



## ➤ РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В EnergyCS

При эксплуатации электрических сетей крупных промышленных предприятий возникает целый комплекс задач, связанных с анализом их электрических режимов в нормальных и аварийных ситуациях. Как правило, такие сети отличаются следующими особенностями:

- большая размерность сети, большая степень разветвленности и протяженности кабельных линий;
- несколько источников питания с разных подстанций энергосистемы, возможное наличие собственных генерирующих мощностей;
- единичные электроприемники большой единичной мощности;
- повышенные требования к надежности электроснабжения, в том числе обязательное наличие источников гарантированного питания;
- большое число поперечных связей для обеспечения резервирования;
- многовариантность возможностей послеаварийного или ремонтного электроснабжения.

Кроме того, могут быть особенности, связанные со спецификой производства.

Например, сети горнорудного предприятия находятся в состоянии постоянного изменения конфигурации. Такие сети могут расти в темпе выработки рудников, а значит очевидна необходимость отслеживать конфигурацию, контролировать установившиеся режимы и токи коротких замыканий по мере развития сети.

Для подобных сетей важно моделировать режим до его реализации. Моделирование установившихся режимов позволит получить информацию о степени загрузки кабельных линий и другого оборудования, об уровнях напряжения у потребителей и возможности либо необходимости компенсации реактивной мощности. Расчеты токов коротких замыканий производятся для проверки чувствительности релейных защит, а также стойкости электрооборудования к электродинамическому и термическому воздействию токов короткого замыкания. Очень важен расчет токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью. Кроме того, для оценки энергоэффек-

тивности интересны расчеты технических и технологических потерь электроэнергии по данным отпуска энергии в сети. Решение всех этих задач охватывает программный комплекс **EnergyCS**, включающий модули **EnergyCS Режим** для расчета установившихся режимов, **EnergyCS ТКЗ** для расчета токов коротких замыканий в сетях любой конфигурации и любых классов напряжения (кроме низковольтных) и **EnergyCS Потери** для расчета потерь электроэнергии. Все три модуля работают с одной и той же информационной моделью сети, из которой формируются математические модели для выполнения каждого вида расчетов.

Внедрение системы, моделирующей электрические режимы таких сетей, связано с приобретением специальных программных комплексов. Однако, как показывает практика, стоимость моделирующих программ (например, программного комплекса **EnergyCS**) составляет меньшую часть затрат в общем комплексе решаемых задач.

Существенно большую часть составляют затраты, связанные с постановкой рас-

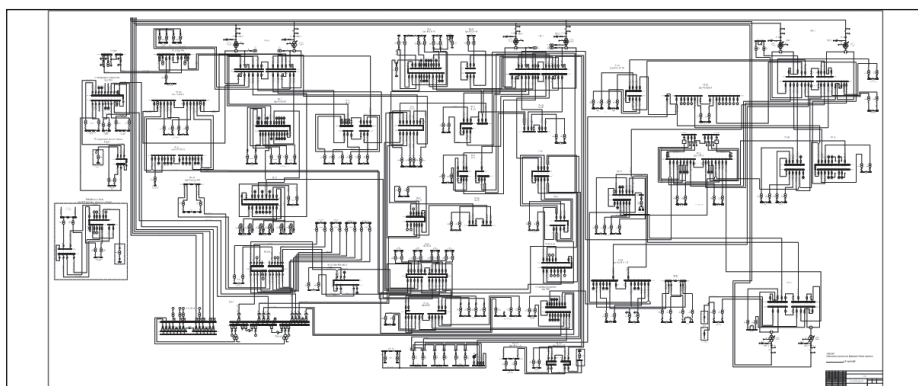


Рис. 1. Схема 6 кВ горнодобывающего рудника

| № | Тип двигателя   | Uном кВ | Pном кВт | cosФн | n об/мин | η %  | КПД % | In/лн | Mм/Мн | Rст о.е. | Xd'' о.е. | Rp о.е. | Примечание | Код изделия |
|---|-----------------|---------|----------|-------|----------|------|-------|-------|-------|----------|-----------|---------|------------|-------------|
| 1 | EMVE 229-34-40  | 6       | 220      | 0,8   | 145      | 1,73 | 93,2  | 5     | 2     | 0,0173   | 0,199     | 0,0129  | +          | 1           |
| 2 | BAO2-450LA2Y2   | 6       | 315      | 0,9   | 3000     | 1    | 92,1  | 6,5   | 2,1   | 0,01     | 0,154     | 0,00607 | +          | 2           |
| 3 | 2АЗМП 2000/6000 | 6       | 2000     | 0,88  | 2975     | 2    | 94,2  | 5,2   | 1,9   | 0,02     | 0,191     | 0,0135  | +          | 3           |
| 4 | A-13-42-8       | 6       | 400      | 0,86  | 735      | 2    | 92,5  | 5,1   | 1,9   | 0,02     | 0,195     | 0,0138  | +          | 4           |
| 5 | A-13-42-8       | 6       | 800      | 0,85  | 750      | 2    | 94,2  | 5,2   | 1,9   | 0,02     | 0,191     | 0,0135  | +          | 5           |
| 6 | A-113-42-8      | 6       | 250      | 0,85  | 750      | 1,33 | 91,5  | 5,1   | 2,1   | 0,0133   | 0,196     | 0,0103  | +          | 6           |
| 7 | A 13-42-8A      | 6       | 400      | 0,86  | 735      | 2    | 92,5  | 5,1   | 1,9   | 0,02     | 0,195     | 0,0138  | +          | 7           |

Рис. 2. Справочник асинхронных двигателей в EnergyCS TK

четных задач, корректным сбором исходных данных и созданием модели, анализом выполненных в программе расчетов, подготовкой отчетной документации, выводов и рекомендаций по необходимому реконструкциям и оптимизации моделируемой электрической сети. Перечисленные задачи могут быть решены двумя путями:

- 1) модель формируется силами специалистов предприятия. В этом случае один или несколько специалистов надолго выводятся из основной работы или продолжительное время работают сверхурочно. Одновременно они должны обучаться созданию сложных моделей средствами программы — то есть получать знания, которые впоследствии могут и не понадобятся, поскольку модель предприятия чаще всего имеет стабильную конфигурацию;
- 2) подготовка модели и выполнение необходимых расчетов заказывается в специализированной сторонней организации — с тем чтобы специалисты, обладающие большим опытом выполнения аналогичных работ, обеспечили решение поставленных задач с высоким качеством и в кратчайшие сроки.

Какой путь предпочтительнее — вопрос спорный. Казалось бы, если модель создали собственные специалисты, они будут лучше в ней разбираться, при необходимости легче смогут внести в нее из-

менения и к тому же сделают модель практически бесплатно. На самом деле это не всегда так.

Как правило, вводом модели занимаются молодые сотрудники. Не имея опыта работы с программой, они осваивают ее в темпе ввода модели, а значит качественный продукт будет получен не раньше чем со второй попытки. Решиться на перерывовку модели бывает непросто, и в эксплуатации может оказаться некорректная модель, которую придется доводить до ума в течение длительного времени. То, что модель создавали свои специалисты, — тоже сомнительное преимущество. Наибольшая текучесть кадров наблюдается именно среди молодых людей. Если такой специалист уволился, модель остается и незаконченной, и лишенной внимания обученного человека, на которого возлагались надежды, связанные с ее совершенствованием.

Другое дело, когда модель заказывается у профессионалов. Заказчику не требуется отвлекать от основной работы своих сотрудников. Модель разрабатывается быстрее. Опытный специалист делает ее в соответствии с согласованным техническим заданием, для решения необходимых заказчику задач. В этом случае заказчик получает не только готовую отлаженную модель электрической сети предприятия, но и эталонный расчет с подробным описанием принятых исходных данных, самой модели, а также всех необходимых отчетов и рекоменда-

ций в соответствии с поставленными задачами. Специалисты заказчика обучаются на уже подготовленной модели сети именно их предприятия и, располагая подробным техническим отчетом с результатами выполненных расчетов, смогут в будущем повторить их по мере необходимости.

Оценка стоимости выполнения подобных работ обычно определяется по затратному методу, исходя из средней стоимости единицы рабочего времени квалифицированного специалиста. Соответственно, в каждом случае стоимость определяется индивидуально в зависимости от величины и сложности структуры системы электроснабжения, а также состава решаемых задач.

Компания "ВиВа Энерго" специализируется на проектировании электросетевых объектов и активно использует в проектной деятельности программы серии EnergyCS. Накоплен большой опыт создания комплексных моделей систем электроснабжения крупных предприятий в горнодобывающей, металлургической, целлюлозно-бумажной отраслях — для задач анализа и управления режимами, проверки электрооборудования на стойкость действию токов короткого замыкания, расчетов уставок срабатывания, проверки чувствительности и селективности устройств РЗА.

В качестве примера предлагаем рассмотреть процесс создания модели схемы электроснабжения на напряжении 6 кВ горнодобывающего рудника — для расчета токов короткого замыкания. Схема также должна быть пригодна для расчета установившегося режима.

В качестве исходных данных предоставлены схема сети 6 кВ (рис. 1), кабельный журнал и перечень потребителей.

Схема сети 6 кВ — очень разветвленная, с большим количеством подстанций и связей между ними; основными потребителями являются синхронные и асинхронные двигатели.

Перед началом работ необходимо добавить в справочник программы недостающие данные по маркам кабеля, типам асинхронных и синхронных двигателей. Справочник открыт для редактирования и самостоятельного пополнения. Паспортов оборудования заказчик не предоставил, поэтому данные по двигателям пришлось находить в многочисленных справочниках, искать в Интернете, а также запрашивать данные у производителей. В итоге данные по двигателям были внесены в справочник EnergyCS TK3, показанный на рис. 2.



| Общие данные                        |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Применить                           |                                     |
| Размерность мощности                | МВт и Мвар                          |
| Точность баланса мощности           | 1                                   |
| Расчет ЭДС                          | по $U_p(\text{тек.})$               |
| Число итераций м.Зейделя на старте  | 3                                   |
| Метод расчета                       | Ньютона                             |
| Максимальное число итераций         | 20                                  |
| Расчетный час графика нагрузки      | 0                                   |
| Отдельный расчет фидеров            | <input type="checkbox"/>            |
| Учет XX трансформаторов             | <input type="checkbox"/>            |
| Авторасчет при изменениях           | <input type="checkbox"/>            |
| Частота сети, Гц                    | 50                                  |
| Протокол расчета                    | <input type="checkbox"/>            |
| Коэффициент трансформации           | Ук/Ун                               |
| Способ ввода положения РПН или ПВВ  | Логич. (-9..+9)                     |
| Внешний справочник по умолчанию     | Energy.SPR                          |
| Штамп                               |                                     |
| Строгое соответствие модели и схемы | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Вариант расчета КЗ                  | Трехфазные КЗ                       |
| Время отключения основной защиты    | 0                                   |
| Время отключения резервной защиты   | 0                                   |
| Сортировка отмеченных узлов КЗ по   | Номерам                             |
| Единица измерения тока              | килоАмпер                           |
| Нумерация узлов                     | Исходная                            |
| Особый состав параметров            | по элементам                        |

Рис. 3. Общие данные

Марками кабелей справочник пополнять не пришлось — все необходимые кабели уже содержатся в базовой поставке программы (в основном это марки СБ, АСБГ, ААШВ, ААБГ сечением от 70 до 240 мм<sup>2</sup>). Таким образом, были собраны все исходные данные, необходимые для начала моделирования схемы.

На следующем этапе требуется настроить программу для расчетов конкретного предприятия. Первым делом открываем окно настроек программы — *Общие данные* (рис. 3).

Для корректного расчета и получения адекватных результатов понадобится выполнить правильные настройки программы. Представим наиболее важные пункты настройки.

Точность баланса мощности определяет максимальное значение небаланса мощности в узлах, при достижении которого заканчивается расчет. По умолчанию задается значение 1 МВт. Задание меньшего значения может быть оправдано, если требуется обеспечить большую точность результатов расчета, что бывает важно при задании очень малых нагрузок. В общем случае лучше задать точность, кратную наименьшей нагрузке всей модели. В нашей модели присутствуют трансформаторы 100 кВА и для большей точности результатов задана точность баланса 10 кВт.

Следует определиться с методикой расчета ЭДС. Можно выбрать "по  $U_p$ " — выполняется полный расчет установившегося режима, определяются напряжения узлов-шин синхронных и асинхронных машин. На основе напряжений и расчетной выдаваемой или потребляемой

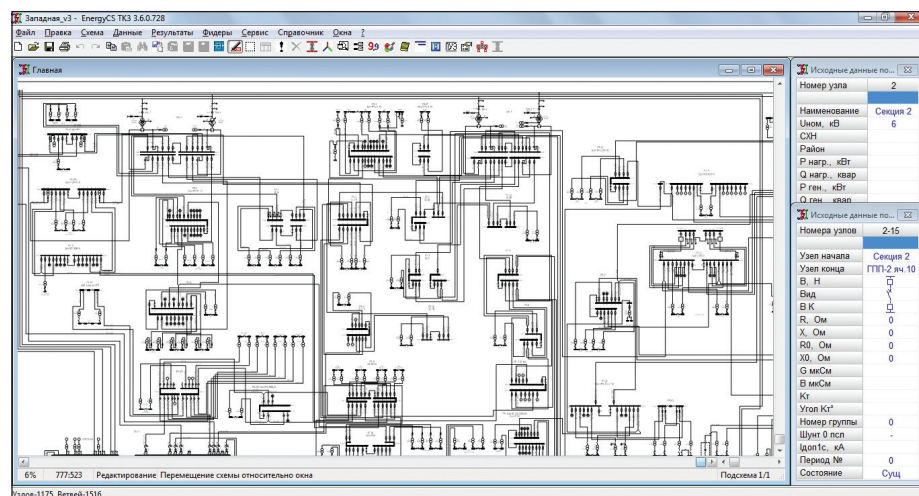


Рис. 4. Использование кальки в EnergyCS TK3

мощности выполняется расчет ЭДС. При расчетах ТКЗ у проектировщиков зачастую нет параметров для расчета установившегося режима. Но очень важно, что этот метод работает только когда заданы все данные для расчета установившегося режима. Если не задать нагрузки, которые часто не указывают для ТКЗ, можно получить неправильные значения ЭДС и, соответственно, токов короткого замыкания.

Второй вариант — расчет ЭДС "по Уном". В этом случае расчет установившегося режима не производится. Программа предполагает, что фазы напряжений узлов равны нулю и выполняет расчет ЭДС генераторов и двигателей по заданной мощности генераторов или двигателей.

Есть и еще один вариант: принять, что "Е=Уном". В этом случае не производится ни расчет установившегося режима, ни расчет ЭДС. Программа принимает, что в поле Уном узлов, к которым подключены генераторы или двигатели, введены значения модулей ЭДС. Этот вариант следует использовать, чтобы получить результаты, идентичные полученным в других программах, — например, в АРМ СРЗА, где ЭДС вводятся, а не рассчитываются.

Для нашей первичной целевой задачи, расчета ТКЗ, подойдет методика расчета ЭДС "по Уном", поскольку данных по нагрузке двигателей и трансформаторов нет. Также была поставлена задача проверить выключатели на динамическую стойкость к ударным токам КЗ. Для этого необходимо ввести в общие данные время отключения основной и резервной

защиты. Мы ввели стандартные значения 0,1 с и 0,6 с.

Остальные параметры интуитивно понятны, подробно описаны в руководстве пользователя и не оказывают существенного влияния на расчет.

В программе EnergyCS TK3 есть функция *Калька*, которая позволяет подложить на задний план схему в растровом виде и средствами программы наносить в графическом редакторе элементы схемы. В качестве исходных данных была предоставлена схема в формате PDF. С помощью PDF-редактора удалось сохранить схему как растровое изображение и использовать ее в EnergyCS TK3 как подложку (загруженная калька показана на рис. 4). После масштабирования подложки можно начинать создание схемы в EnergyCS TK3.

Для удобства ввода элементов схемы мы присвоили линиям контрастный цвет и увеличили их толщину, а контрастность подложки снизили (вид схемы с подложкой показан на рис. 5). Ввод структуры сети 6 кВ крупного предприятия занял примерно неделю — при работе в спокойном темпе. Для ускорения процесса ввода активно использовалась функция копирования элементов схемы — в основном речь шла о шинах распределительных пунктов (РП) с набором выключателей. Расстояния между объектами были заданы таким образом, чтобы текст с результатами расчета не налезал на другие объекты. Использование функции копирования позволяет обеспечить однотипность изображения и масштаба элементов сети, что делает модель удобной для работы.

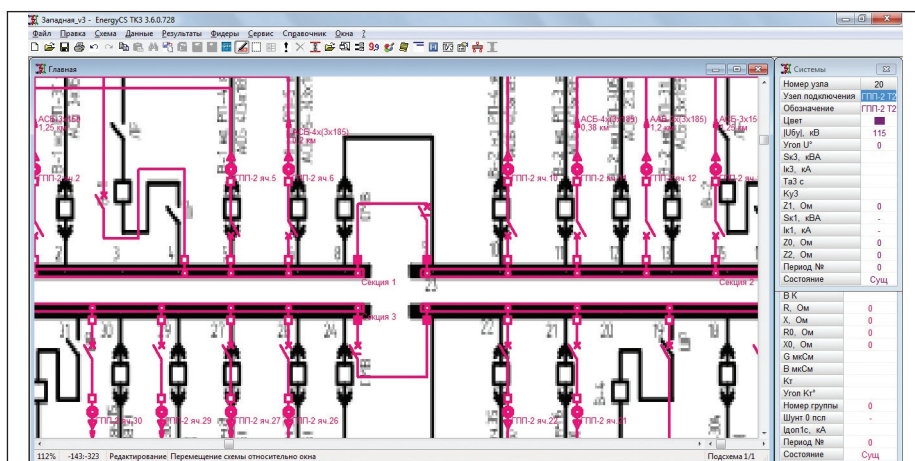


Рис. 5. Использование подложки в EnergyCS TK3

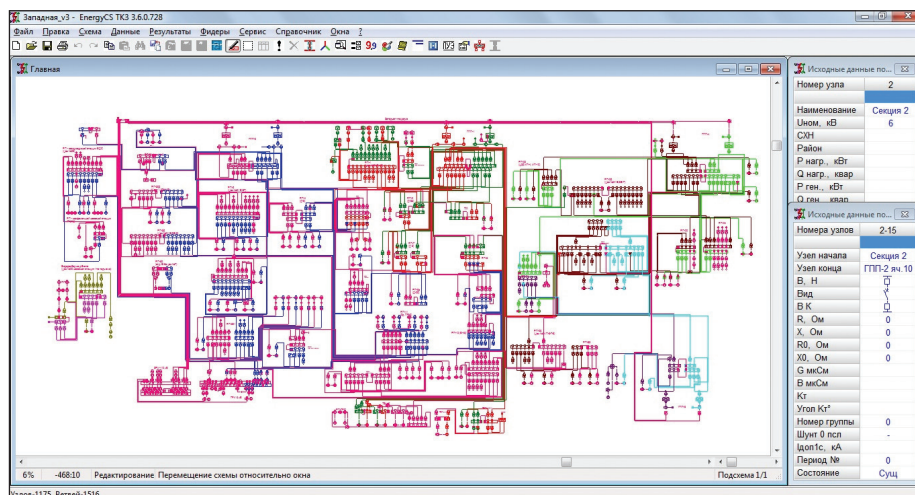


Рис. 6. Схема сети 6 кВ с расцветкой по источникам питания

Чтобы получать качественные результаты при дальнейшей работе, в процессе создания модели необходимо заботиться о наименовании узлов, кабелей и нагрузок. Для кабелей будет виден узел начала и узел конца, для нагрузок будет указано, к какой РП и к какой ячейке подключен двигатель или ТП. Например, для кабеля узел начала — "ГПП-2 яч.22", узел конца — "РП-4 яч.35". Правильное наименование узлов также упрощает сортировку кабелей в перечне, позволяет быстро получить перечень кабелей конкретной РП. Если все это оставить без должного внимания, вместо обозначений начала и конца кабеля будет указан номер узла присоединения,

который не несет никакой практической информации. Для лучшей визуализации и обозначения РП на схему можно добавлять текст и делать этот текст крупным. В конечном итоге вся модель составила 1200 узлов и 1500 ветвей. Обозначение всех объектов, ввод типов двигателей, марок и длин кабелей, трансформаторов и реакторов в спокойном темпе заняло примерно неделю. Также за это время вся схема была приведена к эстетичному виду, прослеживалась структура схемы и объекты не пересекались хаотично, схема стала наглядной. На руднике имеются четыре ГПП и все РП имеют два источника питания, в свою

| Номер узла | Наименование | Уном кВ | I(3) кА | I(2) кА | I(11) кА | I(1) кА | КЗ          | Z1экв.        | Z0экв. |
|------------|--------------|---------|---------|---------|----------|---------|-------------|---------------|--------|
| 326        | ЗРУ-19 1СШ   | 6,47    | 8,66    | 7,5     | -        | -       | ЗРУ-19 1СШ  | 0,24+j0,36    | -      |
| 338        | ЗРУ-19 2СШ   | 6,47    | 7,26    | 6,29    | -        | -       | ЗРУ-19 2СШ  | 0,325+j0,401  | -      |
| 164        | ЗРУ-2 1СШ    | 6,42    | 15,6    | 13,51   | -        | -       | ЗРУ-2 1СШ   | 0,0312+j0,237 | -      |
| 184        | ЗРУ-2 2СШ    | 6,41    | 16,14   | 13,98   | -        | -       | ЗРУ-2 2СШ   | 0,0305+j0,229 | -      |
| 351        | ЗРУ-21 1 СШ  | 6,37    | 4,53    | 3,93    | -        | -       | ЗРУ-21 1 СШ | 0,608+j0,553  | -      |

Рис. 8. Результаты расчета токов КЗ в табличном виде

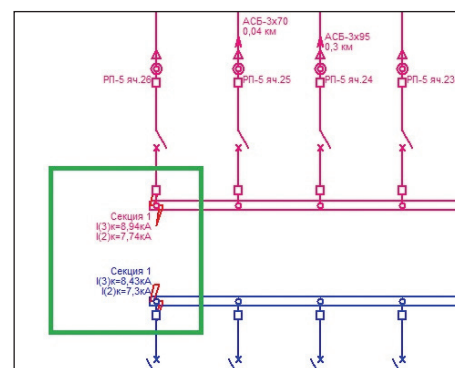


Рис. 7. Результаты расчета токов КЗ в графическом виде

очередь все РП имеют сложные взаимосвязи между собой, на предприятии происходит частое переключение с одного источника питания на другой. В EnergyCS TK3 есть возможность включать и отключать коммутационные аппараты, моделируя любую схему электроснабжения предприятия. Также для визуализации можно делать расцветку по источникам питания — схема становится наглядной и удобной для использования; видно, от какой ГПП запитана данная секция РП. Законченная схема показана на рис. 6.

Следующим шагом был расчет токов КЗ. Нам необходимо было знать токи КЗ на секциях всех РП. EnergyCS TK3 позволяет делать моментальный расчет во многих точках КЗ и формировать таблицу с результатами. Для этого в узлах указывается наличие точки КЗ, а для большей информативности отчета тут лучше указывать и наименование этой точки. Пример формата: "ЗРУ-21 1СШ", "ГПП-1 2СШ". После указания всех точек КЗ приступаем к расчету. Его результаты программа может вывести как на схему, где рядом с каждым узлом КЗ будет показан ток КЗ (рис. 7), так и в таблицу (рис. 8).

EnergyCS TK3 имеет собственный графический редактор, и вся схема с результатами расчета показывается в программе, но эту информацию можно передать для последующего дооформления в любую CAD-систему (например, в nanoCAD или AutoCAD), причем все цвета расцветки будут передаваться с отдельные слои. Табличная информация может быть передана в MS Word с использованием шаблонов. Результаты расчетов в nanoCAD представлены на рис. 9.

Для проверки оборудования на стойкость к токам КЗ необходимо указать отключающую способность и предельную динамическую стойкость выключателей. Результаты расчетов будут сформированы в виде таблицы. Выключатели, не проходящие по тем или иным па-



раметрам, подсвечиваются красным цветом, и от проектировщика требуется принять соответствующие меры.

Также нами была выполнена работа по моделированию сети 6 кВ крупного химического производства. Заказчик попросил сделать модель более наглядной, разбить сеть на листы, соответствующие отдельным ЗРУ. EnergyCS TK3 позволяет это сделать, причем модель остается взаимосвязанной и расчет токов КЗ осуществляется с учетом подпитки от всех двигателей. Часть сети 6 кВ с разбивкой на подсхемы показана на рис. 10.

В заключение отметим, что работать с программой удобно, имеются инструменты, позволяющие быстро вводить схему. Наличие базы оборудования, которую можно пополнять самостоятельно и без больших трудозатрат, современный интерфейс, объектное представление модели в виде кабелей, трансформаторов и другого оборудования в классическом представлении делает EnergyCS TK3 удобной для освоения как специалистами проектных организаций для задач проектирования и аудита, так и инженерами предприятий для задач экс-

плуатации. Освоение программы не занимает много времени, но создание качественной модели, учитывающей все нюансы сети и параметры оборудования, — задача непростая, требующая участия специалиста высокого уровня, хорошо разбирающегося и в возможностях EnergyCS TK3, и в вопросах теории.

**Александр Вермаховский,**  
ведущий специалист  
ООО "СиСофт Иваново"  
**Валерий Корольков,**  
генеральный директор  
ООО "ВиВа Энерго"

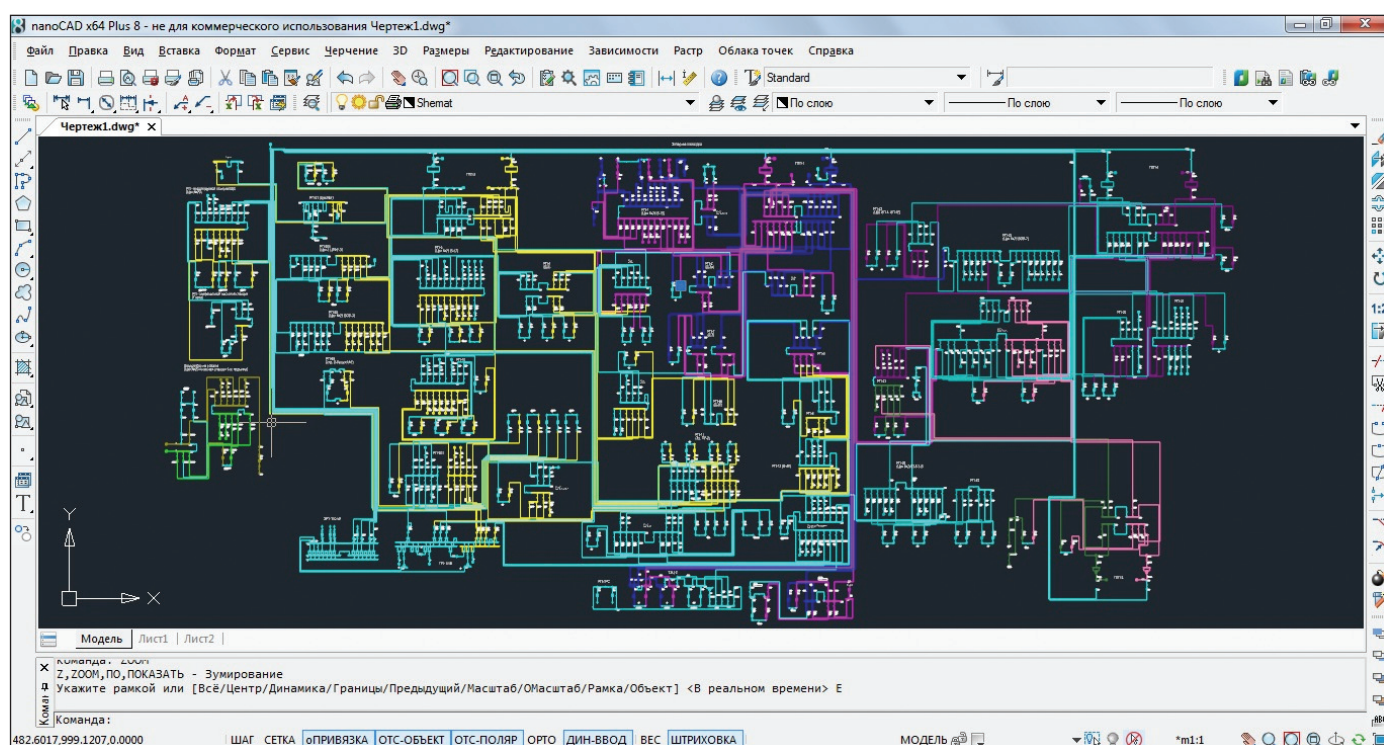


Рис. 9. Результаты расчетов в nanoCAD

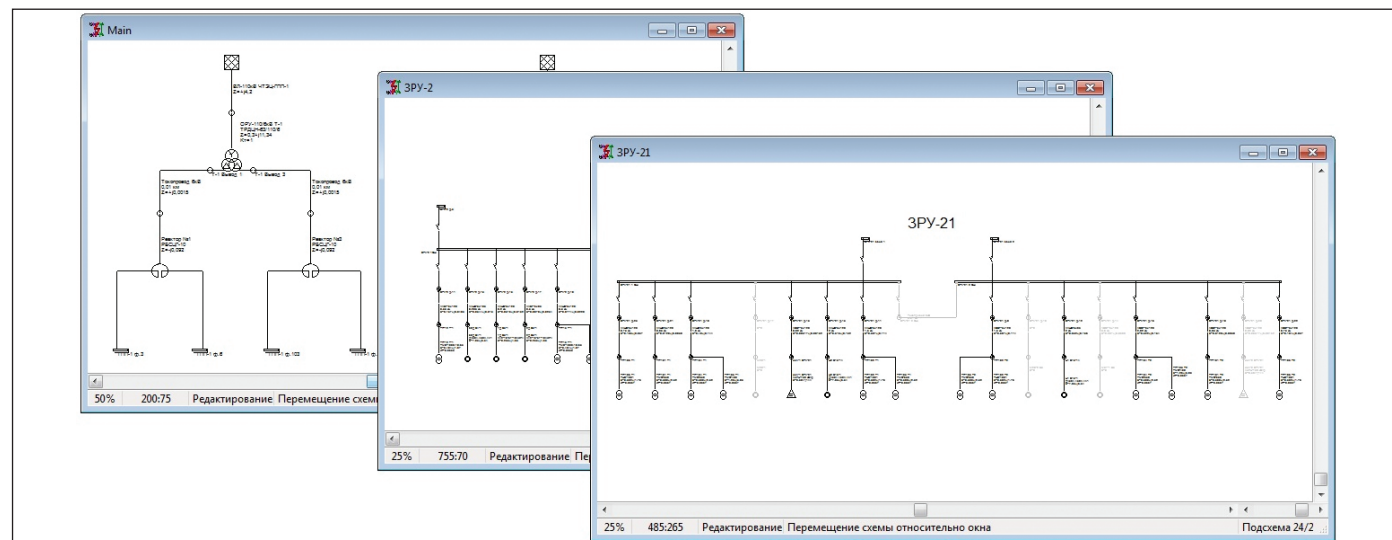


Рис. 10. Сеть 6 кВ крупного химического производства с разбивкой на подсхемы