



# EnergyCS

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При проектировании электроэнергетических систем, являющихся системами кибернетического типа, требуется учитывать их основные свойства: многообразие свойств и состояний, большое число элементов, которые различаются функционально, но работают в едином режиме, сложность и разнообразие структуры и режимов работы, многовариантность развития... При этом проектировщикам приходится выполнять большой объем расчетов установившихся режимов (УР) — так проверяется допустимость принятых решений по условиям загрузки элементов электрических сетей, а также по возможностям регулирования потоков распределения и уровней напряжения. Кроме того, на основе моделей установившихся режимов требуется произвести расчеты токов короткого замыкания (ТКЗ): они необходимы для выбора и проверки оборудования по условиям термической и динамической стойкости, результаты этих расчетов используются при проектировании релейной защиты и автоматики.

Понятно, что при выполнении всех этих операций необходимы

программы для расчетов УР. Определены и основные требования к таким программам: высокая точность и адекватность расчетов, быстродействие, надежность получаемых результатов, возможность их визуализации и автоматизированного анализа.

В основу расчета УР положено решение системы нелинейных уравнений большой размерности, что само по себе сопряжено с большими сложностями. Решение таких систем уравнений осуществляется численными итерационными методами, а это зачастую сопровождается возникновением проблем сходимости и однозначности решения. В свою очередь, практически все проблемы сходимости так или иначе связаны с корректностью задания исходных данных. При больших объемах данных, которые необходимо ввести для расчета, велик риск ошибки, следствием которой становится расходящийся итерационный процесс. Другой причиной может оказаться несоответствие заданных нагрузок пропускным способностям элементов электрической сети, что в случае больших электроэнергетических систем далеко не очевидно.

Все эти проблемы решены при создании программного комплекса **EnergyCS**, который позволяет выполнять как расчеты установившихся режимов, так и расчеты токов короткого замыкания на единой информационной модели электроэнергетической системы. Та же модель используется при расчете потерь электрической энергии. Для решения каждой из этих задач предназначен свой модуль системы: соответственно **EnergyCS UR**, **EnergyCS TKZ** и **EnergyCS Poteri**. Модули представляют собой самостоятельные программные средства и могут использоваться независимо друг от друга, но все они используют одну и ту же цифровую модель сети, единый интерфейс и базовый расчет установившихся режимов. Дополнительная информация, необходимая для работы модуля, сохраняется в единой модели, но никак не влияет на работу других модулей.

Программный комплекс **EnergyCS** реализует многократно проверенный на практике метод Ньютона для решения системы нелинейных уравнений баланса мощностей в сочетании с методом Гаусса для решения линеаризованных систем уравнений на каждой итерации метода Ньютона.

При проведении расчета различных режимов электрических систем очень важны удобство подготовки и коррекции исходных данных, а также наглядность получаемых результатов — поэтому средствами **EnergyCS** осуществляется объектное моделирование и графическое представление электрической сети с автоматическим формированием ее расчетной схемы (модели).

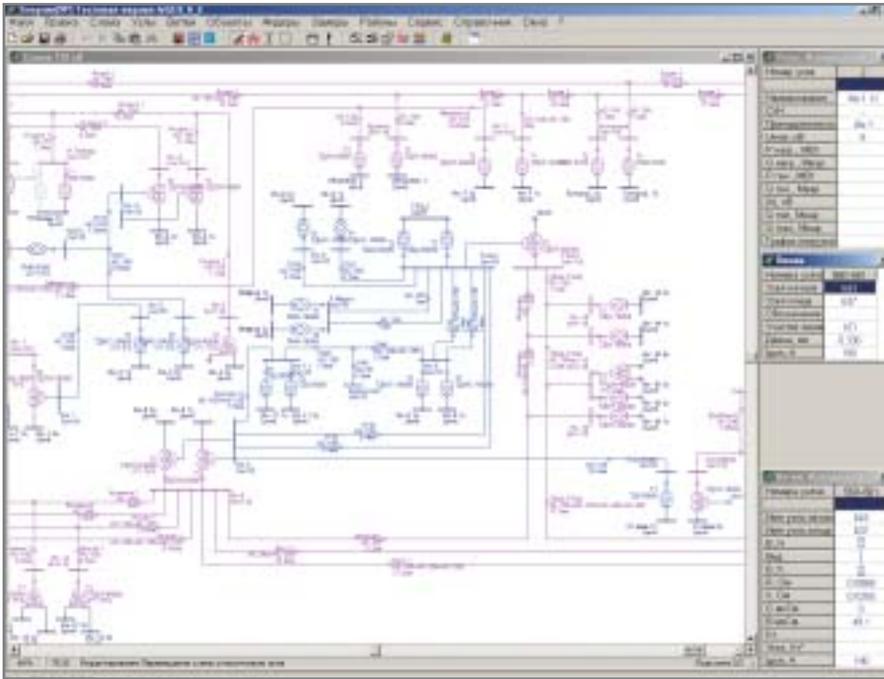


Рис. 1. Общий вид экрана программы при выполнении расчета

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.д.), но число видов этих объектов ограничено. В EnergyCS для каждого из объектов предусмотрена отдельная таблица описания его характерных свойств (параметров) и 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 различных марок, помещенная в базу справочной информации, содержит значения их сечений и диаметров, погонных активных сопротивлений и емкостных проводимостей, допустимых токов.

Ввод информации о схеме электрической сети производится добавлением новых объектов в графическом редакторе, а их свойства пользователь задает в соответствующих таблицах. При этом автоматически создаются необходимые узлы и ветви расчетных схем замещения объектов. Параметры схемы замещения каждого объекта рассчитываются на основе заданных свойств и справочной информации, которая

хранится в отдельном файле базы данных. В процессе ввода EnergyCS постоянно отслеживает связь между объектами и соответствующими узлами и ветвями расчетной схемы — это позволяет значительно упростить процесс подготовки исходной информации для расчета режимов сложной электрической сети и исключить ошибки при определении параметров схем замещения.

Вся введенная информация хранится в базе данных расчета; просмотр и редактирование этих данных возможны как в табличном, так и в графическом виде. На рис. 1 показан вариант экранной формы программы при выводе участка сложносвязанной электрической сети в окна со схемой и таблицами исходных данных.

Каждому объекту электрической сети соответствует общепринятое графическое изображение, которое появляется на схеме при добавлении этого объекта. Схема может содержать и абстрактные ветви, не привязанные к конкретному объекту электрической сети. Выбор нужного объекта при его добавлении производится из списка объектов электрической сети (рис. 2).

Отдельные объекты соединяются между собой через общие шины (узлы расчетной модели). При добавлении на схему новых элементов и при их соединении автоматически фор-

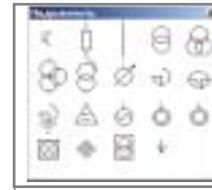


Рис. 2. Окно со списком элементов, включаемых в модель

мируется расчетный граф электрической сети.

Параметры оборудования вводятся в соответствующие таблицы одновременно с вводом изображения схемы или, по усмотрению расчетчика, позже. В правой части экрана, представленного на рис. 1, располагаются формы для ввода данных узлов и параметров линий, а в форме "Ветви. Исходные данные" отображаются результаты расчета электрических параметров схемы замещения вводимого объекта.

В принципе (правда, чисто теоретически) графическое изображение схемы не является обязательным элементом расчета. EnergyCS допускает возможность ввода всей расчетной модели исключительно в табличном виде (рис. 3, 4). Графическое изображение схемы может вводиться позднее, после ввода описания модели — такой порядок принят во многих других программах подобного класса, но это, как правило, неудобно.

Допускается ввод изображения только для анализируемой части электрической сети (остальная часть остается в табличном виде). Таким образом, элемент, присутствующий в модели и учитываемый при расчете, не обязательно должен быть изображен на схеме. В то же время схема не может содержать элементов, не представленных в расчетной модели. При просмотре схемы табличное представление данных автоматически синхронизируется с указанным на схеме элементом.

Выполнение расчетов установившихся режимов сложных реальных электрических систем требует работы с расчетной моделью большой размерности. Когда же размерность задачи заметно превышает тысячу узлов, неизбежно возникают препятствия, которые не связаны с размещением модели в оперативной памяти компьютера, а определяются такими проблемами, как устойчивость расчета (проблема обеспечения

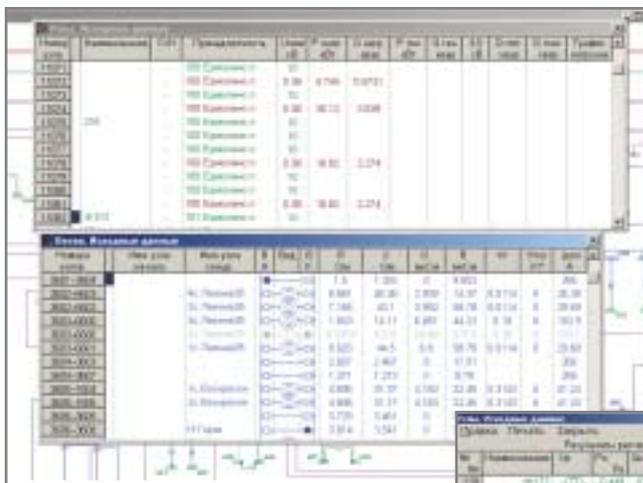


Рис. 3. Табличное представление исходных данных

сходимости) и наблюдаемость результатов расчетов на схеме электрической сети.

В программном комплексе EnergyCS эти проблемы решены. Устойчивость расчета обеспечивается сразу в двух направлениях. С одной стороны, применен надежный алгоритм решения уравнений узловых напряжений, а с другой — в процессе расчета производится интеллектуальный анализ топологии сети, который позволяет выделять разомкнутые участки и применять для них более простые топологические методы расчета. Такое решение снижает размерность уравнений узловых напряжений и, соответственно, существенно повышает 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, причем программа предусматривает организацию до четырех уровней иерархии подрайонов. Например:

- Энергосистема;
- Сетевое предприятие;
- Сетевой район;
- Подстанция.

Вся информация — как исходные данные, так и результаты расчетов — может быть выделена и проанализирована по отдельным районам и подрайонам.

Кроме того, расчетную схему допустимо разбивать 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 схемы к другой служит команда *Список под-*



Рис. 4. Табличное представление результатов по узлам и ветвям

схем в позиции *Схема* главного меню и в контекстном меню. Для выбора подсхемы служит окно со списком имеющихся подсхем (рис. 5).



Рис. 5. Выбор страницы-подсхемы

### Опыт применения

К настоящему времени имеется опыт применения программного комплекса EnergyCS для расчета установившихся режимов энергосистемы, расчетная модель которой содержит более 16 000 узлов и свыше 17 500 ветвей. Эта модель включает схему с участками сети от шин 220 кВ системообразующей сети до шин 0,4 кВ трансформаторных подстанций распределительных сетей. Расчетная модель визуально разбита на системообразующую часть, объединяющую подстанции с высшим напряжением 220 — 110 — 35 кВ, и множество распределительных сетей, каждая из которых изображена на отдельной подсхеме, но при этом оста-

ется частью единой системы и способна работать в едином режиме.

Для проведения многовариантных расчетов, связанных с исследованием режимов электрической сети при отключении отдельных ее элементов, предусмотрены выключатели, позволяющие подключить или отключить любой элемент сети. При проектировании линий электропередач важно, с какой именно стороны элемент подключен или отключен от схемы. В начале и в конце каждой ветви имеются маркеры выключателей (рис. 6), обозначаемые маленькими прямоугольниками (закрашенный прямоугольник показывает, что с соответствующей стороны элемент отключен). Если маркеры скрыты, то отключенное состояние элемента показывается разрывом линии и перпендикулярной чертой. Чтобы изменить состояние выключателя, требуется только щелкнуть на маркере левой клавишей мыши. Включение и отключение ветвей изменяет топологию сети — при этом соответствующим образом изменяется раскраска схемы. Участки, не связанные с системой, показываются цветом, определенным для отключенных элементов (например, серым). Если применена раскраска по связности с системой, то в результате переключений изменяются цвета участков схемы.

### Расчеты токов короткого замыкания

Проект развития и реконструкции электрических сетей требует не только расчета установившихся режимов, но и многочисленных расчетов токов короткого замыкания и токов замыкания на землю. Расчеты токов короткого замыкания выполняются для выбора оборудования и его проверки по стойкости токам короткого замыкания, а также для выбора релейных защит и расчета их уставок. Как правило, эти задачи решаются в разных подразделениях проектного института с использованием различных программных средств. Разработчики программного комплекса EnergyCS предложили для расчета токов короткого замыкания специальный модуль EnergyCS TKZ. Расчеты токов короткого замыкания выполняются на той же модели, что и расчеты установившихся режимов — при этом модель отвечает самым жестким требованиям, предъявляемым к расчетам для

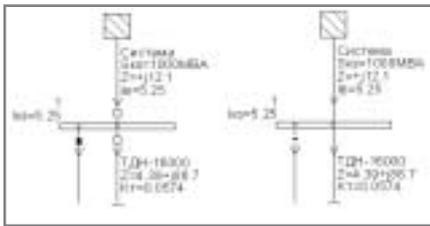


Рис. 6. Варианты представления маркеров включения/отключения ветвей

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. Расчет ЭДС в начальный момент короткого замыкания для системы, генераторов, синхронных и асинхронных двигателей производится с использованием напряжений в установленном режиме, предшествующем моменту возникновения КЗ: ре-

зультатов расчета установившегося режима с учетом регуляторов напряжения и режима по активной и реактивной мощности (в полном соответствии с требованиями ГОСТ). На самом деле полный расчет установившегося режима производится для каждого расчета токов короткого замыкания. Для получения сопоставимых результатов может быть включен режим, позволяющий рассчитывать ЭДС по номинальным параметрам, — при этом можно получить результаты, соответствующие тем, что были получены другими способами (вручную или средствами других программ). Правда, в этом случае значения токов короткого замыкания могут оказаться завышенными или заниженными.

На сегодня программа выполняет расчеты только симметричных коротких замыканий, однако уже разрабатывается модуль расчета несимметричных коротких замыканий с учетом взаимоиндукций параллельных линий электропередач с описанием коридоров параллельных участков ВЛ, а также геометрии подвески проводов и тросов.

Программа предусматривает два варианта представления результатов расчета ТКЗ. Используя первый из этих вариантов, расчетчик определяет узел, в котором следует рассмотреть возможность короткого замыкания, и получает информацию по току короткого замыкания в данном узле при трехфазном КЗ, а также значение ударного тока и постоянной времени затухания свободной составляющей. Для всех ветвей показывается распределение токов при КЗ, для всех остальных узлов — остаточные напряжения.

Когда выбран второй вариант, программа выполняет расчеты ТКЗ для всех узловых точек схемы, позволяя вывести полученные результаты на схему.

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.

Пример расчета ТКЗ для системы собственных нужд тепловой электростанции приведен на рис. 7.

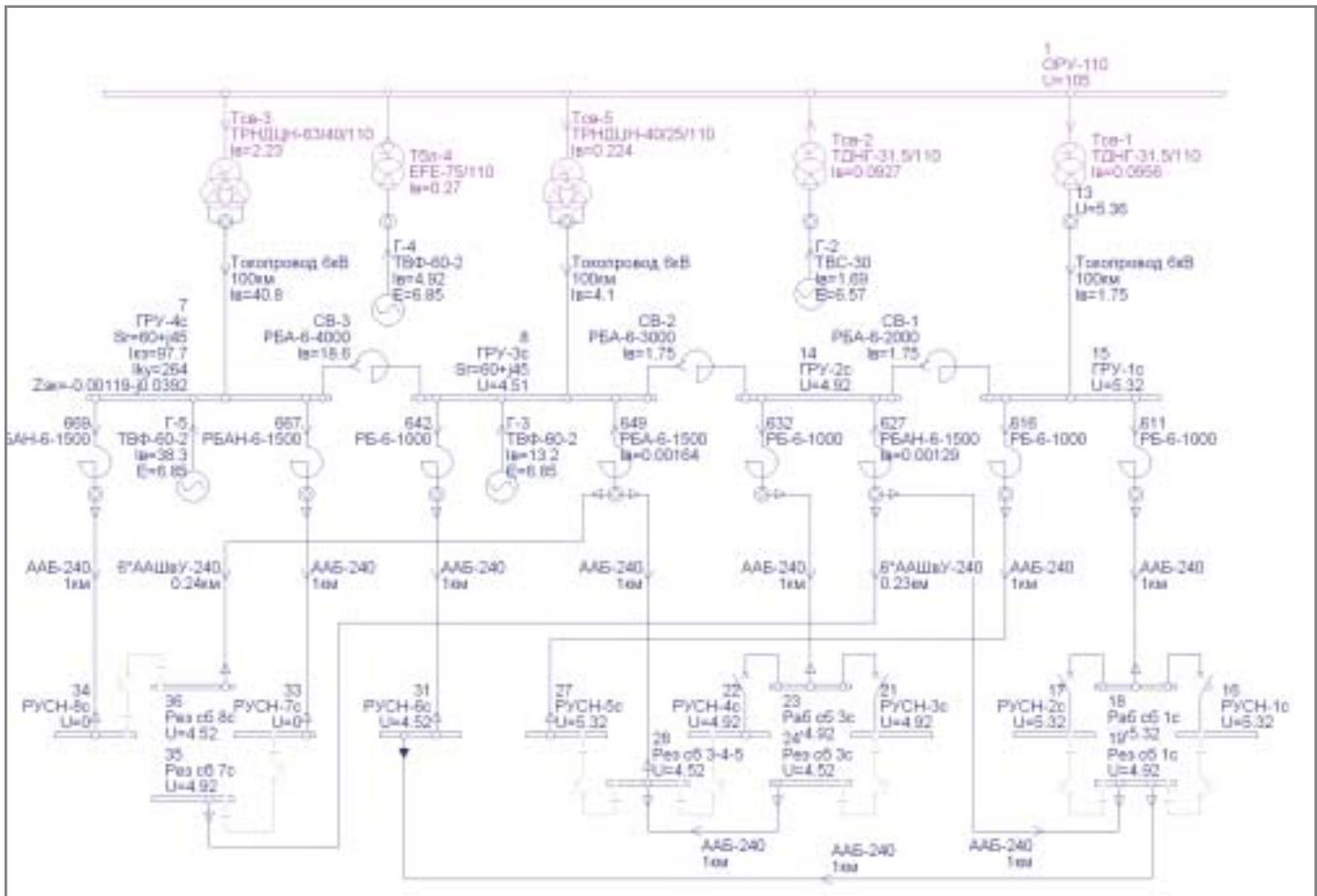


Рис. 7. Результаты расчета ТКЗ на схеме