

## СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

**М.Ю. Красноселов (АО «Карельский окатыш»), В.В. Сиротинкин (ООО «Сумма технологий»)**

*Рассмотрены этапы выполнения проекта по обследованию электрических сетей и созданию их цифрового двойника с применением системы моделирования PSS Sincal в АО «Карельский окатыш». Описаны особенности и результаты выполненного проекта.*

*Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, электрические сети, обследование, рекомендации.*

АО «Карельский окатыш» входит в группу ПАО «Северсталь». Как и большинство промышленных предприятий, АО «Карельский окатыш» обеспокоено вопросом повышения энергоэффективности и улучшения качества электроэнергии. Постоянно повышающиеся технические требования Федеральной сетевой компании (ФСК ЕЭС) требуют современных мер по улучшению качества энергии. Для решения данной задачи специалисты компании «Сумма технологий» разработали и внедрили цифрового двойника электрических сетей АО «Карельский окатыш», который позволяет моделировать нормальные и послеаварийные режимы работы, а также сформулировали рекомендации по повышению энергоэффективности предприятия и улучшению качества электроэнергии. Проект стартовал в марте в 2019 г. и был завершен в середине января 2020 г.

Проектом охвачены электрические сети предприятия, которые делятся на три группы:

- сети электроснабжения карьеров;
- сети электроснабжения дробильно-обогащительной фабрики и фабрики окомкования и обжига;
- сети электроснабжения инженерных систем, вспомогательных производств, коммунальных предприятий г. Костомукша.

В ходе выполнения проекта решался ряд задач.

1. Обследование электрических сетей с целью локализации источников реактивной мощности и ухудшения качества электроэнергии.

2. Формирование единого электронного каталога оборудования и электроприемников электрических сетей; схем нормального режима электрических сетей всех уровней напряжения.



Рис. 1. Инструментальное обследование оборудования электрических сетей

3. Разработка мероприятий по компенсации реактивной мощности путем наладки существующих устройств компенсации реактивной мощности и синхронных двигателей, а также установке новых.

4. Разработка рекомендаций по выбору частотно-регулируемых приводов и установке локальных фильтрокомпенсирующих устройств или замены существующих приводов с целью повышения надежности работы технологического оборудования и улучшения качества электроэнергии.

5. Рекомендации по созданию перспективной модели развития электросети на 5 и более лет.

Параллельно решалась проблема соответствия электросетей требованиям поставщика электроэнергии — Карельского предприятия МЭС Северо-Запада и Системного оператора.

Для АО «Карельский окатыш», как и для любого другого крупного горно-обогатительного предприятия, выделяют три основных источника искажения формы напряжений и токов сети:

- мощный электротранспорт (карьерная техника, железнодорожный транспорт), являющийся источником резко переменной и несимметрической нагрузки сети;
- асинхронные двигатели с частотно-регулируемым приводом, являющиеся источником искажения синусоидального напряжения;
- асинхронные двигатели без частотно-регулируемого привода, как основные потребители реактивной мощности.

### Обследование сетей

На первом этапе выполнения работ инженеры компании «Сумма технологий» провели обследование электрических сетей АО «Карельский окатыш», изучили и собрали воедино:

- схемы нормального режима электрических сетей высокого и среднего напряжения;
- каталог оборудования сетей в объеме паспортных данных силовых трансформаторов, трансформаторов собственных нужд, токоограничивающих реакторов, линий электропередач высокого и среднего напряжения, устройств компенсации реактивной мощности;
- каталог энергоприемников с описанием их типа;
- данные о режимах работы сети в разные сезоны;
- типовые суточные графики работы энергоприемников;
- данные о качестве электрической энергии в узловых пунктах сети: на шинах главной понизитель-

ной подстанции (ГПП), распределительных подстанций (РП) и трансформаторной подстанции (ТП) в объеме, позволяющем оценить амплитуды гармоник напряжения, асимметрию напряжений сети.

Для получения исходных данных по показателям качества электрической энергии проводилось инструментальное обследование оборудования электрических сетей. Для измерений было выбрано около 280 пунктов, включая:

- шины главных понизительных подстанций высокого и среднего напряжения;
- точки подключения синхронных и асинхронных двигателей;

- устройства компенсации реактивной мощности.

При инструментальном обследовании проводились измерения (рис. 1):

- осциллограмм токов и напряжений;
- мгновенных значений токов, напряжений, активной и реактивной мощностей;
- параметров работы высоковольтных силовых трансформаторов (положения устройств автоматического регулирования напряжения);

- последовательности фаз на входе устройств управления установками компенсации реактивной мощности (УКРМ), устройств управления двигателями (выборочно, для верификации показаний приборов АСТУЭ, проверки режима работы устройств).

Для каждого из 280 пунктов снимались осциллограммы токов и напряжений, после обработки которых фиксировались:

- линейное напряжение (U);
- активная (P) и реактивная (N) мощности;
- полная и активная мощности гармоник;
- фазный коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ );
- коэффициент искажения напряжения (THDU) с определением соответствия требованиям ГОСТ 32144-2013;
- коэффициент асимметрии сети;
- уровень напряжения;
- коэффициент искажения тока (THDI) с определением соответствия рекомендациям IEEE по влиянию высших гармоник тока на стабильность работы сетей промышленной автоматики и связи.

Далее была проведена сверка оперативных показаний приборов с данными телеизмерений и АСТУЭ.

В результате обследования было выявлено, что загрузка некоторых силовых трансформаторов электрических сетей АО «Карельский окатыш» низкая. Это приводит к избыточным потерям активной мощности и дополнительному поглощению реактивной мощности.

Отметим, что электроснабжение карьеров отличается значительной удаленностью энергоприемников от электросетевых объектов. Применяемая технология постоянного оперативного наращивания линий увеличивает сопротивление линий за счет переходных сопротивлений контактов. Поэтому инженеры компании «Сумма технологий» предложили

использовать мобильные подстанции вместо стационарных распределительных подстанций.

### Создание цифрового двойника

Данные, полученные в процессе обследования, использовались при создании цифрового двойника электрических сетей АО «Карельский окатыш», реализованного с помощью системы моделирования PSS Sincal компании Siemens. Цифровой двойник позволяет моделировать различные сценарии работы электросети для повышения ее надежности и сокращения удельных энергозатрат на производство продукции [1-3].

Под понятием «цифровой двойник» подразумевается программный аналог устройства или системы, который в виртуальной среде имитирует технические характеристики и поведение своего реального прототипа. В логику цифрового двойника заложены физические законы реального мира. При достижении определенной точности цифрового двойника эксперименты с ним способны прогнозировать потенциальное развитие системы при изменениях заданных параметров. Однако неверно воспринимать цифровой двойник только как симулятор для проверки различных гипотез и проведения инструктажей. Его потенциал гораздо шире и включает:

- разработку концепции сети электроснабжения;
- технико-экономическое обоснование проектов создания и развития сетей;
- разработку и обеспечение планов по реконструкции, расширению и модификации сети;
- определение причин аварий;
- анализ параметров и режимов эксплуатации;
- прогнозирование отказов и формирование технического обслуживания и ремонтов оборудования электрической сети.

В основе цифрового двойника электрических сетей АО «Карельский окатыш» лежит модель сети, включающая информацию о технических параметрах используемого оборудования, географическом расположении элементов сети, потребителях генерируемой энергии (синхронные и асинхронные электродвигатели). Средствами PSS Sincal производятся расчеты режимов, токов короткого замыкания, мест потребления реактивной мощности и пр.

В топологическую модель включены все сети 110 кВ, все сети среднего напряжения и сеть низкого напряжения до уровня шин трансформаторных подстанций дробильно-обогащительной фабрики и фабрики окомкования и обжига. В качестве энергоприемников сети моделируется энергопотребление двигателей среднего напряжения, электротранспорта среднего напряжения, а также эквивалентных нагрузок сетей низкого напряжения.

В модель оборудования включены высоковольтные силовые трансформаторы, силовые трансформаторы среднего напряжения, трансформаторы собственных нужд, токоограничивающие реакторы, технические данные которых были собраны

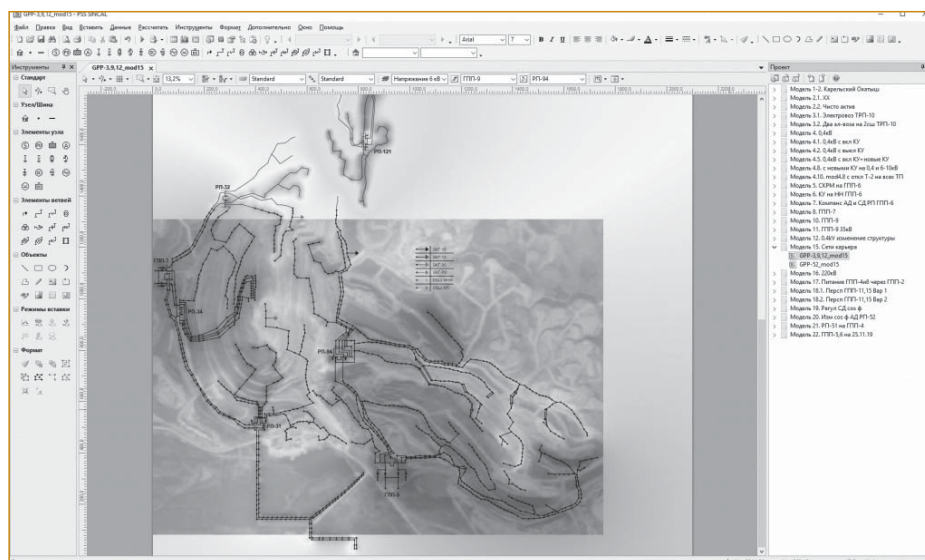


Рис. 2. Вид с географически точным расположением сети

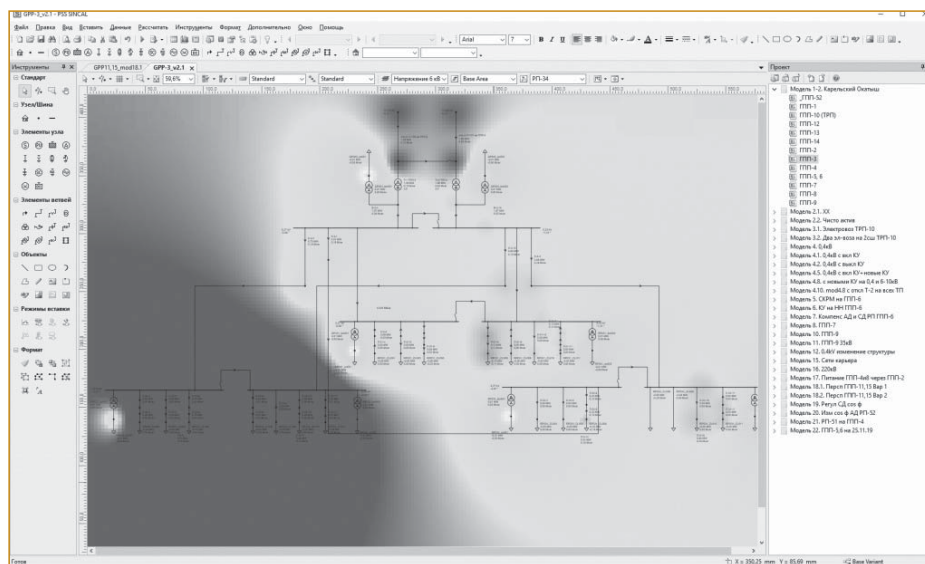


Рис. 3. Тепловые карты электросети

цифрового двойника сети инженеры с помощью PSS Sincal рассчитали:

- потери электрической энергии в силовых трансформаторах, линиях электропередач, токоограничивающих реакторах;
- потоки активной и реактивной мощности в сетях, выделение потерь мощности от транспорта реактивной мощности;
- перспективные варианты развития электрических сетей с учетом планов по вводу в эксплуатацию новой ГПП и задач по повышению энергетической эффективности предприятия;
- искажения электрической энергии в сетях (гармоники), вызванные искажениями, вносимыми в сеть частотно-регулируемыми приводами асинхронных двигателей.

#### Аналитические возможности цифрового двойника

Уникальность созданной в PSS Sincal модели сети состоит в том, что расчеты можно проводить как с учетом изменений в ГПП, так и с учетом изменений потребления электроэнергии конечными пользователями.

#### Вычисление и прогнозирование

#### участков сети с максимальным потреблением реактивной мощности

В сети предприятия находится более 1000 энергоприемников. Визуализация данных об уровне реактивной мощности в сети в формате тепловой карты позволила легко определить потребителей реактива: мощные асинхронные двигатели и сети сторонних потребителей (рис. 3).

На основе данных о местах возникновения и концентрации потоков реактивной мощности с помощью серии расчетов установившегося режима в PSS Sincal были проработаны несколько вариантов мероприятий по снижению влияния реактивной мощности на сеть: частичный перенос нагрузки между центрами питания, установка устройств компенсации реактивной мощности и оптимизация режимов работы синхронных двигателей.

Цифровой двойник помогает увидеть, как изменяется состояние сети при каждом из предложенных

в процессе обследования и каталогизированы. Также модель использует реальные геометрические конфигурации воздушных и кабельных линий электропередач напряжения.

Все данные о сети отображаются в виде электрических схем в географическом, схематическом и смешанном форматах. Например, для карьеров АО «Карельский окатыш» вид с географически точным расположением сети представляет интерес, так как именно там происходят постоянные перемещения опор линий электропередач (рис. 2).

Результаты расчетов также отображаются в нескольких наиболее удобных для пользователей форматах (в таблицах, графиках, диаграммах, отчетах, тепловых картах и т.д.), и результаты можно оценивать с помощью цветовых обозначений на схеме сети.

Для верификации созданной модели использовались данные АСТУЭ, АСУТП и собственные измерения разработчиков. После разработки и верификации



вариантов. Это позволило, например, достаточно быстро сформировать оптимальную модель регулирования синхронных двигателей, определить оптимальные точки размещения УКРМ, чтобы сбалансировать их стоимость и ожидаемую экономию от снижения потерь.

#### **Моделирование искажений сети**

Механизмы с частотно-регулируемыми приводами, в частности, насосы, компрессоры, конвейеры, являются источником нелинейных нагрузок, которые ухудшают качество электрической энергии в сети. Создаваемые помехи снижают надежность работы всех электронных и компьютерных систем, а также систем связи.

Для расчета гармонических искажений в электросети АО «Карельский окатыш» в цифровой двойник были загружены результаты проведенных измерений качества электроэнергии в 278 точках.

Моделирование искажений сети от частотно-регулируемых мощных асинхронных двигателей позволило определить зоны распространения опасных радиопомех и наведенных электрических сигналов, приводящих к сбоям систем автоматического управления технологическими процессами.

#### **Перспективы развития электросети**

Одна из самых мощных функций PSS Sincal — создание и расчет перспектив развития сетей на ближайшие годы. Теперь энергетики АО «Карельский окатыш» на основе нормального режима работы и с учетом существующей инфраструктуры могут самостоятельно разрабатывать планы развития сетей.

В программной среде PSS Sincal разработка проводится объектно-ориентированным методом. Инженер может вводить в расчет новые нагрузки, трансформаторы, линии и другие элементы сети. Новые объекты размещаются сразу на мнемосхемах с указанием их паспортных характеристик и роли в сети. При этом на экране отображаются все результаты расчета режима с оценкой минимальных и максимальных величин (например, уровни напряжения и нагрузки) и диаграммы с информацией о требуемой мощности и перегруженных линиях.

Если во время расчета превышены ограничения, выводится дополнительная информация, необходимая для локализации слабых мест и определения мер по усилению или реструктуризации сети.

#### **Выявление источников небалансов в сети**

Для крупных поставщиков электроэнергии головной болью может стать выявление незаконных потребителей в сети, а для промышленных предприятий — своевременное обнаружение неисправностей, в том числе в измерительных приборах. Цифровой двойник электросети позволяет быстро определить источник проблемы в сети, так как система всегда реагирует, если где-то появился дисбаланс.

С помощью PSS Sincal удалось вычислить неисправные счетчики. Для предприятия это было очень важно, потому что неисправности приборов учета

лишают возможности сформировать корректный материальный и энергетический баланс, оценить показатели удельного энергопотребления.

#### **Расчет потерь трансформаторов**

При занесении паспортных данных трансформатора в цифровой двойник в PSS Sincal, а также данных о том, сколько энергии поступает на трансформатор и сколько он отдает, можно отследить потери активной мощности. Таким образом реально оценить, насколько трансформатор физически изношен, и при больших потерях подобрать его оптимальную загрузку.

Для АО «Карельский окатыш» проводились различные тесты. Например, проверялась гипотеза, что, компенсировав реактивную энергию, можно увеличить энергоэффективность сети. На деле же вышло, что потери активной мощности от реактива оказались незначительными и для обеспечения нормальной работы сети необходимо приобретение лишь двух современных устройств компенсации реактивной мощности.

#### **Разработка графика работы электротранспорта**

Для предприятий типа АО «Карельский окатыш» важно поддерживать нормальную работу электровозов, горных экскаваторов и прочей карьерной техники.

С помощью PSS Sincal были проведены расчеты того, как будет изменяться состояние сети при движении по разным отрезкам железной дороги одного груженого состава, затем двух, идущих навстречу друг другу, а также рассмотрены иные дорожные ситуации. Без цифрового двойника просчитать все разнообразие вариантов крайне затруднительно, потому что приходится иметь дело с несимметричными нагрузками.

Моделирование в PSS Sincal помогло выявить те отрезки пути и такую компоновку транспорта, когда электричества может не хватить, и оба электровоза просто остановятся. Все узкие места можно увидеть на тепловой карте. На основе данных из PSS Sincal можно предпринять меры по организации бесперебойного движения электровозов.

Похожие расчеты проведены и для карьерной техники. Там цифровой двойник крайне необходим, потому что карьер — это место, где происходят постоянные изменения как карты сети, так и нагрузок на разных участках. В программной среде PSS Sincal можно провести моделирование поведения сети при изменении расположения потребителей, при увеличении или снижении нагрузки. Это важно для того, чтобы наиболее выгодно расположить воздушные линии по отношению к существующим ГПП для питания карьерной техники.

#### **Выводы**

Цифровой двойник электрической сети, выполненный в PSS Sincal, помогает осуществлять оперативное управление энергоресурсами предприятия, а также производить расчет перспективного развития сетей.

На АО «Карельский окатыш» специалисты «Суммы технологий» провели полный цикл работ по разработке математической модели электрических сетей предприятия, в которые входит:

1. обработка данных, полученных напрямую от заказчика или путем интервьюирования сотрудников. На этом этапе были собраны схемы нормального режима электрических сетей высокого напряжения, каталоги высоковольтных силовых трансформаторов, силовых трансформаторов среднего напряжения, трансформаторов собственных нужд, токоограничивающих реакторов, синхронных и асинхронных двигателей среднего напряжения, кабельных и воздушных линий высокого и среднего напряжения и прочие данные;
2. статистическая обработка данных АИСКУЭ и АСТУЭ по энергопотреблению предприятия и ГПП;
3. проведение инструментального обследования электрических сетей;
4. создание и верификация модели электрических сетей в программном комплексе PSS Sincal;
5. разработка различных вариантов перспективного развития электрических сетей и вынесение рекомендаций;
6. обучение персонала работе с цифровым двойником в PSS Sincal.

Расчеты в среде PSS Sincal помогли сформировать четкие рекомендации по повышению эффективности эксплуатации электродвигателей, а также по снижению потребления реактивной мощности в электрических сетях и выбору устройств компенсации. Моделирование гармонических искажений позволило разработать рекомендации по выбору устройств час-точно-регулируемого привода. Разработаны рекомендации по повышению надежности работы систем автоматического управления технологическими процессами и сетей связи в условиях ухудшения качества электрической энергии при использовании частотно-регулируемого привода.

По результатам обследования создан единый унифицированный электронный каталог оборудования. Программный комплекс позволяет поддерживать его в актуальном состоянии, добавляя элементы

по мере появления новых или ввода в эксплуатацию отремонтированных.

Цифровой двойник интегрирован в существующую систему управления электрическими сетями и систему технического учета электроэнергии, что позволяет мгновенно обновлять данные о нагрузках сети, а также анализировать ранее архивированные данные о режимах работы сетей.

В программной среде PSS Sincal разработка моделей сети проводится объектно-ориентированным методом. За счет этого обеспечивается возможность самостоятельной работы с цифровым двойником специалистов службы главного энергетика АО «Карельский окатыш». Изменяя характеристики работы существующего оборудования, а также размещая новые объекты сети или новых потребителей, сразу на схеме можно увидеть места возникновения проблем и ухудшения качества электроэнергии. А если будут допущены грубые нарушения, модуль выдаст перечень ошибок.

Цифровой двойник электрических сетей АО «Карельский окатыш» полностью настроен и введен в промышленную эксплуатацию. В настоящее время планируется разработка аналогичных моделей для сетей тепло- и водоснабжения.

#### Список литературы

1. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Ч. 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? // Автоматизация в промышленности. 2020. №9.
2. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Ч.2. Ключевые технологии цифровых двойников. Типы моделирования физического объекта // Автоматизация в промышленности. 2020. №11
3. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 3. Прикладные платформы, практические примеры, прогнозы развития, вызовы // Автоматизация в промышленности. 2021. №1

**Красноселов Михаил Юрьевич** – руководитель проектов энергоуправления АО «Карельский окатыш»,  
**Сиротинкин Василий Васильевич** – руководитель проектов по энергетике ООО «Сумма технологий».  
<https://summatechnology.ru>

**Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:**

по электронному каталогу "Почта России" ФГУП Почта России - подписной индекс **П7753**

• сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию

**Адрес редакции:** 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (926)212-60-97. E-mail: [info@avtprom.ru](mailto:info@avtprom.ru)