

УДК 621.311

С. А. Абакумов, А. В. Виштинбеев, С. Е. Гаязов, Д. Н. Саввин,
Е. А. Надобная, Е. И. Эрекайкин

Автоматизированный расчёт уставок устройств релейной защиты и определение минимального состава генерирующего оборудования в ПВК «АРУ РЗА»

Описаны основные требования, предъявляемые к программному комплексу, предназначенному для решения задачи определения минимального состава генерирующего оборудования по условиям правильного функционирования устройств релейной защиты. Также в статье описываются инструменты автоматизации процесса выбора уставок и анализа срабатывания релейной защиты. Показано, как данные требования реализованы в модулях в составе программно-вычислительного комплекса для автоматизированного расчёта уставок релейной защиты и автоматики (ПВК «АРУ РЗА»). Подробно описана работа модулей, входные и выходные данные, преимущества разработанных модулей.

Ключевые слова: программно-вычислительный комплекс, расчёт токов короткого замыкания, релейная защита и автоматика, уставки РЗА, анализ срабатывания, резервирование защит, минимальный состав генерирующего оборудования, автоматизированный расчёт уставок.

Введение

Одной из важнейших задач в сфере релейной защиты является расчёт уставок. Благодаря корректному выбору уставок защит, различные повреждения в электрической сети оперативно локализуются, тем самым, предотвращается дальнейшее развитие аварии. Все оборудование, предназначенное для производства, передачи и распределения электрической энергии, требует установки устройств релейной защиты, и, как следствие, – расчёта их уставок. Неправильный расчёт уставок влечёт за собой выход из строя дорогостоящего электрооборудования вследствие отказа, не срабатывания, либо неселективного срабатывания устройств релейной защиты в аварийных ситуациях.

В современных условиях из-за масштабов энергосистем и высоких требований к точности результатов расчётов решение данных задач невозможно без автоматизации. Тем не менее, расчёт аварийных параметров трудоемок даже с применением современных ПВК – в связи с большим количеством элементов электрической сети и необходимостью учёта множества режимов работы сети. Специалист должен оперировать огромными объёмами информации для корректного расчёта уставок релейной защиты, а также грамотно анализировать большое количество выходной информации. Более того, анализ данной информации не может быть полным без проверки чувствительности защит с выбранными уставками в наиболее тяжёлых, с точки зрения устройств РЗА, режимах работы энергосистемы. Все эти факторы учитываются при развитии ПВК «АРУ РЗА» [1, 2].

Для корректного выбора необходимых настроек устройств релейной защиты специалисту требуется рассмотреть множество различных режимов работы системы, чтобы выбрать из них один определяющий. Также специалисту необходимо учитывать одновременно функционирование не только рассматриваемой защиты, но и других защит, которые могут оказать влияние на срабатывание или несраба-

тывание рассматриваемой защиты. С учётом данной особенности, процесс расчёта уставок релейной защиты в больших разветвлённых сетях представляет из себя сложную и трудоёмкую задачу. При аналитическом решении задачи специалист, как правило, руководствуется собственным опытом, прогнозируя, какой режим для каждой защиты будет минимальным или максимальным. Зачастую даже опытный специалист не может определить, какой именно из режимов будет определяющим, без проведения большого количества расчётов. При данном подходе не рассматриваются все возможные состояния системы, что может привести к упущению рассмотрения необходимого режима, и, как следствие – неправильному выбору уставок. Для автоматизации данного процесса разработан модуль в составе ПВК «АРУ РЗА» – модуль автоматизированного расчёта уставок (модуль «АРУ»).

Для оценки соответствия выбранных устройств релейной защиты и их уставок необходимо рассмотреть поведение защит при возникновении всех возможных аварийных ситуаций. Для решения этой задачи в ПВК «АРУ РЗА» был разработан специализированный модуль, позволяющий определять состояние любой выбранной защиты (группы защит) в произвольный момент времени в зависимости от аварийной ситуации – модуль проверки чувствительности и анализа срабатывания устройств релейной защиты (модуль «МАС»).

Также перед специалистами нередко стоит задача определения состава генерирующего оборудования, чтобы иметь представление, как поведут себя устройства релейной защиты при проведении ремонтных работ на объектах генерации, или в режимах с внеплановыми отключениями генерирующего оборудования. Для этого требуется рассмотреть множество режимов и сделать выводы о их допустимости или недопустимости. Для автоматизации решения данной задачи в ПВК «АРУ РЗА» был разработан специализированный модуль, позволяющий определять, сохранится ли чувствительная и селективная работа любой выбранной защиты (группы защит) в зависимости от состава генерирующего оборудования – модуль определения минимального состава генерирующего оборудования (модуль «МСГО»).

Модуль автоматизированного расчёта уставок защит с относительной селективностью – АРУ

Принципы построения систем защит энергетических систем построены на широком использовании устройств релейной защиты с относительной селективностью. Относительная селективность подразумевает, что зона защиты устройства может намеренно или путём формирования режима выходить за рамки объекта сети, на котором установлено данное устройство. Это значит, что защита сети своим поведением в каждом режиме может оказывать влияние на работу других устройств релейной защиты.

Модуль АРУ предназначен для автоматического расчёта уставок защит с относительной селективностью одновременно по нескольким условиям, заданным пользователем. Расчётные условия, сформированные модулем, основываются на языке задания команд на расчёт модуля «К.У.Р.С.», который также является компонентом ПВК «АРУ РЗА». Функционал модуля значительно упрощает процесс расчёта уставок защит, а также позволяет осуществлять проверку чувствительности рассчитанных защит и сохранять полученные уставки в фонд РЗА. Выбор уставок осу-

ществляется по условиям отстройки и согласования с защитами. При этом необходимые параметры для расчёта программа выбирает автоматически. Например, рассматривая условие согласования со смежными защитами, модуль автоматически проанализирует смежные элементы по отношению к месту установки защиты и сформирует необходимые файлы заданий на расчёт.

Работа с модулем АРУ начинается с задания исходных данных, необходимых для расчёта. В первую очередь добавляются необходимые защиты, затем добавляются необходимые расчётные условия.

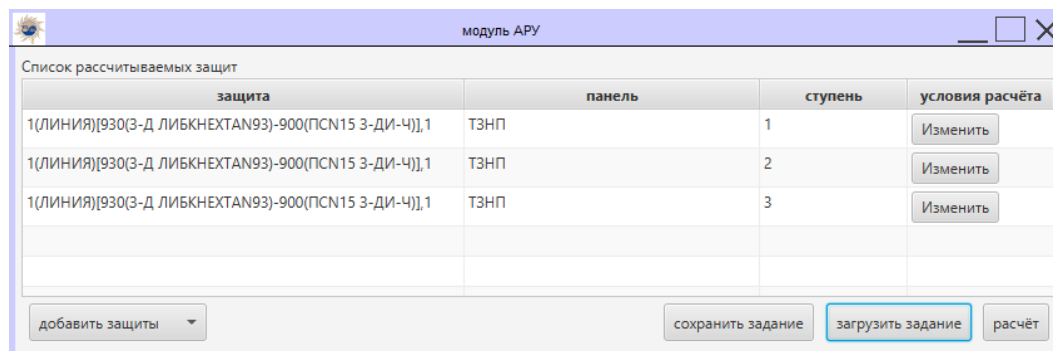


Рис. 1. Первое окно модуля автоматизированного расчёта уставок

Модуль позволяет задавать следующие расчётные условия:

1. Согласование:

- По вееру 1 пояс – команда производит поиск конца зоны срабатывания защиты Б (ЗАЩ Б) и в точке конца зоны срабатывания производит расчёт уставки для защиты А (ЗАЩ А), при этом в качестве защиты Б автоматически указывается защита первого пояса, а также автоматически подставляется узел начала и элемент, по которому будет перемещаться точка КЗ;
- По вееру произвольно – аналогично указанному выше, но номер защиты Б, а также узел начала и элемент поиска заполняются пользователем вручную;
- Каскад – команда производит расчёт уставки защиты А (ЗАЩ А) по условию согласования с защитой Б (ЗАЩ Б) в каскаде;
- Повреждение в узле – команда производит расчёт уставки защиты А (ЗАЩ А) по условию согласования с защитой Б (ЗАЩ Б) при установке повреждения в точке. Команда производит вывод на грань срабатывания защиты Б;

2. Отстройка:

- КЗ в конце линии – команда производит расчёт уставки защиты по условию отстройки от КЗ в указанной точке (в узле или в промежуточной точке ветви);
- Произвольная отстройка – аналогично указанному выше, но режим формируется пользователем с использованием команд К.У.Р.С.

При выборе расчётного условия откроется дополнительное окно с составленным автоматически приказом на языке модуля К. У.Р.С., данный приказ может быть отредактирован пользователем, а также при необходимости в поле «подрежимы» можно задать необходимые коммутации, используя язык К.У.Р.С.

Для упрощения процесса задания подрежимов предусмотрен блок генерации подрежимов. Данная возможность позволяет для расчётного условия рассмотреть

все возможные сочетания состояний режимов. Элементы, заданные в поле «Номера манипулируемых элементов», будут поочерёдно отключаться для создания соответствующих подрежимов. Также можно задавать максимальное и минимальное количество одновременно отключаемых в подрежиме элементов с помощью соответствующих полей. Для генерации приказа на создание подрежимов требуется нажать на кнопку «сформировать подрежимы». Данная функция значительно упрощает составление списка подрежимов.

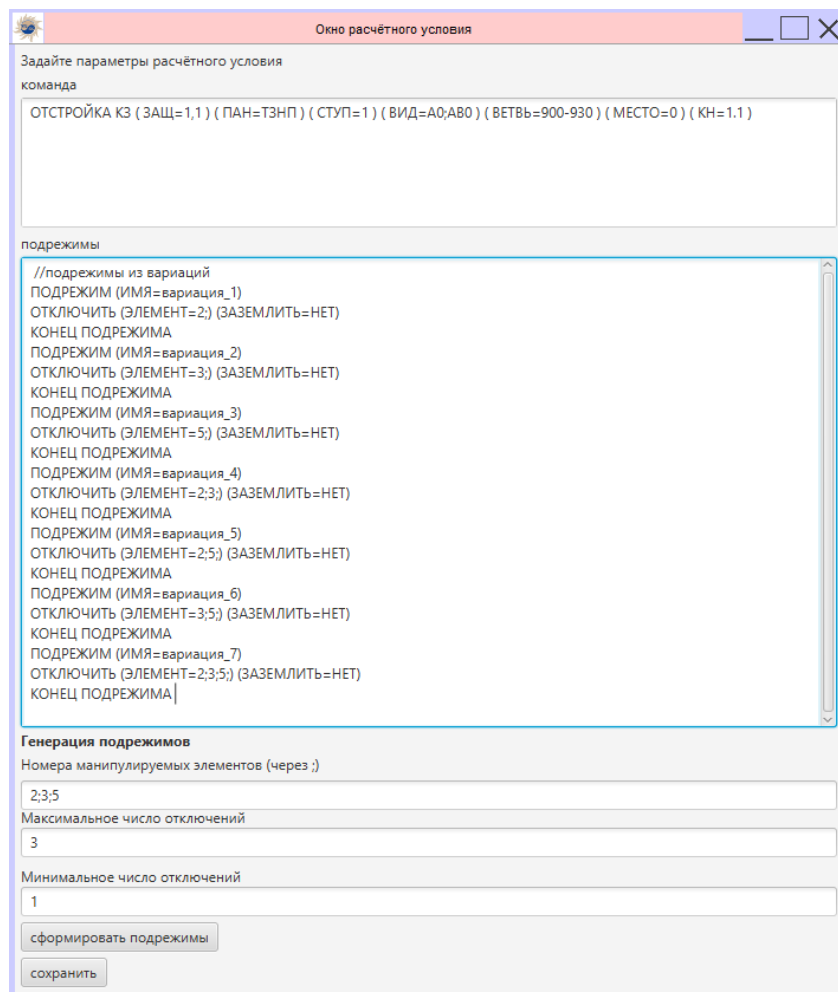


Рис. 2. Окно расчётного условия с автоматически сгенерированными подрежимами

После задания всех необходимых расчётных условий и нажатия на кнопку «расчёт» открывается второе окно модуля АРУ, которое содержит все результаты расчёта. В данном окне можно рассчитать коэффициент чувствительности выбранной защиты в заданных условиях. Для расчёта чувствительности требуется задать точки, в которых будет проверяться чувствительность, также с помощью открытия дополнительного окна с составленным автоматически приказом на языке К.У.Р.С., предназначенным для проверки чувствительности в конце защищаемой линии. В случае недостаточной чувствительности пользователь имеет возможность анализа недопустимых режимов.

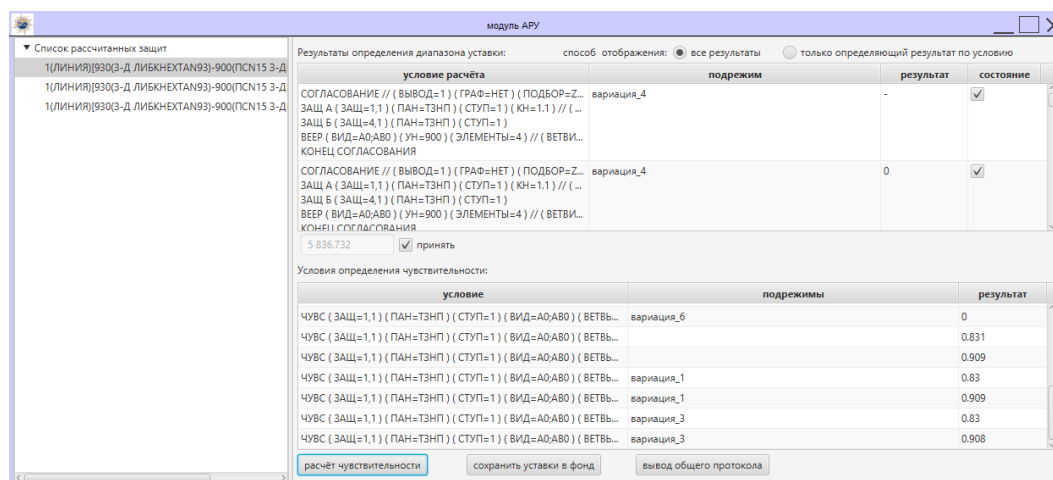


Рис. 3. Второе окно модуля автоматизированного расчёта уставок с произведённым расчётом чувствительности

Для удобства пользователя в данном окне имеются различные способы отображения результатов расчёта и вывода протоколов. Данная функция позволяет пользователю формировать необходимую в зависимости от поставленных задач документацию. При удовлетворительном коэффициенте чувствительности можно сохранить полученные уставки в фонд РЗА, нажав на кнопку «сохранить уставки в фонд».

Преимущество работы с данным модулем заключается в одновременном расчёте множества расчётных условий и подрезимов и автоматическом анализе результатов расчёта. Таким образом, работая с данным модулем, имеется возможность выбора параметров срабатывания устройств РЗА с учётом всего спектра возможных условий, влияющих на выбор уставки.

Модуль анализа срабатывания защит – МАС

Правильность выбора уставки защиты не может быть однозначно подтверждена, если для защиты соблюдаются все необходимые условия по чувствительности в требуемых точках. Важно иметь полное представление, каким именно образом и в какой последовательности будут действовать защиты при моделировании реального повреждения в сети с реальным нормальным режимом.

Модуль функционирует следующим образом [3]. Для начала работы с модулем необходимо задать на сети начальные расчётные условия: установить повреждения и задать любые необходимые коммутации. При этом количество повреждений и защит в замере может быть произвольным. Модуль производит расчёт дерева событий, построенного на основании времен срабатывания защит, добавленных в замер. В каждый момент времени для каждой ступени защиты из выбранного списка производится расчёт коэффициентов чувствительности, в соответствии с которым определяется состояние защиты в каждый момент времени путём сравнения с требуемым значением коэффициента чувствительности. Пользователь имеет возможность изменять требуемый коэффициент чувствительности в диалоговом окне модуля. В модуле имеется возможность моделировать отказ ступеней защиты, отказ всей панели, отказ всего комплекта защит, что удобно при анализе резервирования защиты. Пользователю доступна также функция создания различных вариантов

развития аварий. Данная функция может быть полезна, например, при наличии близких времен срабатывания защит.

При прохождении итерации защита может производить модификации на сети, а именно отключение заданной ветви со стороны узла, указанного пользователем в фонде РЗА. Все производимые модулем коммутации отображаются на схеме. Также пользователь в каждый момент времени в графическом редакторе может редактировать режим сети, например, моделировать различные варианты развития аварии во времени, либо добавлять дополнительные коммутации.

В работе модуля для определения состояния защит учитывается не только чувствительность по уставке, но и чувствительность по дополнительным условиям. Для токовых защит дополнительно имеется возможность учёта чувствительности реле мощности и реле напряжения (для защит с пуском по напряжению). Для дистанционных защит учитывается чувствительность по току точной работы и устройства блокировки от качаний. Набор коэффициентов чувствительности для каждой защиты индивидуален. Состояние ступени в каждый момент времени определяется в соответствии с коэффициентом, определённым среди всех доступных условий. Среди всех фактических коэффициентов для анализа выбирается наиболее подходящий из доступного перечня коэффициентов чувствительности и выделяется знаком «*».

Каждая ступень защиты может иметь следующие состояния:

- 1) «не чувс.» – расчётный коэффициент чувствительности оказался меньше требуемого. Программа делает вывод о том, что данная ступень защиты не чувствует повреждение с требуемым коэффициентом чувствительности;
- 2) «отсчёт вв.» – расчётный коэффициент чувствительности больше или равен требуемому. Защита начинает отсчёт выдержки времени. В каждый следующий момент времени проверяется удержание защиты в модифицированной сети.
- 3) «отказ» – отказ защиты. Отказ задаётся пользователем путём вызова соответствующей функции из контекстного меню строки таблицы.
- 4) «откл.» – защита сработала и отключила ветвь со стороны установки защиты. Защита принимает данное состояние в случае, если расчётный коэффициент чувствительности оказался больше требуемого, а выдержка времени либо равна 0, либо стала меньше времени с момента, когда защита почувствовала повреждение.
- 5) «сброшена вв.» – сброшен отсчёт выдержки времени в результате срабатывания другой защиты.
- 6) «откл. ненормат.» – защита сработала, но коэффициент чувствительности меньше нормативного.

Окончанием расчёта является состояние изолированности повреждения, либо отсутствие изменений состояний защит в будущие моменты времени. В результате окончания расчёта пользователь имеет возможность сформировать протокол. В протоколе отображается результат расчёта каждой итерации с отображением параметров повреждений на сети и коммутаций.

В результате окончания расчёта (рис. 4) все защиты, находящиеся в замере, должны иметь одно из четырёх состояний:

- 1) не чувствует повреждение;
- 2) защита сработала и отключила ветвь со стороны установки;

- 3) защита сработала и отключила ветвь со стороны установки при коэффициенте чувствительности меньше нормативного;
- 4) защита не сработала вследствие сброса выдержки времени.

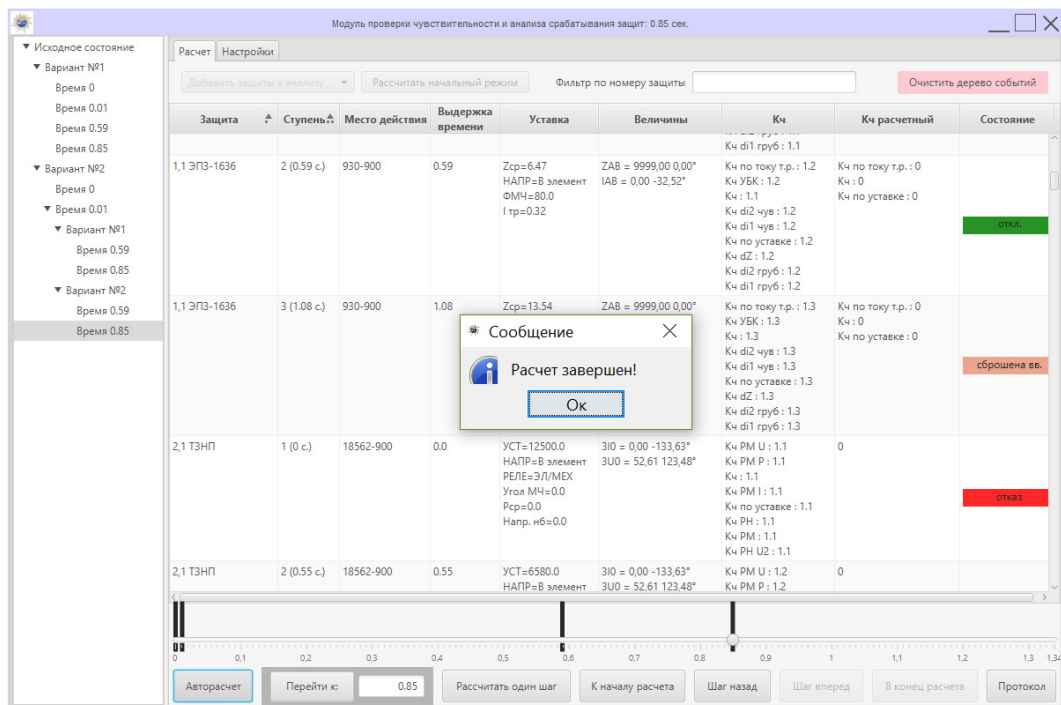


Рис. 4. Окно модуля анализа срабатывания при завершении расчёта

Модуль анализа срабатывания устройств релейной защиты с относительной селективностью позволяет видеть процесс локализации повреждения в каждый момент времени и делать вывод о правильности выбора уставок и времён срабатывания ступеней защиты.

Модуль определения минимального состава генерирующего оборудования – МСГО

При выводе в ремонт генерирующих блоков в системе изменяется токораспределение. Наибольшее влияние такое изменение состояния сети оказывает на защиты, находящиеся в электрической близости к объектам отключения.

Логика работы модуля МСГО заключается в построении вариаций одновременных отключений генерирующих блоков и дополнительных элементов сети и расчёта для каждой итерации чувствительности и селективности действия рассматриваемых защит. Для формирования режимов, наиболее приближенных к реальности, и исключения лишних режимов доступны настройки максимального и минимального числа одновременно отключаемых блоков. Например, при задании номеров элементов: 1, 2 и 3, максимального числа одновременно отключаемых блоков равного 2 и минимального числа равного 1, модуль построит следующие вариации отключений блоков: 1; 2; 3; 1 и 2; 2 и 3; 3 и 1. При этом алгоритм исключает повторения с целью расчёта только уникальных вариаций. Основываясь на результатах расчётов модуля, можно сделать вывод о допустимости или недопустимости какого-либо режима.

Работа с модулем МСГО начинается с задания исходных данных, необходимых для расчёта. В первую очередь указываются номера элементов электрической сети, представляющих собой блоки генератор + трансформатор, в соответствующее поле «Список рассматриваемых блоков (номера элементов)». Затем, при необходимости, указываются дополнительно манипулируемые элементы в соответствующем поле. Далее добавляются необходимые защиты. Для каждой защиты можно задать множество точек проверки чувствительности и зоны срабатываний.

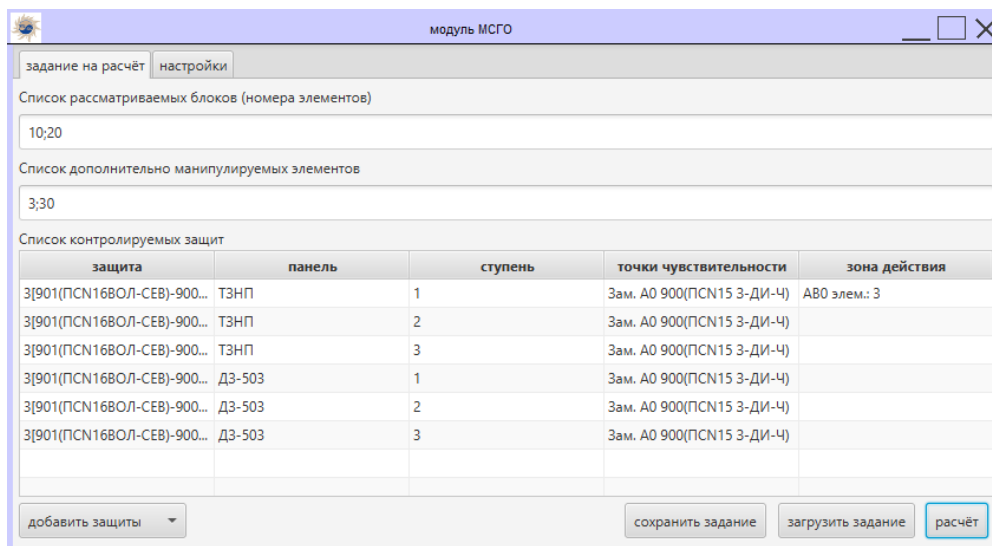


Рис. 5. Окно модуля определения минимального состава генерирующего оборудования

При добавлении точки проверки чувствительности в дополнительном окне требуется задать повреждение, при котором будет проверяться коэффициент чувствительности защиты, на языке модуля К.У.Р.С., а также требуемый коэффициент чувствительности в соответствующие поля.

При добавлении зоны конца срабатывания в дополнительном окне требуется задать номера элементов, на которых будет производиться поиск зоны конца срабатывания, а также тип повреждения, при котором будет производиться поиск зоны конца срабатывания, в соответствующие поля. Логика работы данной функции аналогична команде «СОГЛАСОВАНИЕ» модуля К.У.Р.С.

При необходимости при добавлении расчётных условий можно задать дополнительные коммутации и подрежимы, которые будут применены только к рассматриваемому условию. Также имеется возможность задания начального режима сети.

По результатам выполнения расчёта модуль формирует результаты расчёта в диалоговом режиме, где в табличном виде будет представлен список всех рассчитанных вариаций с обозначением допустимости или недопустимости данного режима. В целях компактности и наглядности данная таблица реализована с помощью представления типа «дерево». По умолчанию открывается лишь список режимов с указанием их допустимости или недопустимости, а далее пользователь вручную может развернуть результаты расчёта и просмотреть выполнение необходимых условий для каждой интересующей ступени каждой защиты. Также пользователь может вывести протокол интересующего его расчёта.

| № | защита | вариация | режим | результат | комментарии |
|---|--------------------------------------------------------|----------|---------------------------|----------------------|-------------|
| 1 | 3[901(ПСН16БОЛ-СЕВ)-900(ПСН15 3-ДИ-Ч)]1 ТЗНП ступ. 1 | 10 | | недопустимый режим | |
| | 3[901(ПСН16БОЛ-СЕВ)-900(ПСН15 3-ДИ-Ч)]1 ТЗНП ступ. 2 | | | условия не соблюдены | |
| | 3[901(ПСН16БОЛ-СЕВ)-900(ПСН15 3-ДИ-Ч)]1 ТЗНП ступ. 3 | | | условия не соблюдены | |
| | чувствительность | | Зам. А0 900(ПСН15 3-ДИ-Ч) | условия соблюдены | |
| | | | | Кн = 2,708 > 1 | |
| | 3[901(ПСН16БОЛ-СЕВ)-900(ПСН15 3-ДИ-Ч)]1 ДЗ-503 ступ. 1 | | | условия не соблюдены | |
| | 3[901(ПСН16БОЛ-СЕВ)-900(ПСН15 3-ДИ-Ч)]1 ДЗ-503 ступ. 2 | | | условия не соблюдены | |
| | 3[901(ПСН16БОЛ-СЕВ)-900(ПСН15 3-ДИ-Ч)]1 ДЗ-503 ступ. 3 | | | условия соблюдены | |
| 2 | | 20 | | недопустимый режим | |
| 3 | | 3 | | недопустимый режим | |

Рис. 6. Второе окно модуля определения минимального состава генерирующего оборудования с результатами расчёта

Заключение

С целью снижения рутинных однотипных операций модуль автоматизированного расчёта уставок предоставляет функционал для удобного одновременного расчёта всех требуемых условий и, что немаловажно, автоматического выбора необходимых уставок на основании всех результатов расчёта. При этом, верификация результатов расчёта и сохранение уставок в фонд РЗА остаются в зоне ответственности пользователя.

Модуль анализа срабатывания защит позволяет произвести анализ корректности выбора уставок и времён срабатывания ступеней при одновременном анализе множества защит. Исследование поведения установленной в электрической сети релейной защиты в условиях множества аварий, действий противоаварийной автоматики, постоянных изменений выдержек времени РЗ и возможных отказов каких-либо ступеней защит является одной из ключевых задач, решаемых специалистами РЗА, с которой прекрасно справляется разработанный модуль анализа срабатывания защит в ПВК «АРУ РЗА».

Модуль определения минимального состава генерирующего оборудования позволяет определить состояния защит в каждом из возможных состояний сети, сформированных на основании моделирования одновременного отключения генерирующих блоков. Благодаря разработанному модулю пользователь может сделать вывод о допустимости рассматриваемого режима и выдать дополнительные рекомендации в случае необходимости.

Рассмотренные модули, находящиеся в составе ПВК «АРУ РЗА», позволяют на основе большого количества входных данных проводить полный автоматизированный анализ действия защит сети с высокой скоростью расчёта и информативностью получаемых результатов, имеющих удобную форму представления для последующей работы с ними.

Важным достоинством разработанных и описанных выше модулей (АРУ, МАС, МСМГО) является существенная экономия рабочего времени за счёт автоматиза-

ции рутинных процессов и действий пользователя, а также связанное с этим снижение вероятности ошибок при расчёте и выборе уставок. Также разработанные модули позволяют работать с расчётными случаями, в которых большое количество необходимых для анализа и рассмотрения режимов не позволяет практически производить полный расчёт и анализ вручную.

Список литературы

1. Абакумов С. А., Виштибеев А. В., Гаязов С. Е., Саввин Д. Н., Надобная Е. А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ «Программно-вычислительный комплекс для автоматизированного расчёта уставок релейной защиты и автоматики. Версия 6.0 (ПВК АРУ РЗА 6.0)» № 2020662535 от 15.10.2020.
2. Развитие программно-вычислительного комплекса автоматизированного расчёта уставок релейной защиты и автоматики: новые модули и функции / С. А. Абакумов, А. В. Виштибеев, С. Е. Гаязов, Е. А. Надобная, Д. Н. Саввин // Известия НТЦ Единой энергетической системы – 2019. – № 2 (81). – С. 91–100.
3. Модуль анализа срабатывания защит в современных программно-вычислительных комплексах на примере модуля анализа в ПВК «АРУ РЗА» / С. А. Абакумов, А. В. Виштибеев, С. Е. Гаязов, Е. А. Надобная, Д. Н. Саввин, Е. И. Эрекайкин // Известия НТЦ Единой энергетической системы – 2020. – № 1 (82). – С. 49–56.

Абакумов Сергей Александрович, главный инженер проектов, заместитель заведующего отделом развития энергосистем и энергообъектов Научно-технического центра Единой энергетической системы Противоаварийное управление (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»). E-mail: AbakumovSA@nsk.so-ups.ru

Виштибеев Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий отделом развития энергосистем и энергообъектов Научно-технического центра Единой энергетической системы Противоаварийное управление (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»). E-mail: VishtibeevAV@nsk.so-ups.ru

Гаязов Ставро Евгеньевич, инженер-программист отдела развития энергосистем и энергообъектов Научно-технического центра Единой энергетической системы Противоаварийное управление (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»). E-mail: GayazovSE@arurza.ru

Саввин Дмитрий Николаевич, инженер отдела развития энергосистем и энергообъектов Научно-технического центра Единой энергетической системы Противоаварийное управление (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»). E-mail: SavvinDN@nsk.so-ups.ru

Надобная Евгения Анатольевна, инженер отдела развития энергосистем и энергообъектов АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление». E-mail: NadobnayaEA@arurza.ru

Эрекайкин Евгений Иванович, программист отдела развития энергосистем и энергообъектов Научно-технического центра Единой энергетической системы Противоаварийное управление (АО «НТЦ ЕЭС Противоаварийное управление»). E-mail: ErekaikinEI@arurza.ru