

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА EnergyCS ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Михалева О. Б.

Приведен краткий обзор нового программного комплекса, позволяющего осуществлять проектирование электрических систем. Показан ряд возможностей комплекса, в том числе проведение расчетов системы в различных режимах.

Введение.

Комплекс программ EnergyCS предназначен для выполнения электротехнических расчетов при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем любой сложности. Комплекс EnergyCS сочетает в себе удобный пользовательский интерфейс и мощные математические методы расчета режимов как разомкнутых распределительных, так и сложнозамкнутых системообразующих сетей.

Области применения:

- проектирование электрических распределительных сетей района, подрайона, города, а также промышленных предприятий;
- проектирование сложных энергетических систем;
- разработка технических условий на подключение дополнительных предприятий к существующей электрической сети;
- оперативный контроль и проверка возможных режимов существующих электрических сетей переменного тока;
- расчеты и анализ технических потерь электроэнергии.

Проектирование электроэнергетических систем, являющихся системами кибернетического типа, должно учитывать основные свойства таких систем: большое многообразие свойств и состояний, множество функционально разнообразных, но работающих в едином режиме элементов, сложность и разнообразие структуры и режимов работы, многовариантность развития и т.п. При этом проектировщикам приходится выполнять большое число расчетов установившихся режимов (УР) для проверки допустимости принятых решений как по условиям загрузки элементов электрических сетей, так и по возможностям регулирования потокораспределения и уровней напряжения. Кроме того, на основе моделирования установившихся режимов выполняются расчеты токов короткого замыкания (ТКЗ) для выбора и проверки оборудования по условиям термической и динамической стойкости и для проектирования релейной защиты и автоматики. Поэтому организации, занимающиеся проектированием развития электроэнергетических систем, широко используют различные программы для расчетов УР.

Основными требованиями к таким программам являются высокая точность и адекватность расчетов, надежность получения результата при высокой производительности выполнения расчетов. В настоящее время к этим требованиям добавилось еще одно: возможность визуализации результатов расчетов и их автоматизированного анализа.

В основе расчета УР лежит решение системы нелинейных уравнений большой размерности, что само по себе представляет большую сложность. Решение таких систем уравнений выполняется численными итерационными методами, при этом возникают проблемы сходи-

мости и однозначности решения. Практически все проблемы сходимости так или иначе связаны с корректностью задания исходных данных. При большом объеме данных, которые необходимо ввести для расчета, велика вероятность совершения ошибки, что может привести к расходящемуся итерационному процессу. Другой причиной может оказаться несоответствие заданных нагрузок пропускным способностям элементов электрической сети, что для больших электроэнергетических систем далеко не очевидно.

Решить проблему ошибок при вводе данных позволяет использование в качестве исходных данных первичных документов (паспортные данные оборудования, протяженность, марка проводов и вид опор линий электропередачи и т.п.) для элементов электрических сетей и автоматизация определения расчетных параметров их схем замещения. Первичные данные оборудования могут заноситься в электронный справочник и использоваться всеми модулями программного комплекса.

Все эти проблемы решены в программном комплексе EnergyCS, который позволяет выполнять на единой информационной модели электроэнергетической системы как расчеты установившихся режимов, так и расчеты токов короткого замыкания. Кроме того, в процессе эксплуатации на той же модели могут проводиться расчеты потерь электрической энергии. Для решения этих задач соответственно предназначены модули EnergyCS Режим, EnergyCS ТКЗ и EnergyCS Потери. Они являются самостоятельными программами, но могут использовать одну и ту же расчетную модель сети. Дополнительная информация, необходимая для каждого из модулей, сохраняется в модели, однако никак не влияет на работу с этими данными других модулей. В основу работы всех модулей положен единый интерфейс и базовый расчет установившихся режимов.

Расчеты установившихся режимов.

В программном комплексе EnergyCS реализован многократно апробированный и хорошо себя зарекомендовавший метод Ньютона для решения системы нелинейных уравнений баланса мощностей в сочетании с методом Гаусса для решения линейаризованных систем уравнений на каждой итерации метода Ньютона. Для разомкнутых участков сети реализованы специальные топологические методы расчета, которые позволяют существенно улучшить сходимость метода Ньютона благодаря значительному сокращению размерности решаемой системы нелинейных уравнений. Применение топологических методов позволяет решить ряд специфических задач, применимых для разомкнутых сетей (таких как расчет нагрузок по отпуску мощности или энергии на головном участке), выполнять расчет разомкнутой сети с учетом коэффициентов неодновременности и т.п.

При проведении расчетов различных режимов электрических систем большое значение имеют удобство подготовки и коррекции исходных данных, а также наглядность получаемых результатов. Поэтому в программном комплексе EnergyCS использовано объектное моделирование электрической сети с автоматическим формированием расчетной схемы (модели) и графическое ее представление, приближенное по изображению к принципиальной схеме.

Схема любой электрической сети состоит из множества связанных между собой объектов: воздушных и кабельных линий электропередачи, трансформаторов, шунтирующих и токоограничивающих реакторов, батарей конденсаторов, генераторов и т.п. Но в целом схема сети содержит ограниченное число видов объектов. Для каждого вида в программном комплексе предусмотрена отдельная таблица описания характерных свойств (параметров) объекта, а также таблица каталожных данных в базе справочной информации. Например, для объекта «воздушная линия» основными свойствами являются марка и сечение проводов, среднегеометрическое расстояние между фазами, число проводов в фазе и шаг расщепления, длина линии. Таблица проводов для различных марок, хранящаяся в базе справочной информации, содержит значения сечений и диаметров проводов, погонных активных сопротивлений и емкостных проводимостей, допустимых токов.

Ввод информации о схеме электрической сети производится в естественном для пользователя виде путем добавления новых объектов в графическом редакторе, а также задания

им необходимых свойств в соответствующих таблицах. При этом автоматически создаются необходимые узлы и ветви расчетных схем замещения объектов. Параметры схемы замещения каждого объекта рассчитываются в программном комплексе на основе заданных свойств и справочной информации, которая хранится в отдельном файле базы данных. В процессе ввода постоянно отслеживается связь между объектами и соответствующими узлами и ветвями расчетной схемы. Это позволяет значительно упростить процесс подготовки исходной информации для расчетов режимов сложной электрической сети и исключить возможные ошибки при определении параметров схем замещения.

Вся введенная информация хранится в базе данных расчета. Для просмотра и редактирования она отображается в различных окнах экрана как в табличном, так и в графическом представлении. На Рис.1 приведен вариант экранной формы программы при выводе участка сложносамкнутой электрической сети в окна со схемой и таблицами с исходными данными (формами для задания исходных данных).

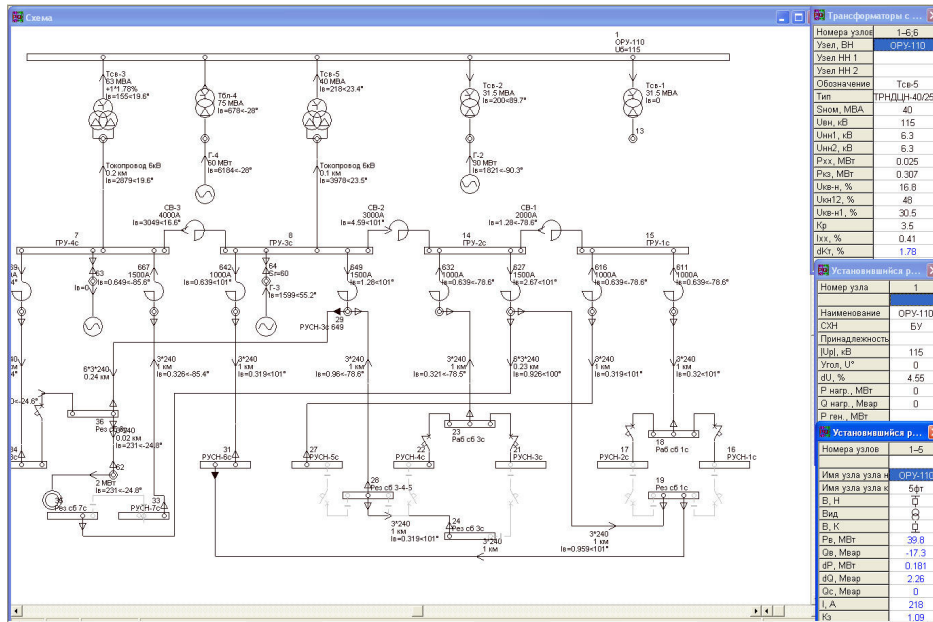


Рис.1 Графическое окно модели проекта

Каждому объекту электрической сети соответствует общепринятое графическое изображение, которое отображается на схеме при его добавлении. В схеме также могут присутствовать абстрактные ветви, не привязанные к конкретному объекту электрической сети. Выбор нужного объекта при его добавлении производится из списка объектов электрической сети (Рис. 2).



Рис. 2. Палитра объектов электрической сети

Отдельные объекты соединяются между собой через общие шины (узлы расчетной модели). При добавлении новых элементов на схему и при их соединении автоматически формируется расчетный граф электрической сети.

Параметры оборудования вводятся в соответствующие таблицы одновременно с вводом изображения схемы или, по усмотрению расчетчика, позднее. В правой части экрана, приведенного на Рис.1, расположены формы для ввода данных узлов и параметров линий, а в форме «Ветви. Исходные данные» отображены результаты расчета электрических параметров схемы замещения вводимого объекта.

Вообще (чисто теоретически) графическое изображение схемы не является обязательным элементом расчета. Программный комплекс допускает возможность ввода всей расчетной модели исключительно в табличном виде. Графическое изображение схемы может быть введено позднее, после ввода описания модели (так принято во многих других программах подобного класса), но это, как правило, неудобно.

Допускается вводить изображение лишь для анализируемой части электрической сети, оставляя не анализируемую часть только в табличном виде. То есть элемент, присутствующий в модели и учитываемый в расчете, не обязательно должен (но может) быть изображен на схеме. В то же время схема не может содержать элементов, не представленных в расчетной модели. При просмотре схемы автоматически обеспечивается синхронизация табличного представления данных с указанным на схеме элементом.

При выполнении расчетов установившихся режимов сложных реальных электрических систем возникает необходимость работы с расчетной моделью большой размерности. Однако когда размерность задачи заметно превышает 1000 узлов, неизбежно возникают препятствия, которые не связаны с размещением модели в оперативной памяти компьютера, а определяются такими проблемами, как:

- устойчивость расчета (проблемы обеспечения сходимости);
- наблюдаемость результатов расчетов на схеме электрической сети.

В программном комплексе EnergyCS эти проблемы решены. Устойчивость расчета обеспечивается сразу в двух (или нескольких) направлениях. С одной стороны, применен надежный алгоритм решения уравнений узловых напряжений, использован стартовый алгоритм для получения «хороших» начальных приближений для решения нелинейных уравнений методом Ньютона, а с другой – в процессе расчета обеспечивается интеллектуальный анализ топологии сети, который позволяет выделять разомкнутые участки и применять для них более простые топологические методы расчета. Благодаря такому решению появляется возможность существенно снизить размерность уравнений узловых напряжений и соответственно значительно увеличить скорость расчета.

Наблюдаемость результатов расчетов на схеме электрической сети достигается следующими способами. Все элементы расчетной схемы могут быть классифицированы по принадлежности к различным районам и подрайонам. При этом предусмотрено до четырех уровней иерархии подрайонов, например:

- Энергосистема
 - Сетевое предприятие
 - Сетевой район
 - Подстанция.

Названия уровней иерархии могут быть изменены пользователем в соответствии с поставленной задачей.

Вся информация – как исходные данные, так и результаты расчетов - может быть выделена и проанализирована по отдельным районам и подрайонам. Кроме того, расчетную схему можно разбить на множество визуально независимых участков, каждый из которых может быть изображен на отдельной странице схемы (подсхеме).

Каждая подсхема имеет свое наименование, которое отображается в заголовке окна графического редактора. Для перехода от одной подсхемы к другой служит команда Список

подсхем в позиции Схема главного меню и в контекстном меню. Для выбора подсхемы на экран выводится окно со списком имеющихся подсхем (Рис. 3).

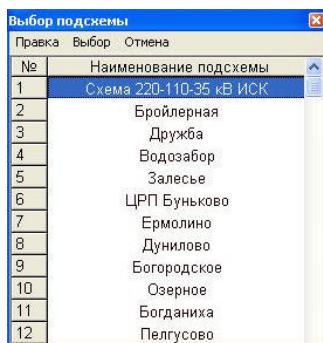


Рис. 3. Окно со списком подсхем

Чтобы обеспечить проведение многовариантных расчетов, связанных с исследованием режимов электрической сети при отключении отдельных ее элементов, в схеме замещения каждого элемента сети предусмотрены выключатели, которые не присутствуют в расчетной модели, но позволяют задавать включенное или отключенное состояние любого элемента. В частности, это дает возможность рассматривать одностороннее отключение линий электропередач, так как для них значимо, с какой именно стороны элемент подключен или отключен от схемы. Каждая ветвь в начале и в конце имеет маркеры таких выключателей (ветви с одним узлом подключения – например, шунты – только в начале). Маркер выключателя обозначается маленьким прямоугольником. Если прямоугольник закрашен, то с соответствующей стороны элемент отключен. Маркеры могут быть скрыты – в этом случае отключенное состояние элемента обозначается разрывом линии и перпендикулярной чертой. Изменение состояния выключателя производится простым щелчком мышью по маркеру на схеме. Включение и отключение ветвей изменяет топологию сети, соответствующим образом изменяется раскраска схемы. Участки, не связанные с балансирующим узлом (системой), окрашиваются окрашенными в специальный цвет отключенных элементов (например, в серый). Если применена раскраска по связности с системой, то в результате переключений изменяется окраска участков схемы.

Расчеты токов короткого замыкания.

При проектировании развития и реконструкции электрических сетей требуется выполнять не только расчеты установившихся режимов, но и множество расчетов токов короткого замыкания и токов замыкания на землю. Причем расчеты токов короткого замыкания выполняются для разных целей: для выбора оборудования и его проверки по стойкости токам короткого замыкания; для выбора релейных защит и расчета их уставок. Как правило, эти задачи решаются разными подразделениями проектного института и зачастую с использованием различных программных средств. Это, естественно, приводит к тому, что в подразделениях проектной организации используются различные модели одной и той же сети, что является причиной ошибок и противоречит принципам автоматизированного проектирования. В программном комплексе EnergyCS задача расчета токов короткого замыкания решена в специальном модуле EnergyCS ТКЗ. Расчеты токов короткого замыкания выполняются на той же модели, что и расчеты установившихся режимов. Модель, которая используется для расчета токов короткого замыкания, удовлетворяет самым жестким требованиям, предъявляемым к расчетам для выбора уставок релейных защит. Токи ветвей приводятся к своим номинальным напряжениям. При этом учитываются точные значения коэффициентов трансформации трансформаторов и изменения сопротивлений обмоток при переключении ответвлений РПН и ПБВ. Расчет узловых напряжений при коротких замыканиях производится методом Гаусса,

по напряжениям узлов вычисляются токи в ветвях. Для расчета ЭДС в начальный момент короткого замыкания для системы, генераторов, синхронных и асинхронных двигателей в программе используются напряжения в установившемся режиме, предшествующем моменту возникновения короткого замыкания, – результаты расчета установившегося режима с учетом регуляторов напряжения и режима по активной и реактивной мощности (в строгом соответствии с требованиями ГОСТ). На самом деле полный расчет установившегося режима производится для каждого расчета токов короткого замыкания. Модуль EnergyCS ТКЗ не связан с модулем EnergyCS Режим и может использоваться совершенно независимо. Для получения сопоставимых результатов можно включить режим программы, при котором ЭДС рассчитываются по номинальным параметрам – результаты будут соответствовать полученным иным способом (например, вручную или с использованием других программ). Однако при этом можно получить завышенные или заниженные значения токов короткого замыкания. На сегодня программный комплекс EnergyCS позволяет решать следующие задачи в рамках расчетов токов короткого замыкания:

- расчет начальных значений токов трехфазных коротких замыканий в сложносамкнутых сетях;
- расчет начальных значений токов однофазных на землю коротких замыканий;
- расчет начальных значений токов двухфазных на землю коротких замыканий;
- расчет начальных значений токов двухфазных без земли коротких замыканий;
- расчет токов в тросах линий при коротких замыканиях на землю и оценка их термической стойкости;
- расчет емкостных токов однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью;
- расчет ударных токов коротких замыканий при трехфазных КЗ в соответствии с ГОСТ 27514-87;
- расчет значения периодической и аperiodической составляющих тока КЗ в заданный момент времени;
- расчет действующего значения тока трехфазного КЗ в момент отключения;
- расчет интеграла Джоуля на момент отключения, а также термически эквивалентного и эквивалентного односекундного токов короткого замыкания;
- построение векторных диаграмм токов и напряжений для произвольных узлов и произвольных ветвей сети.

Программа позволяет при заданной точке короткого замыкания рассмотреть распределение токов и напряжений по всем ветвям схемы, вывести в таблицу или на схему значения максимальных фазных значений токов КЗ, токов во всех фазах, токов по симметричным составляющим, а также построить векторную диаграмму токов для выбранной ветви и векторную диаграмму напряжений для выбранного узла.

Во время расчета несимметричного короткого замыкания в заданной точке схема нулевой последовательности формируется автоматически. Формирование схемы осуществляется на основе:

- топологической структуры расчетной схемы;
- информации о схеме групп соединения обмоток трансформатора и режима его нейтрали;
- информации о взаимном влиянии ВЛ, проходящих в общих коридорах с учетом геометрии подвески проводов на опоре;
- информации о наличии и способе заземления грозозащитных тросов.

Результаты расчетов могут быть выведены непосредственно на схему или в таблицы. Окончательные документы можно формировать с использованием MS Word на основе заранее заготовленных шаблонов.

В программе предусмотрено несколько вариантов представления результатов расчета ТКЗ.

При первом варианте расчетчик определяет узел, в котором следует рассмотреть возможность короткого замыкания. В результате получаются токи короткого замыкания в данном узле при трехфазном, двухфазном, однофазном и двухфазном КЗ на землю, а также значение ударного тока и постоянной времени затухания свободной составляющей. Для каждого вида КЗ во всех ветвях определяется распределение токов, а для всех узлов – остаточные напряжения (Рис. 4).

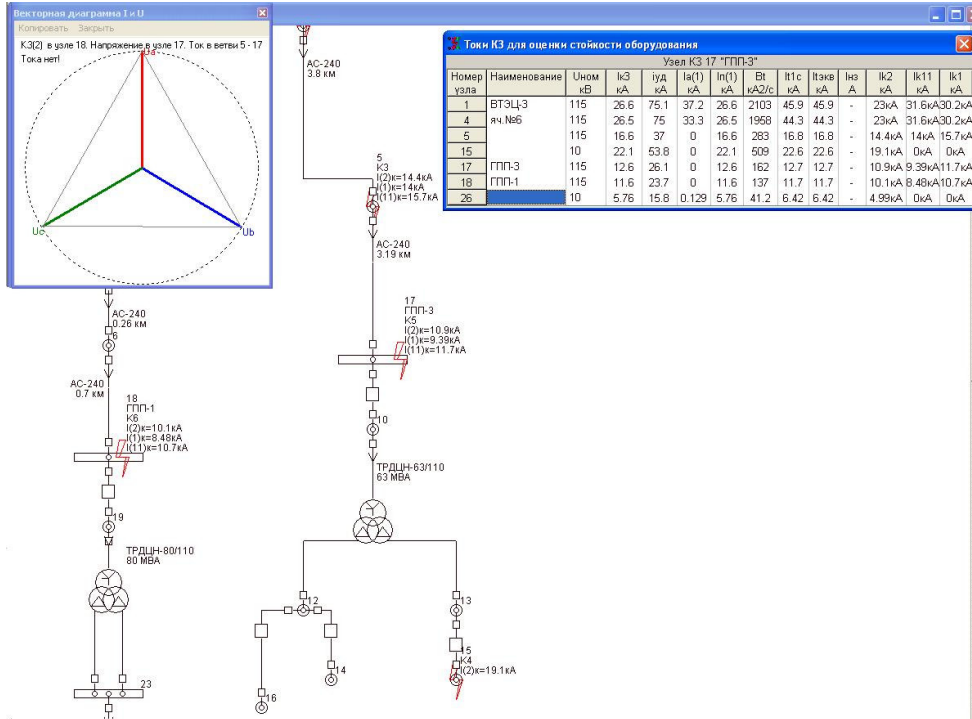


Рис. 4. Пример результатов расчета токов коротких замыканий

При втором варианте программа выполняет расчеты ТКЗ для множества указанных узловых точек схемы. В этом случае на схему могут быть выведены только значения токов в выделенных узлах, а в таблицу – токи во всех выделенных узлах и примыкающих к ним ветвях. Кроме начальных значений токов КЗ для всех видов повреждений, в таблицу выводятся режимные параметры для оценки теплового и динамического действия токов трехфазного КЗ, то есть для каждой примыкающей к узлу КЗ ветви выводятся результаты расчета ударного тока, интеграла Джоуля, термически эквивалентного и эквивалентного односекундного токов (Рис.5).

Для расчетов токов КЗ с целью определения уставок релейной защиты предусмотрен расчет токов, протекающих через заданную ветвь при коротких замыканиях в заданном множестве узлов.

Расчеты токов замыкания на землю для сетей с изолированной нейтралью производятся топологическим методом в этом же модуле и могут быть выведены на схему или в таблицы наряду с результатами расчетов ТКЗ.

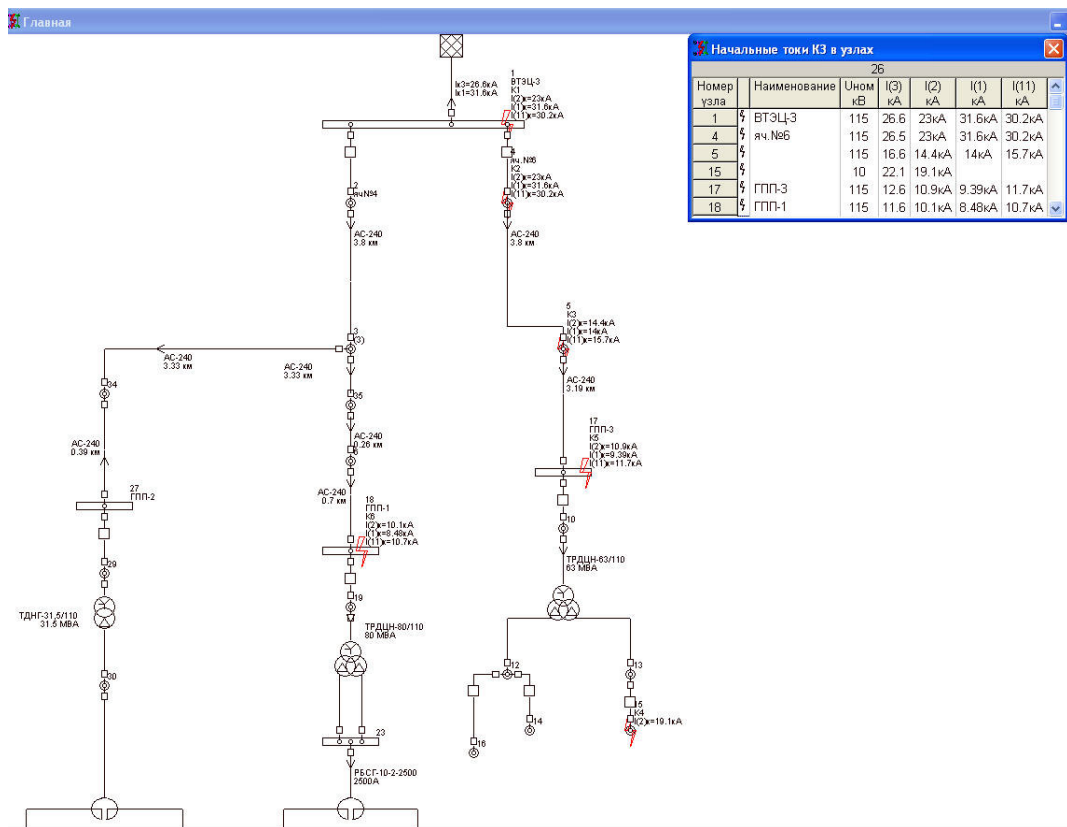


Рис.5 Результаты расчета ТКЗ при коротком замыкании в нескольких узлах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение программного комплекса EnergyCS на этапе проектирования электрических сетей различного назначения позволяет достаточно быстро сформировать расчетную модель – трудозатраты на создание модели с использованием объектного моделирования окупаются значительным сокращением времени проведения множества расчетов как установленных режимов, так и токов короткого замыкания. Кроме того, расчетная модель может быть передана заказчику вместе с проектной документацией. В этом случае заказчик получает не только документы, обосновывающие проектные решения, но и готовую информационную модель проектируемой сети, которая может использоваться при решении задач эксплуатации. Например, при принятии решений о возможных последствиях оперативных переключений, анализе последствий аварийных повреждений, оперативном анализе потерь мощности и технических потерь электрической энергии. Такой подход в полной мере соответствует принципам, положенным в основу CALS-технологии.