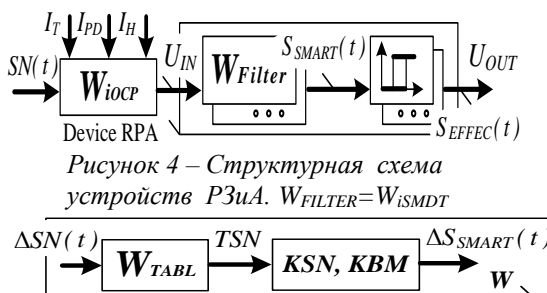


Рисунок 4 – Структурная схема устройств РЗиА. $W_{FILTER} = W_{ISMDT}$

Рисунок 5 – Передаточная функция $W = S_{SMART}(t)/SN(t)$

Далее в статье при преобразованиях, выводах математических моделей будем ориентироваться на графические структурные преобразования согласно ТАУ. С графической модели всегда можно списать формульное представление при необходимой полноте информации. Применяемый метод решения задач smart-grid и моделирования в САПР также порождает цепочку логико-графических объяснений. Поэтому в статье сокращения, аббревиатуры необходимы для строгости и доказательности изложения.

Описание используемых методов. В основе построения рабочего места и решения поставленных задач моделирования находится измерительный инструмент или S-детектор смысла со шкалой уровня изменения смыслового сигнала $S(t)$. Теоретическое обоснование работоспособности смыслового измерителя описано в ряде работ — SI-метод, две теоремы ‘О возможности выделения смыслового сигнала в устройствах РЗиА’ [4] и ‘О единстве структурного описания устройств РЗиА’ [4], способы разделения движений по частотам и по смыслу [4–11], моделирование реального времени устройств РЗиА в САПР [4–17].

SI-метод основан на лингвистическом распознавании образов. Выделяются морфологический (Morph), синтаксический (Synt), семантический (Sem) иерархические уровни (рис. 3). На выходе SemA формируется смысловой сигнал $S_{SMART}(t)$ (1), отражающий изменения смысловой информации в сигналах ПП

$$S_{SMART}(t) = Fix[\beta \times f(\Sigma KSN(t) - \Sigma KBM(t))], \quad \varepsilon_{SMART}(t) = \rho I - S_{SMART}(t), \quad S_{RE}(t) = f(\rho N < \varepsilon_{SMART}(t) < \rho(N+I)), \quad (1)$$

где $N=1, 2, \dots, M=1, 2, \dots, \Sigma$ – сумма всех KSN или KBM , β – масштабирующий коэффициент. Функция Fix описывает работу блока фиксации, который позволяет запомнить на определенное время активные правила PS, PB для накопления значения смыслового сигнала $S_{SMART}(t)$. Функция Fix аналогична работе аварийного регистратора. Активируется при появлении TS , задаваемого в настройках устройства РЗиА. Такой ‘активирующий’ TS обычно известен для каждого ОСР. Диапазон изменения смыслового сигнала $0\% < S(t) < 100\%$ отсчитывается относительно значения 0% или 100% в зависимости от сути решаемой задачи.

Возникновение смысловой ситуации SN (рис. 4–6) проявляется при возникновении такой величины отклонения Δ какой-либо внутренней координаты ОСР, которое приводит к отклонению Δ смыслового сигнала $\Delta S(t)$ на выходе ОСР относительно порогового значения ρI ‘NR’ (рис. 6–10). Для того чтобы сигнал $S_{SMART}(t)$ превысил пороговое значение ρN необходимо определенное соответствие объему, структуре, последовательности, отсутствию ошибок в информации сигналов ПП. Таким образом, пороговое значение ρN выступает контрольной суммой в смысловой информации, поступившей на вход устройств РЗиА. Полагается, что смысл детектируется из огибающих сигналов ПП на выходе РЗиА, которые переносятся сигналами промышленной частоты.

Согласно теореме ‘О единстве ... устройств РЗиА’ все устройства РЗиА можно заменить связкой двух элементов — смыслового фильтра ‘Filtr’ и порогового устройства ρ (рис. 4). В свою очередь смысловой ‘Filtr’ заменяется обобщенной эквивалентной структурной (ОЭС) схемой автомата распознавания смысла ПП в ОУЗ [4–5]. Схема ОЭС получена объединением SyntA известных устройств РЗиА $G_{GES} = \Sigma G_{RPA}$. Устройства РЗиА оказываются распознавателями смысла ПП. Совершенствование алгоритмов и схемы ОЭС будет повышать качество распознавания. Важной задачей распознавания является уменьшение случаев определения смысловой ситуации $S2$ ‘Nor’. Далее будем ориентироваться на возможность описания внутренней структуры ОУЗ, восстанавливая ее по схеме ОЭС устройств РЗиА $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA} = G_{GES}$ (рис. 3–4). Будем рассматривать связку элементов — ОУЗ и устройство РЗиА. Оперирование внутренней структурой ОУЗ позволит приблизиться к решению поставленных в статье задач. Среди известных подходов к описанию структуры ОУЗ можно выделить метод идентификации оборудования электрическими RLC-цепочками [3] и структурно-операторный метод [4–5]. С учетом того, что в САПР имеются готовые библиотеки элементов ОУЗ, наработаны схемы идентификации ОУЗ, то разработка самого проекта ОУЗ в САПР является стандартной задачей.

n	S	ρ	ρ^1 “NM”	ρ^2 “US”	ρ^3	ρ^n “EM”	ρ “TS”	Weight TS
		TS	S1	S2	S3	SN	Stest	kTS, s-step
1	TS S1	1	0	0	0	0	1	min kTS
2	TS S2	0	1	0	0	0	1	min+s
...								
	ΣkTS	min ΣkTS					max ΣkTS	-
	$k\rho = 1 \Sigma kTS$	min k\rho					1	-

Рисунок 6 – Табличная передаточная функция $W_{TABL} = TSN/SN$

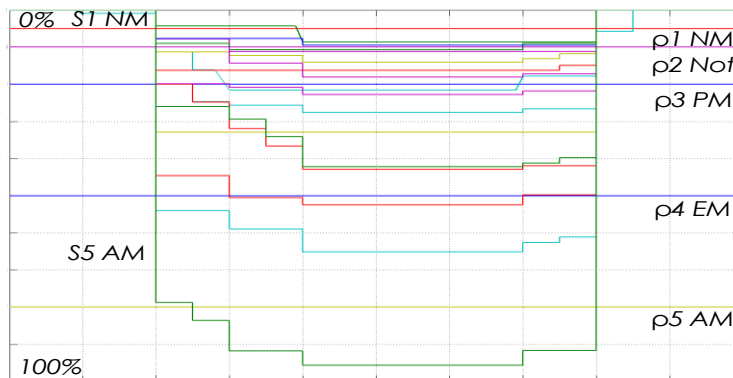


Рисунок 7 – Расчет диаграммы изменений $S(t)$, учитывающий SN и ρN . Диаграмма стилизована под ПП в ОУЗ

Разделение движений по частотам. Под разделением движений по частотам будем понимать выяснение числа и параметров колебательных контуров в ОУЗ (рис. 8). Исходя из полученных описаний структурно-

операторным методом, можно представить структуру дерева определения ОУЗ в виде взаимосвязи или ряда колебательных или инерционных контуров (рис. 11). Охарактеризуем способ разделения движений по частотам с точки зрения SI-метода. Одна схема ОЭС (рис. 8) контролирует работу только одного колебательного контура в структуре ОУЗ (рис. 9). Тенденции развития требований к моделированию в ОУЗ показывают — а) Увеличиваются количество элементов решаемых задач, частота обработки и выделения селективной и блокирующей информации; б) Реализуется сквозное моделирование алгоритмов реального времени; в) Отрабатываются способы представления интуитивно понятной конечной информации на экране графических индикаторов и формирования диагностических сообщений. Такой объем одновременно решаемых задач приводит к ограниченности способа разделения движений по частотам для моделирования в ОУЗ и решения задач smart-grid. Дальнейшее решение задач приводит к задействованию способа разделения движений по смыслу.

Разделение движений по смыслу. Под разделением движений по смыслу будем понимать разделение динамического потока информации на иерархически подчиненные структурные части и оперирование этими частями (рис. 9). Дополнительно выполняется разделение на альтернативные информационные потоки 'За-Против' или 'Селективность-Блокировка'. Способ следует непосредственно из SI-метода. Для способа совершенствование смыслового уровня SemA устройств РЗиА оказывается типичной задачей. При моделировании способ позволяет — а) Сосредоточиться на одном иерархическом уровне, реализованном в отдельной вычислительной части общего проекта. Следовательно, минимизируется количество элементов и время единичного расчета; б) Передать минимум информационных связей между иерархическими уровнями; в) Моделировать формирование графических диагностических сообщений для целей диспетчерского контроля и автоматического восстановления смысла аварийных файлов. Также решается задача автоматического восстановления сути накопленных аварийных файлов, записанных регистраторами в реальных сетях.

Взаимосвязь способов разделения движений. Разделение движений по частотам определяет структуру колебательных движений в ОСР (рис. 8), но смысл этих движений распознается за счет разделения движений по смыслу (рис. 9). Для пояснения взаимосвязи способов можно ввести следующую аналогию. Способ разделения движений по частотам описывает взаимосвязи всех имеющихся элементов схемы. Это описание располагается в пределах одной плоскости. При этом НЧС-процессы занимают ресурсы вычислительной системы, пока идет расчет ВЧС-процессов. Способ разделения движений по смыслу представляет взаимосвязи элементов в схеме не на плоскости, а в пространстве.

Схема разделяется на иерархически подчиненные вычислительные части. Выделяются группы элементов подготавливающих, основных и результирующих. Каждая последующая группа менее активна и не занимает вычислительные ресурсы. Например, в группу подготовительных элементов (MorphA) могут входить источники сигналов, генерирующие и управляющие, измерительных трансформаторов и др.). В группу основных элементов (SyntA) — инерционные цепи оборудования и др. (рис. 2, 9). В группу результирующую (SemA) — элементы, исполнительных органов, оперативных переключений и др. Чем больше элементов в схеме, тем на большее число вычислительных частей ее можно разделить. В результате время единичного расчета сокращается при сохранении устойчивости расчета. Таким образом, помимо моделирования вначале следует некий сторонний алгоритм подготовки проекта к расчету. Такой алгоритм возможно автоматизировать. Главными общесинхронизирующими параметрами при разделении движений выступают известные предварительные установки модели в САПР — время расчета и контрольные точки отображения информации.

В рамках SI-метода можно говорить о способе разделения движений по частотам как о дополнительном предварительном иерархическом уровне способа разделения движений по смыслу. Изменение ΔSN моделирует несущую сигналов промышленной частоты сети и выделяется S-детектором (рис. 4, 9). Порядок применения приведенных выше способов может быть следующим — структурно-операторный, идентификация, разделение движений по частотам для описания ОУЗ, далее SI-метод со структурно-морфологическим, структурно-синтаксическим, структурно-семантическим этапами. Поскольку способы относятся к разделению движений по смыслу, то могут включаться в SI-метод. Далее применим SI-метод для решения задач smart-grid.

Составление схемы ОЭС устройств РЗиА. Контроль сигналов $S(t)$ выполняется на разных иерархических уровнях управления ОУЗ и оборудования и обобщается в АСУ ТП ОУЗ. Если структурная схема устройств РЗиА наблюдаема (рис. 1–4), то структуру ОУЗ можно отнести к ненаблюдаемым объектам. Это позволяет получить общую систему распознавания SN и общую схему ОЭС устройств РЗиА. Для каждой задачи РЗиА формируется схема ОЭС с селективной частью, контролирующей один из колебательных контуров infra-НЧС—ВЧС. Другие колебательные контура для селективной части оказывают блокирующие функции и формируют часть 'Против' в S-детекторе. Схему ОЭС можно кратко описать перечнем — грамматикой G_{RPA}

$$G_{RPA} \rightarrow (TS\ SN, TS\ BM, NTS\ SN, NTS\ BM, PSN, PBM, P_S\ SN, P_S\ BM, P_S\ SBN); \quad (2)$$

Rules of selectivity '3a'	$PSN, N=1, 2, \dots,$	Record example	$PS5 \rightarrow f_x(PS1, PS3)$ или $PS5 \rightarrow f_z(PS1, PS11);$
Blocking rules 'Против'	$PBM, M=1, 2, \dots,$	Record example	$PB12 \rightarrow f_i(PB9, PB15);$
Root rules PS	$P_S\ SN; P_S\ BM; P_S\ SBI,$	Record example	$P_S\ SBI \rightarrow f\&(P_S\ SI, P_S\ BI).$

Главным (центральный) функциональным элементом в схеме ОЭС является синхронный детектор ‘-,+,x’ (PS9), Filter (PS10) [4–5]. Разностный элемент ‘-,+,x’ сравнивает информационный сигнал U_{OUT} с опорным сигналом U_{IN} схемы ОУЗ (рис. 8). Схему ОЭС можно представить КИХ-фильтром (КИХ — конечная импульсная характеристика). Это основывается на работе автомата SyntA последовательно от исходного положения (TS) до текущего (NTS), далее символа S (рис. 9). Коэффициенты КИХ-фильтра можно определить экспертным методом с наложением оконных функций. Таким образом, КИХ-фильтр устройств РЗиА выделяет развивающуюся во времени смысловую ситуацию SN в ОУЗ и является смысловым S-фильтром (рис. 4, 9). Исходя из понятия управляемости ОУЗ, следует, что грамматика G_{RPA} (2) отражает работу структурной схемы ОСР в динамике. Чем более полный контроль выполняют алгоритмы устройств РРА, тем более полно возможно восстановить структурную модель ОУЗ по $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA} = G_{GES}$ на рис. 4, 9.

Составление схемы ОЭС для ОУЗ. Структурное дерево формирования $SN \rightarrow TS$ для ОУЗ задействует внутренние координаты и контура ОУЗ, ненаблюдаемые схемами ОЭС устройств РРА (рис. 8). Дерево будем строить исходя из трех основ — а) Структурно-операторное описание. Составим описания ОУЗ и

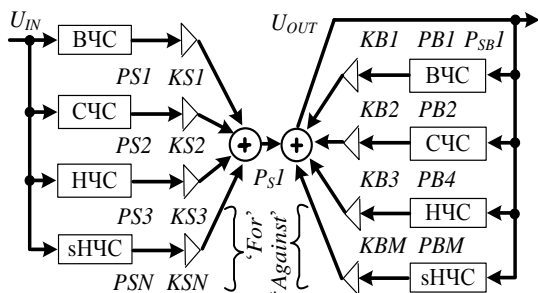


Рисунок 8 – Структурно-операционная модель ОУЗ в виде структуры БИХ-фильтра. Иллюстрация разделения движений по частоте

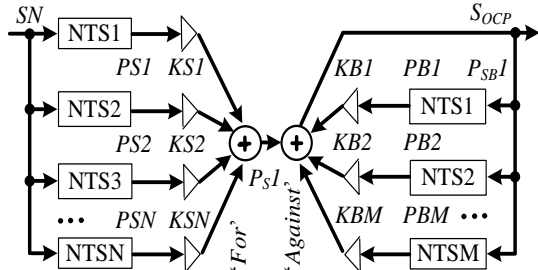


Рисунок 10 – Структурная модель ОУЗ в виде классической схемы БИХ-фильтра. Иллюстрация разделения движений по смыслу

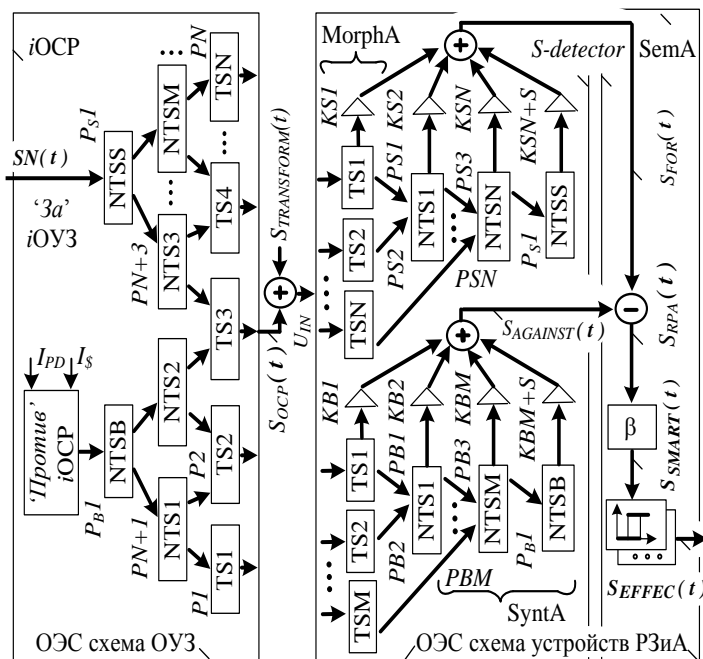


Рисунок 9 – Структурные схемы ОЭС для ОУЗ и устройства РЗиА в виде КИХ-фильтра с однонаправленным потоком информации. Иллюстрация разделения движений по смыслу

высоковольтного оборудования исходя из рис. 2. Информационные потоки порождаются инерционными полями и описываются операторами $D=d/dt$, $1/D=S$. Входным воздействием схемы является координата сигнала возмущения $SN(t)$ для ОУЗ (рис. 8). Разделим элементы описания на альтернативные потоки ‘За’, ‘Против’ по отношению к формированию выхода ОУЗ (рис. 3);

б) *Разделение движений по частотам.* Преобразуем структурно-операторное описание ОУЗ к каноническому виду цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) согласно правилам структурных преобразований (рис. 9). Такая возможность следует из теории фильтрации, согласно которой любую инерционную модель можно описать фильтром БИХ или КИХ. Будем ориентироваться на ‘центральные’ элементы ‘-,+,x’ (PS9–PS10) дерева ОЭС устройств РЗиА на рис. 8. В группу ‘Против’ входят потоки, инициируемые выходом U_{OUT} и приходящие со знаком минус на центральный внутренний сумматор. Элементы группы ‘Против’ относятся к блоку Filter на основании того, что Filter пропускает только селективный сигнал;

в) *Взаимное отображение $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA} = G_{GES}$.* Модель ОУЗ строится исходя из связки $W_{iOCP} \rightarrow$ ОЭС устройств РЗиА на рис. 5, 10 относительно внутреннего сумматора. В схеме БИХ-фильтра на рис. 11 каждому правилу P назначается весовой коэффициент KN, KM , ориентируясь на G_{RPA} (рис. 8, 10). В структуре цифровых фильтров инерция задается дискретно структурным автоматом SyntA, а динамическое поведение фильтров (собственный ПП) зависит от информации, получаемой от входа и от выхода схемы ОУЗ (рис. 11).

В полученных в структурных моделях ОУЗ при ситуации SI ‘NR’ выходной поток информации ‘уравновешивает’ входной поток (рис. 9, 11). При нарушении ‘уравновешивания’ возникает ПП в ОУЗ. Переход к новому состоянию автомата SyntA происходит по мере развития ПП и обуславливается ситуацией SN . Поскольку физически обусловленная и не разделяемая конструкция ОУЗ и оборудования имеет собственные движения, то схема БИХ-фильтра более соответствует схеме ОУЗ. Таким образом, грамматику G_{OCP} можно представить перечнем

$$G_{OCP} \rightarrow (TS\ SN, TS\ BM, NTS\ SN, NTS\ BM, PSN, PBM, P_s, P_B). \quad (3)$$

Грамматика G_{OCP} (2) отличается от G_{RPA} (1) тем, что ее элементы имеют колебательный, часто гармонический выход, элементы G_{RPA} имеют пороговый выход.

Представление структуры ОУЗ смысловыми ситуациями SN. Известно, что в энергетике ОУЗ характеризуются неразделимостью и отсутствием физического доступа к внутренним параметрам. Положим, что ситуация $SI\ 'NR'$ соответствует установившимся величинам внутренних параметров схемы ОУЗ (выходам операторов, нетерминальных символов NTS, правилам P). Таким образом, в SI-методе под понятием смысловая ситуация SN подразумевается появление реакции ΔU_{OUT} структурной схемы ОУЗ на изменение Δ в какой-либо координате ОУЗ. Это определение SN исходит относительно ОУЗ. Определение SN относительно устройств РЗиА введено ранее в виде аналогии — каждой ситуации SN соответствует трафарет с соответствующей последовательностью окон. Составление дерева формирования ОУЗ можно спланировать с помощью табличной передаточной функции $W_{TABL} = TSN/SN$ (рис. 4–10). Заполняется W_{TABL} исходя из аварийных файлов, а также при расчете в САПР моделей ОУЗ и схем ОЭС устройств РЗиА.

В модели ОУЗ полезно построить автомат SyntA с грамматикой G_{OCP} , формирующий смысловой сигнал $S_{OCP}(t)$. Сигнал $S_{OCP}(t)$ выступает обобщением информационных потоков в ОУЗ (рис. 9). Однако $S_{OCP}(t)$ может быть синтезирован только в модели ОУЗ. В реальных ОУЗ он восстанавливается сигналом $S_{RPA}(t)$ с некоторым приближением. В пределе сигнал $S_{OCP}(t)$ может задаваться единственной ситуацией SN . Это становится минимальной информацией для построения модели ОУЗ, что позволяет сократить время единичного расчета. Возможно классифицировать смысловые ситуации SN для различных режимов работы и видов отказа оборудования ОУЗ аналогично Ψ -структурам устройств РЗиА. Такое разделение и анализ Ψ -структур РЗиА были задействованы при доказательстве теоремы [4–11].

Составление совмещенной схемы ОЭС. Из сравнения рис. 8–9 следует, что синхронный детектор является 'центральным' элементом и в ОЭС схеме ОСР [4]. Фильтром оказываются обратные связи с выхода U_{OUT} на общий сумматор. При замене элементов на рис. 8 (охваченных обратными связями) передаточной функцией получается более общая схема ОСР в виде однонаправленного дерева формирования $SN \rightarrow TS$ (рис. 9). Совмещенная схема на рис. 9 позволит получить более качественную модель распознавания ситуаций SN в виду взаимного отражения $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA}$ и возможности сравнения сигналов $S_{OCP}(t)$ и $S_{RPA}(t)$. Схема позволит решать задачи моделирования и smart-grid. Так минимальной информацией для построения модели ОСР являются два элемента информационной части $iOCP$ — селективный TS или блокирующий TS (рис. 10). Также минимальной моделью ОСР будет связка — источник сигнала $S_{OCP}(t)$ и управляемый генератор частоты. Генератор может иметь амплитудную, частотную, фазовую модуляцию выходного сигнала из диапазона super-НЧС—ВЧС в зависимости от решаемой задачи. Такие модели ОСР минимизируют время единичного расчета. Таким образом, были настроены модели ОСР, устройств РЗиА, S-детектора в части 2 этой статьи. Алгоритм восстановления сигнала $S_{OCP}(t)$ из модели ОСР может использоваться для расшифровки накопленных аварийных файлов. Для этого задействуются модели экспертной системы ExS и формирователя диагностических сообщений (рис. 3).

Решения задачи 'Информационное горло' Поиск решений выполняется на уровне SemA как взаимодействие множества SemA соответствующих ОУЗ на рис. 4, 9 согласно $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA} = G_{GES}$. Система АСНОР работает автоматически, но контроль ее выполняется диспетчером по конечному смыслу. Формирование сигналов $S(t)$ происходит в конкретных устройствах РЗиА. Для такой модели входным сигналом является отклонение ΔSN , выходным — модель ExS с графическим формирователем диагностических сообщений. Эта задача сопрягается с задачами разбора аварийных ситуаций. Передача информации выполняется в рамках конкретных алгоритмов управления ОУЗ (алгоритмы управления или селективности, блокировки, защиты от неправильных действий, самоконтроля, живучести, экономической эффективности, контроля ресурсов и др.). В сетях smart-grid задачу можно решать на основе формирования и анализа сигнала $S(t)$, его сжатия и автоматического разбора аварийных файлов [13–17]. Экспертная система ExS выдает смысловой результат при анализе аварийных файлов, в реальном времени в режиме мониторинга и в накопительном, предсказательном, профилактическом режимах на длительных интервалах времени эксплуатации [14].

Выводы по части 1. Показан способ построения рабочего места для организации аутсорсинга службы РЗиА. На основе аутсорсинга можно решить ряд известных задач — реструктуризация затрат хозяйствующих субъектов, обеспечение качества работ службы РЗиА, продолжение автоматизации сетей традиционного и smart-grid построения до их полной автоматической работы. Для диспетчерских служб — решение задач контроля 'Под напряжением', 'Информационного горла', хранения, передачи, автоматического формирования диагностических сообщений из аварийных файлов регистраторов сети. В основе предлагаемых решений информационных задач находится формирователь смыслового сигнала $S(t)$ устройств РЗиА.

Приведены теоретические основы построения рабочего места — SI-метод распознавания сигналов переходных процессов, две теоремы 'О возможности формирования смыслового сигнала в устройствах РЗиА' и «О единстве структурных схем устройств РЗиА», способы разделения движений в инерционных контурах по частотам и по смыслу, методы обеспечения устойчивости моделирования при сокращении времени единичного расчета, S-детектор (измеритель) смысловых сигналов $S(t)$. Показан метод описания внутренней структуры ОУЗ исходя из обобщенной схемы ОЭС устройств РЗиА и параметров грамматик $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA}$. Предложенный способ разделения движений по смыслу обеспечивает сокращение времени единичного расчета при сохранении устойчивости моделирования в САПР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Maffei, M., Malavolta, G., Reinert, M., Schroder, D. Privacy and Access Control for Outsourced Personal Records Security and Privacy (SP), 2015 IEEE Symposium, 2015, pp. 341 - 358, DOI: 10.1109/SP.2015.28
2. Ji, N., Semjan, A. New protection testing philosophy with emphasis on probing tests. Developments in Power System Protection (DPSP 2014), 12th IET International Conference, 2014, pp. 1 - 6, DOI: 10.1049/cp.2014.0028
3. Сивокобыленко, В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике. 2005, Донецк: РВА ДонНТУ: 306.
4. Nikiforov, A.P. Unified smart-detector for electrical power smart-grid networks, 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Cambridge, UK, pp. 1032-1039, 2015, IEEE Catalog Number: CFP15INI-15, ISBN: 978-1-4799-6648-6/15.
5. Никифоров А. П. Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты // Научно-производственный журнал 'Техническая электродинамика' и 10 научно-техническая конференция 'Проблемы современной электротехники 2010'. Часть 2. НАН Украины. Институт электродинамики - Киев, 2010.- С. 73-76.

Надійшла до редакції 01.12.2015

Рецензент: Сивокобыленко В.Ф.

А.П. НИКИФОРОВ

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Аутсорсинг контролю роботи пристроїв релейного захисту та управління в енергомережах smart-grid.

Частина 1. Теорія. Вирішуються завдання організації робочого місця для виконання аутсорсингового контролю роботи пристроїв захисту та управління. Розглядається задача розпізнавання, зберігання та передачі на відстань сенсу перехідних процесів у множині спільно працюючих ділянок мережі smart-grid. Пропозиції засновані на рішенні задач моделювання пристроїв реального часу, структурному розпізнаванні образів, поділі рухів по частотах і за сенсом. Досягається скорочення часу одиничного розрахунку при збереженні стійкості моделювання. Вирішуються завдання 'інформаційного горла' для енергетичних мереж smart-grid.

Ключові слова – *smart grid, діагностика під напругою, моніторинг, перехідні процеси, релейний захист, структурно-інформаційний метод, структурно-лінгвістичний метод, технічний інтелект, детектування, моделювання реального часу, аутсорсинг.*

A. P. NIKIFOROV

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Outsourcing control of work of devices of relay protection and control in power smart-grid.

Part 1 Theory. The problem of workplace organization to perform outsourced control of protection and control devices is considered. The problem of recognition, storage and transmission on the distance of the sense of transient processes in multiple sites working together in the network of smart-grid is studied. The proposal is based on the solution of problems of modelling of real-time devices, structural pattern recognition, separation of motions in frequency and meaning. The time of a single calculation is reduced with stability of simulation. The problem of 'information throat' for energy smart-grid networks is solved.

Key words: *smart grid, diagnostics under voltage monitoring, transitional processes, relay protection, automatics, structural-information method, structural-linguistic method, technical intelligence, detection, modelling real-time, outsourcing.*