

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
(код и наименование направления подготовки)  
Энергосбережение и энергоэффективность  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Внедрение системы автоматизированного проектирования Etap в учебный процесс кафедры «Электроснабжение и электротехника»

Студент	<u>С.В. Шлыков</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>А.Н. Черненко</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель программы	<u>к.т.н. А.Н. Черненко</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
« _____ »	<u>20</u> _____ Г.	

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой	<u>д.т.н., профессор В.В. Вахнина</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
« _____ »	<u>20</u> _____ Г.	

Тольятти 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Общая характеристика системы автоматизированного проектирования в электроэнергетике .....	9
1.1 История развития специализированного программного обеспечения .....	9
1.2 Сравнительный анализ специализированного программного обеспечения в электроэнергетике .....	16
1.3 Выводы по разделу 1 .....	42
2 Основные функциональные возможности программного продукта <i>Etap</i> .....	44
2.1 Описание и системные требования при установке программного продукта <i>Etap</i> .....	44
2.2 Создание нового проекта однолинейных схем в программном продукте <i>Etap</i> .....	51
2.3 Мастер проекты в программном продукте <i>Etap</i> .....	55
2.4 Программа сравнения выходной базы данных и библиотеки <i>Etap</i> .....	58
2.5 Описание общей структуры и пользовательского интерфейса программы <i>Etap</i> .....	63
2.6 Создание однолинейных схем в <i>Etap</i> .....	69
2.8 Анализ потоков нагрузки .....	73
2.9 Анализ потоков несимметричной нагрузки .....	77
2.10 Выводы по разделу 2.....	80
3 Практическая работа по учебному курсу «Электроэнергетические системы и сети» .....	82
3.1 Исследование влияния компенсирующих устройств на режим напряжений электрической сети .....	82
3.2 Краткие теоретические сведения .....	82
3.3 Задание на практическую работу .....	94
3.4 Порядок выполнения работы .....	96
3.5 Содержание отчета.....	100

3.6 Контрольные вопросы .....	100
3.7 Выводы по разделу 3.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	104

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в высших учебных заведениях наблюдаются изменения в организации учебного процесса, что приводит к сокращению количества часов контактной работы и увеличению количества часов самостоятельной работы студентов. При этом падают уровни знаний и умений студентов при изучении электротехнических дисциплин, так как не в достаточной степени осваивается физико-математический аппарат обязательной части дисциплин учебного плана.

С другой стороны, сохранению качественной подготовке будущих выпускников (бакалавров, инженеров и магистров) способствует применение в учебном процессе современных образовательных технологий и специализированных пакетов прикладных программ. Особыми видами самостоятельной работы студентов являются выполнение ими практических и расчётно-графических работ, учебных курсовых работ и проектов, которые имеют важную роль при усвоении теоретического материала и получения необходимых компетенций, согласно учебному плану. Понятно, что при выполнении данных видов работ студенты тратят наибольшее количество времени и она является наиболее трудоёмкой. В электротехнических дисциплинах наиболее эффективно указанные виды работ могут выполняться студентами с применением компьютерной поддержки учебного процесса – с помощью пакета специальных программ системы автоматизированного проектирования (САПР). Использование прикладных программных продуктов является одним из современных направлений развития образовательного процесса в высших учебных заведениях [1].

Следует отметить, что благодаря большому вниманию со стороны промышленных предприятий к интегрированным САПР, ни одна важная разработка не обходится без их использования, поэтому внедрение последних в учебный процесс является актуальной задачей. Таким образом, компьютерная поддержка учебного процесса должна являться неотъемлемой

частью подготовки современных выпускников бакалавров и магистров. А одним из критериев конкурентоспособности выпускников высших учебных заведений на рынке труда будет являться владение умениями и навыками САПР при выполнении проектных работ и проектов.

В настоящее время, термин САПР является синонимом таких характеристик, как высокая точность и высокая скорость проектных работ [2]. В федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования (ФГОС ВО) к числу самых сложных, но важных компетенций выпускников вузов направлений подготовки бакалавра могут быть отнесены навыки работы с пакетами прикладных программ в проектной области. Например, в федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» к выпускнику в проектно-конструкторской деятельности предъявляются следующие виды компетенций [3]:

- способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин (ОПК-3);
- способен участвовать в проектировании систем электроснабжения объектов (ПК-1);
- способен проводить обоснования проектных решений систем электроснабжения объектов (ПК-2);

К достоинствам выполнения работ с применением современных САПР в учебном процессе следует отнести:

- расчет и моделирование многих режимов работы электроэнергетической системы и отдельных ее компонентов;
- использование современной справочной базы электрооборудования;
- повышение качества подготовки выпускника бакалавра и магистра;
- значительное сокращение периода времени, необходимого для адаптации молодого специалиста на рабочем месте после окончания вуза;
- существенное повышение востребованности выпускника бакалавра и магистра со стороны работодателя.

В сегодняшних реалиях, использование в учебном процессе САПР является актуальной задачей, а значит, требуется разработать соответствующие методические рекомендации по учебным курсам кафедры «Электроснабжение и электротехника», где в качестве контактной или самостоятельной работы студента предусмотрено выполнение практических и курсовых работ или проектов.

Актуальность работы.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки и внедрения в учебный процесс методических рекомендаций к практическим работам по учебному курсу «Электроэнергетические сети и системы», отвечающим современным требованиям и пожеланиям работодателей.

Цель работы.

Целью настоящей работы является внедрение в учебный процесс кафедры «Электроснабжение и электротехника» САПР *Etap*, направленное на формирование у студентов навыков по использованию современных систем автоматизированного проектирования в электроэнергетике.

Задачи исследования:

- провести сравнительный анализ доступного специализированного программного обеспечения в электроэнергетике;
- описать функциональные возможности программного продукта *Etap*;
- разработать методические указания по выполнению практической работы «Электроэнергетические системы и сети».

Практическая значимость.

Разработанные методические указания позволят углубить знания и получить навыки при расчёте, моделировании и проектировании электроэнергетических систем, с помощью применяемого специализированного САПР *Etap*.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методические указания к практическим работам по учебному курсу «Электроэнергетические системы и сети».

Новизна магистерской диссертации

1. Новизна работы заключается в разработке новых типов практических и курсовых работ по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети», позволяющие углубить знания о принципах построения районных, местных и распределительных электрических сетей и получить навыки проектных работ.

Основные материалы диссертации обсуждались на научно-технических семинарах кафедры и конференций Международного и Всероссийского уровней.

По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи [27, 28, 29]:

1. Шлыков С. В., Скворцов А. В., Старостин В. Д. О способах коррекции коэффициента мощности в системах электроснабжения // Технологии XXI века: Проблемы и перспективы развития : сб. статей Международной научно-практической конференции. (13 июня 2017 г., г. Пенза) Часть 2. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С.157-160.

2. Шлыков С.В. Специализированные САПР в проектных работах электротехнических дисциплин // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 2–27 апреля 2018 года) : сборник студенческих работ – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018.-С.155-156

3. Шлыков С.В. Специализированная САПР *Etap* в учебном процессе / «Молодежь. Наука. Общество» : Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция (Тольятти, 5 декабря 2018 года) – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. – с 727 - 729

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованных источников из 30 наименований. Основное содержание работы изложено на 90 страницах, содержит 50

рисунков и 10 таблиц.



# **1 Общая характеристика системы автоматизированного проектирования в электроэнергетике**

## **1.1 История развития специализированного программного обеспечения**

Программное обеспечение энергетических систем – это специализированное программное обеспечение (ПО), направленное на решение задач анализа или расчета отдельных её элементов: воздушных и кабельных линий электропередач, опор воздушных высоковольтных линий, элементов заземления и молниезащиты, а также проектирования конкретных систем: электрических сетей, электроэнергетических систем и электрических станций.

Первая система автоматизированного проектирования была создана в Соединённых Штатах Америки, почти сразу после окончания Второй мировой войны – в 1947 году. Как показывает опыт, все новые разработки сначала используются военными, и только потом получают дальнейшее развитие в областях науки и техники. Подобным образом произошло и в случае САПР. Первая САПР нашла применение в военно-промышленном комплексе США, в качестве аппаратно-программного комплекса управления силами и средствами континентальной противовоздушной обороны [4]. Первая САПР, которая была создана в Советском Союзе разработана значительно позже – в конце 80-х годов XX века группой челябинских ученых под руководством профессора Анатолия Александровича Кошина.

В мировом опыте системы САПР развивались и в дальнейшем выделились в подсистемы, которые могли решать функционально-законченные последовательности проектных задач с получением соответствующих проектных решений и проектных документов. Данные подсистемы САПР по назначению разделяют на два вида:

- обслуживающие;
- проектирующие.

К первым типам подсистем САПР относят объектно-независимые подсистемы, которые реализуют функции, являющиеся общими для подсистем или САПР в целом. Эти виды подсистем обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, оформление, передачу и вывод данных, сопровождение программного обеспечения и другие.

Ко вторым видам подсистем САПР относят объектно-ориентированные подсистемы, которые реализуют определенный этап проектирования или группу связанных проектных задач. В свою очередь, проектирующие подсистемы САПР в зависимости от отношения к объекту проектирования, можно разделить на:

- объектные, которые выполняют проектные процедуры и операции, непосредственно связанные с конкретным типом объектов проектирования;
- инвариантные, которые выполняют унифицированные проектные процедуры и операции, имеющие смысл для многих типов объектов проектирования.

Первыми появились обслуживаемые подсистемы САПР. У систем автоматизированного проектирования также произошло разделение по отраслевому назначению:

- системы автоматизированного проектирования механических устройств или MCAD (от англ. – mechanical computer-aided design). Областью применения данных САПР являются отрасли автомобилестроения, судостроения, авиакосмической промышленности, производство товаров народного потребления и другие;
- системы автоматизированного проектирования электронных устройств или ECAD (от англ. – electronic computer-aided design). Областью применения данных САПР являются проектирование электронных устройств, радиоэлектронных средств, интегральных схем, печатных плат и другие;
- системы архитектурного автоматизированного проектирования или CAAD (от англ. – computer-aided architectural design) или по другому

обозначению AEC CAD (от англ. – architecture, engineering and construction computer-aided design). Областью применения данных САПР являются проектирование зданий, промышленных объектов, дорог, мостов, магистралей и другие.

Целью данной работы являются специализированные САПР электроэнергетических систем, поэтому перейдем к их подробному рассмотрению.

Первое специализированное программное обеспечение энергетических систем было создано в конце 60-х годов XX века и его целью был сбор данных для мониторинга параметров электрических станций. Последующее десятилетие передовые компьютерные технологии быстро развивались совместно с энергетической отраслью и нашли применение в частном контролирующем органе, который на сегодняшний день представляет собой комиссию по коммунальному хозяйству Калифорнии (CPUC – California Public Utilities Commission) [5]. Основными функциями данной организации являются регулирование цен коммунальных услуг и защита потребителей при использовании инженерной инфраструктуры. Комиссия CPUC оказывает влияние на качество услуг в следующих сферах: телекоммуникация, потребление природного газа и воды, перевозки железной дорогой, перевозки пассажирскими и транспортными компаниями.

Комиссия CPUC активно участвует в следующих климатических инициативах по защите штата Калифорнии США:

- повышение энергоэффективности;
- закупки возобновляемых источников энергии;
- калифорнийская солнечная инициатива;
- интегрированный план энергоресурсов и долгосрочный план закупок.

Благодаря первой государственной программе потребление энергии на душу населения осталось на прежнем уровне, в то время как в остальных штатах США он вырос примерно на 33 процента. Благодаря достаточной экономии энергии удалось сократить выбросы углекислого газа на 5,3

миллиона тонн, что эквивалентно удалению более 1 миллиона автомобилей с магистралей.

Использование второй государственной программы способствует тому, что процент энергоустановок, использующих возобновляемые ресурсы должен быть достигнут 33% на конец 2020 года, а к 2030 году должен достигнуть 60%.

Третья государственная программа предусматривает финансовый кредит для вырабатываемой потребителями электроэнергии, поступающей обратно в электрическую сеть фотоэлектрическими системами.

Четвертая государственная программа поддерживает развертывание транспортных средств с нулевым уровнем выбросов: электромобили с подключаемыми аккумуляторами, гибридные электромобили и электромобили с водородными топливными элементами. Планируется эксплуатировать около 5 миллионов электромобилей на дорогах к 2030 году и около 250 тысяч станций для их подзарядки к 2025 году.

Пятая программа способствует «зонтичному» планированию, в котором рассматриваются все политики и программы комиссии CPUC в области закупок электроэнергии и обеспечивается надежное, надежное и экономически эффективное электроснабжение штата Калифорнии.

Как видно, комиссия CPUC будучи «пионером» в области создания специализированного программного обеспечения энергетических систем и сейчас ставит амбициозные планы, направленные на развитие энергетической отрасли отдельной страны, но и всего мира в целом.

После первого применения специализированного САПР, дальнейшее развитие программного обеспечения энергетических систем пошло по пути использования компьютерных языков в этих системах. Данные программные продукты успешно применялось в управлении тепловыми и атомными электрическими станциями. И только в 80-х годах XX века были разработаны первые программные продукты и платформы для электрических моделей. Их особенностью является дружелюбный пользовательский интерфейс, в

котором каждый исследуемый объект представляет собой определенным математической моделью, то есть описывается определённым только ему математическим выражением.

Начиная с нулевых годов XXI века развитие программного обеспечения энергетических систем идет по пути аналитического программирования и 3D-моделирования. При проектировании энергетических систем и их элементов применяются программные продукты на основе математических алгоритмов и их вычислений. В таблице 1 представлены коммерческие специализированные САПР, которые широко применяются в электроэнергетических системах и указаны их основные отличительные признаки. Специализированные программные продукты указаны в порядке появления на рынке.

Таблица 1 – Специализированные САПР электроэнергетических систем

Программный продукт	Год создания	Особенности программного продукта
SKM	1972	Мощный комплекс подпрограмм в области электротехники; Расчет и моделирование систем электроснабжения в установившемся и аварийном режимах; интуитивно понятный интерфейс
XGSLab	1980	Мощный инструмент электромагнитного моделирования систем заземления и молниезащиты; интуитивно понятный интерфейс.
DIgSILENT	1985	Комплекс энергетических программ инжиниринга в системах генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии; моделирование возобновляемых источников энергии; интуитивно понятный интерфейс.

Продолжение таблицы 1

<p>CYME</p>	<p>1986</p>	<p>Комплекс энергетических программ в системах передачи, распределения и системах электроснабжения промышленных предприятий; интуитивно понятный интерфейс</p>
<p>RTDS PSCAD</p>	<p>1986</p>	<p>Комплекс энергетических программ моделирования в системах управления, генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии; интуитивно понятный интерфейс.</p>
<p><i>Etap</i></p>	<p>1988</p>	<p>Комплекс энергетических программ моделирования в системах управления, генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии; интуитивно понятный интерфейс, визуализация режимов в реальном времени.</p>
<p>ElectriCS Pro EnergyCS</p>	<p>1989</p>	<p>Пакет специализированных подсистем САПР при расчетах и проектировании в электротехнической области, электроэнергетических систем любой сложности и режимов работы. Система САПР изначально предназначалась для расчетов в энергетическом машиностроении, промышленном и гражданском строительстве, архитектурном проектировании и землеустройстве; интуитивно понятный интерфейс.</p>

Продолжение таблицы 1

ERACS	1999	Комплекс энергетических программ расчета и анализа в системах генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии; моделирование возобновляемых источников энергии; интуитивно понятный интерфейс.
-------	------	---

Как видно, из таблицы 1 одни специализированные системы автоматического проектирования имеют узкую направленность решаемого круга задач, а другие, наоборот, направлены на максимальный охват объектов расчета, анализа и моделирования и не ограничиваются какой-то одной предметной областью. Таким образом, каждая фирма-разработчик применяет свои подходы для завоевания рынка программного обеспечения САПР, чтобы обеспечить потребности множества промышленных предприятий и организаций, а также учебных заведений.

Следует отметить, что коллектив разработчиков программных продуктов большое внимание уделяет взаимосвязи человека-оператора с программной машинной средой и старается максимально упростить работу пользователя с программной оболочкой. Следовательно, все специализированные САПР имеют интерфейс близкий к офисным программам, что значительно сокращает время на обучение и адаптации к рабочему столу программы.

Далее рассмотрим более подробно интерфейсы и возможности специализированных САПР, применительно к электроэнергетическим системам.

## **1.2 Сравнительный анализ специализированного программного обеспечения в электроэнергетике**

Одним из самых «старейших» специализированных САПР, но и одновременно лидером в области электротехники и программного обеспечения для анализа и проектирования энергосистем является SKM Systems Analysis [6]. Это объясняется нахождением на рынке специализированного САПР с 1972 года и плодотворному взаимовыгодному сотрудничеству групп программистов с инженерами-электриками по всему миру численностью более 45 тысяч человек. Программное обеспечение SKM используется в тяжелой и легкой промышленности, на нефтехимических предприятиях, коммунально-бытовом секторе и прикладных электротехнических объектах по всему миру.

Специализированная САПР SKM включает в себя большое количество встроенных исследовательских модулей силовых элементов. Рассмотрим некоторые из этих модулей и их функциональные возможности:

- учебный модуль «Captor». С его помощью создаются временные и текущие чертежи однолинейных электрических схем с отчетами о настройках вынесенных элементов. Модуль позволяет контролировать устройства защиты с помощью интерактивной экранной графики, а также предоставляет обширную библиотеку электрооборудования. Результат моделирования выводится на печать миллиметровой или обычной бумаги с использованием пользовательских сеток и макетов. Учебный модуль «Captor» может использоваться в любых системах электроснабжения: промышленных, коммунальных, коммерческих, производственных, технологических и других. Система электроснабжения может строиться на элементах любого класса напряжения и любого рода тока. Библиотеки элементов используют номенклатуры популярных производителей электрооборудования, а также позволяют добавить новые библиотеки или изменить их зависимости или параметры.



- модуль оценки горения электрической дуги. С его помощью рассчитывают энергию излучения и область горения дуги для каждого места её возникновения в энергосистеме. Данный модуль экономит время, автоматически определяя время срабатывания защитных устройств и значение тока в месте повреждения, вызванного дугой. Также указываются требования к защитной одежде при использовании библиотек её уровней. Обеспечивает повышение безопасности при возникновении электрической дуги, которая является одной из самых опасных, разрушительных и даже смертельно опасных явлений в электрических сетях.

- модуль оценки электрооборудования. С его помощью сравниваются характеристики защитных устройств с расчетами при коротком замыкании. Модуль помогает разрабатывать более безопасные и экономически эффективные энергосистемы; уменьшает количество ошибок, за счет систематического сравнения длительно протекающих токов и токов короткого замыкания с каталожными данными электрооборудования.

- модуль нагрузок кабелей. Предназначен для точного расчета токовой нагрузки и повышения температуры в различных установках силовых кабелей энергосистемы. В библиотеке насчитывается более 500 готовых подземных кабельных трасс и большое количество математических моделей физических характеристик кабелей.

- модуль пусковых характеристик электродвигателей. Позволяет точно проанализировать все аспекты проблем пусковых режимов электродвигателей, благодаря современной программе моделирования во время запуска, остановки и изменения нагрузки на валу электрических двигателей.

- модуль программного обеспечения гармонического анализа. Позволяет моделировать резонансные режимы и гармонические искажения в промышленных, коммерческих и коммунальных энергосистемах. Конденсаторные батареи, полосовые электрические фильтры и фильтры верхних частот могут быть включены для оценки искажения напряжения и

тока, резонансного сканирования импеданса и результатов измерения нагрузки электрической сети.

- модуль анализ устойчивости при переходных процессах. Предназначен для имитации реакции системы во время, так и после кратковременных помех, таких как неисправности, изменения нагрузки, переключение, запуск электродвигателя, потеря работоспособности, потеря генерации мощности, потеря возбуждения и другие. Данный модуль необходим для изучения самых сложных современных задач моделирования энергосистем, но представлен в удобной и простой в использовании форме.

- учебный модуль несимметричной нагрузки. С его помощью моделируются энергосистемы с однофазной, двухфазной и несимметричной трехфазной нагрузкой. Фазные и линейные токи могут отображаться для различных режимов работы нагрузки, включая холостой ход в фазе и одновременные другие аварийные режимы. Моделирование включает однофазные, двухфазные и трехфазные линии, силовые трехфазные трансформаторы, нагрузки и конденсаторы, а также однофазные промежуточные трансформаторы.

- модуль исследования надежности электроснабжения. С его помощью рассчитываются показатели надежности и влияние экономических затрат на альтернативные конструкции электрической системы. Расчеты включают альтернативные поставки, альтернативные конфигурации сети, запасное электрооборудование, время на плановый ремонт и влияние затрат на невыпуск продукции.

Следует отметить, что программный продукт SKM содержит модуль обмена данными между своими проектами, а также другим сторонним программным обеспечением, что повышает доступность вывода результатов анализа, моделирования и расчета исследуемых энергосистем.

Таким образом, электротехническое программное обеспечение SKM является коммерчески успешным продуктом, благодаря широкой базе

учебных модулей, беспрецедентной поддержки клиентов и практическим их обучением по всему миру.

На рисунке 1 изображен интерфейс рабочего стола программы SKM в режиме учебного модуля «Captor».

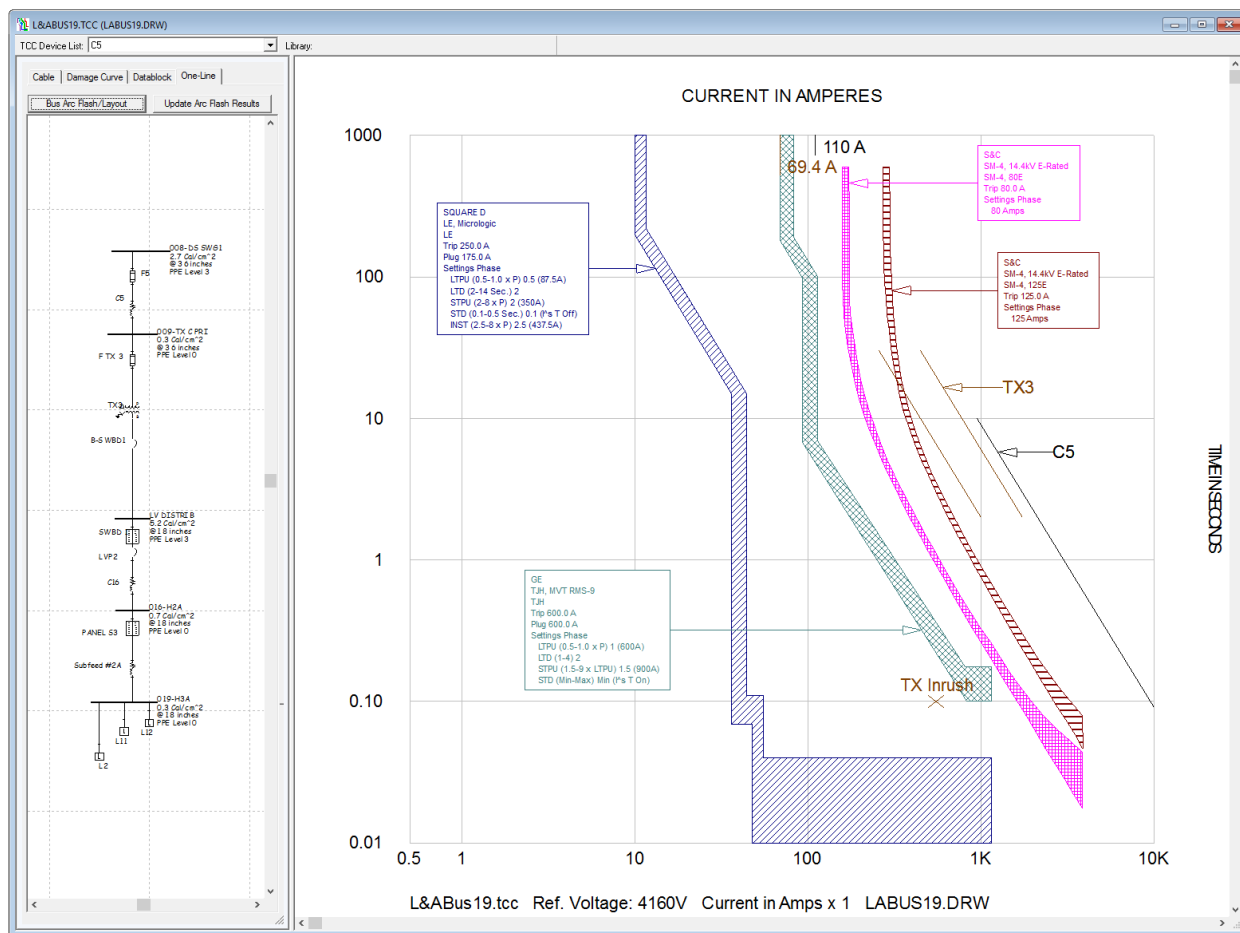


Рисунок 1 – Вид рабочего стола специализированной САПР SKM

В левой части рисунка изображена однолинейная схема электрической сети, а в правой части рисунка – пример моделирования в виде интерактивной экранной графики устройств защиты устройства и коммутационной аппаратуры. Как видно, расчёты сопровождаются визуализацией результатов расчётов в виде графического представления. Это является главным достоинством применяемых САПР в электроэнергетических системах.

Подробнее рассмотрим специализированное САПР XGSLab. Инжиниринговая и консалтинговая компания SINT Ingegneria Srl работает в области электротехники и машиностроения с 1980 года [7]. Эта

коммерческая компания разрабатывает и вводит в эксплуатацию системы для промышленных и коммерческих объектов, а также для инфраструктур (дорог, автомагистралей, туннелей), где были приняты решения, направленные на оптимизацию энергопотребления и на повышение эффективности и надежности. Итальянская консалтинговая компания SINT Ingegneria разрабатывает техническое программное обеспечение по анализу энергосистем.

Одним из самых мощных программ электромагнитного моделирования для систем питания, заземления и молниезащиты является специализированное САПР XGSLab. Укажем преимущества данной САПР:

- интуитивно понятный интерфейс, который является очень простым, даже для начинающих;
- включает полный инструмент для моделирования систем питания, заземления и молнии;
- учитывает общие подходы в широком диапазоне частот, с произвольной сетью проводников и многими моделями грунтов, включая многослойные;
- учитывает зависимые от частоты собственные и взаимные сопротивления для моделирования динамического поведения больших систем заземления во время электромагнитных переходных процессов;

Специализированное САПР XGSLab включает в себя следующие модули:

- модуль анализа систем заземления (GSA) для базового применения с подземными системами. Производит расчет и проектирование сетки Земли, включая анализ удельного сопротивления почвы.
- модуль для анализа и проектирования заземления системы в частотной области (GSA\_FD) для общего применения с подземными системами. Также, включает анализ удельного сопротивления грунта, и представляет собой современное программное обеспечение для заземления. Данный модуль позволяет рассчитывать магнитные поля, вызванные

системами заземления или кабелем, и электромагнитные помехи (индуцированный ток и потенциал из-за резистивной, емкостной и индуктивной связи) между системами заземления или кабелем и трубопроводом или подземными электродами в целом.

- модуль анализа наружных и подземных систем в частотной области (XGSA\_FD) для общего применения с воздушными и подземными системами. Данный модуль предназначен для расчета систем заземления, анализа электромагнитного поля и помех и распределения тока повреждения в частотной области от постоянного тока до нескольких МГц, включая анализ удельного сопротивления почвы. Оценивает электромагнитные помехи между воздушными или подземными линиями электропередачи и установкой в виде трубопроводов, железных дорог или линий связи. Также может рассчитать влияние молнии на одну частоту, а также распределение тока повреждения.

- модуль анализа наружных и подземных систем во временной области (XGSA\_TD) для общего применения с воздушными и подземными системами. Обеспечивает анализ сети проводников во временной области с учетом переходных процессов с максимальной шириной полосы ниже нескольких МГц, включая анализ удельного сопротивления почвы и анализ Фурье. Позволяет оценить распределение токов удара молнии по системе молниезащиты (подземные и надземные компоненты), а также соответствующее распределение потенциала, электродвижущей силы и тока утечки во временной области. Также может быть полезен для расчета магнитных и электрических полей, вызванных подземными или воздушными электродами во временной области.

Область применения специализированной САПР XGSLab настолько широка, что реализованная модель предназначена для общего использования и решает уравнения Максвелла в нестационарных условиях с учетом отсутствия однородности Земли по функциям Грина, реакции Земли по

интегралам Зоммерфельда и перехода от частоты к временной области с помощью преобразований Фурье.

На рисунке 2 изображен интерфейс рабочего стола программы XGSLab.

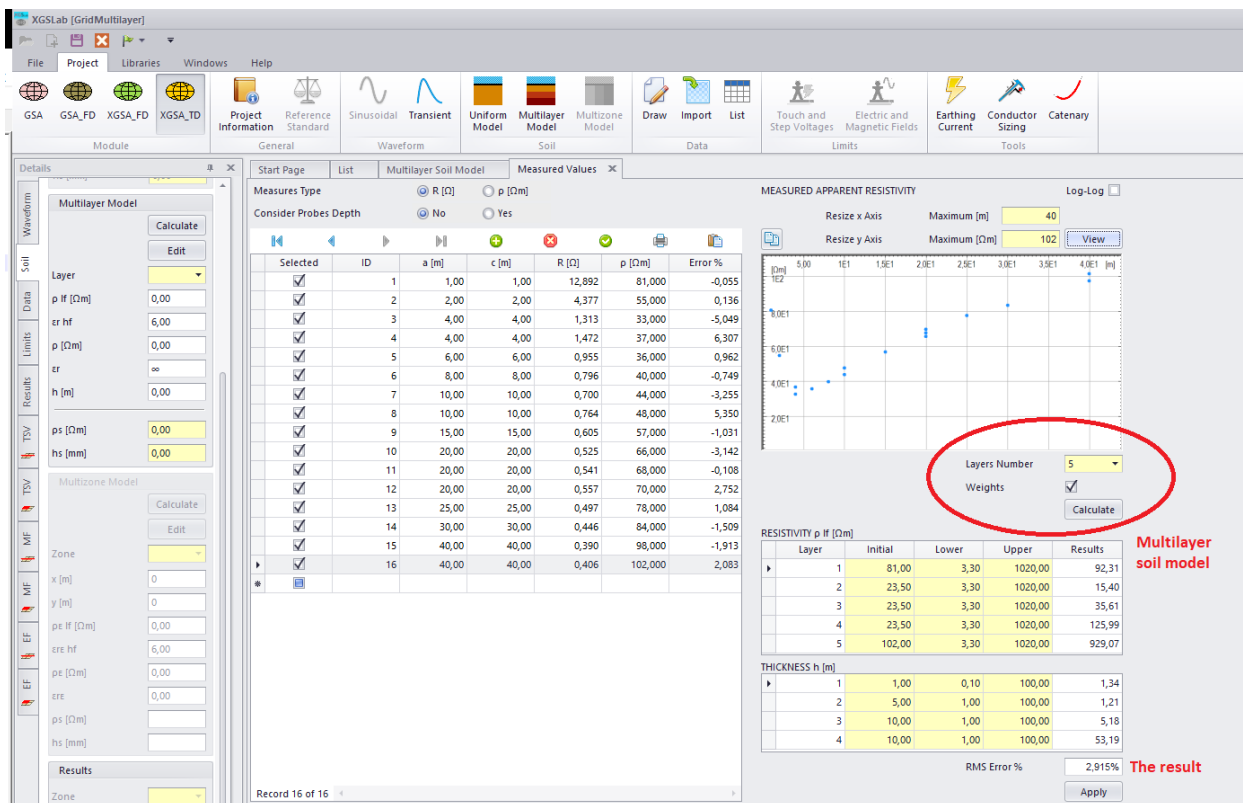


Рисунок 2 – Вид рабочего стола специализированной САПР XGSLab

Все модули объединены в пакет «все в одном» и основаны на гибридном методе расчета, который рассматривает линию передачи, схему и электромагнитную теорию, объединенные в единую модель расчета. Гибридные методы объединяют сильные стороны других методов и хорошо подходят для инженерных целей, поскольку они позволяют анализировать сложные сценарии, включая внешние параметры, такие как напряжения, токи и импедансы.

Хотя алгоритмы расчета специализированной САПР XGSLab очень эффективны с точки зрения скорости вычислений, достаточно точны и стабильны, но данная САПР является узконаправленной и подходит для расчета и моделирования систем питания, заземления и молниезащиты.

Далее рассмотрим функциональные возможности специализированного программного обеспечения DIgSILENT [8]. Эта одноименная компания основана в 1985 году Мартином Шмигом, и в настоящее время предоставляет высокоспециализированные услуги в области систем электроснабжения для передачи, распределения, генерации, промышленных установок и возобновляемых источников энергии.

Специализированная САПР DIgSILENT также достаточно давно присутствует на рынке программного обеспечения для комплексного анализа энергосистем и учитывает талант и опыт системных инженеров, непосредственно участвующих в планировании, эксплуатации и обслуживанию энергетических систем. Программная среда DIgSILENT – это комплексный инструмент анализа энергетических систем, которая сочетает в себе надежные и гибкие возможности её моделирования с современными алгоритмами решения и уникальной базой данных управленческой концепции. Количество лицензий данного программного продукта превышает 10 тысяч, которые находятся в эксплуатации в более чем 140 странах мира. Специализированная САПР DIgSILENT постоянно пополняется программными пакетами, учитывающие влияние современных систем питания, таких как распределенная генерация и ветровой энергетики.

Как и рассмотренный выше вид специализированной САПР DIgSILENT состоит из набора пакетов приложений, отличающихся по функционалу:

- модуль PowerFactory (Модуль электростанция). Его целью является анализ электроэнергетической системы, которая состоит из систем генерации, передачи и распределения электрической энергии. Модуль охватывает весь спектр функциональных возможностей - от стандартных функций до сложных и продвинутых приложений, включая ветроэнергетику, распределенную генерацию, моделирование в реальном времени и мониторинг производительности для тестирования и контроля

электроэнергетических систем. Модуль PowerFactory прост в использовании и полностью совместим с 32- и 64-разрядными версиями MS Windows.

Модуль предлагает ряд методов расчета электрических нагрузок, включая полную методику Ньютона-Рафсона переменного тока (при симметричной и несимметричной нагрузках) и линейного метода постоянного тока. Применяемый усовершенствованный численный метод Ньютона-Рафсона с итерациями отклонения тока или мощности, дает ошибки округления менее 1 кВ·А для всех силовых шин. Реализованные алгоритмы демонстрируют отличную стабильность и сходимость. Применяется несколько уровней итерации, которые гарантируют сходимость при любых условиях.

Также данный модуль обеспечивает расчеты короткого замыкания, которые могут возникнуть при одиночных и множественных неисправностях в системах электроснабжения. Алгоритм расчетов режимов коротких замыканий поддерживает различные представления и методы расчета, основанные на ряде международных стандартов, а также метод наложения, который дает нужную точность для определения токов короткого замыкания без учета упрощений или допущений, обычно сделанных при стандартном анализе неисправностей в системах электроснабжения.

В рабочем модуле доступен полный набор моделей и библиотек силового электрооборудования, позволяющих моделировать все элементы электрической сети, а также устройства автоматики и защиты.

- модуль StationWare (модуль хранения данных). Данный модуль предоставляет надежную базу данных параметров централизованной защиты и систему управления для всех данных подстанций энергосистемы.

- модуль системы мониторинга. Данный модуль представляют собой интегрированные, многофункциональные системы сбора данных, которые охватывают запись, мониторинг и анализ сигналов на всех соответствующих временных промежутках. Возможности модуля мониторинга включает в себя



контроль электрической сети и оборудования, регистрацию неисправностей, анализ качества электроэнергии и характеристик электрической сети.

Центр поддержки предоставляет несколько услуг по техническому обслуживанию и поддержке на разных уровнях, проводит видео-вебинары для пользователей и проводит обучающие занятия.

На рисунке 3 изображен интерфейс рабочего стола программы DIgSILENT.

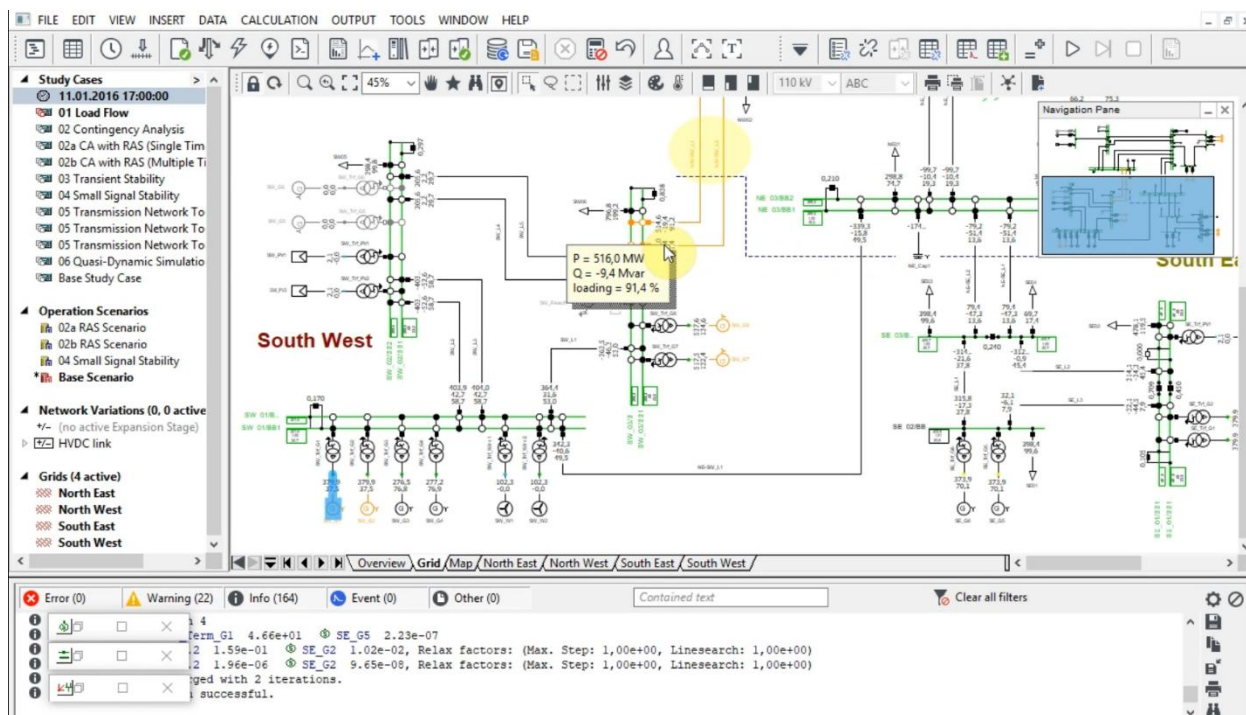


Рисунок 3 – Вид рабочего стола специализированной САПР DIgSILENT

На рисунке изображена однолинейная схема электрической сети, а результат моделирования выводится в реальном времени при нажатии мышкой-манипулятором на выбранный элемент электрической сети.

Преимуществом специализированной САПР DIgSILENT является возможность получения лицензии университетами и другими академическими учреждениями в образовательных целях, отдельными учащимися, имеющими действительное студенческое удостоверение, а также отдельным учащимся, работающим над не спонсируемой диссертацией бакалавра, магистра или доктора наук, которые не имеют доступа к исследовательской или образовательной лицензии. Активация программного

обеспечения производится при её установке с помощью USB-ключа, которое предоставляется за дополнительную плату.

Далее рассмотрим функциональные возможности специализированного программного обеспечения SYME [9]. Компания SYME INTERNATIONAL была основана в 1986 году с целью предоставления высококачественных программных решений в области энергетики для электротехнической промышленности по всему миру. Данное специализированное САПР быстро завоевала международное признание, как поставщик программного обеспечения для энергетического машиностроения мирового класса и в настоящее время имеется более 5000 копий программных решений, которые поддерживают тысячи проектов в более чем 100 странах мира.

Специализированная САПР SYME состоит из доступных модулей, которые включают в себя множество расширенных приложений и обширные библиотеки для анализа систем электроснабжения и распределительных электрических сетей.

Модуль Power Engineering (модуль энергетика) включает в себя большое количество приложений для распределительных сетей и системного анализа, основными из них являются:

- анализ потокораспределения. Позволяет выполнить несколько видов анализа в симметричных или несимметричных трехфазных, двухфазных и однофазных электрических системах, которые работают при радиальной, магистральной или замкнутой конфигурациях.

- автоматический анализ прогноза электрической сети. Для создания, просмотра и изменения зависящих от времени проектов, состоящих из модификаций в сети (добавление любой электрической нагрузки на определенную дату, замена силовых трансформаторов на подстанции, переключение в электрической сети или её изменение конфигурации и другие изменения).

- анализ устойчивого состояния с профилями электрической нагрузки. Позволяет выполнить точный анализ временного диапазона на основе

комбинации данных автоматического считывания показаний электросчетчиков в системах распределения электроэнергии, краткосрочного прогноза нагрузки, откалиброванный с помощью телеметрии показаний электросчетчиков и исторических моделей данных электропотребления.

- оценка надежности. Предоставляет структуру энергосистемы, в рамках которой выполняются сценарии прогнозирования и исторической оценки надежности, в результате которых можно оценить и понять влияние вложенных связанных инвестиций.

- технико-экономический анализ. Облегчает оценку реализуемости и прибыльности проекта на основе модели фактической энергосистемы.

- переходная стабильность системы. Позволяет смоделировать динамическое поведение электрических систем с распределенной генерацией при различных переходных процессах (возникновение и устранение неисправностей, запуск двигателей большой мощности, отключение когенерационных установок тепловых станций, отключение нагрузок и другие).

- гармонический анализ. Проводит анализ протекания гармоник тока в электроэнергетических системах. Приложение позволяет пользователю моделировать нелинейные нагрузки и другие источники гармонических токов, такие как преобразователи и дуговые печи, и легко обнаруживать резонансные частоты благодаря наличию конденсаторных батарей. Благодаря возможностям аналитического и компьютерного моделирования позволяет точно оценивать влияние нелинейных нагрузок на электрическую сеть.

- оптимальное размещение регуляторов напряжения. Позволяет устанавливать регуляторы напряжения в оптимальных местах на распределительных фидерах.

- опасность возникновения электрической дуги. Позволяет анализировать и повышает электробезопасность для работников, работающих с электрооборудованием или рядом с ним. Приложение

рассчитывает необходимые параметры, необходимые для оценки уровня риска и принятия адекватных процедур безопасности.

- улучшенное моделирование подстанции. Для моделирования всех основных компонентов распределительной подстанции и любой подсети, такой как детальное моделирование промышленного объекта.

- анализ сети вторичного напряжения. Позволяет анализировать поток мощности и короткое замыкание в распределенных сетях сети вторичного напряжения с большим количеством ячеек для любого уровня напряжения.

Кроме основных приложений, специализированное САПР СУМЕ включает в себя и дополнительные инженерные приложения, которые полезны для энергетиков, среди которых:

- проектирование и анализ заземляющей решетки подстанции. Позволяет оптимизировать конструкцию новых сеток и усилить существующие сетки любой формы благодаря встроенным средствам оценки опасных точек.

- расчет емкости кабеля. Выполняет расчеты токовой нагрузки и повышения температуры для монтажа силовых кабелей.

- прокладка кабелей в туннелях. Определяет температуру, установившееся состояние, циклическую и кратковременную пропускную способность кабелей, установленных в невентилируемых туннелях.

- прокладка кабелей в желобах. Определяет тепловую рейтинг кабелей, установленных в заполненных или в незаполненных желобах.

- прокладка нескольких кабелей в воде. Позволяет пользователю определять устойчивое состояние неравномерно нагруженной токовой нагрузки и температуры для кабелей, установленных в одном или нескольких немагнитных оболочках, заглубленных, лежащих на морском дне или полностью погруженных в воду.

- расчет магнитных полей. Вычисляет плотность магнитного потока в любой точке на поверхности подземной кабельной линии или над ней.

- расчет сопротивления кабеля. Рассчитывает электрические параметры для кабелей, необходимых для проведения исследований электрической сети на промышленной частоте (50 Гц или 60 Гц).

- оценка рабочей температуры кабеля с течением времени. Оценивает температуру, при которой подземные кабельные системы работали в течение всего срока их эксплуатации.

На рисунке 4 изображен интерфейс рабочего стола программы CYME.

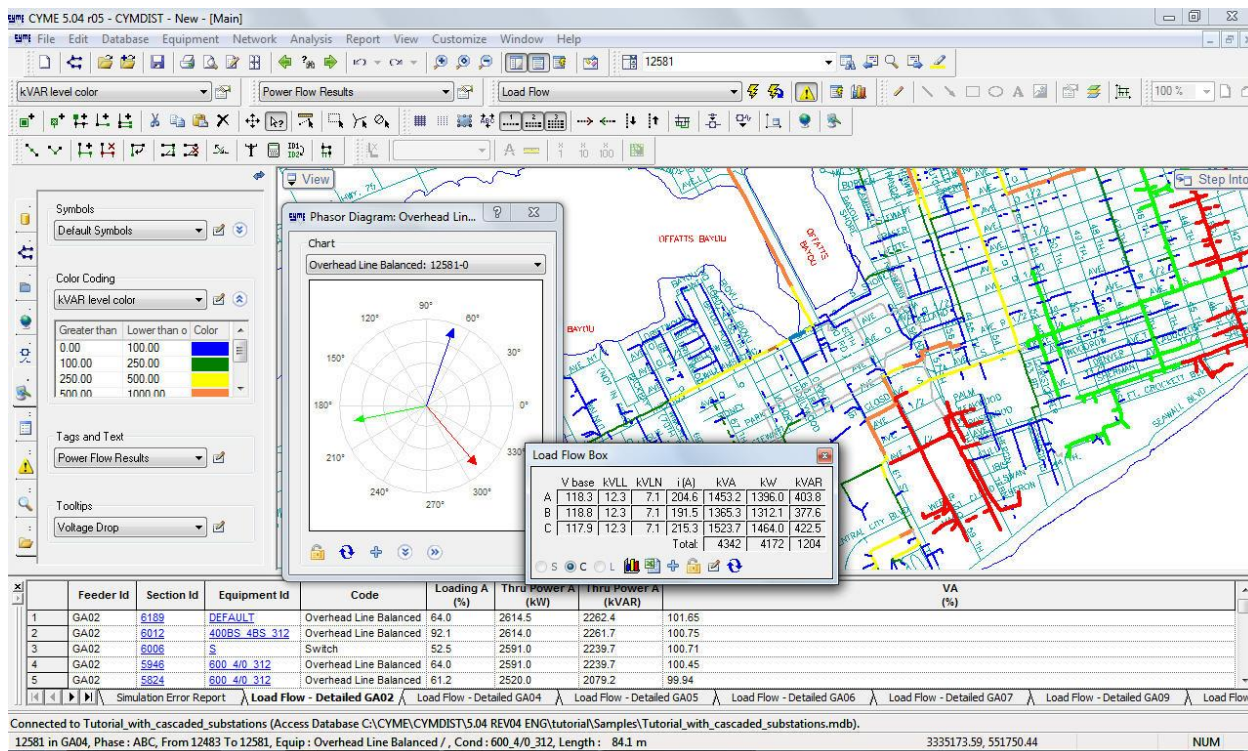


Рисунок 4 – Вид рабочего стола специализированной САПР CYME

Таким образом, рабочий стол программного обеспечения CYME интуитивно настраивается под пользователя и результаты моделирования выводится в виде графических представлений и таблиц. Дополнительные модули программного обеспечения выполняют анализ, оптимальное размещение и оптимизацию элементов распределительных сетей.

Со специализированной САПР DIgSILENT больше сотрудничают предприятия энергосистемы, энергетического машиностроения и другие промышленные объекты Северной и Южной Америк, и в меньшей степени промышленные предприятия Европы, Азии и Африки.

Подробнее рассмотрим специализированное САПР RTDS. Данная специализированная САПР была изначально разработана на основе исследовательского проекта, проведенного в исследовательском центре города Манитоба (Канада) в 1980-х годах. Позднее, в 1989 году, состоялось первое в мире цифровое моделирование энергосистемы высокого напряжения постоянного тока (HVDC) в реальном времени. В 1993 году состоялась первая коммерческая установка симулятора RTDS. Затем, в 1994 году, была основана компания RTDS Technologies Inc., задача которой заключалась в разработке и коммерциализации симулятора [10].

RTDS – это специализированный программно-технический комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе (ЭС) в реальном масштабе времени. С помощью цифрового моделирования процессов, в настоящее время выполняются исследования ЭС высокого напряжения переменного (HVAC) и постоянного (HVDC) тока в 42 странах мира и использующих более 1400 единиц лицензий.

RSCAD – мощный и дружелюбный графический пользовательский интерфейс, который является частью программного обеспечения RTDS. Он позволяет осуществлять подготовку моделей электроэнергетических систем с последующим запуском на RTDS. RSCAD включает в себя несколько модулей, которые позволяют создавать, выполнять, контролировать и анализировать все аспекты моделирования в реальном времени без использования сторонних продуктов.

PSCAD – специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования электромагнитных переходных процессов с высоким уровнем детализации, а также разработка и исследование алгоритмов управления, релейной защиты в электроэнергетических системах.

RTDS включает в себя готовые приложения, среди которых:

- моделирование и тестирование сетей MicroGrid (микросетей).  
Позволяет выполнить моделирование локальных энергетических систем со своими собственными энергоресурсами, которые могут взаимодействовать с единой энергосистемой, отключаться и работать автономно. Сети MicroGrid содержат собственные распределенные источники энергии, накопители энергии, электрические нагрузки, распределительные линии передач и системы управления. В библиотеке моделей RSCAD присутствуют ветровые турбины, электрические машины (асинхронные машины с двойной клеткой, асинхронные машины с короткозамкнутым ротором и синхронные машины с постоянными магнитами), солнечные фотоэлектрические панели, топливные элементы, химических источников тока (литий-ионные батареи).

- модуль кибер-безопасности. Обеспечивает безопасность методов работы в сети связи, новые алгоритмы для обеспечения надежности, отказоустойчивости и эффективности, которые требуются в энергетической инфраструктуре. Противодействует кибер-атакам на устройствах защиты и управления энергосистемой, которые могут привести к критическому отключению питания или повреждению оборудования.

- моделирование и тестирование с обратной связью с распределительными системами. Используется электроэнергетическими компаниями, производителями оборудования для защиты и управления, а также учебными и исследовательскими учреждениями для изучения распределительных систем и тестирования замкнутого контура оборудования защиты и контроля на распределительном уровне.

- моделирование силового оборудование в замкнутом контуре. Моделирование включает в себя среду моделирования в режиме реального времени, обменивающуюся энергией с реальными физическими силовыми аппаратными средствами, такими как оборудование с использованием возобновляемых источников энергии, электромобили, аккумуляторы, двигатели и электрические нагрузки.

- моделирование высоковольтных устройств постоянного тока (HVDC). Высоковольтные устройства постоянного тока являются одними из многих критически важных технологий для обеспечения и повышения управляемости, надежности и безопасности современных электрических сетей. За последние два десятилетия программное обеспечение RTDS произвело революцию в процессе тестирования для систем управления HVDC. Сегодня это идеальный инструмент для моделирования и тестирования подобных устройств.

- моделирование защитной аппаратуры в замкнутом контуре. Предлагает самые передовые и эффективные средства для тестирования защитной аппаратуры, так как моделирование выполняется в режиме реального времени, физическое оборудование защиты может быть подключено в замкнутом контуре к модели энергосистемы.

- тестирование реле бегущей волны. Позволяет обнаружить место повреждения в энергосистеме с высокой точностью, что сказывается на улучшении производительности энергосистемы за счет увеличения запаса устойчивости при переходных процессах, повышения безопасности населения и персонала, а также ограничения износа и повреждения оборудования.

- PMU исследования. Данные моделирования позволяют использовать мониторинга колебаний, разности углов, частоты системы, стабильности напряжения и других параметров.

- интеллектуальная сеть электроснабжения. Позволяет развивать концепцию интеллектуальных сетей и распределенной генерации в глобальном масштабе. Производители энергетического оборудования, коммунальные службы, университеты и исследовательские институты во всем мире стремятся разработать решения, которые смягчают воздействие человека на окружающую среду, укрепляют безопасность и надежность энергетической инфраструктуры, а также обеспечивают эффективное производство, передачу и распределение электроэнергии.



Команда разработчиков компании RTDS Technologies обладает обширными знаниями о программном обеспечении. Пользователи программного продукта, получают поддержку по электронной почте или по телефону от нашей собственной команды и получают любые обновления программного обеспечения по мере их выпуска. Пользователями в Российской Федерации являются акционерные общества и учебные заведения: ОАО ФСК ЕЭС, НТЦ ЕЭС, Ивановский государственный университет, Казанский авиационный институт, Казанский государственный энергетический университет, Московский физико-технический институт, Московский энергетический институт, Нижегородский государственный технический университет, Томский политехнический университет и другие.

На рисунке 5 изображен интерфейс рабочего стола программы RSCAD.

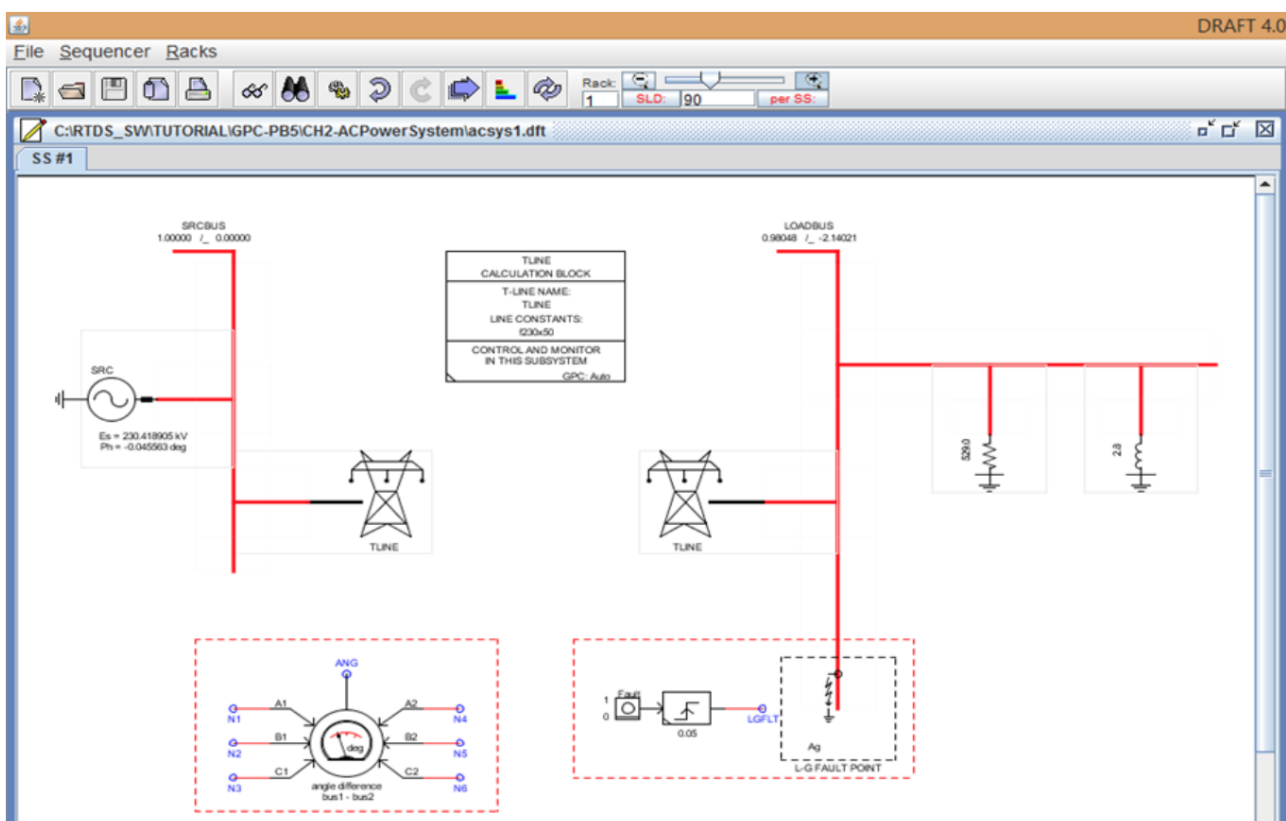


Рисунок 5 – Вид рабочего стола специализированной САПР RSCAD

Таким образом, пользователями программного обеспечения RTDS являются не только предприятия энергосистемы, производители электротехнического оборудования, но и исследовательские и

образовательные учреждения по всему миру с отделами электрических и энергетических систем. Пользователи RTDS Simulator в академическом мире имеют доступ к передовому инструменту для исследований и обучения в области энергосистем, что, в свою очередь, повышает репутацию вуза и способствует привлечению преподавателей высокого уровня.

Далее рассмотрим функциональные возможности специализированного программного обеспечения *Etap* [11, 15]. Компания *Etap*, основанная в 1986 году, со штаб-квартирой в городе Ирвине (США, Калифорния). В настоящее время имеет более 50 офисов по всему миру, продано более 50 тысяч лицензий по всему миру, сотрудничают с более чем 5 тысячами учебных заведений и государственных учреждений по всему миру.

Как и в других специализированных САПР *Etap* состоит из доступных программных продуктов, которые могут быть представлены по секторам промышленности:

- система планирования, анализа, защиты и управления энергопотреблением. Пакет приложений «Планирование системы электропередачи, анализ сети, защита и оптимизация» включает в себя основные приложения: сетевой анализ, оптимизация сети, геопространственная электрическая схема, линия передачи, динамические и переходные процессы, кабельные системы, возобновляемая энергия, модуль обмена данными [12]. Пакет приложений «Система энергоменеджмента, система автоматизации подстанций и решения Smart Grid» включает в себя основные приложения: SCADA (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных) и мониторинг, система энергоменеджмента, система автоматизации подстанции, система сброса нагрузки.

- анализ, планирование, защита и расширенная система управления распределительной сетью. Пакет приложений «Моделирование распределительных сетей и их применение в распределительных сетях» включает в себя основные приложения: сетевой анализ, защита и

координация, геопространственная электрическая схема, динамические и переходные процессы, возобновляемая энергия, кабельные системы, оптимизация сети, модуль обмена данными [13, 14]. Пакет приложений «Усовершенствованная система управления дистрибуцией» включает в себя основные приложения: SCADA и мониторинг, система управления распределением электроэнергии, система управления отключениями.

- решения для моделирования, анализа, оптимизации и эксплуатации энергосистем промышленного оборудования. Пакет приложений «Полный спектр приложений для анализа энергетических систем» включает в себя основные приложения: сетевой анализ, горение электрической дуги, защита и координация, системы постоянного тока и управления, наземные сеточные системы, динамические и переходные процессы, возобновляемая энергия, кабельные системы, оптимизация сети, силовые трансформаторы, геопространственная электрическая схема, модуль обмена данными. Пакет приложений «Модульная система управления питанием и автоматизации» включает в себя основные приложения: SCADA и мониторинг, система управления питанием, система управления поколением, система сброса нагрузки, система управления микросетями, интеллектуальная автоматизация подстанций.

- программное обеспечение для моделирования энергосистем, инженерного проектирования и анализа для объектов ядерной энергетики. Пакет приложений «Ядерная генерация. Приложения для моделирования и анализа энергосистем» включает в себя основные приложения: сетевой анализ, горение электрической дуги, защита и координация, системы постоянного тока и управления, динамические и переходные процессы, кабельные системы, наземные сеточные системы, силовые трансформаторы, модуль обмена данными. Пакет приложений «Ядерная генерация. Модульная система управления питанием и автоматизации» включает в себя основные приложения: SCADA и мониторинг, система управления питанием, система

управления покоем, система сброса нагрузки, система управления микросетями, системы автоматизация подстанций.

- решение для анализа и эксплуатации железнодорожных тяговых энергетических систем. Пакет приложений «Рельсовая тяговая силовая система» включает в себя основные приложения: анализ тягового усилия, тяговый базовый пакет, тяговая SCADA и система управления.

- решение для анализа и эксплуатации аэропортов и аэрокосмических электрических систем. Пакет приложений «Аэропорт и аэрокосмический. Гибкие программные инструменты для проектирования и анализа электрических систем» включает в себя основные приложения: сетевой анализ, горение электрической дуги, защита и координация, системы постоянного тока и управления, динамические и переходные процессы, возобновляемая энергия, кабельные системы, наземные сеточные системы, ГИС карты, модуль обмена данными. Пакет приложений «SCADA в аэропорту и система управления питанием» включает в себя основные приложения: SCADA и мониторинг, система управления нагрузкой.

На рисунке 6 изображен интерфейс рабочего стола программы *Etap*.

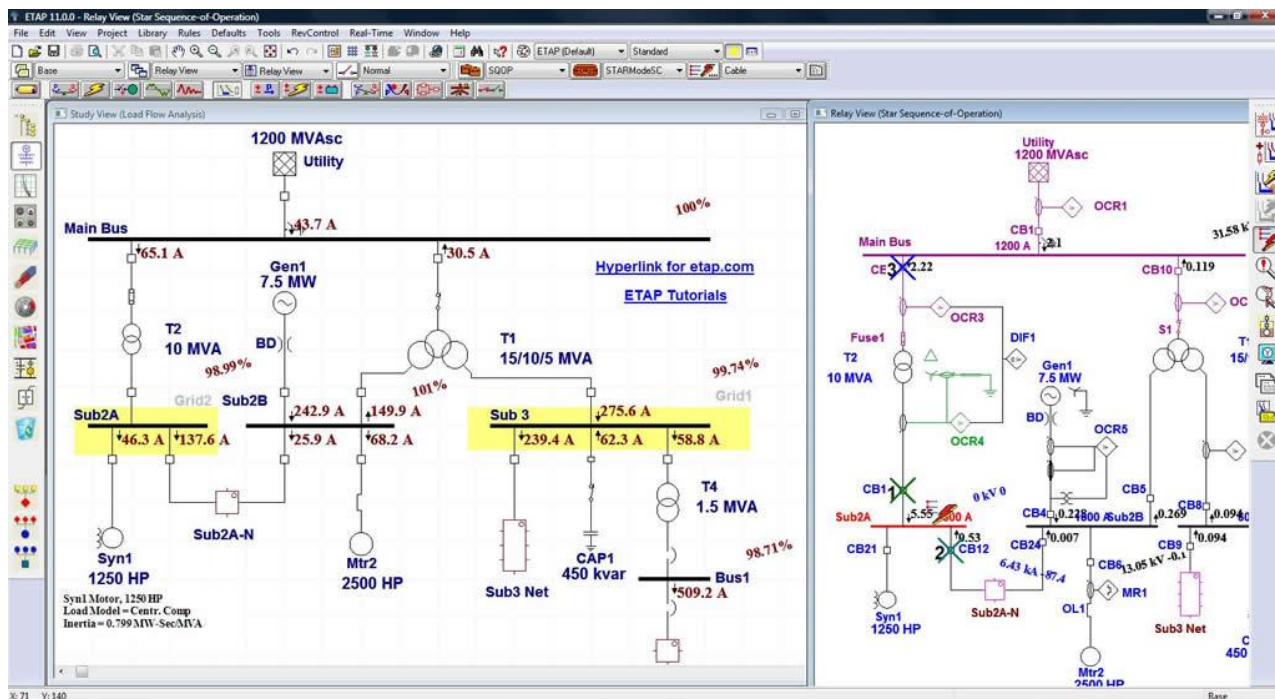


Рисунок 6 – Вид рабочего стола специализированной САПР *Etap*

Как видно, рабочий стол САПР *Etap* представляет собой интуитивно понятный интерфейс. Программный комплекс *Etap* предназначен для планирования, расчета и моделирования электрических сетей и систем электроснабжения промышленных предприятий, объектов атомной промышленности, тяговых сетей железнодорожного транспорта, при эксплуатации аэропортов и аэрокосмических электрических систем, объектов судостроения и других. Важно отметить, что руководство компании работает с академическими учебными заведениями при взаимовыгодном сотрудничестве.

Далее рассмотрим функциональные возможности специализированного программного обеспечения *ElectriCS Pro/EnergyCS*. Данное программное обеспечение начала свою историю развития с 1989 года и в настоящее время создано более 60 приложений, которые применяются крупными, средними и малыми предприятиями в России и за рубежом. Количество выданных лицензий превысило 1 миллион, размер коммерческой базы инсталляций составляет более 400 000 рабочих мест [15, 16, 17].

Специализированная САПР *ElectriCS Pro/EnergyCS* разработана компанией *CSoft Development*, которая является ведущим разработчиком программного обеспечения для рынка САПР в области машиностроения, промышленного и гражданского строительства, архитектурного проектирования, землеустройства и ГИС, электронного документооборота, обработки сканированных чертежей, векторизации и гибридного редактирования. Следует отметить, что данная специализированная САПР является результатом работы группы российских программистов.

Специализированная САПР *ElectriCS Pro/EnergyCS* состоит из доступных программных продуктов, которые могут быть разбиты на две подгруппы:

- набор приложений автоматизированного проектирования и расчетов в области электротехники и электротехнического оборудования. Объектами САПР могут быть: системы электроснабжения; системы молниезащиты,

заземления и электромагнитной совместимости промышленных и энергетических объектов; наружные и внутренние осветительные установки предприятий, зданий и сооружений, промышленных площадок; промышленное электрооборудование; бортовое электрооборудование летательных аппаратов и другие. Примерами программных продуктов являются ElectriCS ADT, ElectriCS Light, ElectriCS Pro, ElectriCS Pro, ElectriCS Storm.

- набор приложений для выполнения расчетов при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем и сетей. Объектами САПР могут быть: электрические и механические параметры воздушных и кабельных линии электропередачи; волоконно-оптических линий связи; гибкие ошиновки распределительных устройств станций и подстанций; распределительные сети переменного и постоянного тока. Примерами программных продуктов являются EnergyCS, EnergyCS Потери, EnergyCS ТКЗ, EnergyCS Line, EnergyCS Режим, EnergyCS Электрика.

На рисунке 7 изображен интерфейс рабочего стола программы EnergyCS.

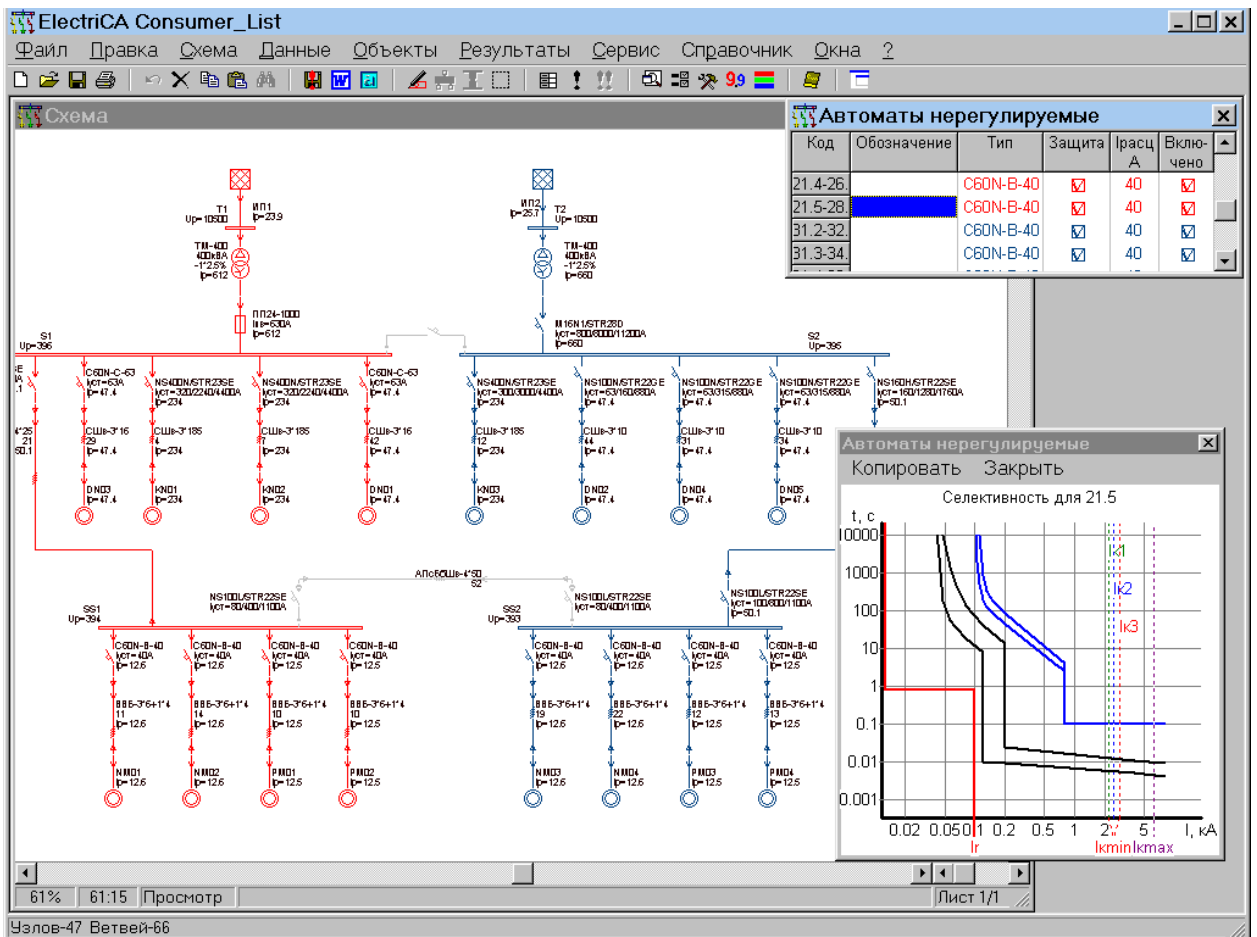


Рисунок 7 – Вид рабочего стола специализированной САПР EnergyCS  
Электрика

Как видно, рабочий стол САПР Electrica Pro/EnergyCS представляет собой интуитивно понятный интерфейс на русском языке. Набор приложений от CSoft Development является коммерческим продуктом и находят применение в расчетах проектных подразделений ОАО «Газпром», ОАО «РЖД», ОАО «Транснефть», ОАО «Роснефть», АК «Алроса», ФГУП «Ростехинвентаризация», инженерных центров, входивших в состав РАО ЕЭС, предприятий ОАО «ОАК», концернов Boeing, BMW, Verizon, Shell, Toyota, Nippon Steel, Alstom Power. Следует отметить, что отсутствует сотрудничество на безвозмездной основе данной САПР с высшими учебными заведениями.

Далее подробнее рассмотрим специализированное САПР ERACS. Данная САПР является результатом работы группы европейских программистов и начала свою историю развития с 1999 года [18]. В

настоящее время программный продукт представляет собой набор инновационного программного обеспечения для анализа систем электропитания, которое позволяет пользователям быстро и легко моделировать сети систем электроснабжения для оценки их правильной, безопасной и безотказной работы. При применении САПР ERACS пользователь может сократить расходы, снизить риски, улучшить качество электроэнергетической системы и повысить ее надежность и безопасность.

САПР ERACS состоит из следующих доступных приложений:

- модуль потока нагрузки. Позволяет моделировать радиальные и замкнутые трехфазные системы низкого и высокого напряжения переменного тока с несколькими источниками. Данный модуль рассчитывает: потери в системе, активную и реактивную мощности, ток (на экране стрелки указывают его направление), настройки выводов трансформатора, профили нагрузки силового оборудования и напряжения и многие другие.

- модуль гармонического анализа. Позволяет подключать к электроэнергетической системе несколько источников гармоник и рассчитывать их влияние. Результаты включают общее гармоническое напряжение и искажение тока и их отдельные гармонические составляющие в графическом и числовом форматах.

- модуль гармонического импеданса. Вычисляет профили гармонического импеданса между выбранными системными шинами, позволяя определить возможные резонансы в системе.

- модуль настройки защитных устройств. В библиотеке данных присутствуют реле, предохранители и автоматические выключатели. Модуль позволяет их добавлять к однолинейной схеме системы электроснабжения и графически выбирать настройки защитных устройств.

- модуль проверки стабильности защиты. Выбираются желаемые параметры защиты, и программа защиты проверяет, что ни одно устройство не будет работать в установившемся режиме нагрузки.



- модуль исследования динамической защиты. Любое из классических условий отказа может быть применено к однолинейной схеме для оценки динамической работы схемы защиты. Модуль будет поэтапно проходить этапы, чтобы подтвердить (или нет), что неисправность в сети может быть изолирована устройствами защиты приемлемым способом.

- модуль анализатора защиты. Модуль позволяет каждому элементу защиты в однолинейной схеме вывести в режим неисправности и зарегистрировать соответствующие реакции схемы защиты. Удобная графическая отчетность позволяет быстро выявлять недостатки и сбои в схеме защиты.

- модуль динамической устойчивости. Позволяет изучать динамическое поведение системы, например, запуск двигателя, приложение отказа, приложение нагрузки, отклонение нагрузки и общее поведение. Временная шкала нескольких событий выбирается так, чтобы результат отображался графически и на однолинейной схеме.

На рисунке 8 изображен интерфейс рабочего стола программы ERACS. Программный комплекс ERACS предназначен для расчета и моделирования электрических систем в реальном времени. Данный программный продукт сочетает в себе удобный пользовательский интерфейс и комплекс имитационного моделирования, чтобы обеспечить устойчивую и безопасную работу энергетической системы в целом. Специализированная САПР ERACS является лидером на европейском рынке программного обеспечения в электроэнергетике.

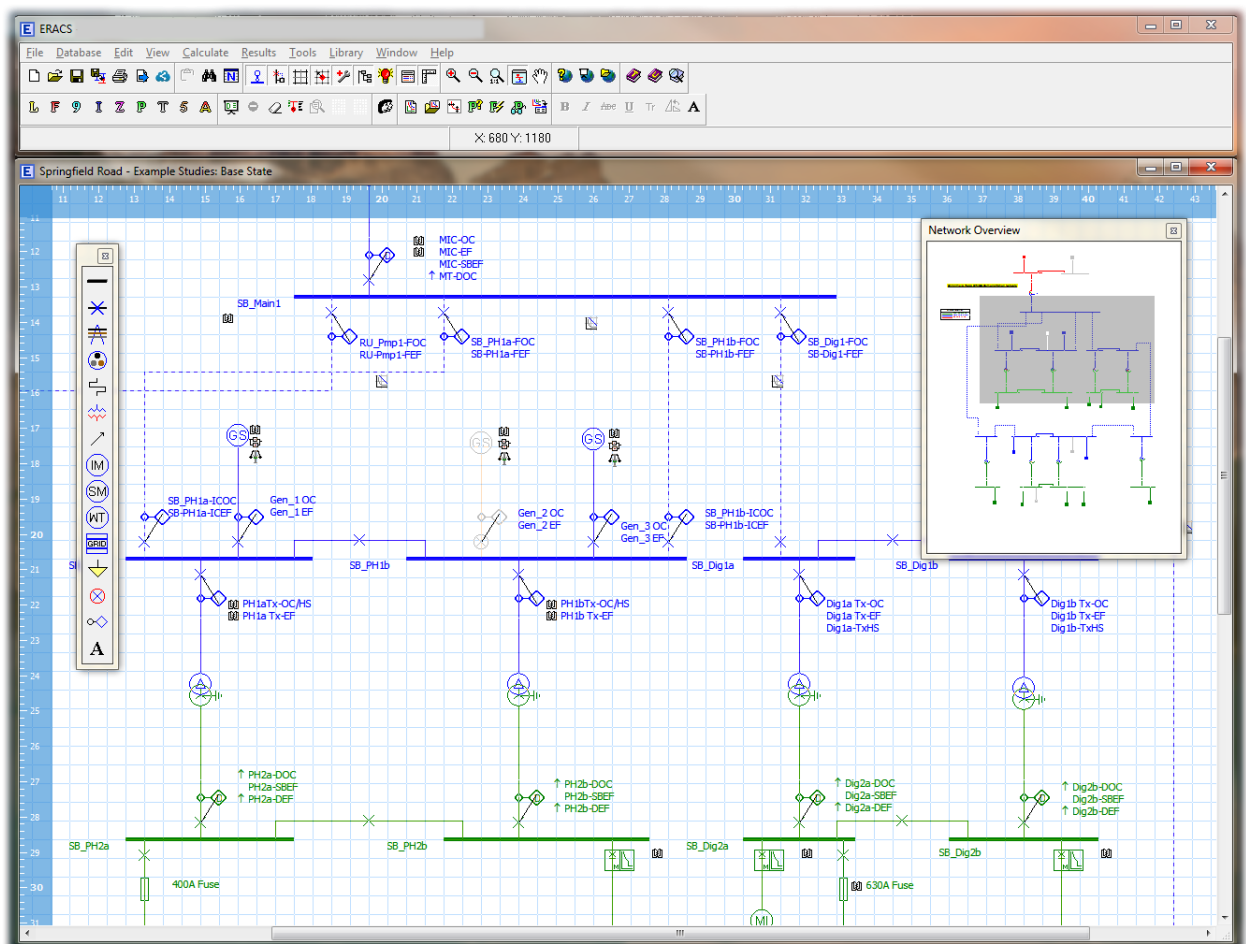


Рисунок 8 – Вид рабочего стола специализированной САПР ERACS

### 1.3 Выводы по разделу 1

Рассмотренные выше специализированные САПР достаточно разнообразны, но при выборе конкретного программного обеспечения пользователь принимает во внимание следующие особенности:

- наличие определенного круга решаемых задач (расчет, анализ и моделирование);
- максимальный охват набора пакетов приложений в областях электроэнергетики и электрооборудования;
- большое многообразие свойств и состояний элементов системы;
- большая библиотека элементов систем, работающих в едином режиме;
- разнообразие структур и режимов работы систем;

- воздействие на работу системы в любой момент времени;
- отображение многих вариантов развития течения процесса в системе;
- возможность вывода результатов расчетов или моделирования в файлах офисных приложений;
- визуализация данных вывода результатов расчетов или моделирования;
- простота и удобство при пользовании интерфейсом рабочего стола;
- поддержка языковых пакетов и пакетов интерфейса пользователя программного обеспечения;
- по возможности более низкая стоимость программного продукта;
- онлайн-поддержка при возникающих вопросах пользователя;
- участие компании разработчика в сотрудничестве с высшими учебными заведениями и другие.

Принимая во внимание, всё выше сказанное, из рассмотренных специализированных САПР с академическими учебными заведениями на взаимовыгодных условиях сотрудничают следующие программные продукты: RTDS, DIgSILENT и *Etap*.

Специализированная САПР RTDS включает в себя как программно-аппаратные, так и программные продукты, но стоимость подобной лицензии достаточно высока. Поэтому, подобными САПР оснащаются крупные исследовательские институты и учебные заведения федерального статуса при достаточном уровне финансирования.

Получение лицензии при использовании САПР DIgSILENT могут получить как само учебное заведение, так и отдельные учащиеся в нем – бакалавры, магистры и докторанты. Но это происходит за дополнительную плату с помощью USB-ключа.

Последнее специализированное САПР *Etap* сотрудничает достаточно продолжительное время с крупными исследовательскими и образовательными учреждениями по всему миру и предоставляет лицензию на

безвозмездной основе. Поэтому, наиболее интересным будет рассмотреть возможности данной САПР в учебном процессе.

## **2 Основные функциональные возможности программного продукта *Etap***

### **2.1 Описание и системные требования при установке программного продукта *Etap***

Программный продукт *Etap* используется для проектирования, анализа и моделирования электрических сетей и энергетических систем. Следует отметить, что моделирование энергосистем и вспомогательного электрооборудования происходит в реальном времени, которое является общепризнанным и востребованным методом исследования энергетических систем, оптимизации их функционирования, анализа работоспособности, обучения и так далее. Технологический прогресс в компьютерном моделировании всё время идет вперед и инструменты моделирования постоянно совершенствуются с развитием технических средств, используемых разработчиками программных продуктов САПР.

В настоящее время, специалисты в области электроэнергетики по всему миру для выполнения перечисленных работ пользуются методами цифрового моделирования энергосистем. В Российской Федерации неуклонно увеличивается количество установок, использующих те или иные программные продукты мировых лидеров САПР. Сотрудники компаний заинтересованы в продвижении своих продуктов и постоянно взаимодействуют со своими заказчиками в получении оперативных вопросов, в возможности поделиться знаниями и выразить свои пожелания в отношении будущего развития самой системы, в том числе и учебных заведениях.

Программный продукт *Etap* является 64-х битной программой, разработанной для операционных систем Microsoft® Windows® версий серий: 2008 R2 (SP1), 2012 / R2, 7 (SP1), 8 / 8,1 и 10 [11]. Для знакомства с

возможностью программы разработана *Demo*-версия, которая полностью интерактивна и позволяет вносить изменения в одну из линий электрической диаграммы, запускать исследования энергосистемы и наглядно проанализировать результаты исследования – так же, как в коммерческом релизе программы. Это дает возможность изучить множество функций и возможностей продукта *Etap*. Программный продукт является надёжным и качественным программным продуктом благодаря инженерному опыту более чем тысячи часов проектирования.

Программный продукт *Etap* является полностью графической программой анализа (рисунок 9) электрических систем питания, которая работает на операционной системе Microsoft® Windows®. Графическая программа *Etap* в дополнении к стандартным модулям с *off-line* моделированием может использоваться в режиме реального времени работы данных для мониторинга и моделирования, оптимизации и интеллектуальной высокоскоростной принудительной системы отключения нагрузки в часы пик.

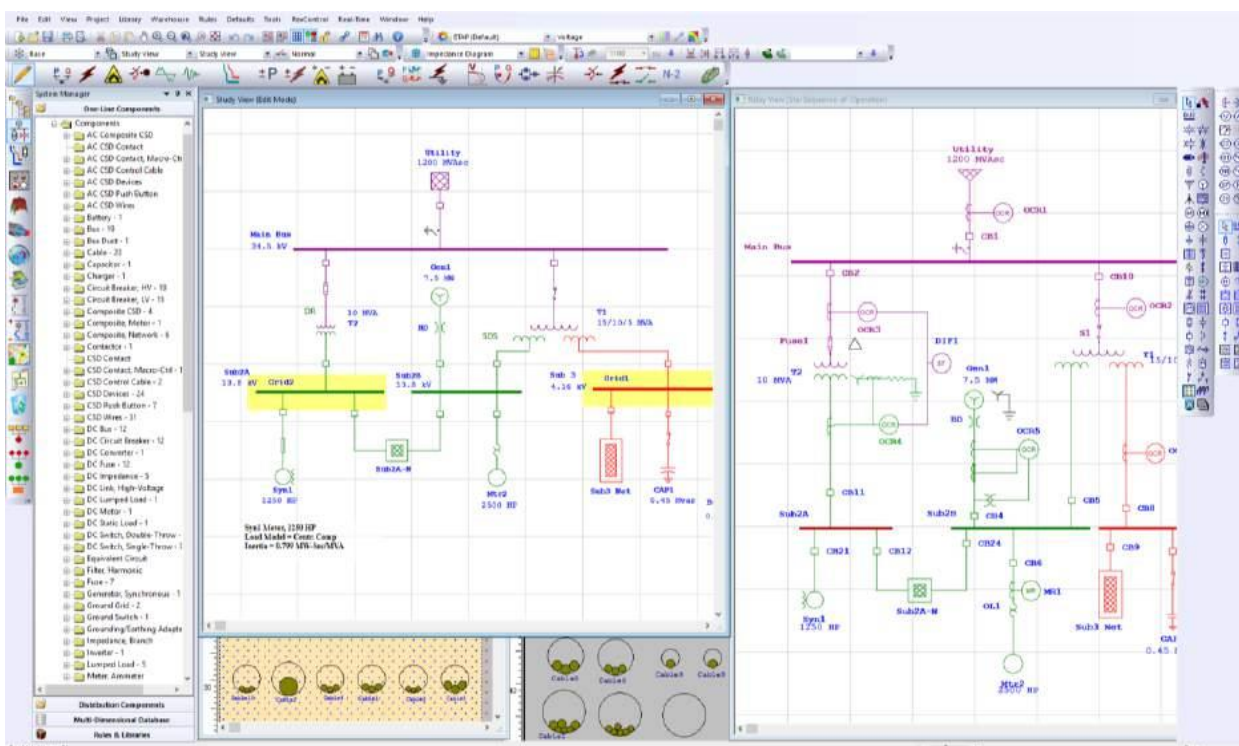


Рисунок 9 - Графическая оболочка *Etap*

*Etap* был создан и разработан как программный продукт «инженерами для инженеров», чтобы обрабатывать разнообразные информационные данные от энергосистем в одном интегрированном пакете с несколькими видами интерфейсов по назначению, такими как [11]:

- воздушные электрические сети переменного и постоянного тока;
- трассы кабельных линий;
- системы заземления;
- геоинформационные системы (ГИС) в электроэнергетике;
- системы солнечных панелей;
- релейные, защитные и противоаварийные устройства;
- система управления структурой энергосистемы.

Программный продукт *Etap* позволяет напрямую работать со следующими системами:

- графическими изображениями однолинейных схем электрических сетей;
- подземными кабельными системами;
- трехмерными кабельными системами;
- передовыми системами токовой защиты и участков сети с релейной защитой;
- схемами географических информационных систем (ГИС);
- системами трехмерного заземления.

Работа в графической среде программного продукта *Etap* напоминает работу в реальной электрической сети настолько близко, насколько это возможно. Например, при включении и выключении автоматического выключателя, выходе из строя какого-то элемента, или изменении рабочего состояния двигателя, обесточенные элементы и подсистемы указываются на электрической диаграмме однолинейной схемы серым цветом (рисунок 10).

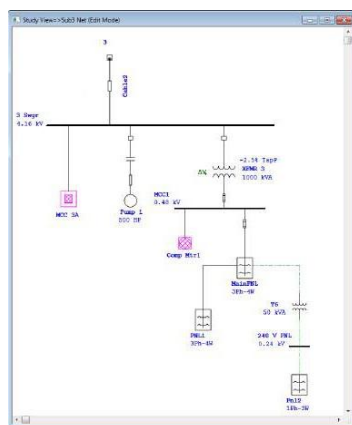


Рисунок 10 – Построение участка электрической сети

Программный продукт *Etap* сочетает в себе электрические, логические, механические и физические свойства элементов энергосистемы в одной и той же базе данных. Например, кабель содержит не только данные, представляющие свои электрические свойства и физические размеры, но также и информацию, указывающую параметры кабельных каналов, через которую он направляется. Таким образом, данные для одного кабеля могут использоваться для расчета нагрузки или анализа короткого замыкания (которые требуют электрических параметров и типов соединений), а также расчетные данные для уменьшения проходной мощности в кабельной сети (которые требуют физических данных маршрутизации). Такая организация расчетных данных обеспечивает согласованность всей системы и исключает ввод нескольких данных для того же элемента.

Графическая среда *Etap* позволяет достаточно просто вводить данные каждого электрического аппарата или устройства и отслеживает их подробные данные. Ускорить процесс ввода данных электрического аппарата способствуют множественные редакторы данных, для которых необходимо самое минимальное их количество (рисунок 11).

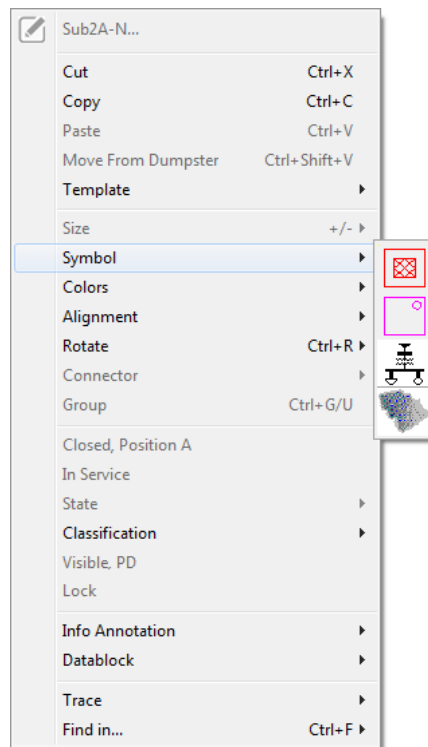


Рисунок 11 – Возможности редактора данных

Редактор свойств электрического элемента особым образом структурирован наиболее логичным образом для ввода данных различных типов анализа или проектирования. Графическая среда *Etap* позволяет построить конфигурацию электрической сети различной сложности. Например, каждая модель электрического аппарата или устройства по отдельности может иметь различную ориентацию по ширине, размеры и отображения символов (IEC или ANSI). Однолинейная схема электрической сети является диаграммой на графическом столе и позволяет разместить несколько устройств защиты между любой ветвью цепи и силовой шиной.

Программный продукт *Etap* предоставляет множество вариантов для представления или просмотра электрической сети. Эти виды называются презентацией. Расположение, размер, ориентация и символ каждого элемента могут быть различными в каждой презентации. Кроме того, устройства защиты и реле могут быть отображены (видимыми) или скрыты (невидимы) для любого конкретного представления. Например, первая презентация может быть вид реле, в котором отображаются все устройства защиты. Другой вид презентации может показать электрическую диаграмму в одну



строку с некоторыми отображаемыми выключателями, а остальные – скрыты. Такой результат моделирования лучше всего подходит для расчётов потоков нагрузки.

Среди наиболее мощных функций программного продукта *Etap* являются совмещение сетевых и «двигательных» элементов. Элементы подсети позволяют графически встраивать в более крупную электрическую сеть внутри себя на произвольную глубину. Например, какая-то электрическая подсеть может содержать другие подсети, предоставляя возможность создавать сложные электрические сети, сохраняя при этом легко читаемую и не загроможденную диаграмму, которая отображает то, что в данный момент нужно показать, но следующий уровень детализации системы находится в пределах поворота колеса компьютерной мыши.

Таким образом, интегрированная база данных программного продукта *Etap* для электрических систем, позволяет получить несколько презентаций систем для различных целей анализа или проектирования.

Отметим основные возможности программы *Etap* при моделировании электрических сетей [11, 15]:

- работа в виртуальном пространстве;
- полная интеграция данных (электрических, логических, механических и физических свойств);
- построение магистральных и радиальных систем;
- неограниченное количество изолированных подсистем;
- отсутствие ограничений на подключения к системе;
- создание нескольких условий загрузки;
- возможность многоуровневой вложенности подсистем;
- усовершенствованные методы разреженной матрицы;
- контроль доступа пользователя и проверка данных;
- асинхронные расчеты, позволяют одновременно вычислять несколько модулей;

- переход базы данных снижает риск потери базы данных при отключении электроэнергии;
- 64-разрядное программирование, предназначенное для Windows® 2008/2012 / 7/8 / 8,1 / 10;
- трехфазное и однофазное моделирование, включая панели и подпанели.

На рисунке 12 приведены результаты моделирования участка кабельной линии на потерю напряжения, в режимах короткого замыкания и под нагрузкой.

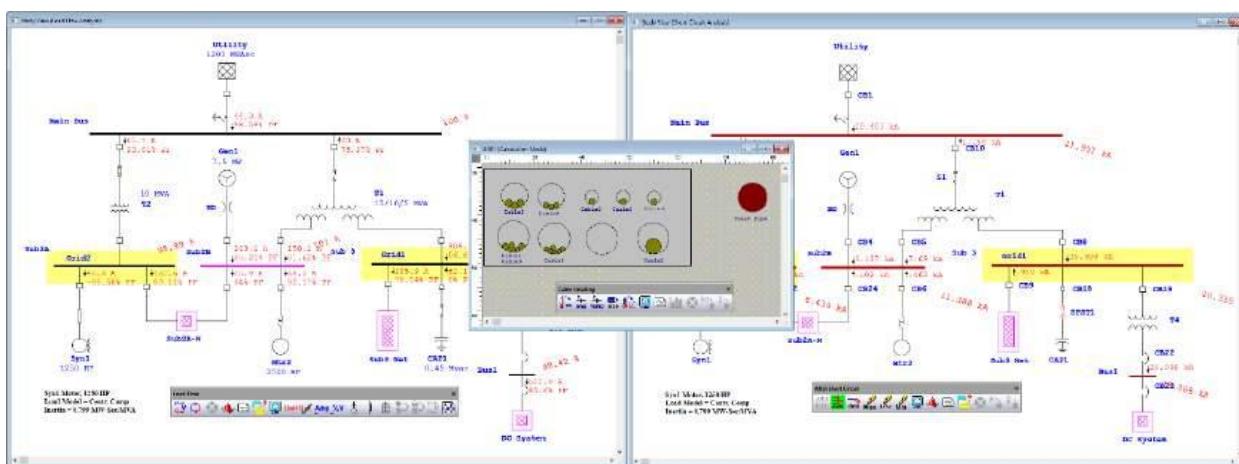


Рисунок 12 – Пример одновременного исследования потерь в кабеле, короткого замыкания и нагрузки

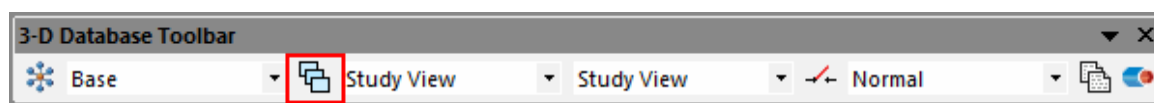
Программный продукт *Etap* обеспечивает простой в использовании, полностью графический интерфейс пользователя для построения диаграмм однолинейных схем. Пользователь может графически добавлять, удалять, перемещать, соединить элементы, увеличение или уменьшение масштаб отображение сетки или совсем её отключить, изменить размер элемента, изменить ориентацию элемента, символы изменения, изменить цвет оборудования или устройства, создавать персональные темы обзора, скрыть или показать защитным устройства, ввести другие свойства, установить рабочий статус и так далее.

## 2.2 Создание нового проекта однолинейных схем в программном продукте *Etap*

При создании новой диаграммы однолинейной схемы, пользователь изначально находится в режиме редактирования, при этом статус конфигурации установлен на «*Normal*», состояние по умолчанию. На графическом столе проверка сетки и непрерывности отключена. Если пользователь открывает (активирует) существующую однолинейную схему презентации, то открывается весь набор атрибутов, которые были сохранены до этого, то есть режим («*Edit*» – «редактировать», «*Load Flow*» - «загрузить поток», «*Short-Circuit*» - «короткое замыкание», «*Motor Starting*» - «запуск двигателя» и другие), состояние конфигурации, параметры дисплея, размер окна и вид расположения в качестве начальной установки.

При создании нового проекта пользователем, автоматически создается однолинейная схема диаграммы с именем, совпадающим с именем стандартной однолинейной схемы по умолчанию, прилагаемой к уникальному номеру.

Чтобы создать новую однолинейную схему презентации в рамках существующего проекта, нажмите на кнопку «*New Presentations*» на панели инструментов презентации, как показано на рисунке 13.



нажмите здесь, чтобы создать копию однолинейной схемы

Рисунок 13 – Создание нового проекта однолинейной схемы

Пользователь может изменить имя однолинейной схемы из контекстного меню (чтобы развернуть дерево презентаций, необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по однолинейной схеме и выбрать «Свойства» из меню), или с помощью двойного щелчка на фоне однолинейной схемы презентации.

Электрическая схема программы *Etap* представляет собой однолинейную схему симметричной трехфазной системы. Эта однолинейная схема является исходной точкой для всех исследований в энергетических системах. Пользователь может графически построить свою электрическую систему, подключив шины, ветви, электрические двигатели, электрогенераторы и защитные устройства в любом порядке, используя определённые панели инструментов в меню.

Далее пользователь может подключить элементы к шинам графически (путем перетаскивания строк из элемента устройства) или с помощью страницы «*Info*» в редакторе свойств устройства (дважды щелкнуть элемент и откроется редактор свойств). Используя эти редакторы, можно назначить инженерно-технические свойства элемента, такие как его рейтинги, настройки, загрузка, подключение и так далее. Также можно выбрать установку значения по умолчанию для каждого элемента перед их помещением в однолинейную схему диаграммы, чтобы минимизировать время, необходимое для ввода данных.

У программного продукта *Etap* имеется следующая особенность. Он организует электрическую систему в единый проект и создает три основные компонента системы:

- *Презентации*. Независимые графические презентации однолинейных схем диаграммы, которые представляют проектные данные для любых целей (например, диаграмма импеданса, результаты исследования или план участка);

- *Конфигурация*. Независимые конфигурации электрических систем, которые идентифицируют состояние переключающих устройств (включены и выключены), электрические двигатели и разнообразные нагрузки (продолжительные, кратковременные и резервные), режимы работы генераторов (качение, контроль напряжением, контроль реактивной мощностью, контроль коэффициентом мощности) и варисторы (открытый, закрытый, дросселирующий и запасной).

- *Данные ревизии.* Базы данных и большое число имен пересмотра данных, которые отслеживают изменения и модификации технических свойств (например, заводской таблички или настройки) элементов.

Все эти три системных компонента организованы ортогонально, чтобы обеспечить большую мощность и гибкость при построении и управлении проектом в *Etap*. Используя эти концепции презентации, конфигурации состояния и данные ревизии, пользователь может создавать множество комбинаций сетей различной конфигурации и различных инженерных подходов, которые позволяют в полной мере исследовать и изучить поведение и характеристики электрических сетей с использованием одной базы данных. Это означает, что пользователю не нужно копировать свою базу данных для разных системных конфигураций.

Программный продукт *Etap* опирается на трехмерную концепцию базы данных для реализации всех презентаций, конфигураций и баз данных и данных ревизии. Использование этой концепции многомерной базы данных позволяет пользователю независимо выбирать конкретную презентацию, состояние конфигурации или данные ревизии в рамках одной и той же базе данных проекта.

Эти варианты могут быть использованы в сочетании с несколькими категориями нагрузки и нескольких случаев исследования быстро и эффективно выполнять проектирование и системный анализ, избегая случайных несоответствий данных, созданных при использовании нескольких копий одного файла проекта для ведения записи о различных системных изменениях.

Программный продукт *Etap* предоставляет пользователю широкие возможности по представлению результатов исследования электрических систем (презентации). Когда создается пользователем новый проект, в окне программы *Etap* создается и отображается диаграмма однолинейной схемы. Здесь пользователь создает однолинейную схему исследуемой электрической системы. *Etap* поддерживает создание неограниченного количества

презентаций однолинейной схемы. Эта мощная функция предоставляет пользователю возможность настраивать каждое однолинейное представление диаграммы для создания различных графических представлений. В одной презентации могут быть видны некоторые или все устройства защиты, в то время как другая презентация может иметь совершенно другую компоновку, наиболее подходящую для отображения результатов потока нагрузки и так далее.

Программа *Etap* обладает мощной конфигурацией, которая позволяет пользователю настроить рабочее состояние каждого из различных элементов электрической сети, включенных в диаграмму однолинейной схемы проекта. Электрические компоненты, такие как автоматические выключатели, предохранители и переключатели, могут быть установлены в включенное или выключенное положение. Электрические нагрузки и электродвигатели могут работать в длительном, кратковременном режимах или могут быть назначены в качестве резерва. Источники питания могут быть работающие в режиме качания, контроля напряжением, контроля реактивной мощности или режимами контроля коэффициента мощности. Отметим основные принципы при создании конфигураций электрических систем:

- когда пользователь присоединяет новую конфигурацию к однолинейной схеме, все элементы в этом графическом представлении принимают свой предопределенный статус, как если бы они были сохранены в этой конфигурации;
- каждая конфигурация электрической сети не зависит от всех остальных, поскольку состояние элементов могут быть установлены независимо друг от друга для каждой конфигурации;
- любая конфигурация электрической сети может быть присоединена к одной из однолинейных схем презентации. С другой стороны, любые или все однолинейные схемы презентации могут быть присоединены к одной и той же конфигурации одновременно;

- пользователь может создавать неограниченное количество конфигураций электрических систем;

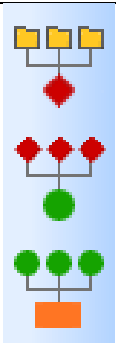
- чтобы подключить или связать конфигурацию электрической системы с презентацией, необходимо сделать окно презентации активным, и выбрать статус конфигурации на панели инструментов «Конфигурация».

Используя эту функцию конфигурации состояния, становится ненужным поддерживать несколько копий одного проекта для проведения исследований электрических систем для разных конфигураций. Кроме того, когда пользователь изменяет инженерно-технические свойства или добавляет новые элементы в диаграмму однолинейной схемы, изменения будут автоматически сохранены для всех конфигураций.

### 2.3 Мастер проекты в программном продукте *Etap*

Программный продукт *Etap* включает в себя инструменты для управления проектами, экономящие время, называемые мастерами-*Etap*, которые позволяют записывать и запускать любое исследование в любое время [11]. Мастера-*Etap* включают *Мастер сценариев*, *Мастер исследования* и *Мастер проектов* (Таблица 2). Применение пользователем мастеров-*Etap* позволяет комбинировать ортогональные инструменты (презентации, конфигурации и данные ревизии), типы исследований, выходные отчеты и учебные примеры (факторы работы системы загрузки и генерации вместе с параметрами решения) для выполнения полного системное исследование одним нажатием кнопки.

Таблица 2 – Мастера-*Etap* в панели инструментов

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Мастер сценариев</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Мастер исследование</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Мастер проектов</li> </ul>

*Мастер сценариев* позволяет сгруппировать все варианты исследований в одном месте. По этой причине, мастер-сценариев полезен в любое время, когда необходимо записать исследование, чтобы позже его выполнить. Каждый файл проекта содержит мастер-сценариев. Сценарии создаются и регистрируются в мастере-сценариев и могут выполняться в индивидуальном порядке в любое время. Проект может иметь неограниченное количество сценариев.

Сценарии состоят из следующих параметров:

- система (анализ сети или анализ программно-аппаратного решения);
- презентация (например, диаграмма однолинейной схемы);
- данные ревизии (база данных или ревизии);
- состояние конфигурации (например, *Normal*);
- режим исследования (например, нагрузки поток или короткое замыкание);
- пример исследования (коэффициенты работы нагрузки и генерации и параметры решения);
- тип исследования (зависит от режима исследования)
- выходной отчет (зависит от режима исследования).

Когда пользователь запускает сценарий в проекте, он автоматически создает выходной отчет или перезаписывает существующий с тем же именем.

Каждый файл проекта содержит *мастер-исследования*. Макросы сокращают время, затрачиваемое на выполнение нескольких сценариев. *Мастер-исследования* позволяет последовательно группировать существующие сценарии в макросы исследования. Пользователь должен создать сценарии, которые хочет включить в макрос исследования, прежде чем сможет создать макрос (рисунок 14).





### Мастер-исследования

Рисунок 14 – Создание мастер исследования

Проект может иметь неограниченное количество макросов исследования. Когда пользователь запускает макрос исследования, все сценарии, включенные в него, запускаются, создавая или перезаписывая выходные отчеты так же, как если бы они выполнялись индивидуально. Например, может быть группированы сценарии, связанные с потоком нагрузки или определенным типом потока нагрузки, в один макрос исследования.

Мастер проектов (рисунок 15) является независимым от самого проекта и сохраняется в папке *Etap*. Он позволяет пользователю группировать существующие макросы исследования в макросы проекта.



### Мастер проектов

## Рисунок 15 – Создание мастер проектов

Пользователь должен использовать макрос проекта, если имеется несколько проектов, из которых необходимо одновременно запускать несколько макросов исследования и их сценарии. Эта функция автоматизирует открытие и закрытие файлов проекта и индивидуальное выполнение макросов исследования и их сценариев.

### **2.4 Программа сравнения выходной базы данных и библиотеки**

#### ***Etap***

Программа сравнения выходной базы данных (DB Compare Program) - это консоль, предназначенная для сравнения двух файлов базы данных Microsoft Access (MDB) в соответствии с указаниями третьего файла MDB (базы данных инструкций) (рисунок 16). Эта консоль была разработана для взаимодействия со сценариями в программе *Etap*, чтобы можно было сравнивать текущие результаты выходной базы данных *Etap* с результатами эталонной базы данных выходных отчетов. Результаты тестирования могли быть получены с использованием предыдущей версии или той же версии *Etap*.

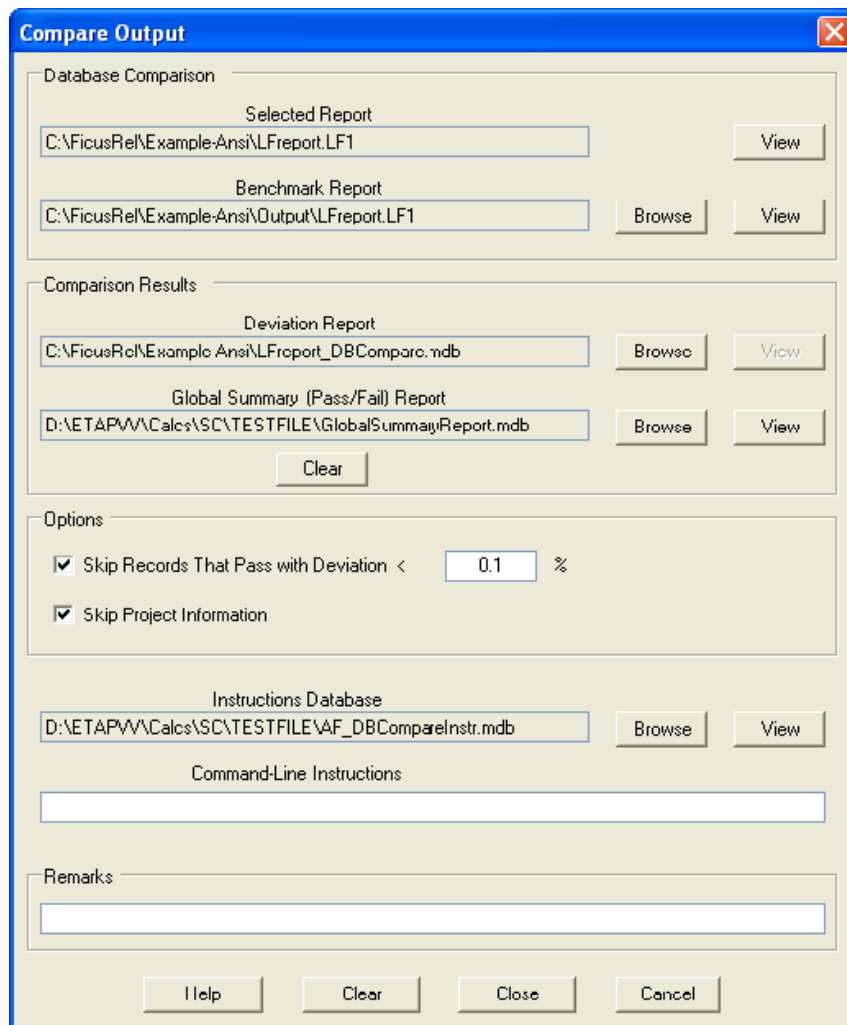


Рисунок 16 – Консоль сравнения выходной базы данных

Редакторы *Etap* ещё называют «интеллектуальными редакторами», потому что они обладают следующими возможностями:

- ✓ требуется минимальный ввод данных;
- ✓ автоматическая замена типовых данных;
- ✓ расположение нескольких страниц для различных данных;
- ✓ проверка всех возможных взаимозависимых электрических параметров;
- ✓ автоматическая проверка ошибок и диапазона каждого поля данных;
- ✓ возможности оптимизации и определения размеров;
- ✓ определяемые пользователем поля данных;
- ✓ навигация, отмена и поиск команды;

✓ отслеживание изменений для каждого поля данных.

Библиотеки *Etap* предоставляет обширные контролируемые пользователем библиотеки на основе фактических данных, заданных производителем. Библиотеки *Etap* содержат следующие разделы:

- кабельная продукция (NEC, ICEA и данные, заданные производителем);
- огнезащитное покрытие кабеля (данные, заданные производителем);
- противопожарная защита кабеля (данные, заданные производителем);
- заводская табличка электродвигателя;
- модель цепи электродвигателя (одно- и двухуровневая обмотка ротора);
- модель характеристик электродвигателя;
- модель нагрузки электродвигателя;
- релейные устройства (данные, заданные производителем);
- автоматические выключатели повторного включения (данные, опубликованные производителем);
- электронные контроллеры (данные, заданные производителем);
- выключатели низкого напряжения (данные, заданные производителем);
- высоковольтные выключатели (данные, опубликованные производителем);
- предохранители (данные, заданные производителем);
- реле перегрузки (данные, заданные производителем);
- гармоники сети (IEEE и данные, заданные производителем);
- реле перегрузки электродвигателя (данные, заданные производителем);
- батареи аккумуляторов;
- библиотеки индекса надежности;

- библиотека анализа затрат от перебоя электроэнергии;
- более 50 тысяч устройств с время-токовыми характеристиками;
- объединение данные из разных библиотек;
- экспорт данных библиотеки в файл Microsoft Access с помощью диспетчера отчетов и Crystal Reports.

Программная среда *Etap* организует и получает доступ к базе данных с использованием новейшего отраслевого стандарта Microsoft® ODBC® (Open Database Connectivity - открытое соединение с базой данных), позволяющий *Etap* использовать любую базу данных, для которой доступен драйвер ODBC. Так, например, обеспечивает следующие функции (рисунок 17):

- установка базы данных *Etap* в Microsoft Access, Oracle, *SQL*-сервере и другие;
- доступ к базе данных от администраторов баз данных третьей стороне;
- интеграция других данных проекта в той же базе данных;

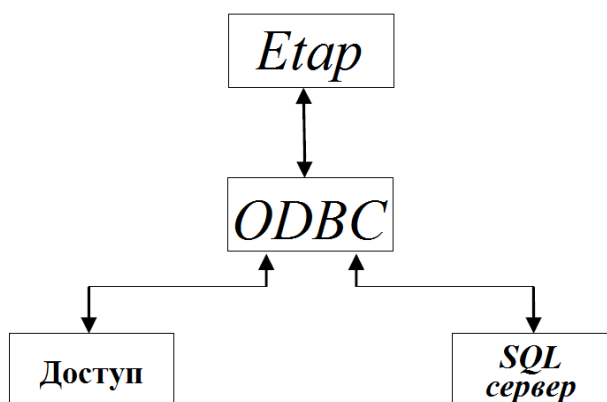


Рисунок 17 – Возможности *Etap* с открытым соединением баз данных

Открытое соединение с базой данных (ODBC) позволяет получить доступ к базам данных *Etap* с помощью стороннего программного обеспечения, такого как Microsoft Access. Это помогает управлять данными и предоставляет простой способ переноса данных из *Etap* на другие носители информации. Также можно вставить дополнительные поля (вместе со значениями, предоставленными *Etap*) в таблицы базы данных *Etap*.

*Клиент OLE* - это технология интеграции программ, используемая для обмена информацией между программами. Многие программы Windows, включая Microsoft Office, поддерживают *OLE*. В *Etap* можно динамически встраивать объекты OLE, такие как растровые изображения, текст, электронные таблицы, таблицы и метафайлы, в однолинейной схеме (рисунок 18).

Однолинейные диаграммы программы *Etap* экспортируются в файлы:

- расширенного метафайла (EMF),
- метафайлы Windows (WMF),
- расширяемого языка разметки (XML),
- формат необработанных изображений (RAW),
- файлы AutoCAD (DXF).

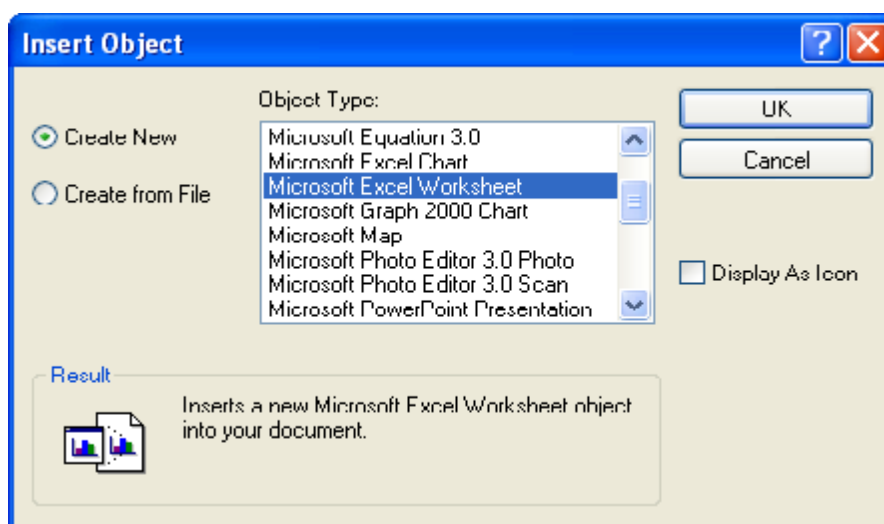


Рисунок 18 – Выбор OLE объектов для размещения однолинейной схемы

Эти файлы могут быть импортированы в AutoCAD®, Microsoft Word®, и другие приложения, как показано на рисунке 19.

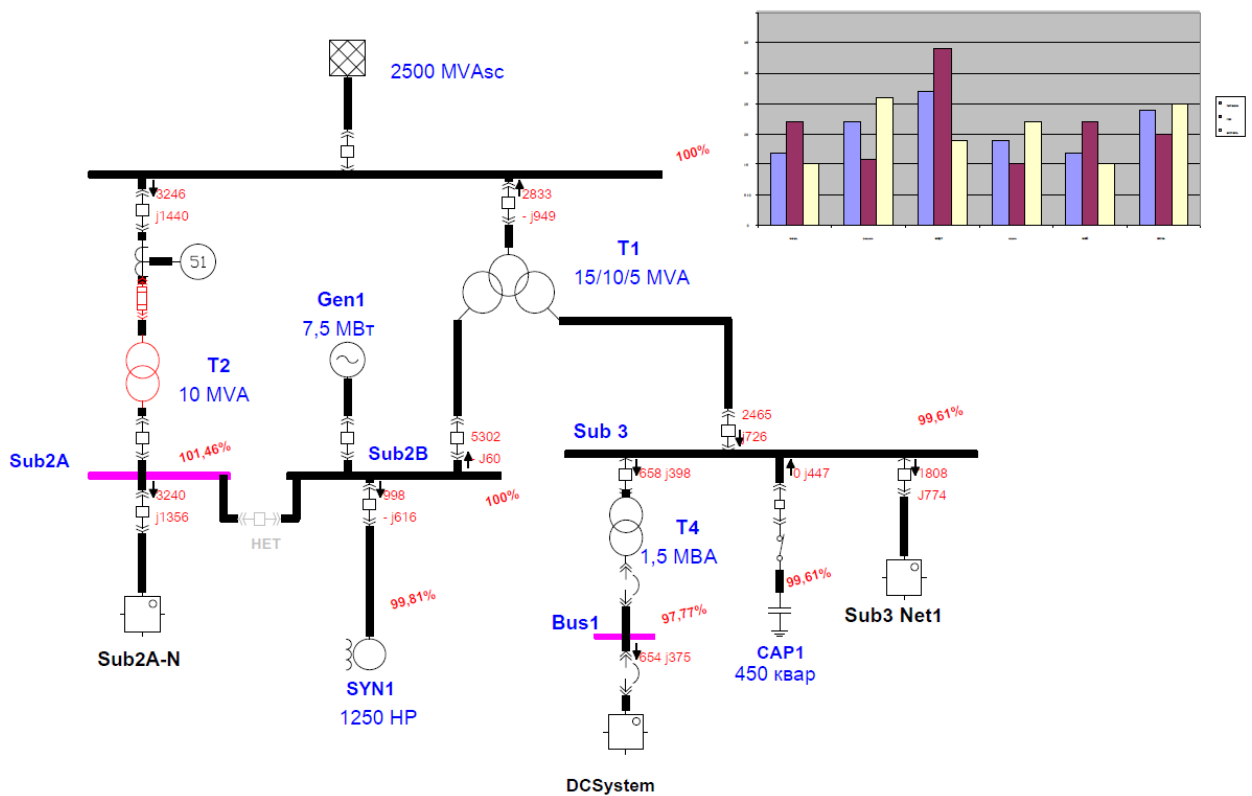


Рисунок 19 – Файл EMF *Etap* и преобразованный в картинку

## 2.5 Описание общей структуры и пользовательского интерфейса программы *Etap*

В режиме редактирования *Etap* как и в других офисных и графических программах можно графически выполнять следующие действия (рисунок 20):

- добавлять, удалять, перемещать и соединить элементы,
- увеличивать или уменьшение масштаба отображение сетки;
- отключить и/или изменить размер или ориентацию элемента,
- изменить символы изменения,
- скрыть или показать защитные устройства,
- вводить свойства, установить рабочее состояние и другое.

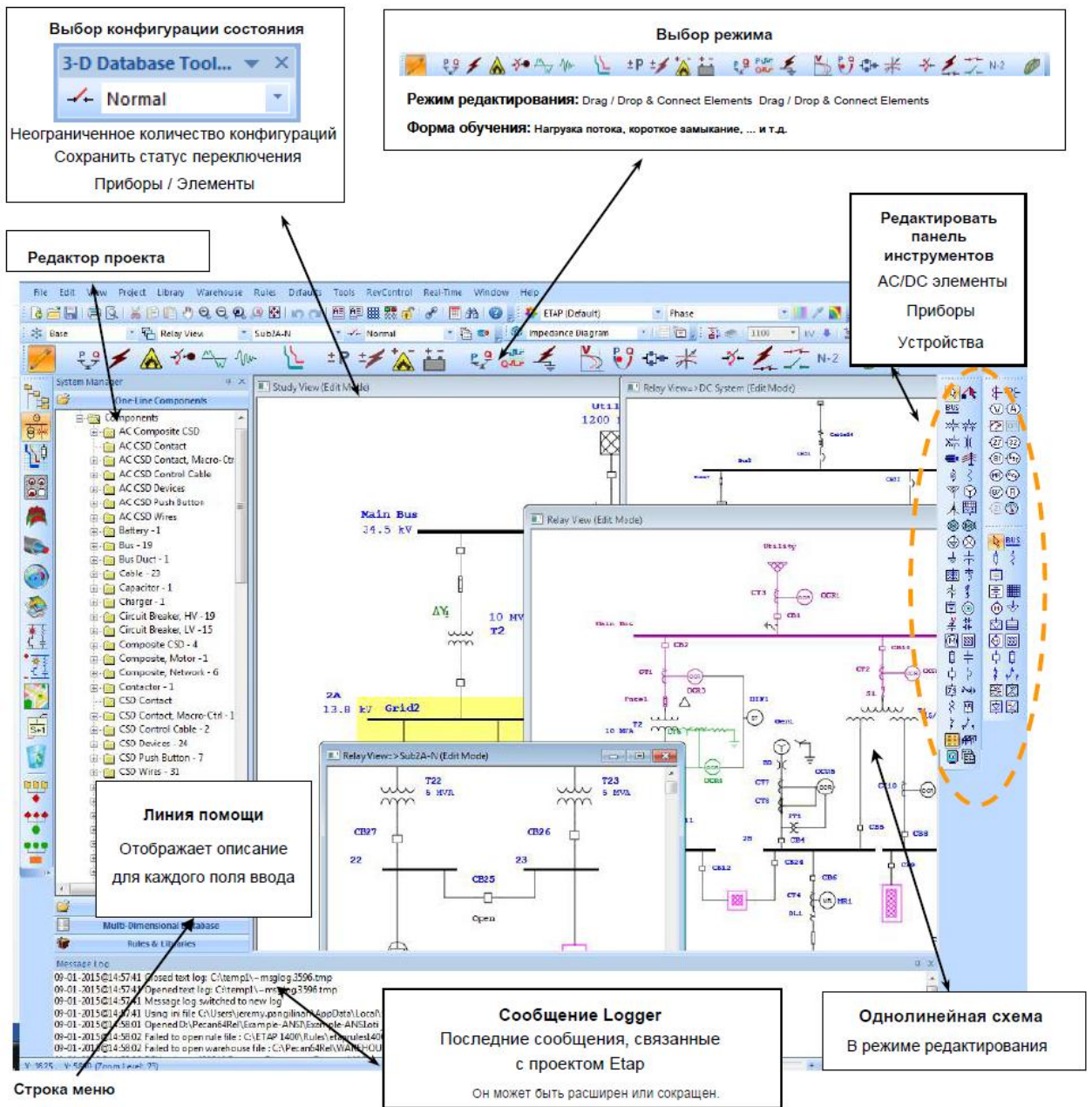


Рисунок 20 – Вид рабочего стола *Etap*

Строка меню содержит полный список опций меню (рисунок 21). Каждая опция активирует выпадающий список команд, такие как, операции с файлами, печать, преобразование базы данных, обмен данными, *OLE* объекты, стандарты проекта, настройки и параметры проекта, библиотеки, установки «по умолчанию», шрифты аннотаций, базовые и данные ревизии, и многие другие.

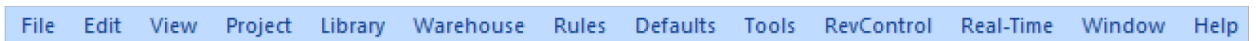


Рисунок 21 – Строка меню программы *Etap*



Панель инструментов «Проект» содержит кнопки, которые предоставляют ярлыки для многих часто используемых функций (рисунок 22). Это следующие функции: создание проектов, открытие проектов, сохранение проектов, печать, предварительный просмотр печати, вырезание, копирование, вставка, панорамирование, масштабирование, отмена, повтор, текстовое поле, отображение сетки, проверка непрерывности, темы, получение шаблона, добавление в OLV шаблон, гиперссылка, калькулятор мощности, поиск и справка.



Рисунок 22 – Строка панели инструментов «Проект» программы *Etap*

Панель инструментов «Тема» содержит кнопки, которые позволяют выполнять ярлыки с использованием многих часто используемых команд в *Etap* для изменения цвета и стили линий для штепсельных разъемов устройства, цвет символов и фона (рисунок 23).

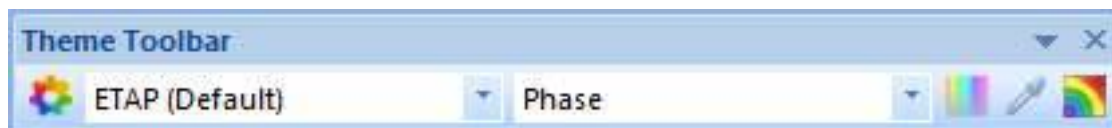


Рисунок 23 – Строка панели инструментов «Тема» программы *Etap*

Панель инструментов «Тема» состоит из следующих команд:

- менеджер темы;
- название темы;
- тема цветовой кодировки;
- цвета по умолчанию;
- установка цветовой схемы;
- включить контуры.

Вид проекта – это графическое древовидное представление, которое включает в себя презентации, конфигурации, учебные примеры, библиотеки и компоненты, связанные с созданным проектом. Здесь можно создавать и

управлять следующими презентациями, конфигурациями и учебными примерами:

- однолинейной схемы презентации;
- кабельными системами, в том числе и в кабель-канале;
- наземными Grid-системами;
- системами натяжения и протяжки кабеля;
- содержит приложение для предотвращения случайного удаления определенного типа файлов;
- конфигурацией состояния;
- учебные примеры.

Также есть полный доступ ко всем библиотекам и элементам, которые существуют в создаваемом проекте программы *Etap*.

Панели инструментов активны, когда мы находимся в режиме редактирования. Здесь можно щелкнуть один или два раза, чтобы выделить, перетащить элементы АС, DC и инструменты на презентации однолинейной схемы. Кроме того, можно выполнять следующие функции:

- просмотр и печать настраиваемых выходных отчетов;
- изменение параметров отображения;
- доступ к диспетчеру отчетов по расписанию;
- добавить новые системы наземных сетей;
- добавить композитные сети или электродвигатели.

Программный продукт *Etap* предоставляет следующие обучающие режимы непосредственно доступные из презентации однолинейной схемы (рисунок 24):

1. Анализ потоков нагрузок
2. Анализ короткого замыкания
3. Анализ дуги
4. Анализ ускорения электродвигателя
5. Гармонический анализ
6. Анализ переходной устойчивости

7. Координация защитных устройств в схеме «звезда»
8. Анализ потока нагрузки постоянного тока
9. Анализ короткого замыкания постоянного тока
10. Анализ дуги постоянного тока
11. Расчет размеров и разряда батареи
12. Анализ несимметричной нагрузки
13. Анализ электрической нагрузки во временной области
14. Несбалансированный анализ короткого замыкания
15. Анализ стабильности напряжения
16. Оптимальный анализ мощности потока
17. Оценка надежности
18. Оптимальное размещение конденсаторов
19. Оптимизация переключения
20. Быстрый спектральный анализ с реактором (FMSR)
21. Переключение управления последовательностями фаз
22. Анализ непредвиденных ситуаций
23. Тяговая мощность рельса
24. Системы заземления
25. Подземные системы блуждающих токов
26. Наземные Grid-системы
27. Системы натяжения и протяжки кабеля

Анализ кабельных сетей и Grid-систем, а также расчеты системы натяжения и протяжки кабеля доступны в исследованиях «Подземные системы блуждающих токов» (пункт списка 25), Наземные Grid-системы (пункт списка 28) и «Системы натяжения и протяжки кабеля» (пункт списка 27).

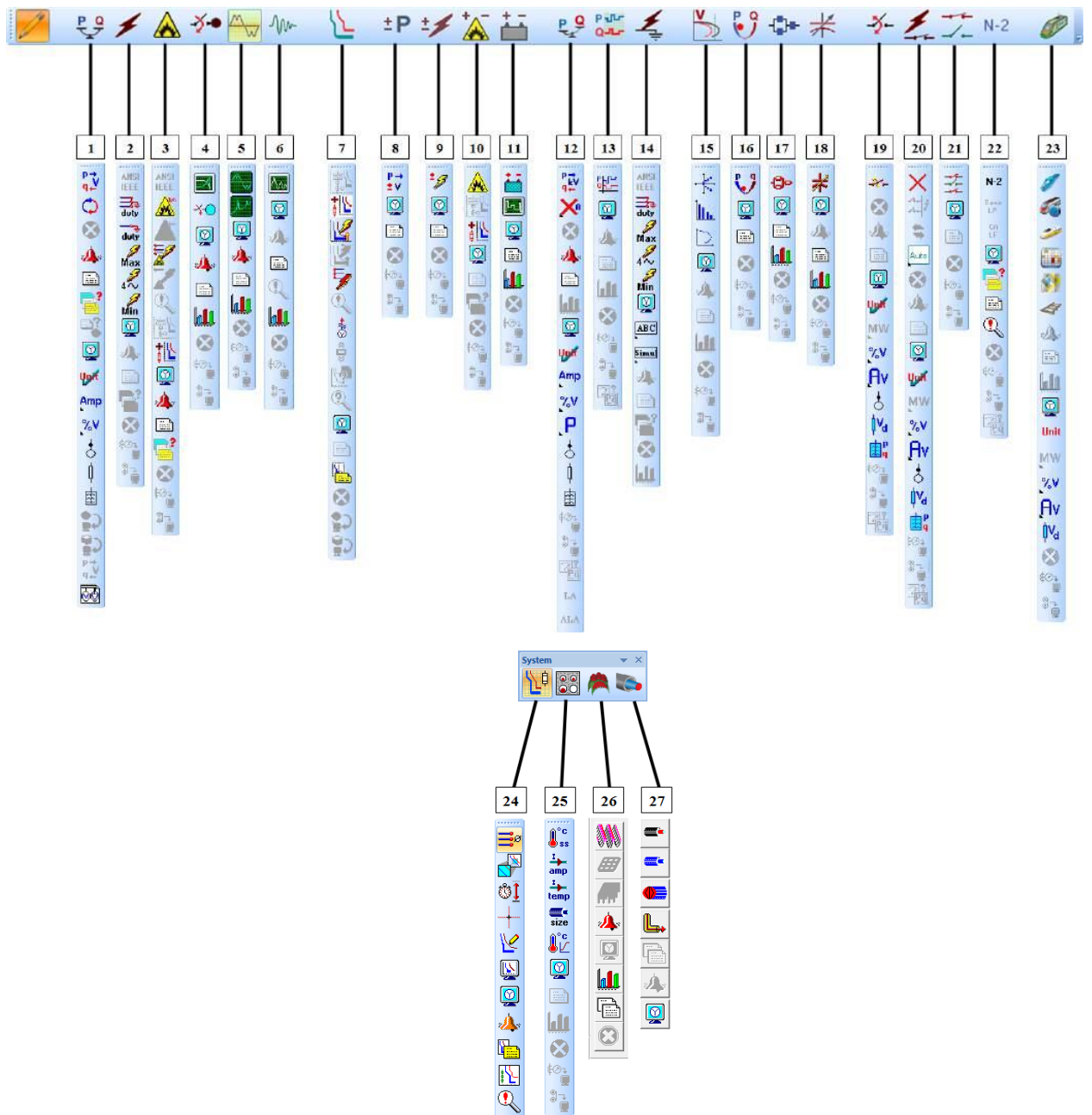


Рисунок 24 – Строка панели инструментов в ознакомительном режиме

Например, модуль исследования ускорения электродвигателя (пункт списка 4) содержит паспортные данные двигателя, начальный механический момент, условия для запуска двигателя и различные параметры для выходных отчетов. В учебном примере разбирается случай снятия характеристик в пусковых режимах двигателя, так и снятия статических характеристик двигателя. Панель инструментов «Case Study» для ускорения двигателя изменяется в соответствии с выбранным режимом обучения. Результаты отображаются непосредственно на однолинейной схеме.

## 2.6 Создание однолинейных схем в *Etap*

Рассмотрим процесс создания однолинейной схемы в программе *Etap*. Для этого необходимо открыть программу *Etap* и выбрать опцию «Новый проект» («New Project»). Чтобы создать или изменить однолинейную схему в *Etap*, нужно находиться в режиме редактирования. Нажмите кнопку «Edit» («Изменить») на панели инструментов режима (рисунок 25).



Рисунок 25 – Строка панели инструментов в режиме редактирования

На панели инструментов «AC Edit» выберем элемент Power Grid (Utility), нажав кнопку Power Grid. Курсор изменится на значок Power Grid при перемещении по OLV. Щелкнем в любом месте OLV, чтобы разместить служебную программу на однолинейную схему *Etap*.

Следуя той же процедуре, вытащим следующие элементы из библиотек, пока рабочий стол не будет выглядеть следующим образом (рисунок 26).

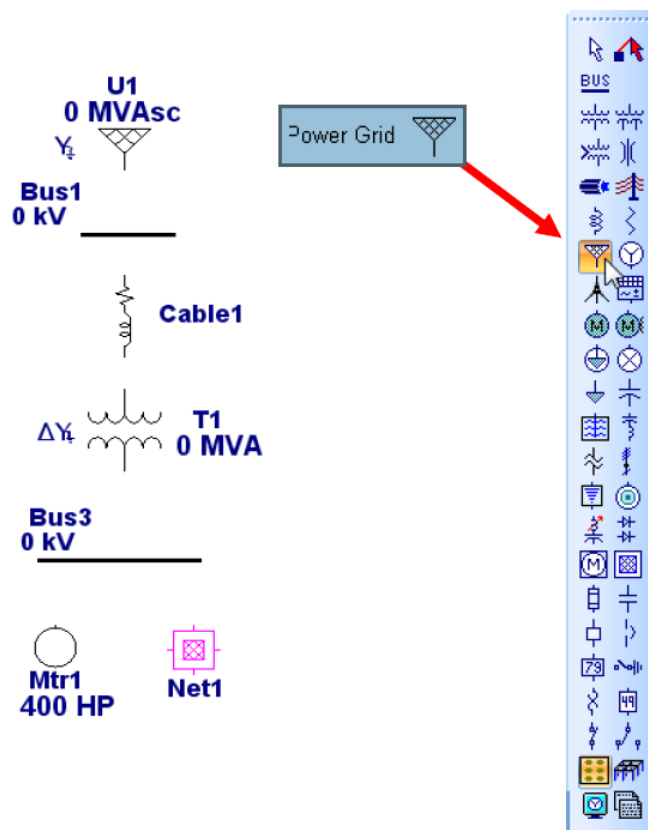





Рисунок 26 – Создание презентации однолинейной схемы в *Etap*

При выполнении действий помогут следующие советы:

- двойной щелчок по кнопке элемента позволяет отказаться от его более чем один раз. По завершению просто нажмем клавишу «Esc».

- можно увеличить , уменьшить , и кнопкой масштабирования , чтобы соответствовать странице OLV, нажав на соответствующие кнопки, расположенные в панели проекта.

- можно растянуть длину шины, поместив указатель мыши на любой её конец, пока не появится двойная стрелка. Затем нажмем и перетащим на нужную длину.

- теперь подключим элементы к одной линии (рисунок 27). Поместим указатель мыши над соединительным контактом элемента, и он станет красным. Затем нажмем и перетащим на контактный вывод другого элемента. Выполним эту процедуру, чтобы соединить все элементы на одной линии. В случае шин весь графический элемент функционирует как точка

подключения. Следует обратить внимание, что узел автоматически вставляется при подключении кабеля к трансформатору.

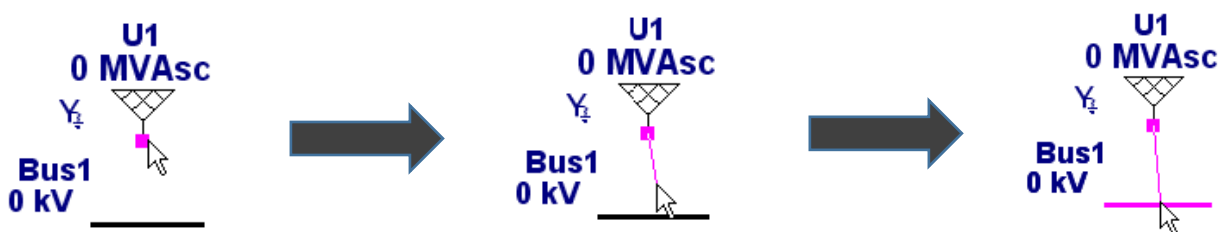
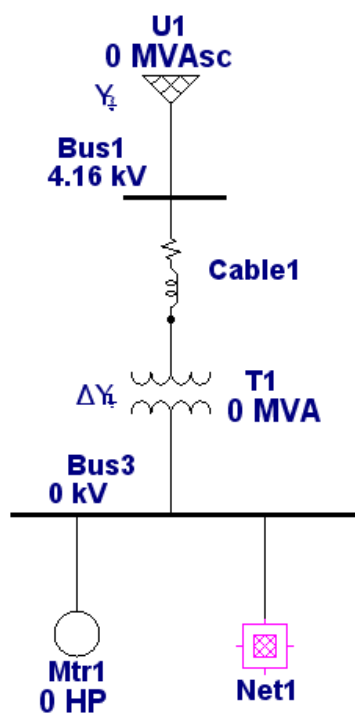


Рисунок 27 – Подключение элементов в одну схему.

- изменить размер, ориентацию и стандартный символ для элемента, щелкнув правой кнопкой мыши по элементу и выбрав атрибут, который мы хотим изменить.

Доступ к данным, содержащимся в любом вынесенным на поле элементе, можно открыть, открыв его редактор (рисунок 28). Дважды щелкнем на объект кабельной линии (Cable1), чтобы открыть редактор кабелей. Можно нажать любую вкладку в редакторе, чтобы открыть ее страницу. Данные можно вводить вручную в поля только на белом фоне.



#### Электрическая сеть U1

Мощность = 1250 МВ·А

$x / R = 120$

#### Кабельная линия 1

Тип NEC = 5.0 кВ

Размер = 4/0

Длина = 200 [футов]

#### Трансформатор T1

Первичное напряжение = 4,16 кВ

Вторичное напряжение = 0,48 кВ

Мощность = 20 МВ·А

Параметры  $x / R = 17$

Рисунок 28 – Сборка однолинейной схемы в Etap

Также можно управлять ориентацией и внешним видом элементов на рабочем поле. Список параметров появится, если щелкнуть правой кнопкой мыши на элемент графика. Например, можно вращать энергосистему или нагрузку, щелкнув по ней правой кнопкой мыши, выбрав «Ориентация», а затем выберите угол поворота (рисунок 29).

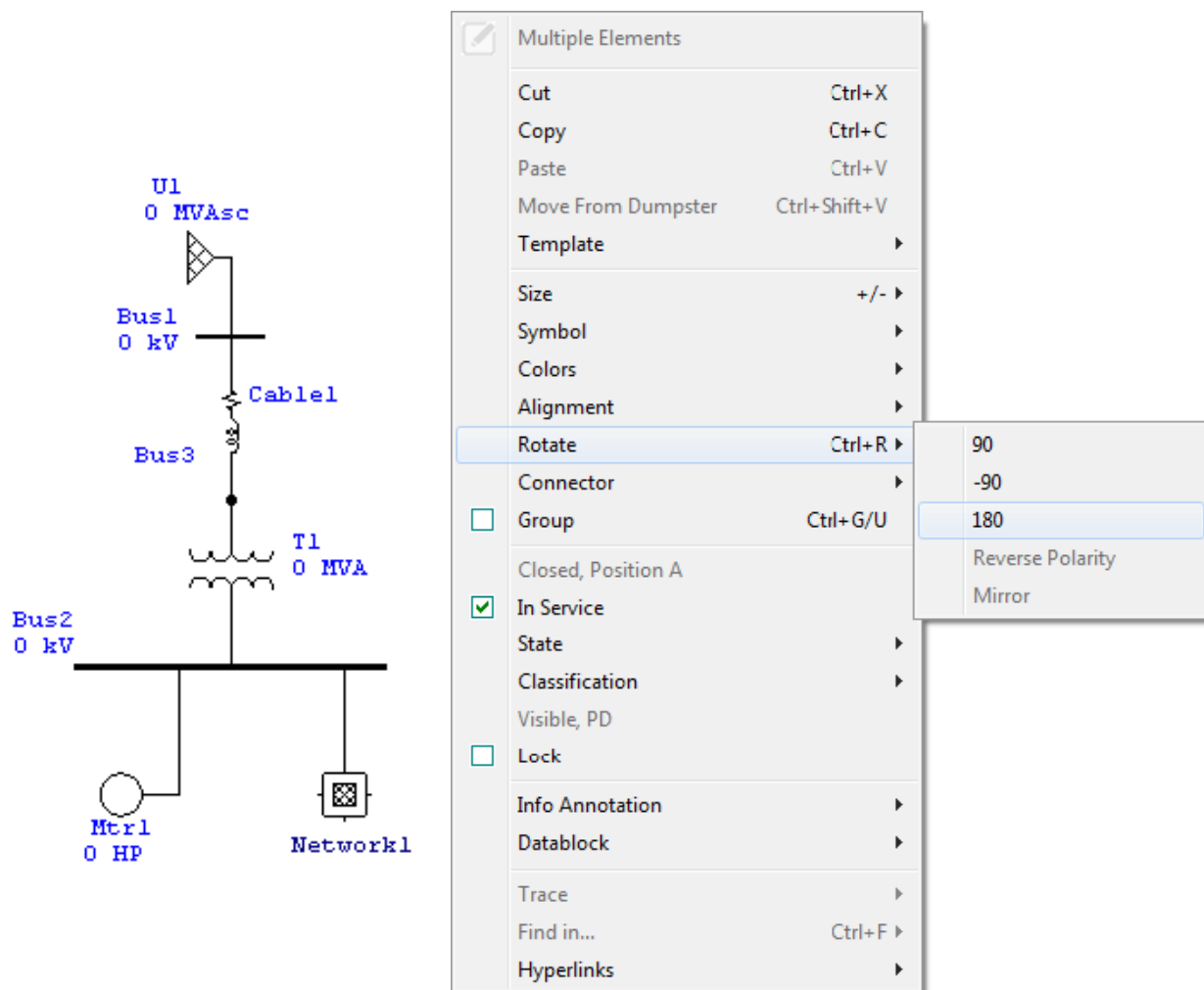


Рисунок 29 – Применение контекстного меню при повороте элемента сети

Также в участок электрической сети можно добавить разнообразные защитные устройства. Для этого, сначала надо убедиться, что между элементами есть достаточно места. Добавление защитного устройства не требует удаления линии, соединяющей элементы, а вместо этого вставим элемент защиты на линию, где потребуем место его установки (рисунок 30).



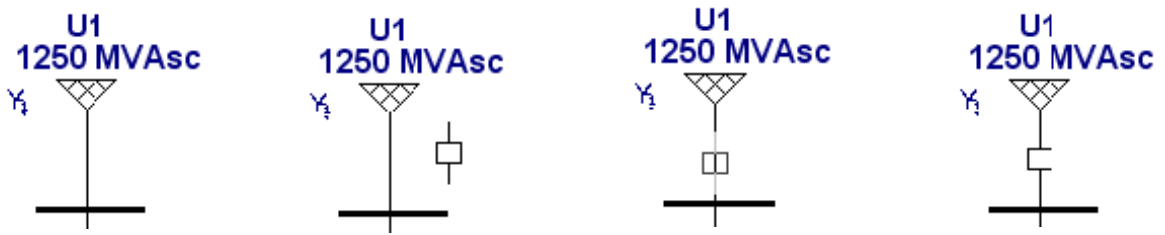



Рисунок 30 – Встраивание защитных устройств электрической сети

Чтобы проверить, находится ли элемент под напряжением, нажмем на значок замкнутости , который находится на панели инструментов проекта. Все элементы, которые не находятся под напряжением, будут выделены серым цветом. Например, при включенной проверке неразрывности (рисунок 31), элементы ниже защитного устройства выделены серым цветом.

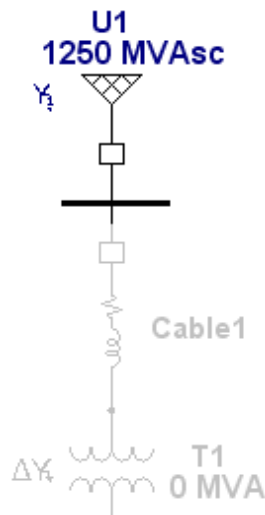


Рисунок 31 – Проверка элементов, находящихся под напряжением

Как показано выше, создание однолинейной схемы электрической сети в программе *Etap* – это быстрый и достаточно простой процесс.

## 2.8 Анализ потоков нагрузки

Далее познакомимся с основными навыками применения модуля анализа потоков нагрузок. Здесь также указано как обеспечить регулирование напряжения шины с помощью силовых трансформаторов TLC (трансформаторов с РПН – регулирование под нагрузкой) и условия флагов перегрузки в специализированном САПР *Etap*.

Для начала необходимо нажать кнопку «Load Flow Analysis» на панели инструментов режима, чтобы переключиться в данный режим. Теперь можно запустить исследование, нажав кнопку «Run Load Flow» на панели инструментов «Load Flow». В окне будет предложено ввести имя для выходного отчета, если выбран параметр «Подсказка», как показано на рисунке 32.

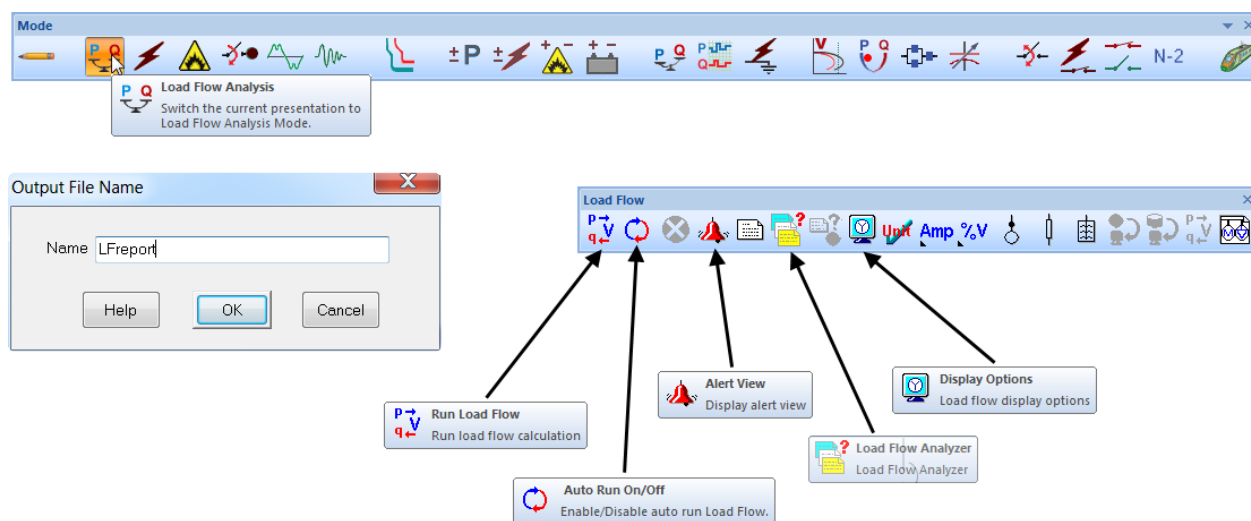


Рисунок 32 – Вид модуля анализа потоков нагрузок

Результаты исследований можно увидеть на однолинейной схеме. Информация, показанная на однолинейной схеме, может быть в любой момент изменена в параметрах отображения. Для получения еще более подробных результатов их можно найти в выходных отчетах.

Если в электрической сети наблюдаются перегрузки, то на однолинейной схеме изменяется цвет линии (рисунок 33). А подробный просмотр проблем перегрузки доступен в просмотре предупреждений на панели инструментов потоков нагрузки нажатием соответствующей кнопки.

На силовой шине 1 (BUS 1) рабочее напряжение составляет 98,42%. Это привело к тому, что силовая шина 1 (BUS 1) была помечена как недостаточное значение напряжение и появилось оповещение в окне «Alert View» (рисунок 33). Критерии, по которым появляется оповещение могут быть изменены в редакторе «Load Flow Study Case». Теперь воспользуемся

опцией регулирования напряжения шин с помощью окна «Transformer Editor», чтобы изменить результаты потоки нагрузок.

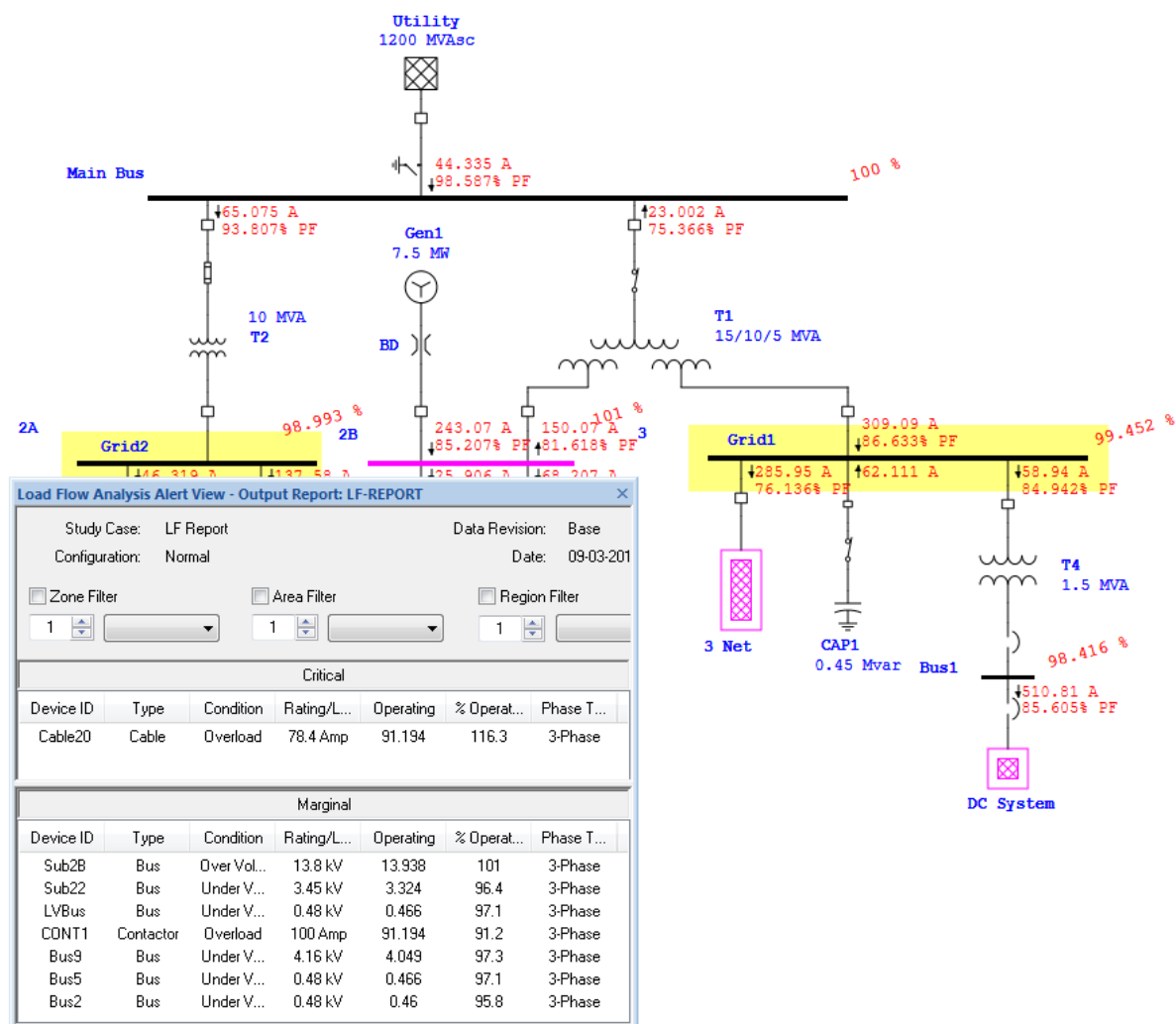


Рисунок 33 – Однолинейная схема в модуле потоков нагрузки

САПР *Etap* позволяет применять автоматические настройки регуляторов под нагрузкой (TLC) для изменения напряжения шин, которые прямо или косвенно связаны с силовым трансформатором. Например, можно использовать трансформатор *T4* для регулирования уровня напряжения шины 1 на 100% от номинального значения напряжения. Для этого необходимо открыть редактор *T4*, дважды щелкнув по его значку на схеме. На вкладке Tar (карта) включите (установите флажок) поле Auto LTC на первичной обмотке. Далее мы откроем окно настройки параметров LTC, нажав на поле LTC и изменим регулируемую шину на первую (Bus1). Потом

следует нажать кнопку «OK», как и для окна «LTC» и окна «Transformer Editor» (рисунок 34).

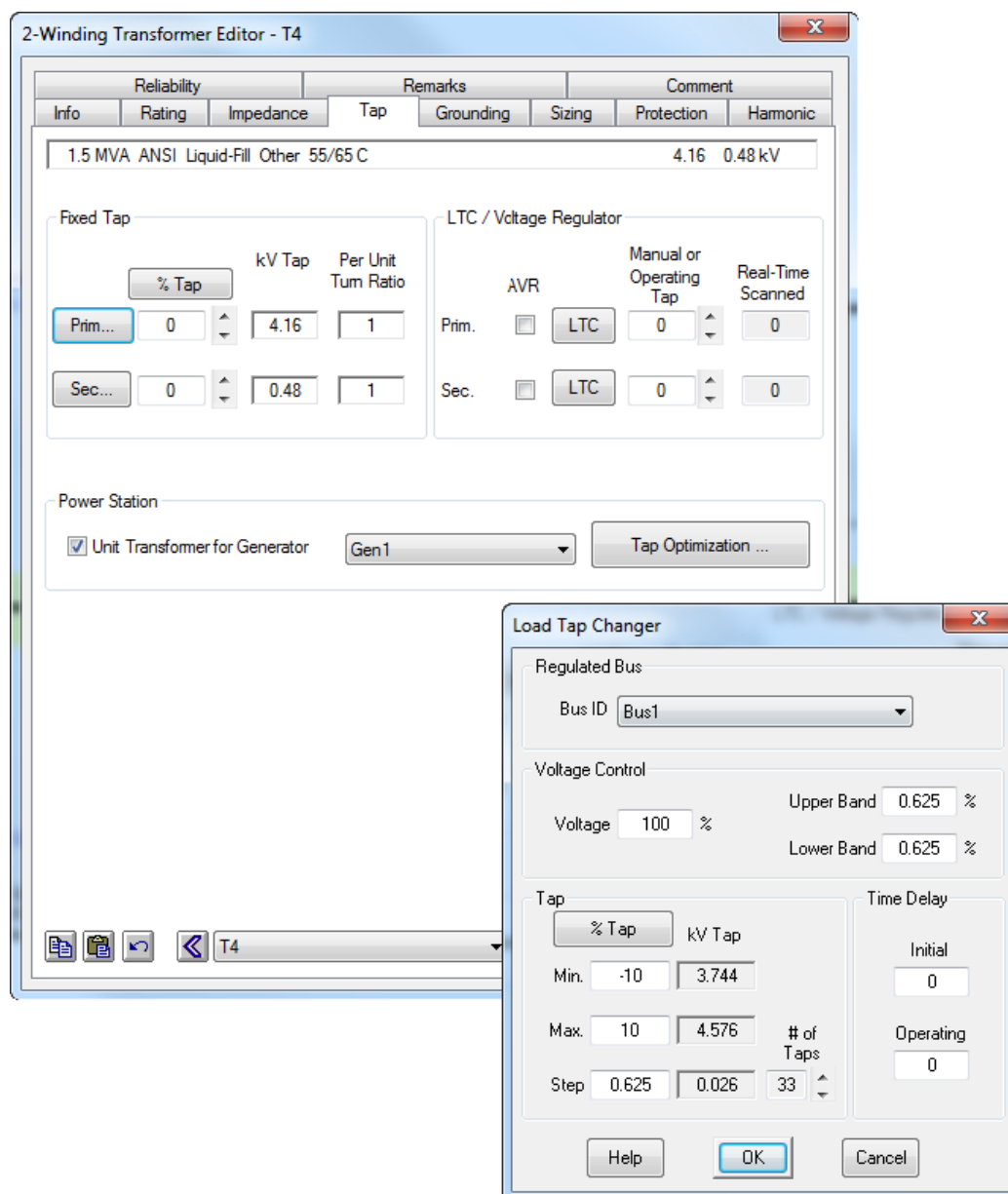


Рисунок 34 – Настройки автоматического управления напряжением по шине 1

Последним действием является запуск исследования модуля потока нагрузки снова, для этого следует нажать кнопку «Flow Run» на панели. Обращаем внимание на величину рабочего напряжения по шине 1 (Bus1).

После проделанных действий, видно, что рабочее напряжение шины 1 (Bus 1) теперь находится в пределах допустимого значения регулирования (рисунок 35).

Теперь можно снова запустить исследование потока нагрузки, и обратим внимание на рабочее напряжение Шины 1.

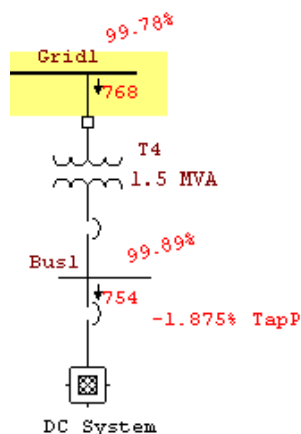


Рисунок 35 – Напряжение на шине 1 с функцией Auto TLC

Анализатор результатов потоков нагрузки позволяет просматривать результаты различных исследований на одном экране, чтобы анализировать и сравнивать различные результаты. Можно сравнить результаты общей информации о проекте или более конкретной информации, такой как результаты, содержащиеся на силовых шинах, в ветвях, в нагрузках или источниках в исследовании потоков нагрузки. Анализатор результатов потока нагрузки – это инструмент экономии времени, который позволяет сравнивать и анализировать различные отчеты, поступающие из разных проектов в одном каталоге и выводить на один экран.

## 2.9 Анализ потоков несимметричной нагрузки

Далее познакомимся с основными навыками применения модуля несимметричного анализа потоков нагрузки. Данный режим возникает, когда мощная однофазная нагрузка подключена к симметричной трехфазной системе [19].

Для начала необходимо нажать кнопку «Unbalanced Load Flow Analysis» на панели инструментов режима, чтобы переключиться в данный режим. Теперь можно запустить исследование, нажав кнопку «Run

Unbalanced Load Flow» на панели инструментов «Unbalanced Load Flow». В окне будет предложено ввести имя для выходного отчета, если выбран параметр «Подсказка», как показано на рисунке 36.

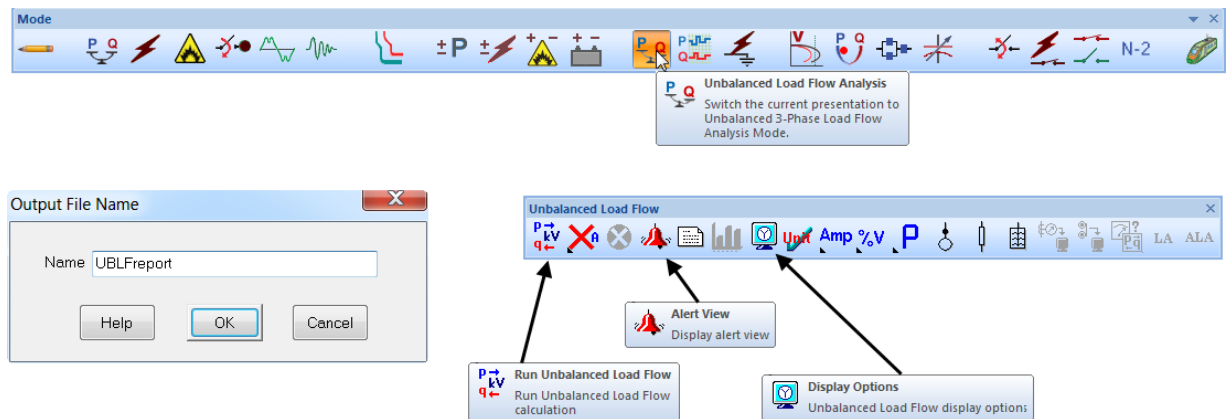


Рисунок 36 – Вид модуля анализа потоков несимметричной нагрузки

Для просмотра любых проблем перегрузки или несимметрии в электрической сети, следует нажать кнопку оповещения (Alert View) на панели инструментов. Откроется окно, содержащее список низковольтного оборудования, а также оборудования, работающего в несимметричном режиме. Пример анализа подобного режима показано на рисунке 37.

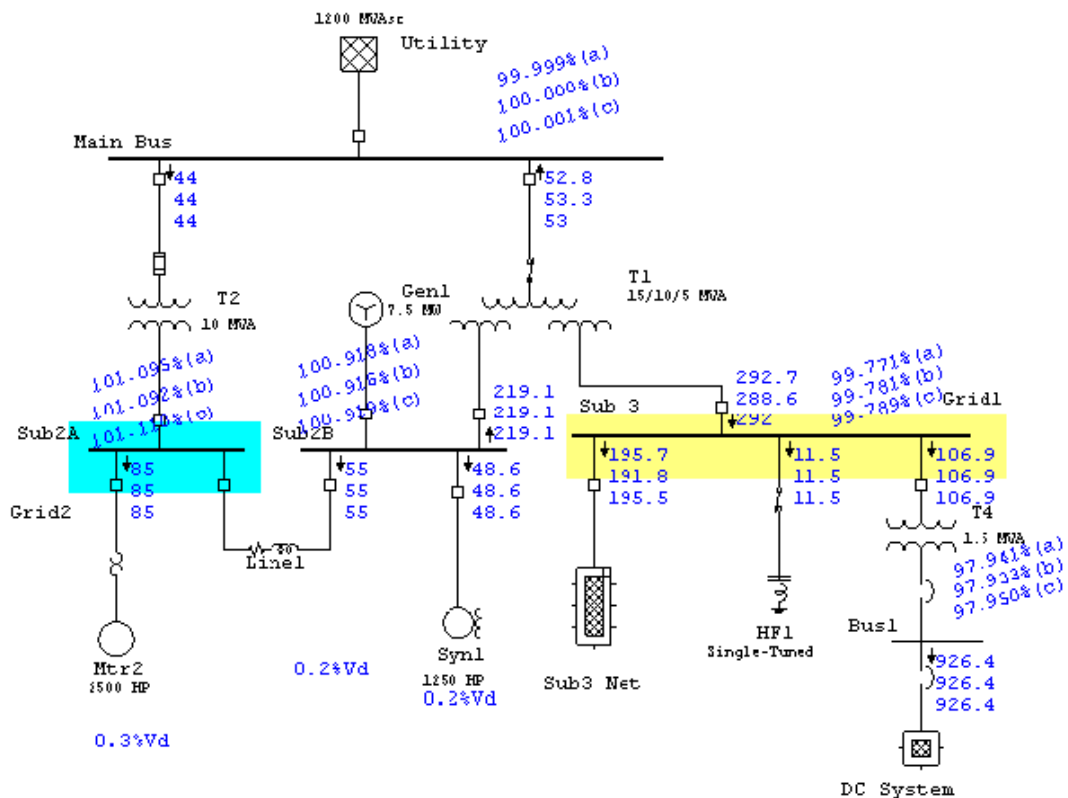


Рисунок 37 – Однолинейная схема в модуле потоков

## несимметричной нагрузки

На рисунке 37 видно, что трехфазная система симметрична, как можно видеть из значений напряжений и токов по фазам.

Несимметричность в трехфазной системе будет обеспечена путем изменения соединения первого электродвигателя (SYN1) от трехфазного к однофазному. Для этого следует открыть редактор электродвигателя SYN1 и внести изменения, указанные на рисунке 38.

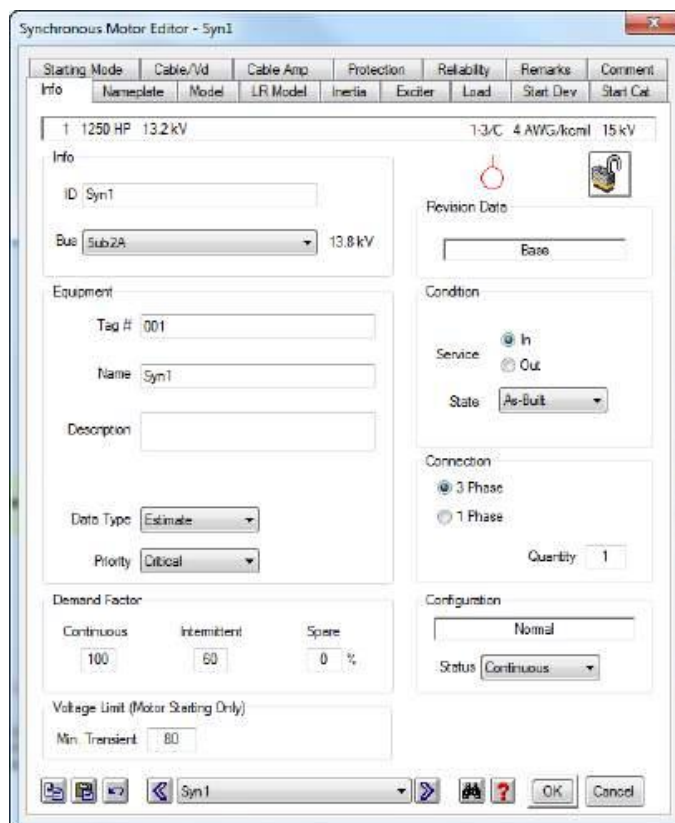


Рисунок 38 – Перевод трехфазного двигателя в однофазный режим

После изменений производим повторный запуск анализа потока несимметричной нагрузки и проверим результаты моделирования (рисунок 39).

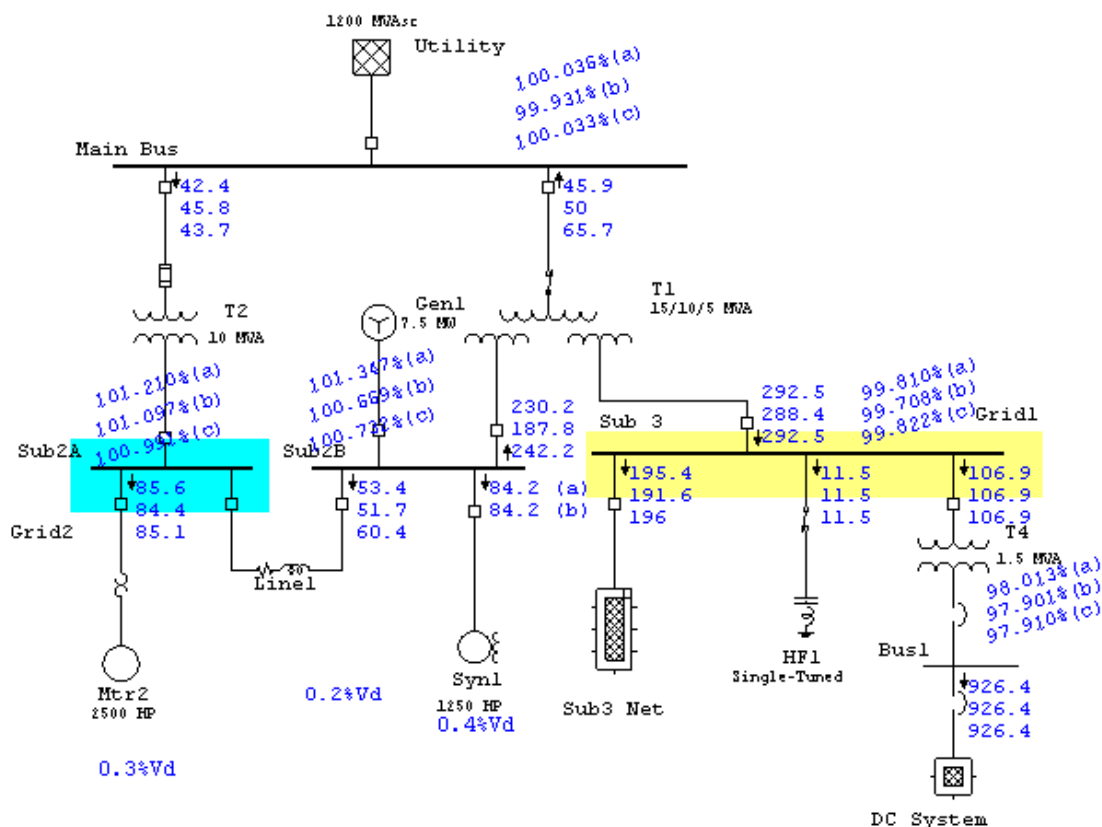


Рисунок 39 – Анализ несимметричной нагрузки

На рисунке 39 видно, что в различных частях трехфазной системы существует несимметрия токов и напряжений, которые не существовали в исходной схеме симметричной нагрузки (рисунок 37). Здесь представлен только один пример из многих случаев моделирования несимметричной нагрузки в специализированной САПР *Etap*.

## 2.10 Выводы по разделу 2

Таким образом, во втором разделе указаны необходимые требования к операционной системе при установке программного продукта *Etap*. Показаны особенности работы графической среды и ее функциональные возможности. Также рассмотрена организация создания новых проектов, инструментов их управления и возможности представления вывода результатов исследования электрических систем. Далее перечислены базы данных и библиотек программного продукта *Etap*, которые предоставляют



широкие возможности для расчета, моделирования, проектирования и оптимизации разных по конфигурации, режимов работы и уровней напряжений электрических систем и силового электрооборудования. Также указаны библиотеки расчетов тяговых сетей, механических расчетов воздушных и кабельных линий, системы заземления, анализа электрической нагрузки во временной области, быстрого спектрального анализа с реактором, наземных Grid-систем и другие.

Более подробно показан алгоритм создания простых конфигураций и режимов работы электрических сетей, что является начальными навыками при освоении основных функциональных возможностей специализированной САПР *Etap*. Расчет однолинейных схем рассматривается при подключении симметричных и несимметричных потребителей электрической энергии.

### **3 Практическая работа по учебному курсу «Электроэнергетические системы и сети»**

Практическая работа состоит из теоретической и экспериментальной частей учебного курса «Электроэнергетические системы и сети». Она нацелена на усвоение знаний по разделу учебного курса, посвященной компенсирующим устройствам, а также на ознакомление с возможностями построения электрических схем в *Etap*, задания параметров элементов, редактирование многомерной базы данных проекта и проведения расчетов режимных параметров сети.

#### **3.1 Исследование влияния компенсирующих устройств на режим напряжений электрической сети**

**Цель работы** – изучение влияние перетоков реактивной мощности на режим напряжения электрической сети.

##### **Программа работы**

- 1 Изучить разделы курса, в которых рассматриваются вопросы компенсации реактивной мощности.
- 2 Подготовить ответы на контрольные вопросы.
- 3 Исследовать влияние статических конденсаторных батарей на режим напряжений электрической сети.
- 4 Оформить протокол отчёта.

#### **3.2 Краткие теоретические сведения**

В системе электроснабжения очень важную роль играют преобразовательные установки, которые помогают повысить коэффициент активной мощности. К преобразовательным установкам, следует отнести следующие устройства [20, 21]:

- конденсаторные батареи;

- шунтирующие реакторы;
- синхронные компенсаторы;
- статические тиристорные компенсаторы;
- фильтрокомпенсирующие устройства.

Чтобы понять важность данных установок в энергетической системе следует вспомнить понятия активной, реактивной и полной мощностей [22].

Коэффициентом активной мощности называют безразмерную физическую величину, являющуюся энергетической характеристикой переменного тока (формула 1):

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \frac{P}{S}. \quad (1)$$

Повышенное потребление реактивной мощности или пониженный коэффициент активной мощности невыгодны электроэнергетических системах по следующим основным причинам [23, 24]:

- с увеличением величины реактивной мощности увеличиваются потери активной мощности в элементах сети;
- протекание реактивной мощности по воздушным линиям и трансформаторам связано со значительными потерями напряжения в них;
- снижение качества электроэнергии и как следствие дополнительные затраты на ввод средств необходимого регулирования напряжения;
- загрузка реактивной мощностью трансформаторов и линий электрических сетей приводит к понижению их пропускной способности;
- возрастание передаваемой реактивной мощности ведёт за собой возрастание потерь реактивной мощности в сети.

Данные последствия приводят к возникновению необходимости их избежать различными способами, а эти способы приводят уже к экономическим потерям, к примеру, при снижении пропускной способности сетей возникает необходимость увеличения сечения проводов, что характеризует большие затраты. А это значит, что высокая реактивная

мощность в сети ведёт за собой множество неприятных последствий различного характера, и её нужно как-то компенсировать.

Мероприятие в узле электроэнергетической системы, в которой подключается потребитель электроэнергии, направленное на улучшение баланса реактивной мощности, называют компенсацией реактивной мощности.

Основными потребителями промышленных предприятий являются асинхронные двигатели, которые снижают значения коэффициента активной мощности. Ориентировочно это значение составляет 0,7 – 0,9 [25, 26].

Для осуществления компенсации реактивные элементы могут включаться последовательно (продольная компенсация) или параллельно (поперечная компенсация).

Продольная компенсация заключается в последовательном включении компенсирующих устройств в линию электропередачи, которые изменяют общее индуктивное сопротивление воздушных и кабельных линий [20]. Данный тип компенсации часто применяется в электрических сетях среднего напряжения (6 – 35 кВ) с резкопеременным типом нагрузки (сварочные установки переменного постоянного тока; мощные электродвигатели в режимах с частыми включениями и выключениями). В электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения (220 – 750 кВ) данный тип компенсации позволяет улучшить статическую и динамическую устойчивость электроэнергетических систем.

Поперечная компенсация так же может применяться в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения. В качестве компенсирующих устройств используются реакторы, схемой замещения которых являются индуктивности. Целью их включения является поглощение большого значения реактивной мощности, обусловленной распределённой ёмкостью воздушных и кабельных линий электропередач.

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой нагрузками, (асинхронный двигатель, электролизная установка) и элементами

электрической системы, применяют только поперечную компенсацию. Обеспечивают требуемые значения напряжения и уменьшают потери электроэнергии в электрической сети посредством этих устройств. Мощность и местоположение компенсирующих устройств определяются технико-экономическими показателями, получаемыми из расчёта.

Для улучшения режима напряжений находят отдельное или совместное применение следующие регулирующие и компенсирующие устройства (Таблица 3).

Таблица 3 – Перечень регулирующих и компенсирующих устройств

<b>Регулирующие устройства</b>	<b>Компенсирующие устройства</b>
генераторы	синхронные компенсаторы и двигатели
трансформаторы с РПН	батареи конденсаторов
автотрансформаторы с РПН	реакторы поперечной компенсации
линейные регуляторы	вентильные статические источники реактивной мощности (ИРМ)

Самым распространенными компенсирующими устройствами являются косинусная конденсаторная батарея (КБ). Её схемой замещения является ёмкость (рисунок 40), которая служит источником реактивной мощности.

Конденсаторная батарея представляет собой две обкладки, выполненные из алюминиевой фольги и диэлектрика. В качестве диэлектрика может использоваться бумага, пропитанная минеральным или синтетическим маслом. Конструкция конденсаторной батареи помещается в герметичный корпус, выполняемый из стали, имеющей электрические выводы.

Батареи конденсаторов (КБ) до 1 кВ изготавливают одно- и трехфазными с мощностями от 4,5 до 50 квар, а выше 1 кВ - только однофазные. Как правило КБ включаются в схему треугольник, так как к конденсатору приложено линейное напряжение и в 3 раза увеличивается

реактивная мощность по сравнению с ситуацией соединения в звезду (рисунок 40).

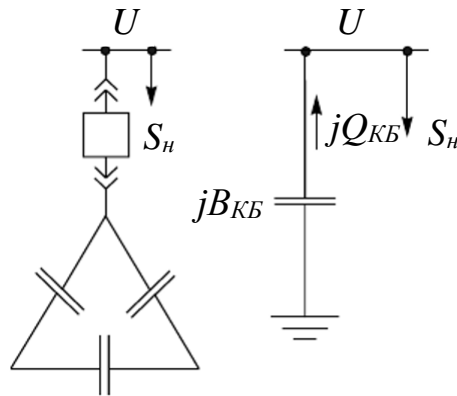


Рисунок 40 – Схемы включения и замещения КБ

Генерируемая реактивная мощность КБ находится по формуле 2:

$$Q_{KB} = 3\omega C_{KB} U_{\Phi}^2 = U^2 \omega C_{KB}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – циклическая частота  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $C$  – величина емкости КБ (Ф).

Потери активной мощности в КБ выражаются по формуле 3 и связаны с качеством диэлектрического вещества:

$$\delta P_{KB} = Q_{KB} \cdot \text{tg}\delta, \quad (3)$$

где  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Потери активной мощности определяется величиной  $\text{tg}\delta$  и обычно составляет от трёх до шести тысячных киловатта на киловар. Как видно, это значение очень мало, поэтому экономичность конденсаторной батареи является высокой, чем обусловлено их широкое использование в качестве компенсирующих устройств [27]. Основные достоинства и недостатки КБ указаны в Таблице 4.

Таблица 4 – Сравнительная таблица параметров КБ

Основные достоинства	Основные недостатки
----------------------	---------------------

Отсутствие вращающихся частей способствует простоте монтажа, обслуживания и наращивания мощности (малые габариты, масса, отсутствие фундаментов), и для установки БК может быть	Трудности механической коммутации емкостной цепи (отставание напряжения от тока на 90° ведёт за собой многократные повторные зажигания дуги при движении контактов), и это в свою
---	---

Продолжение таблицы 4

использовано любое сухое помещение.	очередь вызывает усиленный износ коммутирующей аппаратуры, также отрицательно сказываться на конденсаторах и на электрически близко расположенном электрооборудовании могут броски тока искажения.
Низкие потери активной мощности при выработке реактивной мощности: 0,0025 - 0,006 кВт / квар	Чувствительность конденсаторов к перенапряжениям, к искажению синусоидальности приложенного напряжения

В электрических сетях среднего, высокого и сверхвысокого напряжения широко применяются шунтирующие реакторы [20, 23]. Данное устройство представляет собой катушку индуктивности с большим индуктивным сопротивлением, по сравнению с ее активным сопротивлением (рисунок 41). Его применение обусловлено протеканием больших ёмкостных токов в электрических сетях напряжением от 35 до 750 кВ. Реактивная мощность шунтирующего реактора определяется по формуле 4:

$$Q_p = U^2 B_p, \quad (4)$$

где  $B_p$  – индуктивная проводимость реактора (См),  $U$  – номинальное значение напряжения, получаемое из паспортных данных.

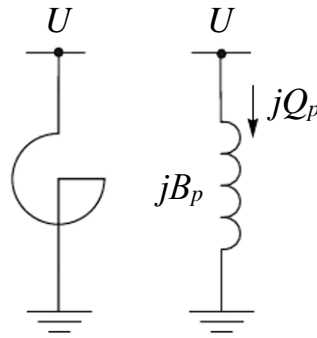


Рисунок 41 – Схемы включения и замещения реакторов

Шунтирующие реакторы позволяют:

- устранять суточные и сезонные колебания напряжения в электрической сети;
- увеличивать качество электрической энергии;
- автоматизировать режим работы электрической сети;
- уменьшить потери при транспортировке и распределении электроэнергии;
- повысить устойчивость энергосистемы;
- увеличить пропускную способность линий электропередачи и обеспечить надёжное автоматическое управление уровнями напряжения при близких к предельным по статической устойчивости перетокам мощности;
- освободиться от эффекта «лавины напряжения» при возникновении аварийных ситуаций, таких как аварийное отключение нагрузки, генератора, линии электропередачи в электрической сети.

Синхронный компенсатор (СК) – синхронная машина, работающая в режиме двигателя, но не имеющая нагрузки на валу (режим холостого хода). Основной задачей синхронного компенсатора является генерирование и потребления реактивной мощности на крупных подстанциях электроэнергетической системы.

Принцип его действия заключается в следующем: необходимую для работы некоторых потребителей реактивную мощность вырабатывает не синхронный генератор, установленный на электростанции, а синхронный компенсатор, установленный в непосредственной близости от потребителя.



На рисунке 42 изображена участок электроэнергетической системы, которая состоит из синхронного генератора (СГ), повышающего  $Tr1$  и понижающего  $Tr2$  трансформаторов, ЛЭП, потребителя  $Z$  и синхронного компенсатора (СК), включенного параллельно потребителю. Синхронный компенсатор, включенный в сеть, работает как синхронный двигатель без нагрузки ( $P_2 = 0$ ), то есть в режиме холостого хода, и вырабатывает реактивную мощность ( $Q_{ск}$ ), необходимую для работы потребителя  $Z$ . Это может быть группа асинхронных двигателей. Благодаря этому реактивная мощность в СГ и ЛЭП доведена до некоторого минимального значения  $Q_{min}$ , что способствует повышению технико-экономических показателей всей электрической системы.

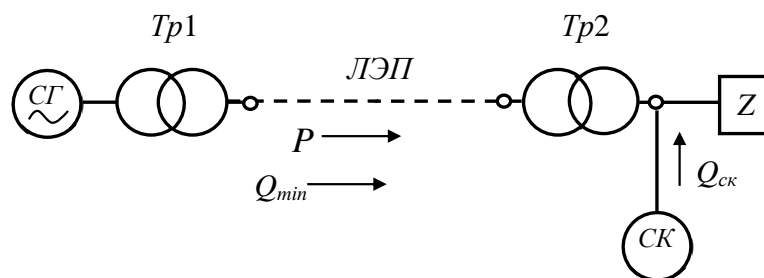


Рисунок 42 – Схема включения синхронного компенсатора

В точке подключения СК регулирование напряжения может осуществляться в пределах (формула 5):

$$0,95U_{ном} \leq U_c \leq 1,05U_{ном}. \quad (5)$$

Диапазон изменения реактивной мощности синхронного компенсатора может быть (формула 6):

$$Q_{min} \leq Q_{ск} \leq Q_{max}. \quad (6)$$

Мощность, генерируемая в режиме перевозбуждения, является наибольшей реактивной мощностью синхронного компенсатора, которую называют номинальной мощностью СК. В режиме недовозбуждения синхронный компенсатор потребляет реактивную мощность, минимальное значение  $Q_{min}$  которой определяет режим ограничения по устойчивости синхронной работы СК.

Так как СК расходует активную мощность только на потери в статоре и роторе, а также на трение в подшипниках, можно говорить о небольшом относительно малом потреблении активной мощности. Из этого можно говорить о представлении схемы замещения СК (рисунок 43) без активного сопротивления. Кроме схемы замещения на рисунке также присутствуют векторные диаграммы, по которым можно увидеть, что ток синхронного компенсатора равен (формула 7):

$$I_{СК} = \frac{E_{СК} - U_c}{\bar{X}_d} \quad (7)$$

И так как  $P_{СК}$  примерно равно нулю, мощность на его зажимах определяется по формуле 8:

$$Q_{СК} = S \bar{3} U_c I_{СК} = \frac{E_{СК} - U_c}{X_d} U_c \quad (8)$$

Следовательно, у реактивной мощности синхронного компенсатора значение и знак зависят от соотношения его ЭДС ( $E_q$ ) и напряжения узла сети в месте подключения синхронного компенсатора ( $U_c$ ). ЭДС определяется током возбуждения СК: при увеличении тока возбуждения возрастает  $E_q$ . И если  $E_q > U_c$ , то синхронный компенсатор генерирует сеть реактивную мощность и потребляет из сети опережающий напряжение ток, как видно из рисунка 43. А если  $E_q = U_c$  реактивная мощность синхронного компенсатора равна нулю и коэффициент активной мощности единице. Последующее понижение тока возбуждения переводит синхронный компенсатор в режим недовозбуждения при котором  $E_q < U_c$ , и СК потребляет из сети реактивную мощность и отстающий от напряжения ток, что так же просматривается из рисунка 43. В режиме предельного недовозбуждения  $E_q = 0$ , включенный без возбуждения в сеть синхронный компенсатор потребляет из нее реактивную мощность (формула 9), составляющую 50-60% от номинальной.

$$Q_{СК} = -U_c^2 X_d \quad (9)$$

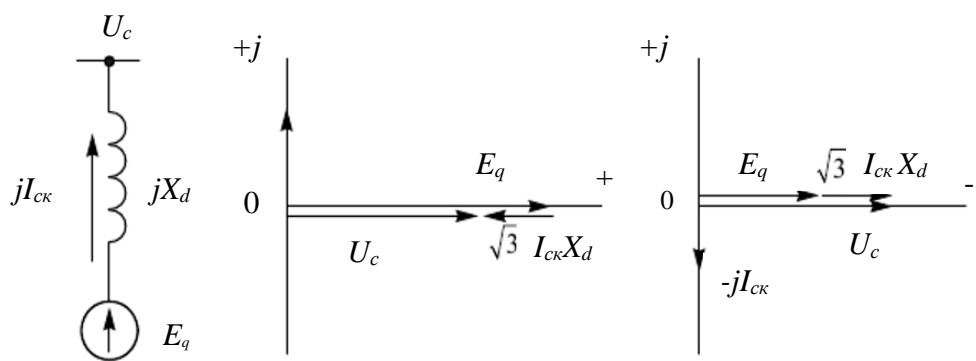


Рисунок 43 – Упрощённая схема замещения СК и векторные диаграммы напряжений в режимах перевозбуждения и недовозбуждения

Таблица 5 – Сравнительная таблица параметров СК

<b>Основные достоинства</b>	<b>Основные недостатки</b>
Возможность плавного увеличения выработки реактивной мощности	Заметные потери электроэнергии и расход вспомогательных материалов
Возможность стабилизации или повышения напряжения при его снижении в часы максимума нагрузки или при аварии в электроэнергетической системе	Высокая стоимость самих двигателей, следовательно, высокие удельные капитальные затраты на компенсацию.
Надёжность работы	Большая занимаемая площадь

Область применения синхронных компенсаторов являются их установка на электрических подстанциях районных электрических сетей, на подстанциях крупных потребителей электроэнергии [27].

Перспективным видом компенсирующих установок являются статические тиристорные компенсаторы (СТК). Главными составляющими статических тиристорных компенсаторов являются накопительные элементы: емкости и индуктивности. Реакторно-тиристорные (рисунок 44) и конденсаторно-тиристорные (рисунок 45) блоки обладают быстродействием и осуществляют плавное регулирование (наибольшая скорость регулирования от 1 до 100 % за продолжительность времени 0,3 с) реактивной мощности во всем диапазоне, устанавливаются на подстанциях энергосистем и имеют мощность от 100 - 400 Мвар и номинальные напряжения 10 - 110 кВ. СТК имеют различные схемы подключения к высоковольтной сети и управления потребляемой реактивной мощностью.

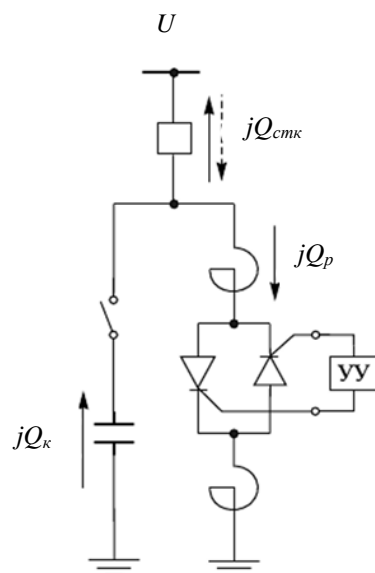


Рисунок 46 – Принципиальная схема статического тиристорного компенсатора с регулируемой мощностью реактора

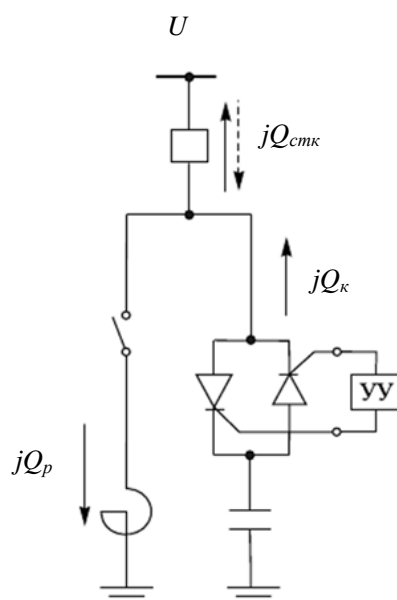


Рисунок 45 – Принципиальная схема статического тиристорного компенсатора с конденсаторной батареей

Статические тиристорные компенсаторы используются чаще всего для промышленных установок типа дуговых сталеплавильных печей и тиристорных приводов прокатных станов. Кроме того, существуют специальное исполнение СТК для применения на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог.

Фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) – конденсаторная установка, которая применяется для уменьшения гармонических искажений,

которые возникают при эксплуатации аппаратуры и оборудования, используемых на промышленных предприятиях. Эти искажения могут приводить к сбоям в работе систем телемеханики, связи, автоматики, росту активных потерь во всех элементах электрооборудования, невозможности эффективного применения систем компенсации реактивной мощности.

ФКУ позволяют скомпенсировать реактивную мощность и обеспечить фильтрацию гармоник в сетях электроснабжения. Индуктивно-ёмкостной фильтр позволяет осуществить данную компенсацию. Указанный фильтр настроен на определенную гармонику сети, чаще всего это пятая, седьмая и одиннадцатая. Важно заметить, что под «фильтром» подразумевается не отдельно взятый элемент, а конструкция из нескольких секций симметричной трехфазной  $R-L-C$ -цепи. Набор секций обуславливается необходимостью фильтрации сразу нескольких гармоник, и каждая отдельно взятая цепь фильтрует одну из гармоник.

### 3.3 Задание на практическую работу

Принципы построения однолинейной схемы электрических соединений в *Etap* рассмотрим на примере упрощенной модели электрической сети [30], состоящей из участка воздушной линии напряжением 110 кВ, понижающей трансформаторной подстанции, и электрических нагрузок напряжением 10 кВ, подключенных с помощью кабельных линий. Рассматривается влияние компенсирующих устройств на режим напряжений в модели электрической сети.

Исходные данные для расчёта, указаны в таблицах 6 – 10.

Таблица 6 – Параметры воздушных ЛЭП

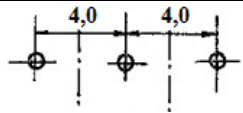
$U_{\text{ном}}$ , кВ	Расположение проводов, м	Марка проводов	$R_0$ , Ом/км	$X_0$ , Ом/км	$L$ , км
110		АС-185	0,162	0,413	100

Таблица 7 – Параметры трансформаторов

№	Тип	$S_{\text{НОМ}}$ , МВ·А	$U_{\text{ВН НОМ}}$ , кВ	$U_{\text{НН НОМ}}$ , кВ	$u_{\text{к}}$ , %	$\frac{X}{R}$	Группа соединений
T1	ТРДН- 63000/110	63	115	10,5	10,5	$\frac{22}{0,87}$	Y0/D-D-11- 11
T2	ТРДН- 63000/110						

Таблица 8 – Параметры секционного реактора

Тип	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	$I_{\text{НОМ}}$ , А	$X_{\text{Р}}$ , Ом	$i_{\text{уд.НОМ}}$ , кА	$I_{\text{терм}}$ , кА	$t_{\text{терм}}$ , с
РТОС-10- 31050-0,35У3	10,5	3150	0,35	37,0	14,7	6

Таблица 9 – Параметры кабельной линии

№	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	$L$ , км	$F_{\text{сеч}}$ , мм <sup>2</sup>
КЛ1 – КЛ4	10	5	300

Таблица 10 – Параметры статической нагрузки

№	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	$P_{\text{НОМ}}$ , МВт	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$
Н1 – Н4	10	20	0,82

На рисунке 46 показана схема соединений расчетной электрической сети.

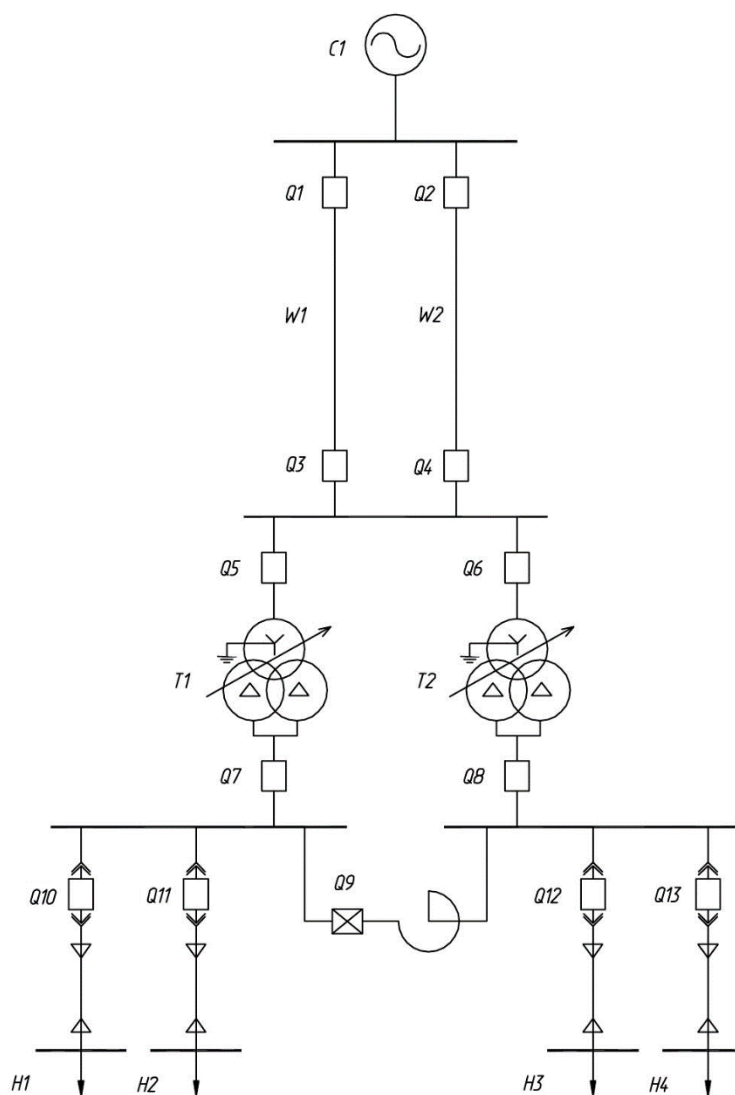


Рисунок 46 – Схема соединений электрической сети

### 3.4 Порядок выполнения работы

Для проведения расчетов в специализированной САПР *Etap* необходимо сделать следующие действия:

- 1 Создайте новый проект, присвоив ему имя «ETAP\_lab\_1»;
- 2 Задайте настройки проекта в соответствии со стандартом, принятым в Российской Федерации (МЭК, метрическая система единиц, 50 Гц);
- 3 Разместите заданные элементы на однолинейной схеме (рисунок 47, рисунок 48), и перейдите к окнам редактирования параметров для ввода данных;



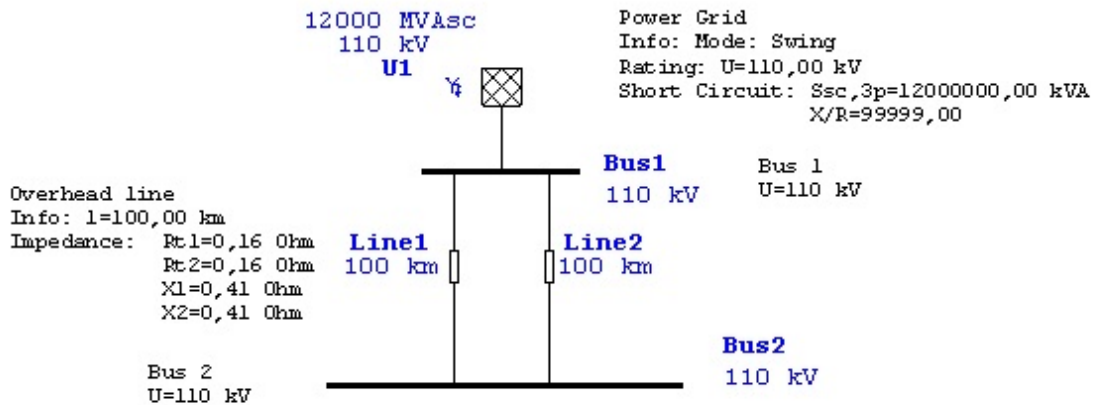


Рисунок 47 – Участок воздушной ЛЭП в Etap

На рисунке 48 показан участок электрической сети, состоящей из трансформаторной подстанции, участка кабельной линии и модели статической нагрузки. Двухобмоточный трансформатор Т1 с расщепленной обмоткой НН моделируется с помощью двухобмоточного трансформатора, так как выводы расщепленной обмотки соединены между собой.

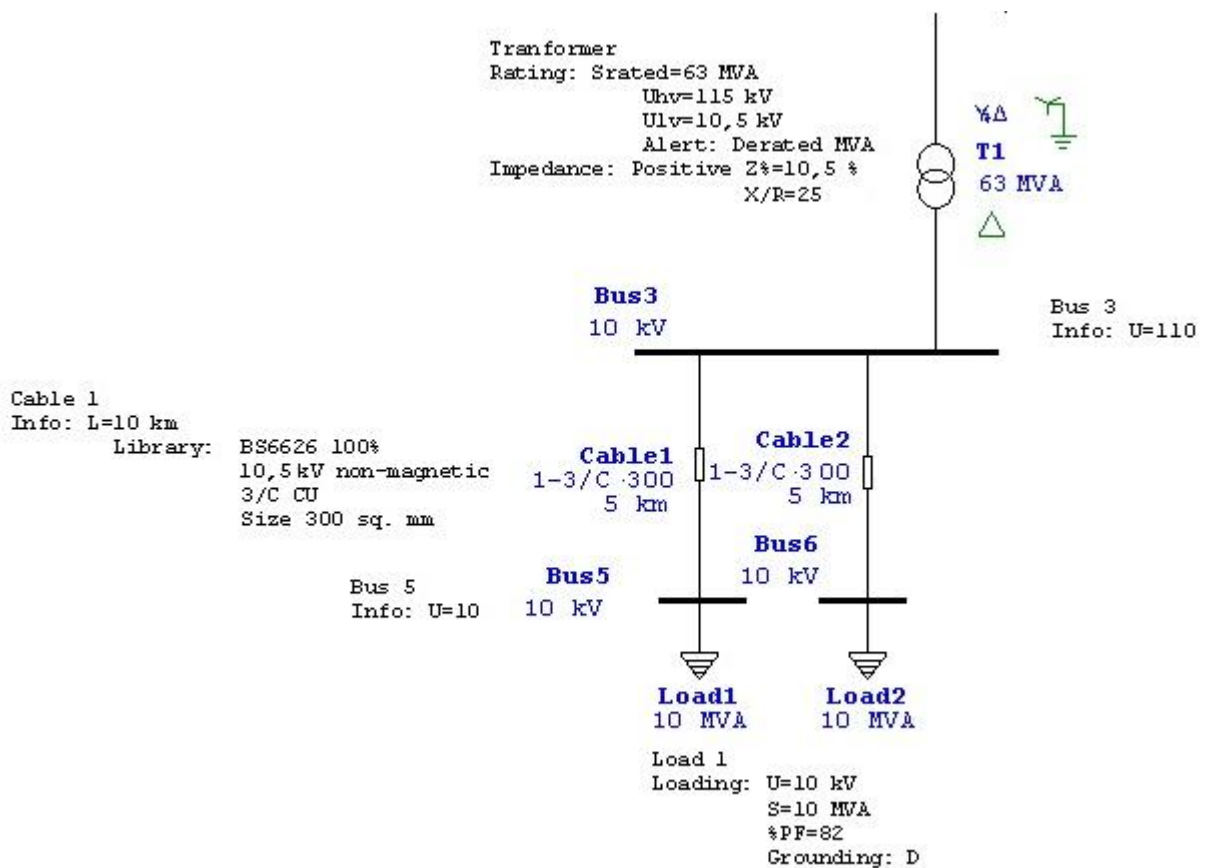


Рисунок 48 – Участок кабельной ЛЭП в Etap

- 4 Далее скопируйте элементы T1, Bus 3, Cable 1, Cable 2, Bus 5, Bus 6, Load 1 и Load 2;
- 5 Откройте System Dumpster и выберите соответствующую ячейку, содержащую ранее скопированные элементы в виде группы;
- 6 Потом следует вернуться на однолинейную схему и перенести содержание ячейки на рабочее пространство операцией Move from Dumpster, отметьте индексацию скопированных элементов;
- 7 Разгруппируйте вставку и соедините T2 с предварительно расширенной Bus 2;
- 8 Создайте нормально разомкнутый секционный выключатель между шинами Bus 3 и Bus 4 и в его в цепь добавьте секционный токоограничивающий реактор (рисунок 49);

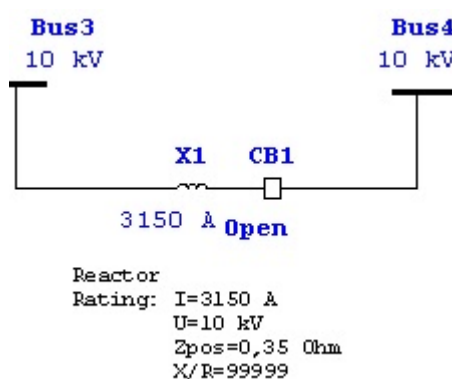


Рисунок 49 – Параметры токоограничивающего реактора

- 9 Разместите коммутационные аппараты на однолинейной схеме в соответствии с рисунком 50;
- 10 Выделите всю схему с помощью мыши и выберите функцию сохранения шаблона в формате xml. Присвойте шаблону имя «ETAP\_lab\_1\_grid»;
- 11 Удалите схему, изображенную на рабочем поле, целиком и вставьте из буфера памяти созданный ранее шаблон в данный проект;
- 12 Запустите расчет установившегося режима по адаптивному методу Ньютона-Рафсона без учета допусков по длинам КЛ/ВЛ, сопротивлений трансформаторов, реактора, температурам КЛ/ВЛ;

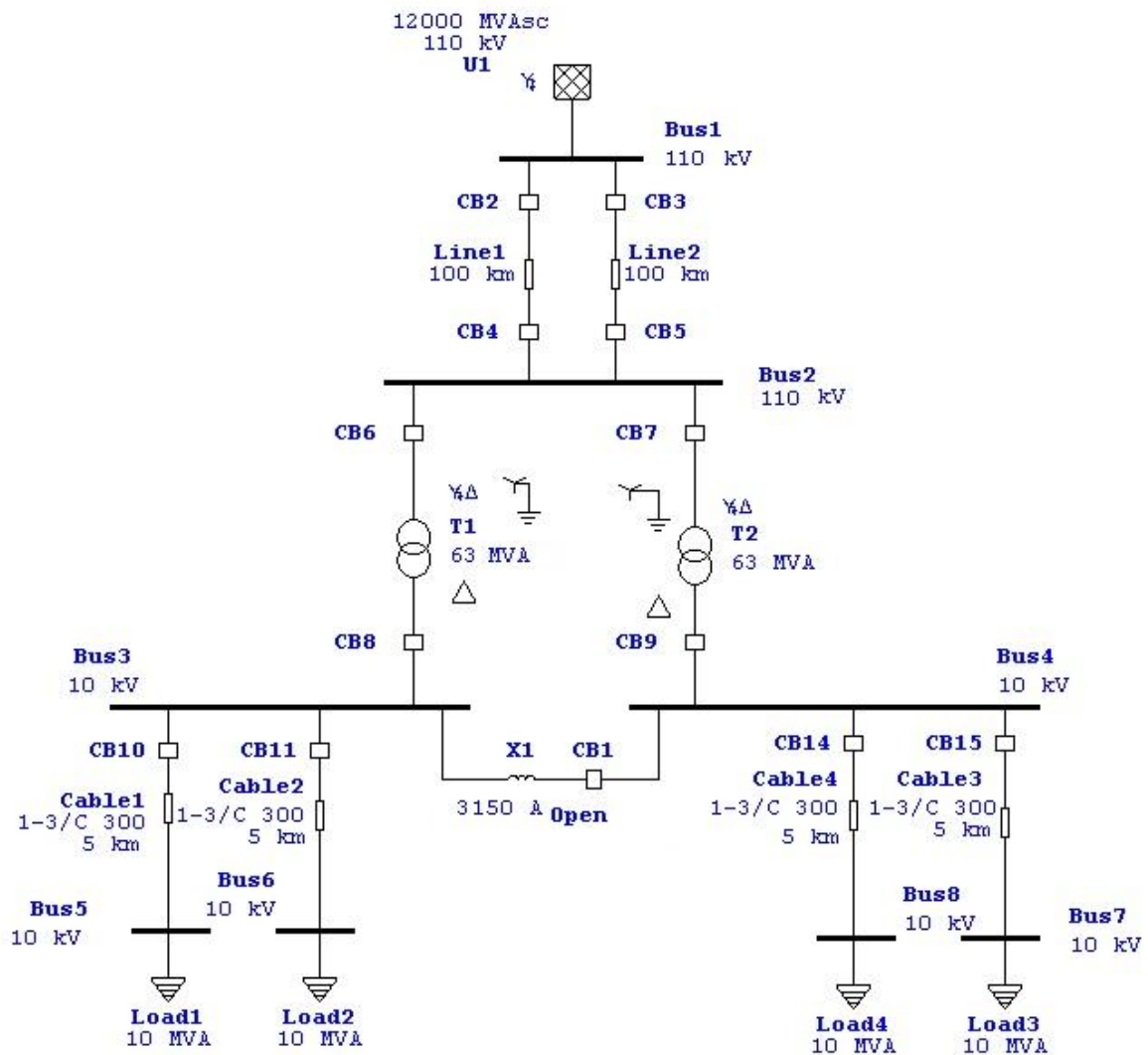


Рисунок 50 – Однолинейная схема электрической сети

- 13 Создайте следующую конфигурацию электрической сети (Normal – секционный выключатель CB1 на шинах Bus 3 и Bus 4 отключен);
- 14 Создайте следующие редакции данных (Revision 1 – Line 1, 2;  $R_{t1}=R_{t2}=0,02$  Ом/км; Revision 2 – Cable 1-4;  $F_{сеч.} = 120$  мм<sup>2</sup>);
- 15 Запустите одновременный расчет трех сценариев, используя Study Wizard, выгрузите комплексные отчеты по каждому режиму;
- 16 Вынесите на рабочее поле модель конденсатора и подключите к шинам Bus 3 и Bus 4 и изменяйте его значение.
- 17 Убедитесь в изменении режима по напряжению в расчетной электрической сети.

18 Проанализируйте полученные результаты с точки зрения обеспечения качества электроэнергии в узлах нагрузки (в точках передачи электроэнергии) и экономических затрат на возведение и эксплуатацию элементов сети и выберите оптимальный вариант.

19 Оформите отчет и ответьте на контрольные вопросы.

### **3.5 Содержание отчета**

- 1 Цель работы;
- 2 Краткие теоретические сведения;
- 3 Схема лабораторной установки;
- 4 Результаты измерений;
- 5 Выводы.

### **3.6 Контрольные вопросы**

- 1 Задачи регулирования напряжения в электрических сетях?
- 2 Когда применяются регулирующие, а когда компенсирующие устройства?
- 3 Каковы основные показатели качества напряжения?
- 4 Как влияет параллельное включение конденсаторов на режим работы электрической сети?
- 5 Как изменится напряжение при включении конденсаторной батареи в электрическую сеть?
- 6 В каких случаях целесообразно регулирование напряжения по величине и направлению реактивной мощности?
- 7 В каких случаях запрещается включение конденсаторной установки?
- 8 Что такое коэффициент мощности? Каково его значение в электрической сети различных уровней напряжений?

9 Почему невыгодна передача большой реактивной мощности по электрическим сетям?

10 Назовите устройства, применяемые для компенсации реактивной мощности?

11 Перечислите функции компенсирующих устройств.

12 В каких случаях применяется продольная компенсация в электрических сетях, а в каких поперечная компенсация?

13 Почему в качестве показателя, характеризующего реактивную мощность удобно принять коэффициент реактивной мощности?

14 Какие существуют компенсирующие устройства в местных электрических сетях?

15 В чём опасность перекомпенсации реактивной мощности в энергосистеме?

16 Какие достоинства и недостатки имеют батареи конденсаторов?

### **3.7 Выводы по разделу 3**

Таким образом, в третьем разделе показана возможность выполнения практической работы по учебному курсу «Электроэнергетические сети и системы» с применением специализированной САПР *Etap*. Работа содержит краткие теоретические сведения, методику выполнения работы при использовании программного комплекса *Etap* упрощенной модели электрической сети, состоящей из участка воздушной линии напряжением 110 кВ, понижающей трансформаторной подстанции и электрических нагрузок напряжением 10 кВ, подключенных с помощью кабельных линий. Предложены контрольные вопросы и форма отчета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во всех академических учебных заведениях неотъемлемым критерием является качество обучения. Последнее время компьютерные технологии и специализированные САПР активно используют крупные промышленные компании, исследовательские учреждения и учебные заведения. Они становятся неотъемлемой частью человеческой жизни, так как позволяют сократить время при расчетах и проектировании, повысить качество и технико-экономический уровень результатов моделирования и проектирования, и в конечном счете обеспечить энергоэффективность и энергосбережение при выполнении проектных работ.

Целью данной работы является внедрение в учебный процесс кафедры «Электроснабжение и электротехника» САПР *Etap*, направленное на формирование у студентов навыков по использованию современных систем автоматизированного проектирования в электроэнергетике. Были поставлены задачи проведения сравнительного анализа специализированных САПР, описание функциональных возможностей программного продукта *Etap* и разработка методических указаний по выполнению практической работы, которые успешно решены в соответствующих разделах.

В первом разделе был проведен сравнительный анализ нескольких наиболее подходящих специализированных САПР: SKM, XGSLab, DIgSILENT, CYME, RTDS, PSCAD, *Etap*, ElectricS Pro, EnergyCS, ERACS. В результате изучения справочных профильных источников информации на английском и русском языках для получения необходимых навыков расчета и моделирования выделены следующие основные критерии:

- простота и удобство при пользовании интерфейсом рабочего стола;
- максимальный охват набора пакетов приложений в областях электроэнергетики и электрооборудования;
- большая библиотека элементов и режимов работы систем;

- возможность вывода результатов расчетов или моделирования в файлах офисных приложений;

- визуализация данных вывода результатов расчетов или моделирования

- наличие бесплатной версии программы для учебных заведений.

В результате сравнения выбор был сделан в пользу специализированной САПР *Etap*, так как подходит по большинству критериев.

Во втором разделе было подробнее рассмотрены функциональные возможности программного продукта *Etap*. Прописаны основные инструменты для получения навыков при расчётах и моделировании однолинейных схем в режимах с симметричной и несимметричной нагрузок.

В третьем разделе показана возможность выполнения практической работы по учебному курсу «Электроэнергетические сети и системы» с применением специализированной САПР *Etap*. Работа содержит краткие теоретические сведения, методику выполнения работы, форму отчета и контрольные вопросы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обуховец В.А. САПР как инструмент освоения высокотехнологичных дисциплин // Высшее образование в России. М., 2014. №5. С. 80 – 85.
2. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с.
3. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, утвержденный приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 28.02.2018 г. №144
4. M. Phiri. Information Technology in Construction Design. (англ.) — London: Thomas Telford Publishing, 1999. P.52. 228 p. ISBN 0-7277-2673-0.
5. California Public Utilities Commission [Electronic resource] URL: <http://www.cpuc.ca.gov/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
6. SKM Systems Analysis [Electronic resource] URL: <http://www.skm.com/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
7. Electromagnetic Simulation for Power, Grounding and Lightning Protection Systems [Electronic resource] URL: <https://www.xgslab.com/index.php/en/xgslab-new/general> (дата обращения 15.05.2019 г.)
8. DIgSILENT| Power System Software & Engineering [Electronic resource] URL: <https://www.digsilent.de/en/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
9. CYME International Inc. [Electronic resource] URL: <http://www.cyme.com/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
10. Real Time Digital Power System Simulator [Electronic resource] URL: <https://www.rtds.com/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
11. Electrical Power System Analysis Software [Electronic resource] URL: <https://etap.com/> (дата обращения 15.05.2019 г.)



12. Кушнир А.В., Белоусов А.В., Виноградов А.А., Рошубкин П.В. Использование программно-аппаратного комплекса диспетчеризации на базе платформ Etap Real Time и PSI Control для моделирования режимов и управления в электроэнергетических системах. Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург. 2015. № 11-2 (42). С. 50-52.
13. Касем М.К., Килин С.В. Исследование динамической устойчивости электрических систем в комплексной программе Etap. Научная дискуссия: вопросы технических наук. 2015. № 12. С. 130-135.
14. Блюк В.В. Некоторые проблемы расчета динамических режимов промышленных ЭЭС программного комплекса Etap. В сборнике: Фёдоровские чтения - 2017 XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. 2017. С. 254-260.
15. Корнилова Н.А. Сравнительная характеристика программных комплексов «Etap» и «Energycs», используемых для анализа, проектирования и тестирования энергосистем / В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород. 2015. С. 3255-3260.
16. CSoft. Группа компаний Воронеж. [Электронный ресурс] URL: <http://www.csoft.vrn.ru/index.php> (дата обращения 15.05.2019 г.)
17. EnergyCS. Электротехнические расчеты любой сложности. [Электронный ресурс] URL: <http://www.energycs.ru/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
18. RINA| ERACS User Site – Power System Analysis Software [Electronic resource] URL: <https://www.eracs.co.uk/> (дата обращения 15.05.2019 г.)
19. Дураков А.А., Федотова Е.К., Чумаченко С.А. Расчеты несимметричных режимов электроэнергетических систем в программном комплексе Etap / В сборнике: Образование, наука, производство

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород. 2015. С. 2971-2976

20. Герасименко А.А., Федин Т.В. Передача и распределение электрической энергии : учебное издание. М.: КноРус, 2014. 597с.

21. Вахнина В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов. Тольятти: ТГУ, 2011. 68 с.

22. Аполлонский С.М., Виноградов А.Л. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению подготовки "Электроэнергетика и электротехника", "Электроника и микроэлектроника". М. : Кнорус, 2016. 249 с. ISBN 978-5-406-03879-6 : 849-00.

23. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2017. 360 с.

24. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 672с.

25. Рекус Г.Г. Электрооборудование производств. М.: Высшая школа, 2007. 709с.

26. Шлыков С.В., Шаповалов В.А., Шаповалова Н.А. Потребители электрической энергии: учебное пособие. Тольятти: ТГУ; 2011. 91с.

27. Шлыков С.В., Скворцов А.В., Старостин В.Д. О способах коррекции коэффициента мощности в системах электроснабжения // Технологии XXI века: Проблемы и перспективы развития : сб. статей Международной научно-практической конференции. (13 июня 2017 г., г. Пенза) Часть 2. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С.157-160.

28. Шлыков С.В. Специализированные САПР в проектных работах электротехнических дисциплин // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 2–27 апреля 2018 года) : сборник студенческих работ. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. С.155-156.

29. Шлыков С.В. Специализированная САПР Eтар в учебном процессе / «Молодежь. Наука. Общество» : Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция (Тольятти, 5 декабря 2018 года). Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. С. 727 – 729

30. Беляев Д.А., Ткач В.А. Разработка лабораторных работ в программном комплексе Eтар. В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов XXIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. 2018. С. 1050.