

УДК 621.713.13: 621.313

**В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО** (д-р техн. наук, проф.),  
**А.П. НИКИФОРОВ** (канд. техн. наук, доц.)  
Государственное высшее учебное заведение  
«Донецкий национальный технический университет»  
[apnikiforov@yandex.ua](mailto:apnikiforov@yandex.ua)

## АУТСОРСИНГ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСЕТЯХ SMART-GRID. ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Рассматривается построение рабочего места аутсорсинговой службы в системе автоматизированного проектирования для задач контроля, наблюдения за эффективностью работы сети, а также профилактики повреждений. Предложения основаны на разделении движений по частотам и по смыслу с помощью структурно-информационного метода. Показан способ построения моделей на основе взаимного соответствия двух обобщенных структурных схем – объекта управления и устройств управления. Моделирование становится устойчивым, иерархически последовательным и наглядным. В процессе моделирования формируется способ представления интуитивно понятной результирующей смысловой информации о показателях работы гальванически связанной сети в виде диагностических сообщений, восстановления смысла переходных процессов по передаваемым смысловым сигналам аварийного файла. Приведен пример моделирования системы обработки и передачи информации для smart-grid сети среднего класса напряжения.*

**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

**Описание примера ОУЗ.** Известно, что затраты на профилактику отказа оборудования обходятся дешевле, чем на ликвидацию последствий повреждений [1–12]. Для применения в сетях smart-grid предпочтение уместно отдать алгоритмам, обеспечивающим устранение повреждений, поиск и профилактику неисправностей без переключений [5–12]. Первопричиной повреждений можно рассматривать именно большую поверхность и объем изоляции оборудования. Выполнить долговечную, нестареющую изоляцию фактически невозможно. Для применения предлагаемых решений поставленных задач в Части 1 выбран один из ‘сложных’ ОУЗ в энергетике — контур нулевой последовательности сети (КНПС). ОУЗ характерен малыми величинами входных сигналов в течение смысловых ситуаций  $SI$  ‘NR’ и  $SN$  ‘AR’. Поэтому селективность устройств РЗиА обеспечивается интеллектом их алгоритмов [3–12]. Опыт эксплуатации выявил возможность возникновения ряда особенностей управления таким ОУЗ. Среди таких особенностей — а) Совпадение результирующих сигналов при ситуации  $SI$  ‘NR’ и при ситуации  $SN$  ‘Отказ’ в оборудовании или устройствах; б) Гарантия функционирования оборудования КНПС в подключенном состоянии; в) Отсутствие дистанционного контроля эффективности работы нейтрали сети на длительных интервалах времени эксплуатации; и др. В условиях отсутствия обслуживающего персонала в сети влияние особенностей следует свести к минимуму.

**Предлагаемые решения задач.** Покажем, как задачи моделирования можно решить за счет организации рабочего места в САПР. А задачи smart-grid решить за счет взаимного определения параметров грамматик  $G_{OCP} \approx \Sigma G_{RPA}$ . Общей целью является сокращение времени единичного расчета при сохранении устойчивости. Цель достигается применением SI-метода распознавания образов и способом разделения движений по смыслу. В качестве примера выбирается моделирование самых медленных (infra-НЧС, super-НЧС) контуров — системы контроля эффективности работы ОУЗ. Некоторые полученные, но известные следствия, подтверждают правильность предлагаемых решений. Построение рабочего места аутсорсингового анализа работы устройств РЗиА выполнено на основе S-детектора, системы АСНОР, разделения проекта на иерархические вычислительные части. Модель состоит из иерархических автоматов устройств РЗиА соответствующих ОУЗ, сети smart-grid, самоконтроля системы АСНОР, виджетов для каждого ОУЗ и всей сети с диагностическими сообщениями экспертной системы ExS. Эти части могут совершенствоваться специалистами аутсорсинговой организации. Модель системы АСНОР становится распознавателем сути ПП аварийного файла и может использоваться для решения оперативных задач, а также для представления быстрых ВЧС составляющих на фоне сверхмедленных infra-НЧС, super-НЧС составляющих ПП.

**Моделирование сверхмедленных контуров.** В указанных в Части 1 задачах 1–4 smart-grid присутствуют в основном сигналы смысловой ситуации  $SI$  ‘NR’. Здесь можно предложить дополнительные способы решения задач моделирования. Так, при моделировании в САПР медленных процессов полезно применить обще синхронизирующий временной интервал развертки моделирования, например, суточный цикл  $T_{CALCUL} = 24$  часа. В модели ОУЗ задействуются сигналы реальных возмущений, позволяющие приблизить модель к реальному ОУЗ.

© Сивокобыленко В.Ф., Никифоров А.П., 2015

Источником возмущения может быть сигнал аварийного файла, например, сигнал солнечной батареи, узла *KNOT* и др. (рис. 1 Части 1). Тогда источник возмущений будет модулировать сигнал несущей с промышленной частотой сети  $\omega$ .

В ОУЗ контура ВЧС определяют параметры работы аналогового цифрового преобразователя (АЦП) в устройствах РЗиА. Реальные события в ПП могут следовать через значительные интервалы времени. Для задач с *infra-НЧС*, *super-НЧС* контурами работающее АЦП выдает чрезмерное количество отсчетов. Это естественно для работы устройств РЗиА в реальном ОУЗ. Но при моделировании в САПР малоинформативные интервалы ПП чрезмерно занимают вычислительные ресурсы. Можно выполнить сжатие оси времени сигнала возмущения в ОУЗ. Для этого достаточно умножить на коэффициент значения столбца времени в аварийном файле. Из сигналов аварийных файлов определяется интервал с минимальным временем изменения сигналов в ПП. Зная общую инерцию или время обработки информации в алгоритмах РЗиА можно определить коэффициент сжатия оси времени. Например, положим, что каждое изменение сигнала возмущения будет модулировать несущую промышленной частоты сети  $\omega$  в течение 5–10 полупериодов  $\omega$ . Значение выбрано из теории модуляции сигналов. Тогда минимальный интервал времени сжатия информации составит  $5 \times \omega = 0.1$  с. Так, для сигнала  $U_{KNOT}$  реальной сети, время  $T_{CALCUL}$  удалось сократить в 2000 крат без потери информации и ухудшения качества представления сигналов (рис. 1 Части 1). В итоге время развертки для моделирования суточного цикла сократилось до  $T_{CALCUL} = 44$  с. Такое принципиальное уменьшение  $T_{CALCUL}$  становится приемлемым для моделирования в САПР. Позволяет не изменять параметры алгоритмов реального времени устройств РРА при моделировании.

**Моделирование на основе SI-метода.** Покажем, как задачи моделирования можно решить за счет организации рабочего места сквозного проектирования в САПР [1–7]. Решаются задачи — сокращение времени единичного расчета после внесения изменения в проект, сохранение устойчивости моделирования, а также интуитивность восприятия графического представления результатов. В основу положим ряд выводов —

а) *Вычислительные части проекта.* Общий проект разделяется на иерархически подчиненные вычислительные части — морфологическая, синтаксическая, семантическая. Каждая часть имеет дополнительные файлы для просмотра получаемых результатов, а также наладочный файл с минимумом элементов для отработки вносимых изменений. При моделировании одной части, другие части могут не перерасчитываться. Задействуется информация, полученная на предварительных расчетах (файлы с сигналами TS, NTS);

б) *Внутренние частоты вычислительных частей.* Понижение частоты дискретизации сигналов между MorphA, SyntA, SemA достигает примерно 10 крат. Информация между частями проекта передается через блоки источников сигналов. Например, для *MATLAB* 'From File' с расширением .mat, для *ORCAD* расширение .csdf или др. Для каждой ситуации SN в ОУЗ формируется совокупность источников сигналов TS в отдельных именованных файлах, например, TS '3U0, Ул'. Такая совокупность сигналов является представлением ОУЗ. Ее можно сохранять для дальнейших этапов моделирования. Это сокращает время моделирования за счет исключения расчета элементов неизменяемых вычислительных частей;

в) *Время моделирования  $T_{CALCUL}$  проекта.* Параметр определяет временную развертку всех вычислительных частей проекта для отображения результирующих сигналов в виде аварийных файлов.  $T_{CALCUL}$  синхронизирует источники сигналов, получаемые в разных частях проекта. Например, если время изменения конечного корневого символа  $\Delta S$  ( $T_{CALCUL}$  = суточный цикл), то самый быстродействующий процесс в общем проекте должен быть расположен в пределах интервала  $T_{CALCUL}$  либо сгруппирован последовательно из нескольких ситуаций SN. Еще одной возможностью сокращения времени  $T_{CALCUL}$  может быть замена в модели САПР неактуального для текущей решаемой задачи сигнала выхода устройства РЗиА на готовый источник сигнала. Источник включается в модель в виде элемента, например, 'From File'. Сигнал источника может быть получен на этом или на последующих уровнях иерархии, взят из аварийных файлов либо обнулен полностью или частично. Это позволяет устранить элементы, формирующие сигнал в рассматриваемой вычислительной части;

г) *Моделирование работы графического индикатора.* Конечным представлением смысловой информации является уровень смыслового сигнала  $S(t)$ . Моделируется наглядность и интуитивность восприятия смысла на цветных графических дисплеях устройств РЗиА с заданными размерами диагонали и количеством точек отображения (рис. 12). Например, в *MATLAB* имеется готовая библиотека таких индикаторов для построения, например, SCADA панелей отображения. Так для разрабатываемого в статье примера ОУЗ (КНПС) цветовой графический индикатор уровня сигнала  $S(t)$  может быть представлен на фоне одноименной схемы ОУЗ и управляется блоком пороговых элементов  $\rho N$ ,  $N = 1-5$ . Величины и названия порогов  $\rho N$  задаются перед началом моделирования (рис. 4–10). Шаблон диагностического сообщения состоит из поля активных частей (рис. 12). Эти части являются выходами блинкеров NTS или корневых символов SN синтаксических автоматов SyncA устройств РЗиА;

д) *Соответствие нормам, принятым на производстве.* Сигналы реальных аварийных файлов ОУЗ формируются регистраторами аварийных процессов. Организация файлов подчинена простоте определения сути ПП. Все сигналы ПП являются реакцией на сигналы источников генерации  $G$  и отображаются относительно наименьшей частоты ПП, называемой 'погибающим'. Общей временной синхронизацией аварийного файла является 'предыстория' с сигналами SI 'NR' (рис. 15). Для возможности одновременного отображения на экране такого большого массива точек организуется ряд файлов представления результатов моделирования. Например, для

каждого иерархического уровня, всего проекта, наладочных файлов. Файлы представления состоят из необходимого числа источников и индикаторов сигналов. Этим также реализуется принцип разделения движений.

**Реализация в САПР способа разделения движений по частотам.** Для совершенствования алгоритмов устройств РЗиА может оказаться достаточным построение только формирователя выходных сигналов ОУЗ. При таком варианте моделирования структура ОУЗ обычно заменяется схемой с минимальным набором колебательных или инерционных составляющих (рис. 8). Для практических целей параметры контуров формирователя сигналов ОУЗ определяются по сигналам аварийных файлов реальных ОУЗ. Приведем пример настройки контуров для одного участка ZN сети —

а) *Настройка НЧС контура (КНПС).* Опыт показывает, что следует различать три типа сети —  $I_C < 10A$ ,  $I_C = 10-100A$ ,  $I_C > 100A$  исходя из параметров колебательных контуров. Добротность контура  $d = 0.05$  определяется исходя из активного тока  $I_A = dI_C$ ;

б) *Настройка infra-НЧС-контуров.* Это диапазон входных сигналов устройств автоматики. Выбирается время моделирования проекта  $T_{CALCUL}$  исходя из инерции моделей для 4 участков ZN (рис. 2 Части 1);

в) *Настройка СЧС-контуров.* Диапазон селективной работы устройств SP. Определяется зарядной частотой здоровых фаз сети. Длится несколько полупериодов  $k$  после возникновения ОЗЗ. Исходя из опыта регистрации аварийных файлов можно обобщить — для сети  $I_C < 10A$  частота  $f_{СЧС} = 5-10$  кГц при  $k = 3-10$ , для сети  $I_C = 10-100A$  частота  $f_{СЧС} = 1-3$  кГц при  $k = 1-3$ , для сети  $I_C > 100A$  частота  $f_{СЧС} = 0.3-1$  кГц при  $k = 1-1.5$ ;

г) *Настройка ВЧС-контуров.* Сигналы ВЧС  $I_0$ ,  $U_0$  находятся в области помеховых сигналов в ОУЗ (рис. 12). Разрядная составляющая поврежденной фазы сети при ОЗЗ в сети  $f_{ВЧС} = 3-10$  кГц. Параметры ВЧС зависят от продольной проводимости фазы сети.  $k = 1-3$  для сети  $I_C = 10-100$  А. Визуально ВЧС можно определить по колебательному изменению первой полуволны СЧС  $I_0$  (окно на рис. 15).

Время расчёта одного иерархического уровня может составлять десятки часов. При совместном моделировании нескольких участков ZN с устройствами РЗиА время увеличивается в разы при уменьшении устойчивости расчета. Это ограничивает применение способа разделения движений по частотам.

**Реализация в САПР способа разделения движений по смыслу.** Подытожим краткие перечни действий способа разделения движений по смыслу полученные в Части 1 статьи.

Для устройств РЗиА — а) Составляется схема ОЭС слиянием структурных схем известных устройств РЗиА (рис. 9). Со схемы списывается грамматика  $G_{RPA}$ ; б) Реализуются элементы MorphA, SyntA, SemA в отдельных вычислительных частях; в) Выполняется последовательное моделирование частей, которые затронуты внесенным изменением при текущей работе с моделью; г) Формируются  $W_{TABL}$ , альбомы сигналов TS, NTS, S для SN и архивы расчетов.

Для схемы ОСР — а) Определяются число и параметры колебательных контуров в ОУЗ по математическим описаниям и сигналам аварийных файлов; б) Составляется схема ОУЗ в виде КИХ-фильтра (рис. 9); в) Составляется ОЭС схема ОУЗ как обратная ОЭС схеме РЗиА  $G_{ОСР} \approx \Sigma G_{RPA}$  относительно  $\Delta S$  (рис. 10); г) Выделяются в  $G_{ОСР}$  и реализуются элементы MorphA, SyntA, SemA в отдельных вычислительных частях; д) Заполняется  $W_{TABL}$  для представления ОУЗ. Формируются обучающая и контролирующая выборки ситуаций SN.

Для совмещенной схемы ОУЗ и устройств РЗиА — а) Разделяется проект на иерархически подчиненные вычислительные части; б) Пересчитывается часть общего проекта, участвующая в дереве формирования в ОУЗ или дереве определения устройств РЗиА согласно рис. 4, 9. Для этого разработчиком предварительно указываются контрольные точки расчета; в) Все сигналы TS, NTS, S сохраняются в общей папке расчета проекта в виде  $W_{TABL}$ . Каждая иерархическая часть может последовательно использовать эти сигналы; г) Для автоматизации процесса многократного моделирования задействуется сторонний алгоритм запуска в САПР указанной последовательности вычислительных частей с минимальным числом элементов. Последовательность частей составляется согласно совмещенной схеме ОУЗ и устройств РЗиА (рис. 9); д) Контролируется смысловое состояние ОУЗ по восстановленному сигналу  $S_{ОСР}(t)$  и сравнивается с сигналом  $S_{RPA}(t)$ .

**Настройка S-детектора.** Решения поставленных в статье задач основаны на работе S-детектора. Определение его параметров удобно выполнить моделированием в САПР в отдельной наладочной вычислительной части. Устанавливается соотношение параметров в таблице TSN/SN на рис. 6-10 Части 1. К параметрам относятся составляющие грамматики G, величины весовых коэффициентов KN, KM, порогов pN. Количество SN, TS обусловлено объективными причинами, формируемыми в устройствах РЗиА и ОУЗ.

На рис. 13 показана схема модели S-детектора '1-Против' контроля эффективности работы нейтральной сети (ЭФРН). Смысловый сигнал  $S_{EFRN}(t)$  подсистем 'ARC', 'SP', 'RVC', 'Мониторинг' объединяются сумматором '+'. Выходной масштабировующий коэффициент позволяет настроить величину  $S_{EFRN}(t)$  к уровню '1'. По смыслу задачи при ситуации SI 'NR' величина  $S_{EFRN}(t) = 1$  или 100%. При ухудшении работы оборудования ОУЗ уровень сигнала  $S_{EFRN}(t)$  может только понижаться. Весовые коэффициенты KN, KM активируются при установке информационных датчиков TS согласно смысловой ситуации SN (Fig. 14).

Модель S-детектора ЭФРН формирует диаграмму изменений величины  $SN = \sum kTS$  для всех рассматриваемых смысловых ситуаций SN исходя из таблицы соответствия TSN/SN. Величины KN, KM могут корректироваться по результатам моделирования на сигналах обучающей и контролирующей выборки ПП в ОУЗ. Диаграмма стилизована под переходной процесс ПП в системе АСНОР и ОУЗ (Fig. 7). В S-детекторе ЭФРН сигнал  $S_{EFRN}(t)$  разделяется многопороговым элементом pEFRN на пять смысловых результатов — p1 'NR', p2 'Not', p3 'Критический', p4

‘Предаварийный’,  $\rho_5$  ‘AR’. Величины порогов  $\rho_N$  можно определить через коэффициент эффективности работы нейтрали  $k_{EFRN}=1/S_{EFRN}(t)$ . Например, от порога  $\rho_1$  ‘NR’ ( $k_{EFRN}=0.98$ ) до  $\rho_5$  ‘AR’ ( $k_{EFRN}=0.25$ ).

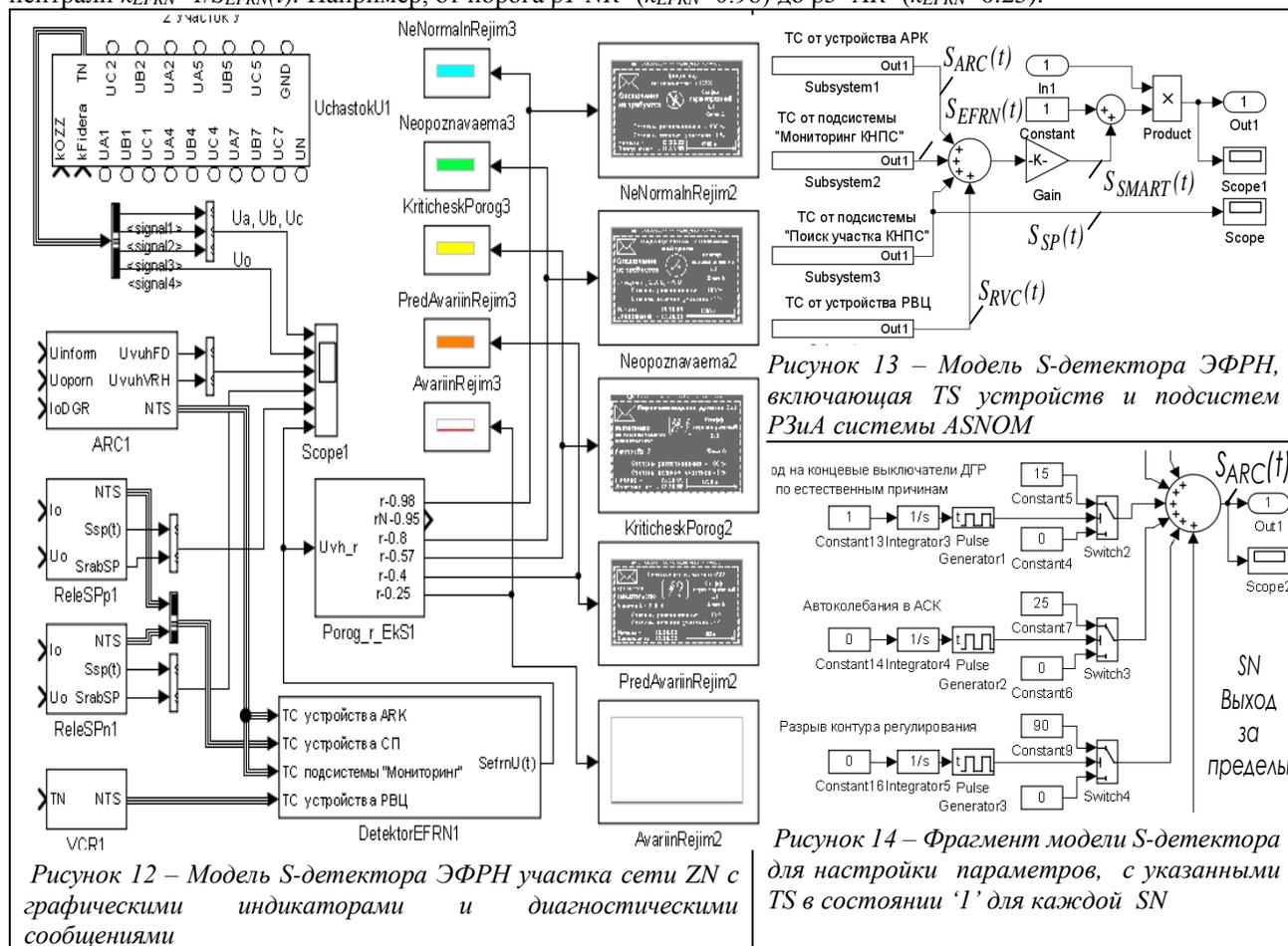
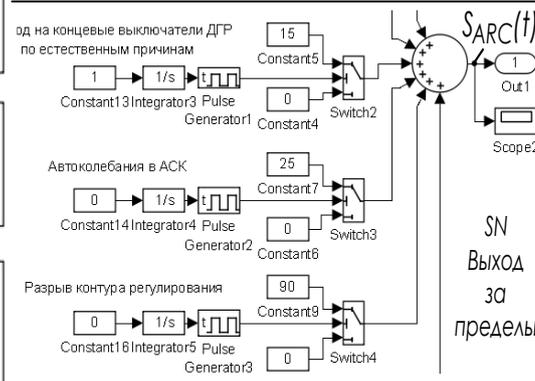
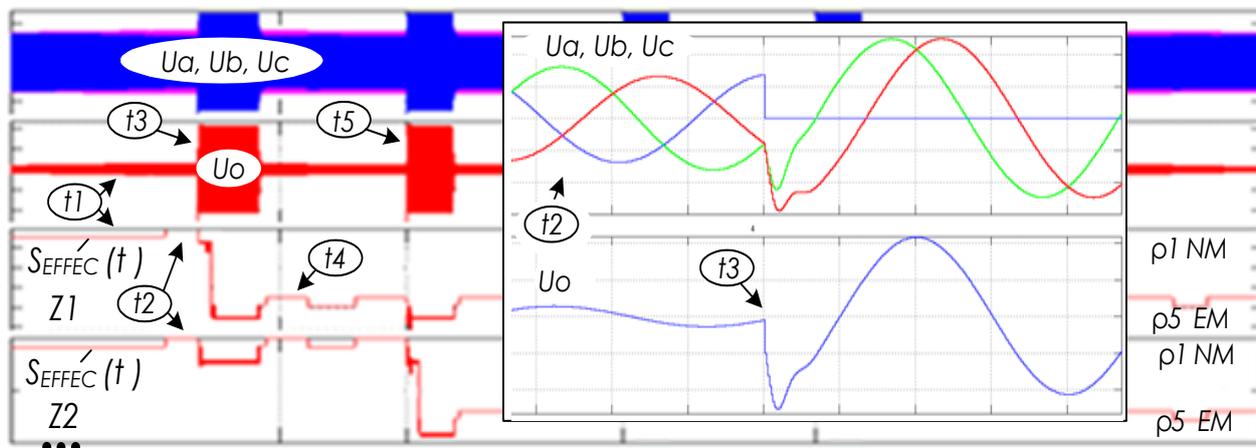


Рисунок 13 – Модель S-детектора ЭФРН, включающая TS устройств и подсистем РЗиА системы ASNOM



**Примеры моделирования в САПР.** В качестве примера применения способов разделения движений по частотам и смыслу выполнен моделирование самых медленных инерционных контуров системы самоконтроля или контроля эффективности работы ОУЗ [5–12]. Рассмотрим последовательно вычислительные части общего проекта. Разделим общий проект на иерархически подчиненные вычислительные части — №1 ‘Расчет ОУЗ’, №2



**Представление в САПР примера ОУЗ (КНПС).** В 'Вычислительную часть №1. Расчет ОУЗ' входит схема сети smart-grid (рис. 9, 1–2 Части 1) — блоки ОУЗ, высоковольтного оборудования, 'L', 'Терминал РЗиА', 'Накопитель В'. Моделируется морфологический уровень схемы ОУЗ. Для этого решается ряд задач —

а) *Определение количества ситуаций SN.* Анализ накопленных аварийных файлов в реальных сетях показывает, что для обучающей выборки количество  $SN=30$ , для контролирующей —  $SN=15$ ; б) *Определение количества TS.* Заполняется таблица соответствия  $SN \rightarrow TS$  на рис. 4; в) *Моделирование TS в САПР.* В модели ОСР формируются отдельные файлы сигналов, которые переносятся в папку с названием SN, например, SN 'Дуговой OPG'. Из таких папок формируется библиотека ситуаций SN; г) *Получение дополнительных TS и SN для модели ОУЗ.* Определяется их наличие, задействование в алгоритмах и способ реализации.

Решается 'Задача №3 smart-grid. Самоконтроль'. Система самоконтроля ЭФРН конструктивно реализуется в терминале 'Т-КНПС' (рис. 2). На рис. 12–14 показан блок 'S-детектор ЭФРН' в качестве получателя результатов других вычислительных частей. Задействуется информация от имеющихся устройств РЗиА — селективной защиты SP для поврежденного  $SPp$  и не поврежденного  $SPn$  присоединений сети, высокочастотного цифрового регистратора (VCR), поставляющего дополнительные TS о состоянии ОУЗ. Также дополнительно могут задействоваться TS сторонних устройств РЗиА.

**Моделирование MorphA устройств РЗиА.** В 'Вычислительной части №2. Расчет MorphA' формируется схема MorphA всех устройств РЗиА. Построение более качественного MorphA возможно, когда минимальное число TS обеспечивает более полное распознавание ситуаций SN. Приведем примеры настройки минимальных значений частотных параметров модели сети smart-grid и устройств РЗиА реального времени (частота дискретизации  $f_{DISCR}$  сигналов) —

а) *Выходные сигналы TS в ОУЗ.* Модель ОУЗ может быть представлена двумя типами источников сигналов ПП — реальных аварийных файлов и моделью ОУЗ в САПР. Частота  $f_{DISCR}$  сигналов аварийного файла может понижаться дециматорами. Частота  $f_{DISCR}$  выходных сигналов модели ОУЗ назначается исходя из минимума искажений ВЧС сигналов. Значение  $f_{DISCR}$  определяется возможностью конструирования информационных датчиков TS. Например, при 10–20 точек на период ВЧС  $I_0$ ,  $U_0$  выбрано целое значение  $f_{DISCR}=100$  кГц;

б) *Входные сигналы устройств РЗиА.* Исходя из задачи моделирования реального времени, точность представления сигналов TS должна поддерживаться типом микросхем, на которых будет реализовано устройство РЗиА. Например, для устройств SP — это максимальная частота в ОУЗ  $f_{DISCR}=100$  кГц. Ее децимация в 25 крат используется для автокомпенсатора ARC —  $f_{DISCR}=50$  Гц–4 кГц, далее для систем управления —  $f_{DISCR}=300$  Гц (рис. 12). Возможно уменьшение  $f_{DISCR}$  для ARC до 20 точек на период промышленной частоты сети;

в) *Сигналы управления исполнительными органами EU.* Частоту  $f_{DISCR}$  рассчитанных сигналов управления можно уменьшать до единиц герц, ориентируясь на динамику работы исполнительных органов ОУЗ (рис. 2–3). То же относится к смысловым сигналам  $S(t)$ , Например, выбрана  $f_{DISCR}=100$  Гц.

**Моделирование SyntA устройств РЗиА.** В 'Вычислительную часть №3. Расчет SyntA' сводятся элементы синтаксического уровня устройств РЗиА всех участков ZN. Для моделирования SyntA характерны несколько особенностей — а) *Время расчета.* Для его сокращения можно выполнить более глубокое разделение вычислительных частей проекта или рассчитывать отдельно 'сложный' блок, отдельно менее 'сложные'; б) *Генерирование синхрочастот.* Значения синхрочастот внутренних генераторов автоматов должны быть минимизированы исходя из точности следования импульсных сигналов; в) *Совмещение времен.* Совмещение времени возникновения TS разных колебательных контуров ОУЗ (infra-НЧС–ВЧС) позволит более просто реализовать селективную и блокирующую части алгоритма SyntA.

Для примера ОСР (КНПС) на рис. 15 показано формирование сигнала  $S_{EFFEC}(t)$  для ситуации SN 'Металлическое ОЗЗ'. Для этой ситуации основным сигналом является  $S_{SP}(t)$  устройств селективной защиты SP. Ситуация инициируется блоком  $kOZZ$  последовательно во времени на каждом из четырех ZN (рис. 2 Части 1). Видна правильная селективная работа SyntA устройств SP для поврежденного  $SPp$  и не поврежденного  $SPn$  присоединений сети каждого участка ZN. Критерием селективности устройств SP является совпадение первых полувольт  $3i_0$ ,  $3u_0$  или TS 'СЧС3i0', 'СЧС3U0', 'НЧС3U015B', 'НЧС3U030B' и наличие факта срабатывания селективного критерия в течение заданного времени (например, 1,5 с). В таком случае величина сигнала  $S_{SP}(t)$  достигает максимального значения и превышает порог срабатывания реле. Во всех остальных случаях величина  $S_{SP}(t)$  не достигает порога  $\rho_{SP}$ , селективный орган блокируется. Для неповрежденных  $SPn$  при достаточных величинах сигналов  $3i_0$  блокировка селективного органа выполняется альтернативным селективным органом.

Предлагаемые способы дают простые решения устранения особенностей управления ОУЗ (КНПС) указанных в Части 1. Так способ устранения временного противоречия между автоматикой и селективной защитой основан на контроле сигнала  $S_{SP}(t)$ , отражающего успешность самоликвидации ОЗЗ (рис. 15). В результате выдержка времени отключения поврежденного участка сети  $SPp$  становится управляемой величиной. Нормативы разрешают ее выбор в диапазоне от 0 с до 4 часов.

**Моделирование семантического уровня ОУЗ и устройств РЗиА.** В 'Вычислительной части №4. Расчет SemA' сводятся вместе источники информации TS, NTS,  $S(t)$  четырех участков сети ZN, полученные при моделировании в других вычислительных частях проекта.

Для нашего примера ОУЗ (КНПС) разные устройства РЗиА поставляют часть общей информации соответствующим подсистемам контроля ЭФРН. Информационная часть S-детектора ЭФРН состоит из

информационных датчиков TS, конструктивно располагающихся в удаленных устройствах РЗиА (SP, VCR, терминал 'Т-КНПС'). Устройства представляются сигналами  $S(t)$  либо непосредственно NTS. Так устройство SP формирует сигнал  $S_{SP}(t)$ , который можно эффективно передавать, хранить и далее обрабатывать смысловыми S-детекторами более высокого уровня иерархии. Результирующий сигнал  $S_{EFRN}(t)$  формируется в терминале 'Т-КНПС' (рис. 2, 4). Изменение  $S_{EFRN}(t)$  начинается в блоках подсистем терминала при появлении '1' на выходах информационных датчиков TS устройств РЗиА (рис. 13–14). Выходной масштабирующий коэффициент  $\beta$  в S-детекторе ЭФРН позволяет настроить величину  $S_{EFRN}(t)$  к уровню '1' максимального отклонения при SN 'AR' (рис. 7). Активирование фиксатора *Fix* происходит при появлении TS 'HЧЗU015B', 'BRC3Uo' характеризующих отсутствие SN 'NR'. Сигнал  $S_{EFRN}(t)$  разделяется многопороговым элементом  $\rho_{EFRN}$  на пять смысловых результатов —  $\rho_1$  'NR',  $\rho_2$  'Not',  $\rho_3$  'Критический порог',  $\rho_4$  'Предварительный режим',  $\rho_5$  'AR'.

Выходы порогов  $\rho_{EFRN}$  подаются на графические индикаторы уровня  $S_{EFRN}(t)$  в качестве блинкеров. Диагностическое сообщение с цветовой градацией и графо-текстовой информацией представляет собой совокупность активных мест (блинкеров), которые заполняются выходами NTS или SN (рис. 12). При восприятии оператором диагностического сообщения происходит интуитивное считывание информации слева–направо, сверху–вниз. Система АСНОР в диагностических сообщениях может фиксировать указания оператору для устранения причин нарушения ситуации SI 'NR'.

**Совмещение результатов иерархических частей.** В 'Вычислительной части №5. Расчет системы АСНОР' совмещаются на одном поле исходные сигналы ПП в ОУЗ и полученные от устройств РЗиА.

**Отображение получаемых результатов в системах реального времени.** Рассчитанные сигналы группируются в блоки согласно системе АСНОР. Для наглядности результаты отображаются в виде плаката аварийного файла (рис. 15). Моделирование показывает, что в САПР только для отображения необходимого количества точек полученных результатов затрачиваются десятки минут, при этом может теряться устойчивость работы САПР с потерей результатов. Для сохранения устойчивости отображения результатов применим способ разделения движений по смыслу. Организовывается ряд вычислительных частей для просмотра групп сигналов, в которых задействуются только файлы .mat. сигналов интересующих элементов TS, NTS, SsN решаемой задачи. Обычно это удобно, поскольку сосредотачиваются на решении одной задачи, например, задачи о селективной защите SP. Возможно, задействовать блоки децимации сигналов в случае просмотра огибающих сигналов всего ПП. Следует предварительно задавать частоту дискретизации отображаемой задачи в блоках *Scope*, соответствующей сигналам, записанным в файлах .mat. Возможности отображения графической информации средствами *MATLAB* оказываются крайне ограниченными для экспертной оценки необходимого количества сигналов аварийных файлов. В связи с этим возможности программы *PSPICE (ORCAD)* являются предпочтительнее [7].

Для наглядности отображения результатов формируется плакат аварийного файла. Информация на плакате располагается по принципу причина–следствие. Для восстановления сути ПП при разборе аварийных файлов возникает необходимость контролировать на одном плакате 'огибающие' ПП и начало события SN (рис. 15). Например, в нашем случае это развитие сигналов *Uф, Uo, Io* в ОУЗ. Ниже отклик алгоритмов динамического распознавания сути ПП — сигналы TS, NTS, SsN. Для отображения огибающих ПП сигналы сжаты по времени. На плакате отображаются инфра-НЧС и ВЧС диапазоны сигналов ПП, сигналы SI 'NR' работы ОУЗ до начала и после завершения ПП, а также начало и завершение работы алгоритмов РЗиА. Отмечаются особые временные точки ( $t_N$ ) для обеспечения анализа сути ПП. Для выяснения причины отклонения от SI 'NR' отображается 'окно', в котором приводится начальное развитие сигналов ВЧС, СЧС. Подобным образом можно формировать альбомы реакций на смысловые ситуации SN для совершенствования алгоритмов устройств РЗиА.

Конечным результатом представления смысловой информации для оперативных, ремонтных, релейных работ может быть виджет терминала 'Т-КНПС' [12]. Виджет позволит управлять и обслуживать сети с минимальными затратами времени и ресурсов на восстановление, профилактику отказов, выявление дефектов и неисправности оборудования на ранних стадиях их развития, устранение редких и нераспознаваемых ситуаций в сети. Виджет позволит выполнять работу с помощью РС или мобильного устройства в любой удаленной точке сети.

**Анализ полученных результатов.** Проверка предложенных решений выполнялась в САПР *MATLAB, ORCAD, MATHCAD*. Сокращение времени расчета при сохранении устойчивости достигается. Так в САПР *MATLAB* получены следующие результаты —

а) *Время расчета всего проекта.* Моделирование четырех участков сети ZN выполнялось для  $T_{CALCUL}=44$  с. Время расчета вычислительных частей составило — №1 – 12 ч, №2 – 4.2 ч, №3 – 3.4 ч, №4 – 4.3 ч;

б) *Коэффициент сжатия сигналов архиватором.* Сигналы аварийных файлов характерны малой заполняемостью. Это связано с большим диапазоном возможных изменений амплитуд сигналов, периодичностью изменения сигналов, изменениями ВЧС в сравнительно небольших интервалах времени и др. Так объем занимаемой памяти одного сигнала параметрической информации в ОСР составил 68.5 МБ. Соответственно, шести сигналов  $U_F, 3U_0, 3I_0P, 3I_0N$  занял 411 МБ. В результате обычного архивирования объем сократился до 94.5 МБ. Коэффициент сжатия составил 411 МБ/94.5 МБ=4.3. Такой объем памяти аварийного файла затрудняет построение систем дистанционного контроля и порождает проблему 'Информационного горла' в сетях smart-grid;

в) *Коэффициент сжатия параметрической информации смысловым сигналом S(t).* Объем памяти результирующего смыслового сигнала составил  $S_{EFRN}(t)=192$  КБ. Коэффициент сжатия параметрической информации 411 МБ/192 КБ=2140. Такой большой коэффициент сжатия достигается за счет медленного

изменения смысловой информации во времени, следовательно, меньшей частотой дискретизации сигнала  $S(t)$  при его хранении. Дальнейшее сжатие сигнала  $S_{EFRN}(t)$  обычным архиватором привело к сокращению объема до 8 КБ. Коэффициент сжатия составил 192 КБ/8 КБ=24. Это высокий коэффициент сжатия для архиватора. То есть изменение смысла происходит сравнительно редко. В итоге общий коэффициент сжатия смысловым сигналом  $S(t)$  в архивированном виде достиг 94.5 МБ/8 КБ=11812. На основе такого значительного коэффициента сжатия информации можно строить систему АСНОР и решать задачи smart-grid по управлению, передаче, обработке, хранению и анализу параметрической информации в электроэнергетике.

**Выводы по части 2.** Показан способ построения рабочего места для организации аутсорсинга службы РЗиА. Решаются два типа задач — моделирование систем реального времени и построение сетей smart-grid. Решения задач моделирования физически ограничены большими объемами оперируемой информации, тактовой частотой, а также эффективным числом параллельно работающих ядер вычислительной системы согласно закону Амдала. Задачи моделирования решены разделением проекта на иерархически подчиненные вычислительные части с последующим сведением результата в обобщающей части. Результаты сохраняются в файлах сигналов и могут эффективно архивироваться для последующих этапов совершенствования устройств РЗиА. Для решения известных задач smart-grid реализуется модель системы АСНОР. Моделирование системы АСНОР задействует модели реального времени устройств РЗиА, участвующие в формировании выходного смыслового сигнала S-детектора блока самоконтроля. Система подготавливает смысловые сообщения оперативному персоналу. Определены показатели работы модели — время моделирования, коэффициенты сжатия смысловых сигналов  $S(t)$  по отношению к исходным сигналам ОУЗ и др.

В качестве примера предложенных решений выполнено совершенствование устройств РЗиА системы АСНОР в САПР *MATLAB* для сети smart-grid среднего класса напряжения. Подробно рассматривается самый медленный контур ОУЗ — самоконтроль эффективности работы нейтрали сети. Аутсорсинговый контроль эффективности позволит обоснованно поддерживать заявленные показатели типа заземления нейтрали. Показаны примеры результатов моделирования каждой вычислительной части и всего проекта, полученные при наиболее частом типе повреждения — однофазном замыкании на землю. Выполнено совершенствование устройств РЗиА согласно предложенным методам — терминала 'Т-КНПС', селективной защиты 'У-СЦ', высокочастотного регистратора 'У-ВЦР' для их совместной работы в сетях smart-grid, а также для реализации задач аутсорсинга службы РЗиА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biswas, D., Haller, S., Kerschbaum, F. Privacy-Preserving Outsourced Profiling, 2010, pp. 136 - 143, DOI: 10.1109/CEC.2010.39.
2. Spahiu, P., Evans, I.R. Protection Systems that verify and supervise themselves. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition. 2011. pp. 1 - 4, DOI: 10.1109/ISGT Europe. 2011.6162614.
3. Shutang, You, Lin, Zhu, Yong, Liu, Robertson, R., Yilu, Liu, Shankar, M., King, T. Data Architecture for the Next-Generation Power Grid: Concept, Framework, and Use Case. Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference, 2015, pp. 679 - 682, DOI: 10.1109/ICISCE.2015.156
4. Waye, A., Gilani, A., Flemming, S., Al-Mutawaly, N. Feeder automation in advanced distribution systems. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference, 2014, pp. 1 - 6, DOI: 10.1109/CCECE.2014.6901123.
5. Ustun, T.S. Modeling electrical networks with Object Oriented data structures for smart control. Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2014 International Conference, 2014, pp. 1 - 7, DOI: 10.1109/ICUE.2014.6904204.
6. Никифоров, А. П. Структурно-информационный метод сквозного проектирования устройств / А. П. Никифоров // Материалы международной научно-практической конференции 'Научные исследования и их практическое применение. 2010'. Том 5, Технические науки. Проект SWorld. - 2010. - С. 1-22.
7. Nikiforov, A.P. The through simulation of devices on the basis of the structural linguistic method, IEEE Trans. Power Delivery, 7th International Conference Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE), vol. 12, no.1, 2011, Tallinn, Estonia, p. 50-55, Identifiers book ISBN: 978-1-4244-8806-3, e-ISBN: 978-1-4244-8807-0, 978-1-4244-8804-9, 978-1-4244-8805-6, DOI10.1109/ CPE.2011.5942206.
8. Никифоров А.П. Диспетчер смарт-грид в каждом устройстве потребителя. Технические и экономические задачи // Наукові праці Донецького національного технічного університету, № 1(12)-2(13) – Донецьк, 2012 р. - С 179-187.
9. Никифоров, А. П., Смирнова М. А. Сквозное проектирование в САПР автоматов экспертных систем устройств РЗиА // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - Донецьк: ДВНЗ 'ДонНТУ', 2011. - Вип.10 (180). - С. 127-132.
10. Сивокобыленко В.Ф., Никифоров А.П., Бурлака В.В., Поднебенная С.К. Повышение живучести комплекса электротехнического оборудования участков сети smart-грид на основе применения активных

фільтров // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Серія: 'Електротехніка і енергетика' Випуск №1(16)/2014.- Донецьк: ДВНЗ 'ДонНТУ', 2014.- С. 198-205.

11. Никифоров А.П., Никифоров П.Р. Определение поврежденного участка объекта защиты и управления в условиях неопределенности // Материалы 17 международной конференции 'Автоматика-2010'. Харьковский Нац. университет радиоелектроники. Харьков, 2010.- С.170-172.

12. Никифоров А.П. Виджет 'Контур нулевой последовательности сетей' для мобильного дисплея АСУ ТП 'Электро смарт-грид' // 15 Международная научно-техническая конференция ICPEES-2014 'Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах'. Наука, образование, практика. Научное издание. - Кременчуг: КрНУ, 2014.-Вып. 1/2014 (2).- С.152-155.

*Надійшла до редакції 01.12.2015*

*Рецензент: Толочко О.І.*

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО, А.П. НІКІФОРОВ

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

**Аутсорсинг контролю роботи пристроїв релейного захисту та управління в енергомережах smart-grid. Частина 2 Моделювання.** Розглядається побудова робочого місця служби в системі автоматизованого проектування для завдань контролю, спостереження за ефективністю роботи мережі, а також профілактики пошкоджень. Показаний спосіб вдосконалення алгоритмів пристроїв на основі взаємної відповідності двох узагальнених структурних схем – об'єкту керування та пристроїв керування. Моделювання стає стійким, ієрархічно послідовним, і наочним. У процесі моделювання формується спосіб подання інтуїтивно зрозумілої узагальненої смислової інформації про показники роботи гальванічно пов'язаної мережі у вигляді діагностичних повідомлень, відновлення сенсу перехідних процесів за переданими смисловими сигналами аварійного файлу. Наведено приклад моделювання системи обробки і передачі інформації для smart-grid мережі середнього класу напруги.

**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.*

V. F. SIVOKOBYLENKO, 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 2 Modelling.** The paper discusses building a workplace-of-service in the CAD system for tasks of control, monitoring the efficiency of the network, as well as prevention of injuries. Decisions are based on the separation of motions in frequency and meaning with the help of the structural information of the method. We show how to improve the algorithms of the devices on the basis of mutual correspondence of two generalized block diagrams of the control object and control devices. The simulation becomes stable, hierarchically consistent and clear. The modelling process results in the formation of a way of representing the information on the performance of electrically-connected network in the form of diagnostic messages and restoration of a sense of transient processes by leveraging semantic signals file. An example of simulation of systems and information processing and transfer for smart-grid networks of medium voltage class is provided.

**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.*