

УДК 621.713.13: 621.313

**В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО** (д-р техн. наук, проф.), **А.П. НИКИФОРОВ** (канд. техн. наук, доц.), **О.Ю. КОЛЛАРОВ** (канд. техн. наук, доц.), **Д.О. КАРДАШ**

**Государственное высшее учебное заведение**

**«Донецкий национальный технический университет»**

**svf1934@gmail.com, a.p.nikiforov@i.ua**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТИ СМАРТ-ГРИД 6-35 КВ СТРУКТУРНО-ИНФОРМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ. ЧАСТЬ 1. АНАЛИЗ**

*Предложен способ методического совершенствования алгоритмов устройств релейной защиты и автоматики для реализации концепций «Смарт-грид», «Цифровая ячейка», «Цифровая подстанция», «Аутсорсинг услуг» в распределительных электросетях. Рассматривается построение информационных датчиков для алгоритмов распознавания ситуаций «Короткое замыкание через землю», «Отсечка–Максимальная токовая защита» ненаправленной и направленной токовой защиты. Приведены численные сравнительные анализы эффективности алгоритмов токовых защит на основе систематизации их структур и смысловых ситуаций в сети, выполнена их реструктуризация и обобщены полученные результаты. Определены причины неустойчивости работы известных алгоритмов устройств. Предложена замена критериев работы на два алгоритма селективного поиска — повреждения в сети и неисправности в оборудовании. Показана возможность введения в алгоритмы формирователя смыслового сигнала для реализации трех смысловых детекторов — реле, «Живучести», «Эффективности». Рассмотрена передача от устройств только смысловых сигналов с последующим их объединением на более высоком иерархическом уровне защиты и управления. Получены способы автоматического устранения конфликтов при работе устройств для поддержания декларируемой функциональной устойчивости работы.*

**Ключевые слова:** *смарт-грид, релейная защита и автоматика, структурно-лингвистический метод, токовая защита, распознавание образов.*

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.** Согласно концепциям «Смарт-грид» (рис. 1), «Цифровая подстанция» «Аутсорсинг услуг» (рис. 2), терминалы релейной защиты и управления (РЗА или RPA)  $TN, N = 1, 2, \dots$  рассматриваются комплексно с учетом дополнительных функций по устойчивости, самоконтролю и управлению в различных режимах эксплуатации сети. В работах [1,2,3] делается вывод, что с одной стороны, имеет место постоянное совершенствование терминалов при традиционном построении сетей. А с другой, появляется техническая возможность осуществления автоматического управления в задачах, выполнявшихся ранее в полуавтоматическом или ручном режимах. Показано, что одним из путей развития распределительных электроэнергетических сетей является аутсорсинговый контроль с графическими и мобильными интерфейсами (рис. 2, 3).

Рассмотрим вначале задачу совершенствования алгоритмов селективного поиска (СП или SP) поврежденного присоединения при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) [2], работающих в области низкочастотных составляющих ОЗЗ (НЧС). Выясняется, что отсутствует отдельный детектор для определения смысловой ситуации  $SN$  «КЗ через землю» в структурной схеме устройств СП. Случаи смены смысловых ситуаций  $SN$  «ОЗЗ»–«КЗ через землю»–«ОЗЗ», «КЗ через землю»–«ОЗЗ», «ОЗЗ»–«КЗ через землю», «Несимметрия фаз»–«КЗ через землю»–«ОЗЗ» являются редко возникающими относительно общего числа ОЗЗ. Устройства блокируются косвенно вследствие отсутствия селективных информационных составляющих для работы основных детекторов. Мониторинг выполнялся высокочастотными регистраторами аварийных файлов переходных процессов (ПП) в разных распределительных сетях с компенсированной нейтралью.

<sup>1</sup> Nikiforov A. Unified smart-detector for electrical power smart grid networks. 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Cambridge, UK: 1032-1039, 2015. IEEE: CFP15INI-15, ISBN: 978-1-4799-6648-6/15, DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487

<sup>2</sup> Никифоров А.П. Оптимизация систем управления в смарт-грид энергосетях на основе обобщения информационных потоков. Научно-произв. журнал «Техническая электродинамика» №5 и Матер. 14 науч.-техн. конфер. «Проблемы современной электротехники ПСЕ-2016». НАН Украины. Институт электродинамики, - Киев, 2016.-С. 64-66, ISSN 1607-7970

<sup>3</sup> Сивокобыленко В.Ф., Никифоров А.П. Аутсорсинг контроля работы устройств релейной защиты и управления в энергосетях smart-grid. Часть 1 Теория. Часть 2 Моделирование / Наукові праці ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика. - Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2015.-С. 86-102. ISSN 2074-2630, DOI: 10.13140/RG.2.1.4106.2806

Перечисленные  $SN$  возникают при накоплении ослабленных мест в высоковольтной изоляции сети. Например, уровень изоляции в процессе эксплуатации оказывается меньше линейного напряжения. Тогда при  $SN$  «*Перекос фаз сети*» (возникают при оперативных переключениях, подключении нагрузки и др.) может развиваться  $SN$  «*КЗ через землю*» с формированием сверх больших сигналов на выходах трансформаторов Ферранти (рис. 4). При реализации устойчиво работающих алгоритмов СП в едином терминале такие  $SN$  следует относить к повторяющимся случаям, следовательно, структура алгоритма СП должна включать информационный датчик соответствующей  $SN$  (детектор развития сигналов при появлении  $SN$ ).

**ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ.** Известна еще одна задача — повышение устойчивости работы алгоритма максимальной токовой защиты (МТЗ) на краю зоны его работы, когда сигналы не значительны и сопоставимы с ПП при работе оборудования [3–7]. При этом нарушаются селективность и устойчивость алгоритмов. Для решения задачи необходимы специальные критерии наличия  $SN$ . Они позволяют работать, когда фильтрация, параметрические и логические сравнения оказываются не достаточными для принятия решений, когда  $SN$ , сложные на структурном и смысловом уровнях, приводят к неправильной работе алгоритмов РЗиА, когда необходимо расширение зоны работы защиты при сложных конфигурациях сети. Однако такие критерии явно не оговариваются, и, следовательно, стоит задача их разработки. При традиционном описании функционирования алгоритмов связано с анализом ярко выраженного возникновения и устойчивого сохранения определенной аварийной ситуации  $SN$ . Обычно построение алгоритмов основано на статическом расчете параметров ПП. Но практические исследования показывают, что это декларирование работы устройств, а динамическое развитие ПП в устройствах многообразнее, а также, что критерии РЗиА работают в узком селективном диапазоне развития ПП. Вне селективного диапазона («окна селективности») работа критерия должна быть заблокирована.

Известно, что принцип управления по возмущению характерен наличием неустранимых ошибок, уместен при катастрофических отказах в оборудовании. Но большая часть повреждений высоковольтной изоляции сети по известной статистике может самоликвидироваться. Для этого алгоритмы должны устойчиво определять такое развитие ПП [1–2]. Выявление и устранение  $SN$  отличных от  $SN$  «*Нормальный режим*» работы сети, равносильно повышению самоликвидации повреждений в сети [10–11]. Специфика нарушения устойчивости работы алгоритмов кроется в повторяющемся многообразии ситуаций  $SN$ , порождаемых работой сети, сочетанием параметров конкретной сети. В гальванически связанной сети, составляющие многообразных ПП, не относящиеся к работе оборудования, оперативных и рабочих режимов, могут присутствовать в течение длительных интервалов времени. Так, если повреждение высоковольтной изоляции не привело к катастрофическому пробою, то информация в составляющих алгоритма присутствует. Ее можно анализировать дополнительными сравнительными критериями и использовать <sup>[1,2,3]</sup> для профилактических целей, мониторинга работы сети. Тогда терминалы, объединяющие необходимые алгоритмы, становятся элементами системы управления сетью. Такое управление может выполняться на разных уровнях иерархии алгоритмов согласно указанным концепциям.

Таким образом, ряд положений при разработке НЧС-алгоритмов СП и МТЗ оказываются общими.

**ЦЕЛИ РАБОТЫ.** 1. Предложить способы автоматического разрешения практических конфликтов в работе НЧС-алгоритмов токовых защит для совершенствования алгоритмов СП при ОЗЗ и максимальной токовой защиты (МТЗ) «*Отсечка–1 ступень МТЗ–2 ступень МТЗ*» или «*Cut-off relay*» (COR)–«*Overcurrent relay*» (OCR). Отсутствие решения конфликтов приводило к снижению надежности эксплуатации, не позволяли совершенствовать и развивать системы РЗиА. Конфликты найдены при практических исследованиях в реальных сетях, но не были решены другими методами. Их перечень рассмотрен далее в работе. Ранее в решении конфликтов полагались на методы технико-экономической оптимизации, трудно применяемые для практического устранения сомнений в правильности выбранного способа борьбы с развитием повреждений.

2. Согласовать решения конфликтов с рассматриваемыми концепциями и конечными целями в виде двух типов смысловых задач — «*Живучесть*» и «*Эффективность*». В основе смысловых задач лежат алгоритмы РЗиА и диагностики «под напряжением». Под «*Живучестью*» понимается обеспечение бесперебойности питания потребителей  $X$  электроэнергией приемлемого качества при отказах оборудования, повреждениях изоляции и др. Под «*эффективностью*» понимается достижение имеющимися средствами конечного смыслового результата — возвращение  $SN$  «*Нормальный режим*» при различных отклонениях за наименьшее время. То есть устойчивости работы сети. S-детектор «*Живучесть*» формирует информацию для S-детектора «*Эффективность*».

**ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АСНОР.** Здесь АСНОР (ASNOM) — система автоматической стабилизации  $SN$  «*Нормальный режим*». Общее построение сети представляется цепочкой «*Driver–EU–ОСР*» (рис. 1–2). Здесь Driver — алгоритмы устройств, EU — исполнительный орган управляющий объектом управления и защиты (ОСР). ОСР разделен ячейками КРУ, но общая информация для всех алгоритмов находится на едином информационном поле терминала, подстанции, АСУ ТП «*ГЩУ*». Терминал с набором алгоритмов РЗиА является обработчиком или детектором сигналов ПП в ОСР. Реализуется известный в ТАУ метод сравнения выхода с входом ОСР. Так на терминал поступает входной информационный поток от ОСР, обрабатывается, затем формируется

выходной командный информационный поток (рис. 2). Информационный поток представляет собой сигналы промчастоты  $\omega$  установившегося режима работы ОСР, модулированные развивающимся ПП. В течение наименьшего времени отключения  $T_{откл}=0.1$  с ситуации SN могут сменяться, развиваться, устраняться. За это время анализируются 10 зон максимумов напряжения, когда возможны пробой изоляции или 5 максимумов при пробоях

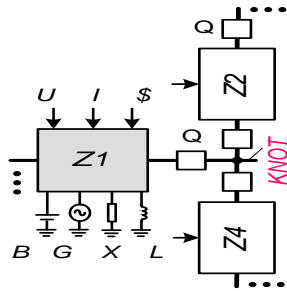


Рисунок 1 – Унифицированная схема смарт-грид сети Driver-EU-ОСР

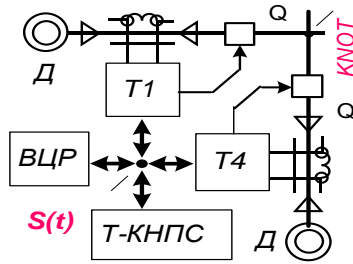


Рисунок 2 – Схема смарт-грид сети относительно локальной информационной сети и смыслового сигнала  $S(t)$

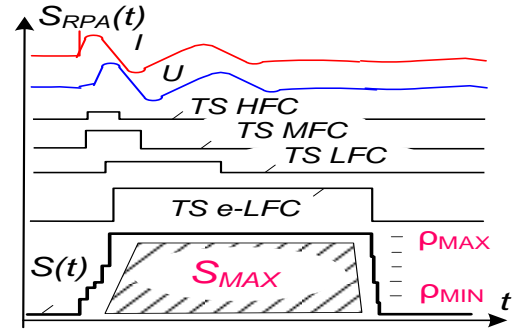


Рисунок 3 – Принцип формирования  $S_{RPA}(t)$  и его контроля порогами  $\rho_N$  для одной из SN

на напряжении одного знака. При менее катастрофических SN время  $T_{откл}$  увеличится, например, при начальном пробое ОЗЗ ко времени работы селективного реле  $T_{откл}=1.5$  с при действии на сигнал с дальнейшим переходом в КЗ и работой МТЗ второй или третьей ступени добавится  $T_{откл}=0.5$  или 1 с. Далее ОСР переконфигурируется для возвращения в SN «Нормальный режим» алгоритмами автоматики АПВ, АВР и даже УРОВ. Таким образом, терминал отслеживает развитие ПП в сети рядом смысловых выходов  $\rho_N$ .

Система АСНОР состоит из обобщенных эквивалентных схем (GES), а именно  $GES_{RPA}$ ,  $GES_{OCPR}$ ,  $GES_{ASNOM}$ . Обратная связь в системе замыкается сигналом  $S(t)$  подобно тому, как это происходило бы через экспертную оценку оперативного персонала (рис. 5).  $S(t)$  формируется внутри алгоритмов РЗиА (рис. 2–3), и затем может обобщаться в терминалах, АСУ ТП. При традиционном построении РЗиА больше внимания уделяется разработке информационных датчиков с повышением их чувствительности. Обычно реле имеет один–три селективных критерия, что аналогично оперированию несколькими знаками при распознавании текста [1,2]. Структура устройства РЗиА представляет собой связку — структурно-информационный или смысловой S-фильтр и многопороговый элемент  $\rho_N$ . S-фильтр состоит из схемы  $GES_{RPA}$  формирующей сигнал  $S(t)=Za(t)-Против(t)$  (рис. 5). Действие «За» характеризует необходимость изменения выхода S-фильтра от установившегося состояния, действие «Против»

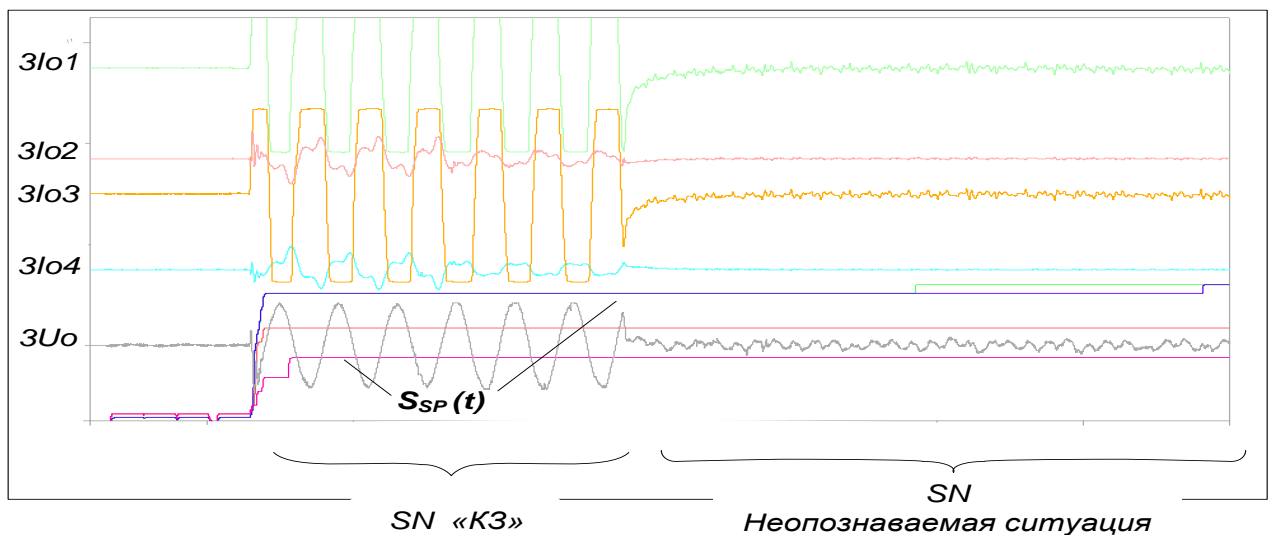


Рисунок 4 – Моделирование 4 участков Z4 сети. Сложная SN «КЗ через землю». Сигналы на выходе трансформаторов Ферранти. Формирование сигнала  $S_{SP}(t)$  информационными датчиками на разных присоединениях сети

отвечает за предотвращение изменения. Например, для устройств РЗиА известны два альтернативных состояния «Селективность–Блокировка». При формировании  $S(t)$  не теряется высокочастотная информация. Это свойство отличает смысловой S-фильтр от частотных фильтров. Сигнал  $S(t)$  контролируется элементом  $\rho_N$  через заданное время срабатывания  $T_{откл}$ . Смысл поведения ОСР представляется площадью  $S_{MAX}$  (рис. 3) изменения  $S(t)$ . Это эквивалент мощности. При превышении порогов  $\rho_N$  выдаются управляющие воздействия. S-фильтр и  $\rho_N$  образуют синхронный (направленный) S-детектор смысла ПП в ОСР. Контролируется ряд порогов  $\rho_N$  — от немедленного отключения до сигнализации, например,  $\rho_1$  «Нормальный режим»,  $\rho_2$  «Неопределяемая»,  $\rho_3$  «Критический»,  $\rho_4$  «Предаварийный»,  $\rho_5$  «Аварийный режим».

Применяются две модификации S-детектора. Первый тип «За-Против» применяется для задач совершенствования алгоритмов устройств, второй тип «I-Против» применяется для оценки эффективности конечной работы устройств, системы АСНОР, оборудования ОСП. Диапазон изменения  $0\% < S_{RPA}(t) < 100\%$  отсчитывается относительно значения 0%. Диапазон изменения  $0\% < S_{SMART-EFF}(t) < 100\%$  отсчитывается относительно значения 100%. Способ представления результатов показан в виде иллюстрации на рис. 4–5.

В работах [1,2,3] показано, что структуру ОСП можно описать совокупностью схем  $GES_{RPA}$ , участвующих в управлении ОСП, то есть совокупностью их грамматик  $G_{RPA}$ , а именно  $G_{OCP} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{RPA}$ ,  $\Sigma$  — сумма составляющих показано. Схема  $GES_{RPA}$  (рис. 5), состоит из набора состояний TS, NTS, правил  $P$  перехода между состояниями. Схема GES составлена слиянием структурных описаний известных устройств РЗиА. В ее основе находится синхронный или балансный детектор (правила  $PS9, PS15$  или  $PS5, PS7, PS6, PS8, PS10$ ). Деревья распознавания SyntA конкретных устройств сводятся к  $\Psi$ -структурам, где  $\Psi = A, B, \dots$  (Табл. 1), следовательно, являются частью обобщенного дерева распознавания. Такое единое описание устройств становится Z-структурой RPA. Общая устойчивость работы устройств достигается структурной фильтрацией сигналов ПП автоматом SyntA, проверкой исправления ошибок каждым последующим автоматом А, дополнением недостающей информации, располагающейся в едином информационном поле, контроле конечного результата по сигналу  $S(t)$ .

**ОПИСАНИЕ ПП В СЕТИ СМЫСЛОВЫМИ СИТУАЦИЯМИ SN.** Каждая точка сигналов ПП зависит от остальных точек и от точек других сигналов. Взаимосвязь точек представляет структуру ПП и ситуации SN. Образ SN появляется как возмущение в равновесном состоянии SN «Нормальный режим». SN модулирует сигналы промышленной частоты на выходе ОСП. Под смысловой ситуацией SN подразумевается часть схемы  $GES_{OCP}$  с активированными корневыми символами  $P_S, P_B$ , далее NTS и TS от  $P_S SI \rightarrow TS, P_B BI \rightarrow TS$  (рис. 5). То есть происходит срабатывание определенных для этой SN элементов дерева распознавания (рис. 3–4). Селективность критериев алгоритма может оказаться недостаточной для решения задачи об отличии SN и устойчивости работы. Используется классификация<sup>1,2,3</sup> ситуаций SN в ОСП с учетом их структурно-смыслового анализа. Выделяется минимальная, изменяемая и контролируемая информация. Развивая такой подход к анализу участка схемы ОСП, проводятся анализ и синтез устройств РЗиА в пространстве смысловых ситуаций, а не сигналов.

Руководствуясь S-фильтром, описаниями GES, расчленяется множество состояний ОСП на интересующие ситуации SN и SN не характерные для ОСП. В случаях прекращения входных сигналов или при не распознавании SN активированные элементы все равно формируют некоторый уровень  $S(t)$ , который можно оценивать при продолжении алгоритма СП.

**СПОСОБ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ.** Методическое [1,2,3] совершенствование SI-методом алгоритмов (СП и МТЗ) основано на взаимном согласовании схем  $GES_{OCP}$  и  $GES_{RPA}$  согласно их грамматикам  $G_{OCP} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{RPA}$  и критериев оптимизации с контролем качества результатов по сигналу  $S(t)$  (рис. 3).

Для максимального задействования накопленного опыта систематизируем структуры алгоритмов МТЗ аналогично систематизации алгоритмов СП [1,2,3]. Для этого имеющаяся информация разделяется на элементарные составляющие с последующей оценкой связей (правил  $P$ ) между ними с помощью весовых коэффициентов  $K$  значимости, реструктурируются составляющие для формирования управления сетью согласно конечному смыслу задачи. Привнесенные элементы не снизят общую надежность, поскольку сами участвуют в общем потоке контролирующей информации.

Исходя из SI-метода [1,2,3] применим ряд общих положений совершенствования алгоритмов РЗиА:

1. Реструктуризация общей задачи на элементарные составляющие с последующим выделением необходимых составляющих для решения;

Выполнение численного контроля по схемам GES, таблицам  $\Psi$ -структур RPA, ситуаций SN;

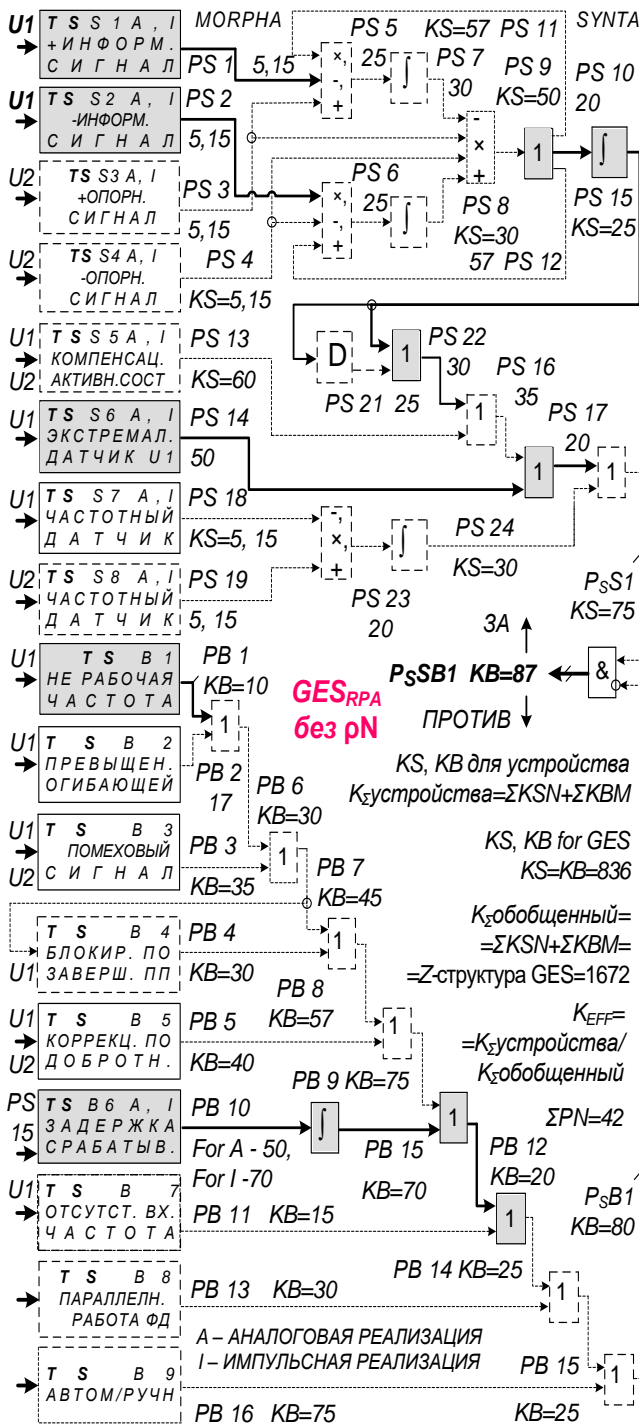


Рисунок 5 – Обобщенная схема  $GES_{RPA}$ . Отмечен весь не-направленный алгоритм, G3-, G4-структуры

Задействование имеющейся информации от всех колебательных контуров ОСР для совершенствования критериев селективности и блокировки. Так селективная часть схемы  $GES_{RPA}$  (синхронный детектор) контролирует один контур (рис. 3, 5), блокирующая часть контролирует другие. Чтобы появилась информация в самом медленном контуре, должен произойти ряд событий в ПП и накопиться достаточный объем информации. Вследствие этого движение в сверхмедленных контурах возникает редко, а появление информации ПП может прерываться. Каждый более низкочастотный контур формирует блокирующую информацию для селективной информации более высокочастотного контура. Это возможно вследствие появления информации в низкочастотном контуре позже, ее можно интерпретировать как интегральную, накопительную, отфильтрованную;

Формирование селективной и блокирующей информации датчиками (синхронно-фазными, амплитудными, синхронными относительно структуре ОСР или логически взаимосвязанными, асинхронными, накопительными);

Формирование «окон селективности» для каждого селективного критерия. Последовательность и временные параметры «окон селективности» формируются автоматом блокировки и относятся к блокирующим критериям;

Контроль качества работы правил «За-Против» S-детектора по качеству формирования сигнала  $S(t)$ . Конечный результат работы алгоритмов формируется согласно достижимым весовым коэффициентам селективности и блокировки каждого информационного датчика. Весовой коэффициент устанавливается и для выхода информационного датчика. Выбор значений многопорогового выхода  $pN$  для распознавания ситуаций  $SN$ , формирования диагностических сообщений;

Оценка введения в устройства трех S-детекторов — реле, «Живучести», «Эффективности» в системе АСНОР;

Замена алгоритмов традиционного реле и самоконтроля на селективный поиск СП, а также СП с продолжением распознавания после блокировки по дополнительным критериям и задействованием относительных критериев;

Изменение времени срабатывания устройства в нормируемых пределах  $T_{откл}$  в зависимости от величины  $S(t)$ ;

Выдача соответствующего диагностического сообщения

и аварийного файла с  $S(t)$  для оценки правильности работы устройств системы АСНОР.

**ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ.** Согласно SI-методу рассматривается непрерывное совершенствование устройств с разделением на иерархические этапы «Анализ→Синтез→Конструктив». Каждый этап выполняется в рамках системы АСНОР «КЗ». Полученные результаты в полной мере относятся к другим устройствам РЗиА [1.3].

Этап 1 совершенствования — анализ устройств RPA. Предлагаются решения известных конфликтов: А) Необходимость начала совершенствования устройств и недостаточность доказательной базы для начала; В) Реализация алгоритмов в едином терминале и разноплановость описания алгоритмов; С) Необходимость сквозного совместного анализа ОСР, устройств и громоздкость моделирования систем реального времени.

Для решения конфликта «А. О начале совершенствования» предлагаются способы численного анализа и систематизации известных устройств РЗА, на основе которых можно построить систему АСНОР. Приведена Таблица 1 систематизации  $\Psi$ -структур РРА для [1]. Выделяется иерархическая линия развития структурных схем устройств от «простого» к «совершенному» (показана красным цветом для структур  $A < \Psi < Z$  в Табл. 1). При этом структурные схемы более «совершенных» алгоритмов логически следуют из более «простых» (являются частью GES). Для ее заполнения подсчитываются весовые коэффициенты на схеме  $GES_{RPA}$  (показано на рис. 5). Например, если участвует в формировании правило  $PS15$  с  $KS=25$ , то в формировании результирующего конечного правила  $PsSB1$  участвует два правила  $PsSB1=f_{\&}(PsS1, PsB1)$ , где  $PsS1=PS15$  с  $KS=25$ . Принято, что  $PsSB1$  подсчитывается отдельно для селективной  $PS$  и блокирующей частей схемы  $GES_{RPA}$ .

Здесь Таблица 1 дополнена модификациями одноходовой G-структуры, то есть имеющей только информационный вход ( $PS1, PS2$ ), а опорный сигнал ( $PS3, PS4$ ) равен 1 или 0 в зависимости от реализации сравниваемого элемента ( $PS5$  и  $PS6, PS9$ ). Повторение элементов в общем алгоритме, например, МТЗ 1 и 2 ступеней, указывается дополнительным перечислением или соответствующим множителем.

Далее перечислены варианты грамматики G-структуры.

Усеченный алгоритм «Отсечка–1 ступень МТЗ с время-импульсным критерием»

$$G_{\Psi}=(PS1, PS2, PS7, PS8, PS10, PS14, PS15, PS17, PsSB1, PB1, PB10, PB12, PB15, PsSB1), \quad (1)$$

где  $\Psi=G1$  — при механической реализации, без выдержки времени  $\Delta t$  в МТЗ (например, алгоритм РТ-80),  $\Psi=G2$  — с  $\Delta t$ ,  $PS7, PS8$  задают время-импульсным критерий (например, КЗ-37) при статической и программной реализациях.

Весь алгоритм «Отсечка–1 ступень МТЗ–2 ступень МТЗ»

$$G_{\Psi}=(2*\{PS1, PS2, PS10, PS15\}, PS14, PS22, PS17, PsSB1, 2*\{PB1, PB10, PB12, PB15\}, PB14, PsSB1), \quad (2)$$

где  $\Psi=G3$  — при механической,  $\Psi=G4$  — статической, программной (например, терминалы), правила  $PS22, PB14$  используются для объединения 1, 2 ступеней,  $PB15$  для статической и программной реализаций.

Алгоритм «1 ступень МТЗ–2 ступень МТЗ»

$$G_{\Psi}=(2*\{PS1, PS2, PS10, PS15\}, PS22, PsSB1, 2*\{PB1, PB10, PB12, PB15\}, PB14, PsSB1), \quad (3)$$

где  $\Psi=G5$  — при механической реализации,  $\Psi=G6$  — при статической и программной.

Алгоритм «1 ступень МТЗ»

$$G_{\Psi}=(PS1, PS2, PS10, PS15, PsSB1, PB1, PB10, PB12, PB15, PsSB1), \quad (4)$$

где  $\Psi=G7$  — при механической (например, реле РТ-40 с ЭВ-100),  $\Psi=G8$  — при статической (например, реле РСТ-14 или РТЗ-51 с РВ-01).

Алгоритм «1 ступень МТЗ» без  $\Delta t$

$$G_{\Psi}=(PS1, PS2, PS10, PS15, PsSB1, PB1, PsSB1), \quad (5)$$

где  $\Psi=G9$  — при механической реализации (например, реле РТ-40),  $\Psi=G10$  — при статической и программной (например, реле РСТ-14, РТЗ-51).

Алгоритм «Отсечка»

$$G_{\Psi}=(PS14, PsSB1), \text{ где } \Psi=G11 \text{ — все реализации.} \quad (6)$$

Многообразие известных алгоритмов обработки параметрической информации требует конкурентного выбора лучшего алгоритма. Рассчитано<sup>1</sup>, что реле достигают средней эффективности работы ( $K_{EFF}=0.5-0.7$  против 1) в задаче построения системы АСНОМ. Например, программные направленные алгоритмы терминалов фирм «SIEMENS», «AREVA», «ABB», «SCHNEIDER ELECTRIC» преимущественно относятся к А4-структуре GES (см. метки на рис. 3) и достигают эффективности  $K_{EFF}=0.61$  от обобщенной Z-структуры.

Далее приведены описание,  $K_{EFF}$  направленных алгоритмов токовых защит, реле мощности аналогично (1)–(6).

Алгоритм «Общий балансный детектор, реле мощности» без  $\Delta t$

$$G_{\Psi}=(PS1, PS2, PS3, PS4, PS9, PS15, PsSB1, PB1, PsSB1), \quad (7)$$

где  $\Psi=A1$  — при механической (например, реле мощности РБМ),  $\Psi=A2$  — при статической (например, реле мощности РСМ-13),  $\Psi=A5$  — при программной с частотным датчиком (добавление  $PS18, PsS1$ ).

Алгоритм «Статическое направленное реле с  $\Delta t$ »

$$G_{\Psi}=(PS1, PS2, PS3, PS4, PS5, PS6, PS7, PS8, PS10, PsSB1, PB1, PB10, PB12, PsSB1), \quad (8)$$

где  $\Psi=A3$  — два детектора с общим сумматором, при статической (реле мощности РМ-12 с РВ-01).  $PS10$  используется для объединения выходов детекторов.

Алгоритм «Реле направленное с Отсечкой и  $\Delta t$ »

$$G_{\Psi}=(PS1, PS2, PS3, PS4, PS9, PS14, PS15, PS17, PS18, PsS1, PsSB1, PB1, PB2, PB3, PB6, PB7, PB10, PB11, PB12, PB13, PB14, PB15, PB16, PB17, PsB1, PsSB1), \quad (9)$$

где  $\Psi=A4$  — программные терминалы.  $PB2$  используется для контроля огибающей,  $PB3$  — помехи,  $PB11$  — отсутствия частоты,  $PB13$  — параллельной работы по информационной сети,  $PB16$  — задания типа управления.

Алгоритм «Направленное МТЗ»

$$G_{\Psi}=(\{PS1, PS2, PS3, PS4, PS9, PS15\}, \{PS1, PS2, PS10, PS15, PS22\}, PsSB1, PB1, PB10, PB12, PB15, PsSB1), \quad (10)$$

где  $\Psi=A6$  — при механической (например, реле мощности РБМ с РТ-40, ЭВ-100),  $\Psi=A2$  — статической.

**Выводы по Таблице 1.** Причина недостаточной селективности и помехоустойчивости работы некоторых устройств исходит из абсолютной формы обработки информации по сравнению с относительной формой [1,2,3], [4–9]. Качество определения SN соответственно выше при относительном способе обработки и представления информации. На пути реализации относительных алгоритмов стоят «простота» реализации алгоритма МТЗ и наглядность статического расчета его порогов срабатывания [7–9]. Введение коэффициентов запаса можно рассматривать в качестве правила блокировки от SN «Помехи», «Неопределяемая», а также допущений при расчете параметров алгоритма. Устранение сложных ПП (неоднозначных, развивающихся, не устраняющихся, редких),

Пояснение Таблицы 1

<b>A1</b> – <i>mech.</i> DOP, PR, RR	$P_{\Sigma}=8,$ $K_{\Sigma}=279,$	$K_{EFF}=0.1$ 7;															
<b>A2</b> – <i>static.</i> DOP, PR, RR	$P_{\Sigma}=8,$ $K_{\Sigma}=319,$	$K_{EFF}=0.1$ 9;	<b>G6</b> – <i>static.</i> CR, 1,2 ocr	$P_{\Sigma}=20,$	$K_{\Sigma}=719,$	$K_{EFF}=0.43;$											
<b>A3</b> – <i>static.</i> DOP, PR, RR, $\Delta t$	$P_{\Sigma}=13,$ $K_{\Sigma}=464,$	$K_{EFF}=0.2$ 8;	<b>G7</b> – <i>mech.</i> CR, 1 ocr	$P_{\Sigma}=9,$	$K_{\Sigma}=309,$	$K_{EFF}=0.18;$											
<b>A4</b> – <i>progr.</i> PR, RR, $\Delta t$ , cor	$P_{\Sigma}=25,$ $K_{\Sigma}=1016,$	$K_{EFF}=0.6$ 1;	<b>G8</b> – <i>static.</i> CR, 1 ocr	$P_{\Sigma}=12,$	$K_{\Sigma}=479,$	$K_{EFF}=0.28;$											
<b>A5</b> – <i>progr.</i> DOP, PR, RR	$P_{\Sigma}=10,$ $K_{\Sigma}=409,$	$K_{EFF}=0.2$ 4;	<b>G9</b> – <i>mech.</i> CR, 1 ocr, not $\Delta t$ ,	$P_{\Sigma}=7,$	$K_{\Sigma}=239,$	$K_{EFF}=0.40;$											
<b>A6</b> – <i>mech.</i> DOP, PR, RR, 1 ocr	$P_{\Sigma}=15,$ $K_{\Sigma}=434,$	$K_{EFF}=0.2$ 6;	<b>G10</b> – <i>static.</i> CR, 1 ocr, not $\Delta t$ ,	$P_{\Sigma}=7,$	$K_{\Sigma}=259,$	$K_{EFF}=0.40;$											
<b>A7</b> – <i>static.</i> PR, RR, 1 ocr	$P_{\Sigma}=16,$ $K_{\Sigma}=589,$	$K_{EFF}=0.3$ 5;	<b>G11</b> – CR, cor, not $\Delta t$ ,	$P_{\Sigma}=2,$	$K_{\Sigma}=137,$	$K_{EFF}=0.08;$											
<b>G1</b> – <i>mechan.</i> CR, VR, OCR	$P_{\Sigma}=11,$ $K_{\Sigma}=369,$	$K_{EFF}=0.2$ 2;	<b>J</b> – SP ‘PZZM1M’,	$P_{\Sigma}=20,$	$K_{\Sigma}=678,$	$K_{EFF}=0.40;$											
<b>G2</b> – <i>static., program.</i> CR,	$P_{\Sigma}=14,$ $K_{\Sigma}=439,$	$K_{EFF}=0.2$ 6;	<b>H</b> – <i>mechan</i> DP, PR gener.,	$P_{\Sigma}=17,$	$K_{\Sigma}=554,$	$K_{EFF}=0.33;$											
<b>G3</b> – <i>mech.</i> CR, cor, 1,2 ocr	$P_{\Sigma}=20,$ $K_{\Sigma}=569,$	$K_{EFF}=0.3$ 4;	<b>I</b> – <i>DD-balanced</i> (Radio),	$P_{\Sigma}=13,$	$K_{\Sigma}=411,$	$K_{EFF}=0.25;$											
<b>G4</b> – <i>progr.</i> CR, cor, 1,2 ocr	$P_{\Sigma}=22,$ $K_{\Sigma}=789,$	$K_{EFF}=0.4$ 7;	<b>M</b> – <i>static.</i> RP ‘NFS-SP’,	$P_{\Sigma}=27,$	$K_{\Sigma}=1018,$	$K_{EFF}=0.61;$											
<b>G5</b> – <i>mech.</i> CR, 1,2 ocr	$P_{\Sigma}=18,$ $K_{\Sigma}=499,$	$K_{EFF}=0.3$ 0;	<b>Z</b> – <i>GES,</i> RP ‘U-SP’	$P_{\Sigma}=42,$	$K_{\Sigma}=1672,$	$K_{EFF}=1.0$											

где RP – релейная защита, DOP – Directional Overcurrent Protection или направленная МТЗ, COR – «Cut-off relay» или Отсечка, OCR – «Overcurrent relay» или МТЗ, CR – токовое реле, VR – реле напряжения, PR – реле мощности, RR – реле сопротивления, SP – селективный поиск, mech-static-progr – механическая-статическая-программная реализации устройств

Таблица 1– Сравнительный анализ  $\Psi$ -структур RPA. Токовые ненаправленные и направленные алгоритмы

		Селективность («За», ‘For’, $\Sigma KSN$ )															
		137	142	162	182	222	227	267	272	277	297	312	327	337	382	392	836
Блокировка (‘Against’, $\Sigma K_{BМ}$ )	0	<b>G11</b>															
	97		<b>G9</b>	<b>G10</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>			<b>G1</b>			<b>A5</b>					
	144							<b>I</b>									
	167		<b>G7</b>					<b>A6</b>	<b>G2</b>								
	187									<b>A3</b>							
	257					<b>G8</b>											
	262												<b>A7</b>				
	272						<b>G5</b>				<b>G3</b>						
	292							<b>H</b>									
	401									<b>J</b>							
	452								<b>G6</b>					<b>G4</b>			
	626															<b>M</b>	
	634														<b>A4</b>		
	836																<b>Z</b>

а также разбор аварийных ситуаций затруднены при оперировании только сигналом релейного действия «включено–отключено», например, при сменах типов SN «Металлич. КЗ», «Клевки», «Утечка КЗ», «Механическое КЗ».

Исходя из схемы устройств  $GES_{RPA}$  алгоритм «Отсечка–1 ступень МТЗ–2 ступень МТЗ» имеет структурные ограничения по селективности (отсутствует опорный сигнал) и блокировке (задействуется только инерционный и временной фильтр, а также крайний минимум блокирующей части в время-импульсном критерии). Очевидно, это связано с необходимостью отключения при катастрофических отказах в ОСР для минимизации последствий разрушения. Например, действие алгоритма «Отсечка–МТЗ» изначально ограничено неполнотой защищаемой зоны действия защиты, задаваемой расчетом порога чувствительности [8]. Решения задачи «простыми» способами приводят к ошибкам срабатывания, неполноте действия защиты. Так, функции блокировки ограничены фильтром (его инерцией, время-импульсным критерием, временным критерием, временным фильтром). Формирование информационного сигнала частотным фильтром, настроенным на промчастоту сети, приводит к дли-



тельными собственным ПП фильтра, которые подтверждаются или уменьшаются новыми ударными воздействиями при повреждении изоляции. Фильтры при прерывистых входных сигналах упрощаются до инерционных элементов и не работают как полосовые фильтры промчастоты, для которой выполняется статическая настройка чувствительности МТЗ. Следовательно, наличие нескольких ступеней отключения в МТЗ является расширением применимости алгоритма «Отсечка» [7]. Отсюда для совершенствования алгоритма и согласно рассматриваемому способу совершенствования требуется реализация всей схемы  $GES_{RPA}$  для каждого колебательного контура ОСР. Тоже можно отнести и к, например, алгоритмам дифференциально-фазной защиты, направленной МТЗ, реле сопротивления, логической защиты участка, ДФЗ линии, которые оказываются иерархическим развитием алгоритма.

Для решения конфликта «В. Реализация алгоритмов...». Предлагается совершенствование алгоритма «Отсечка–МТЗ» на основе приведения алгоритма к схеме  $GES_{RPA}$ , добавления информационных потоков. Организуется формирование сигнала  $S(t)$  для функций опорного сигнала с передачей его по локальным информационным сетям. Например, в ВЧС-регистраторе, терминалах РЗиА участков сети  $ZN$ . Реализуются алгоритмы централизованного СП «КЗ» для всех участков  $ZN$  и сравнения сигналов  $S(t)$ . Выполняется поиск последовательных во времени (в пределе  $T_{откл}$ ) структурных соответствий (шаблонов  $SN$ ) для селективных правил  $PS$ , блокирующих правил  $PB$  и «окон» типичных  $SN$ ,  $SN$  «Не КЗ», а также действий  $SN$  «Неопределяемая», «Не связанная с КЗ». Проверка изменений выполняется в САПР с контролем сигнала  $S(t)$ , таблицы 1,  $GES_{RPA}$ .

Объединение S-детекторов выполняется посредством сигнала  $S(t)$ , формируемого последовательно на разных уровнях иерархической обработки информации о работе сети. Это позволяет реализовать автоматический и аутсорсинговый самоконтроль смыслового состояния ОСР по сигналам ПП.

Для решения конфликта «С. О моделировании...» выполняется сквозная разработка устройств в САПР, например, *Matlab*, *OrCAD* для решения задач смарт-грид. Используются сигналы эталонных ПП ситуации  $SN$  «OPG»,  $SN$  «Неопределяемая» из обучающей и контролирующей выборок реальных аварийных файлов. Сигналы вводятся в математическую модель сети в виде источников возмущений, в качестве тестовых сигналов алгоритмов реального времени устройств. Алгоритмы переносятся в перепрограммируемые микросхемы, чем контролируется физическая реализуемость принимаемых решений.

Применен способ [1,2,3] сокращения времени расчета при сохранении устойчивости моделирования [2]. Способ основан на иерархическом разделении, реструктуризации и сканировании информационного потока согласно SI-методу (рис. 4). Проект разбивается на иерархически подчиненные вычислительные части: №1 «Расчет ОСР», №2 «MorphA», №3 «SyntA», №4 «SemA», №5 «ASNOM». Части работают на разных внутренних частотах. В итоге медленные процессы не ожидают более высокочастотные и не занимают вычислительные ресурсы. Минимум одновременно рассчитываемых элементов позволяет сохранить устойчивость расчета. Части рассчитываются отдельно на интервале общего времени расчета  $T_{CALCUL}$ . Обеспечивается минимум передаваемой информации между этими частями. Рассчитываемые промежуточные сигналы хранятся в именованных файлах сигналов TS, NTS. Для этого в САПР используются имеющиеся источники файловых сигналов. Затем в последующих вычислениях сигналы задействуются согласно структурному дереву определения GES по мере необходимости. На рис. 4 показаны результаты моделирования информационных датчиков А4-, М-структур RPA для построения Z-структуры RPA. Показаны смысловые сигналы для смысловой ситуации  $SN$  «КЗ через землю». Аналогичное моделирование А4-, G4-, J-, М-структур RPA для  $SN$  «Сложные ОЗЗ» были выполнены ранее в [1, 2].

## ВЫВОДЫ.

Предложен способ методического совершенствования токовых защит, основанный на взаимном согласовании схем  $GES_{RPA}$ ,  $GES_{ОСР}$ ,  $GES_{ASNOM}$  согласно их грамматикам  $G_{ОСР} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{RPA}$ , на таблицах систематизации  $\Psi$ -структур устройств релейной защиты и автоматики и смысловых ситуаций  $SN$ . К схемам GES можно свести известные алгоритмы защит с разноплановыми авторскими описаниями. В качестве шаблонов схемы GES позволяют получить или не оставить без внимания необходимую информацию, рассчитать варианты изменений, передать результаты для будущих совершенствований.

Приведен сравнительный анализ 11 вариантов одноходовых ненаправленных и 12 многоходовых направленных алгоритмов «Отсечка–МТЗ» аналогично систематизации алгоритмов селективного поиска однофазных замыканий на землю. Указаны причины неустойчивой работы алгоритмов. Даны рекомендации по совершенствованию качественных характеристик алгоритмов  $\Psi$ -структур.

Предлагается задействование смыслового сигнала  $S(t)$  для реализации критериев по обеспечению надежности, устойчивости, чувствительности и быстродействия, относительного сравнения, дополнительных критериев. Так в алгоритм МТЗ вводится формирователь  $S(t)$ , три S-детектора РЗиА, «Живучесть», «Эффективность». Выполняется сравнение  $S(t)$  разных участков  $ZN$  сети, при аутсорсинге работы с моделями алгоритмов МТЗ и накоплением результатов их работы, аварийных файлов в сети.

Предложено строить структурные схемы устройств РЗиА исходя, прежде всего, из необходимости принятия решения при возникновении смысловой ситуации «Неопределяемая». При этом ситуация, соответствующая качественному определению поврежденного участка сети, оказывается частным случаем множественного результата работы устройств.



Предложена замена критериев работы токовых реле на два алгоритма селективного поиска — повреждения в сетях и неисправности в оборудовании. При обмене информацией с каждым устройством по локальной информационной сети появляется возможность определить поврежденный участок сети при низкой достоверности входной информации, смене сложных ситуаций, разрывах ее следования, сторонних ИП, помехах и др.

Разработаны способы автоматического разрешения конфликтных ситуаций, возникающих при работе сети для реализации задач дальнейшей автоматизации, требований нормативных указаний исходя из алгоритма токовой защиты сети смарт-грид.

Приведены результаты моделирования работы низкочастотных информационных датчиков токовых направленных и ненаправленных алгоритмов в соответствующих «окнах селективности» в реальном масштабе времени при подаче сигналов переходных процессов в сети. Для построения информационных датчиков устройства «U-VCR-SP» с Z-структурой RPA выбраны наиболее эффективные A4-, G4-, J-, M-структуры RPA.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Никифоров А. П. (2010) *Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты*, Научно-производственный журнал «Техническая электродинамика» и Материалы 10 науч.-техн. конференц. «ПСЕ-2010». НАН Украины. Институт электродинамики, - Киев, - С.73-76, ISSN 1607-7970.

Nikiforov, A. P. (2017) *Application of the Theorem of 'About the Unity of the Structural Description of RPA Devices' for the Simulation of a Power Network Smart-Grid*, 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017, ISSN: 2180-1843, e-ISSN: 2289-8131.

Thamilvalluvan, B., Aswini, P., AntoBennet, M., Dhiviya, K., Revathi, R., Steffi, T. (2016) *A novel relay used for fault detection and isolation in distribution networks containing of several DGs*, Int. Conf. ICEEOT, pp. 3574-3580, Tamil Nadu, India.

Zellagui, M., Karimi, M., Mokhlis, H., Benabid, R., Chaghi, A. (2014) *Impact of renewable dispersed generation on performance of directional overcurrent relay on MV distribution power system*, 8th Int. Conf. on Electrical Engineering (CEE), p. 5, Nagpur, India.

Javadian, S., Massaeli, M. (2011) *An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network*. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 11, pp. 1438-1445.

Ates, Y., Boynuegri, A., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtaci, R., Erdinc, O., Paterakis, N., Catalão, J. (2016) *Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation*, Energies, Vol. 9, No. 378, pp. 5. DOI: 10.3390/EN9050378.

Jones, D., Kumm, J. (2013) *Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements*, Rural Electric Power Conference (REPC), IEEE, pp. 6, DOI: 10.1109/REPCon.2013.6681853.

Huchel, L., Zeineldin, H. (2016) *Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG*. IEEE Trans. Smart Grid, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 7(3), pp. 1642-1649, Boston, USA.

Santos, T., Pavão, R., Homma, F., Chumbinho, R. (2013) *Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids*, 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), № 1443, p. 4, Stockholm, Sweden.

El-Zonkoly, A. (2011) *Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation*, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 81, Iss. 7, pp. 1482-1490.

#### REFERENCES

1. Nikiforov, A. P. (2010) *Theorem on the existence of semantic signal in relay protection systems*, Zhurnal «Tekhnichna Elektrodynamika», PPE-2010, pp. 73-76, Kiev, Ukraine, DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921.

2. Nikiforov, A. P. (2017) *Application of the Theorem of 'About the Unity of the Structural Description of RPA Devices' for the Simulation of a Power Network Smart-Grid*, 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017, ISSN: 2180-1843, e-ISSN: 2289-8131.

3. Thamilvalluvan, B., Aswini, P., AntoBennet, M., Dhiviya, K., Revathi, R., Steffi, T. (2016) *A novel relay used for fault detection and isolation in distribution networks containing of several DGs*, Int. Conf. ICEEOT, pp. 3574-3580, Tamil Nadu, India.

4. Zellagui, M., Karimi, M., Mokhlis, H., Benabid, R., Chaghi, A. (2014) *Impact of renewable dispersed generation on performance of directional overcurrent relay on MV distribution power system*, 8th Int. Conf. on Electrical Engineering (CEE), p. 5, Nagpur, India.

5. Javadian, S., Massaeli, M. (2011) *An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network*. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 11, pp. 1438-1445.

6. Ates, Y., Boynuegri, A., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtacı, R., Erdinc, O., Paterakis, N., Catalão, J. (2016) *Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation*, *Energies*, Vol. 9, No. 378, pp. 5. DOI: 10.3390/EN9050378.
7. Jones, D., Kumm, J. (2013) *Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements*, *Rural Electric Power Conference (REPC)*, IEEE, pp. 6, DOI: 10.1109/REPCon.2013.6681853.
8. Huchel, L., Zeineldin, H. (2016) *Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG*. IEEE Trans. Smart Grid, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 7(3), pp. 1642-1649, Boston, USA.
9. Santos, T., Pavão, R., Homma, F., Chumbinho, R. (2013) *Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids*, 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), № 1443, p. 4, Stockholm, Sweden.
10. El-Zonkoly, A. (2011) *Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation*, *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Vol. 81, Iss. 7, pp. 1482-1490.

*Надійшла до редколегії*

*Рецензент:*

В.Ф.СИВОКОБИЛЕНКО, А.П. НІКІФОРОВ, О.Ю. КОЛЛАРОВ, Д.О. КАРДАШ  
 Донецький національний технічний університет, пл. Шибанкова, 2, Покровськ, 83500, Україна.  
 E-mail: svf1934@gmail.com, a.p.nikiforov@i.ua, kollarov@ukr.net, [dmytro.kardash93@gmail.com](mailto:dmytro.kardash93@gmail.com)

**Удосконалення токового захисту від коротких замикань в мережі смарт-грід 6-35 кВ структурно-інформаційним методом. Частина 1. Аналіз.** Запропоновано спосіб методичного вдосконалювання алгоритмів релейного захисту і автоматики для реалізації концепцій «Смарт-грід», «Цифрова комірка», «Цифрова підстанція» у розподільних електромережах. Спосіб виходить із структурно-інформаційного SI-метода динамічного розпізнавання образів, що розробляється. Як приклад розглядається побудова інформаційних датчиків для алгоритмів розпізнавання ситуацій «Коротке замикання через землю», «Відсічка-Максимальний струмовий захист» ненаправлених і направлених струмових захистів. Відповідно до способу виконаний чисельний порівняльний аналіз ефективності алгоритмів на основі систематизації їхніх структур і значеннєвих ситуацій у мережі, наступна реструктуризація й узагальнення результатів. Наведено порівняльний аналіз 11 варіантів одно вхідних ненаправлених і 12 багато вхідних спрямованих алгоритмів «Відсічка-Максимальний струмовий захист» аналогічно систематизації алгоритмів селективного пошуку однофазних замикань на землю, опублікованої раніше. Визначені причини нестійкості роботи відомих пристроїв. Запропоновано заміну критеріїв їхньої роботи на два алгоритми селективного пошуку — ушкодження в мережі й несправності в устаткуванні. Показано можливість введення в алгоритми формувача значеннєвого сигналу для реалізації трьох значеннєвих детекторів: алгоритму реле, «Живучості», «Ефективності». Згідно SI-методу контролюються всі коливальні контури мережі. Так селективна частина узагальненої схеми (синхронний детектор) контролює один контур, частина, що блокує, контролює інші контури. Розглядається передача від пристроїв тільки смислових сигналів з наступним їхнім об'єднанням на більш високому ієрархічному рівні захисту і автоматики. Розроблено способи автоматичного усунення конфліктних ситуацій, що виникають при роботі мережі, для підтримки декларуємої функціональної стійкості роботи, реалізації завдань подальшої автоматизації, вимог нормативних вказівок. Результати дозволяють формувати рекомендації з удосконалювання якісних характеристик пристроїв виходячи з алгоритму захисту мережі смарт-грід.

**Ключові слова:** *смарт-грід, релейний захист і автоматика, структурно-лінгвістичний метод, струмовий захист, розпізнавання образів.*

V.F. SIVOKOBYLENKO, A.P. NIKIFOROV, O. KOLLAROV, D.O. KARDASH  
 Donetsk National Technical University 2, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine.  
 E-mail: svf1934@gmail.com, a.p.nikiforov@i.ua, kollarov@ukr.net, [dmytro.kardash93@gmail.com](mailto:dmytro.kardash93@gmail.com)

**Improving current protection against short circuit of smart-grid 6–35 kv network using structural-information method. Part 1. Analysis.** A proposed method is presented for methodical improvement of the algorithms of relay protection and automation for the implementation of the concepts of "Smart-grid", "Digital cell", "Digital substation", and "Outsourcing of services" in the war-dividing power grids. The method has been developed in a number of articles on the structural-information (SI) method of dynamic pattern recognition. As examples of perfection, it deals with the construction of an information sensor for the recognition of situations including "Short-circuit through the earth", "Cut-off–Maximum overcurrent protection" for non-directional and directional overcurrent protection. According to the method, a numerical comparative analysis of the efficiency of the algorithms is carried out based on the systematization of their structures and semantic network situations, then the results are restructured and generalized. Comparative analysis is presented of 11 non-directional single input variants and 12 multi-directional algorithms for "Cut-off–Maximum overcurrent protection". The analysis is performed similarly to the systematization of the algorithms for selective search for

single-phase earth faults, as shown in previous articles. The reasons for the instability of the operation of the famous current protections are investigated. According to the SI method, all these controlled the oscillating circuit network. So part of the control circuit is selected for blocking a part of the other control circuit. As replacement criteria for their work on the two algorithms, selective search performance in the network and faults in equipment are suggested. The possibility is investigated of introducing in the algorithms of the generator a semantic signal for the implementation of the three semantic detectors algorithm relay "Survivability", "Efficiency". Consideration is given to transferring from the devices only meaningful signals, and then combining them at a higher level of protection and management. Methods are developed for automatic conflict resolution arising from the work of the network, for maintaining the declared functional stability, and the implementation of tasks for further automation of the regulatory guidance. The results allow us to form recommendations for improving the quality characteristics of the devices according to these concepts.

***Key words: smart-grid, relay protection and automation, structural-linguistic method, current protection, pattern recognition, modelling in CAD***