



## ➤ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА EnergyCS ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

**П**рограммные комплексы EnergyCS Режим и EnergyCS ТКЗ, предназначенные для расчетов соответственно установившихся режимов и токов короткого замыкания, используются при проектировании электроэнергетических объектов, электрических сетей, электрических станций и подстанций. Основным преимуществом программного комплекса является возможность простой сборки модели из объектов с автоматическим расчетом параметров схемы замещения и представлением расчетной схемы в виде, близком к схеме электрической однолинейной. На одной модели можно рассматривать как расчеты установившихся режимов (УР), так и расчеты токов короткого замыкания (ТКЗ). Для этого используются два независимых модуля: один для расчета установившегося режима, а второй, соответственно, для расчета токов короткого замыкания. Решение о реализации этих двух задач в разных модулях объяснялось тем, что, с одной стороны, математические модели для расчета установившегося режима и расчета токов короткого замыкания хоть и похожи, но имеют существенные различия. С другой стороны, расчеты установившихся режи-

мов и расчеты токов короткого замыкания в крупных проектных организациях и большинстве эксплуатирующих, как правило, выполняются разными специалистами. Однако анализ практики применения EnergyCS в проектных организациях показал, что достаточно часто одни и те же специалисты решают и задачи, связанные с расчетом установившихся режимов, и задачи, связанные с расчетом токов коротких замыканий. При выполнении проектных работ, связанных с выбором оборудования, одновременно необходима информация из расчета установившегося режима и расчета токов короткого замыкания. Таким образом, нужен ориентированный на проектирование электрических сетей специализированный вариант EnergyCS, объединяющий функциональность EnergyCS Режим и EnergyCS ТКЗ, а также расширенный за счет инструментов, позволяющих решать задачи, возникающие в процессе проектирования. Такой программный продукт для проектирования развития электрических сетей разработан. Он включает в себя всю функциональность EnergyCS Режим и EnergyCS ТКЗ и имеет следующие дополнительные возможности.

1. Анализ вариантов развития электрической сети и документирование результатов по каждому варианту. Учет трендов естественного изменения нагрузок во времени.
2. Анализ схемно-режимного многообразия электрической сети, а также документирование результатов по predetermined множеству режимов. Автоматический синтез множества послеаварийных режимов.
3. Выбор и проверка оборудования по допустимости режимных параметров.
4. Получение затратных характеристик каждого варианта развития и расчета соответствующих капитальных вложений.
5. Моделирование коммутационных аппаратов с разными функциональными возможностями и разными стоимостными характеристиками.
6. Моделирование распределительных устройств в составе схемы сети неограниченной сложности без влияния на качество расчета УР и ТКЗ.
7. Автоматизированное выделение подстанций на схеме и их идентификация.

Для реализации этих возможностей потребовалось внести значительные изменения в информационную модель.

1. Добавлена новая сущность — "Период развития". Предполагается, что существующая сеть соответствует нулевому периоду. Далее каждый новый период (номера 1, 2, 3 ...) соответствует этапу существенного изменения сети. Пример таблицы периодов приведен на рис. 1. Кроме номера, период имеет текстовое название и номер года, соответствующий дате окончания периода.

№	Наименование	Год	Цвет
0	Базовый	2013	
1	Первый	2018	
2	Второй	2023	
3	Третий	2028	

Рис. 1. Таблица периодов

2. Для всех объектов схемы предусматриваются дополнительные поля *Номер периода* и *Новый статус*, связанный с развитием сети. Любой элемент сети может иметь статус:

- 2.1. *Существующий*, если элемент появился в нулевом периоде (то есть до рассматриваемого периода развития) и не изменяет своего статуса.
- 2.2. *Новый*, если элемент появился в период, отличный от нулевого.
- 2.3. *Демонтированный*, если элемент появился в нулевом периоде, но должен быть демонтирован в последующем рассматриваемом периоде.
- 2.4. *Частичная замена*, если элемент появился в нулевом периоде, но в последующие периоды предполагается замена основного оборудования без существенной реконструкции. Это может быть замена трансформатора на ТП, замена провода на существующих опорах и т.п.

3. Для объектов "Нагрузка", "ТП", "Фидер" предусмотрено поле *Тренд*, которое предполагает описание естественного роста (или снижения) нагрузки по периодам. Тренд задается множеством коэффициентов роста нагрузок по активной и реактивной мощности по каждому периоду, кроме нулевого. Предполагается возможность задания тренда для каждого нагрузочного объекта или сразу для

множества объектов, например, для всей схемы, района, фидера, центра питания и т.п. Тренд может вводиться в абсолютных значениях нагрузки Р и Q или в коэффициентах роста нагрузки по отношению к нагрузке в нулевом периоде (рис. 2).

№	Наименование периода	Год	Кроста Re	Кроста Im	Рнагр кВт	Qнагр квар	tg(Ф)	cos(Ф)
0	Базовый	2013	1	1	39.8	24.7	0.62	0.85
1	Первый	2018	1.05	1.05	41.8	25.9	0.62	0.85
2	Второй	2023	1.1	1.1	43.8	27.1	0.62	0.85

Рис. 2. Таблица тренда изменения нагрузок по периодам

4. Добавлена новая сущность "Режим". Режим определяется состоянием коммутационных аппаратов сети, величинами нагрузок и генераций, положениями регуляторов отдельных устройств. Если ввести понятие "Основной планируемый режим", или "Базовый", то это режим, определяемый начальными положениями коммутационных аппаратов, заданными нагрузками, заданными генерациями и положениями регуляторов (РПН и т.п.). Каждый новый режим может образовываться из базового путем изменения состояний коммутационных аппаратов, заданием новых нагрузок, новых генераций или положений регулирующих аппаратов. Каждый новый режим может также получаться не только из базового, но и из текущего режима, то есть последнего режима, который стал результатом предыдущих действий. С одной стороны, это может сократить число действий для перехода к новому режиму, с другой — новый режим из предыдущего может быть получен с меньшими вычислительными затратами, то есть за меньшее число итераций и с большей вероятностью сходимости. Описание списка режимов и списка действий для реализации каждого режима приведено на рис. 3.

№ режима	Наименование режима	Вид исходного режима	Действия	Обозначение фидера
20	Отключен фидер Л-ЗН	Базовый	---	1-114
40	Отключен фидер 2-132	Базовый	---	1-114
90	Отключен фидер 2-77	Базовый	---	1-114
120	Отключен фидер 2-132	Базовый	---	1-114
30	Отключен фидер 1-114	Базовый	---	2-132
60	Отключен фидер 2-77	Базовый	---	2-132
110	Отключен фидер 1-114	Базовый	---	2-132
50	Отключен фидер 2-132	Базовый	---	2-77
70	Отключен фидер Л-ЗН	Базовый	---	2-77
100	Отключен фидер 1-114	Базовый	---	2-77
10	Отключен фидер 1-114	Базовый	---	Л-ЗН
80	Отключен фидер 2-77	Базовый	---	Л-ЗН

Рис. 3. Таблица со списком режимов

5. Для задания изменений параметров, определяющих режим, добавлена связанная с режимом сущность — "Действие". Произвольный режим определяется базовым режимом и конечным числом действий, приводящих схему из базового режима в заданный. Каждое действие связано с режимом и ветвью — устройством. Кроме ссылок на режим и ветвь, здесь содержится описание необходимых действий:

- отключение или включение ветви в начале и/или в конце;
- вид действия (кроме отключения): изменение нагрузки, генерации, положения регулятора, сопротивления и проводимости;
- величина примененного действия, то есть новое значение нагрузки, генерации и т.п. в виде комплексного числа. Таблица описания действий показана на рис. 4.

№ действия	Ветвь	Выключ начала	Выключ конца	Параметр	Р или Q (стар)	Q или P (стар)	Р или Q (нов)	Q или P (нов)
20.1	1	о	о	Нет	-	-	-	-
20.2	1.1	о	о	Нет	-	-	-	-

Рис. 4. Таблица действий, определяющих выбранный режим

6. Если речь идет о разомкнутых участках сети, то есть о фидерах, то множество режимов и соответствующих действий может генерироваться автоматически на основе анализа состояний коммутационных аппаратов на головных участках фидеров и резервирующих коммутационных аппаратов, связывающих смежные фидеры. Автоматически сформированное множество режимов обязательно должно быть проверено расчетчиком. Программа может найти недопустимые режимы, а также пропустить режимы, которые получаются включением и отключением более чем одного коммутационного аппарата. Для анализа множества режимов с действиями предусмотрена таблица с развернутым списком режимов (рис. 5).

7. Для моделирования коммутационных аппаратов вместо абстрактного выключателя, имеющегося в EnergyCS Режим и ТКЗ, предусмотрен объект "Коммутационный аппарат". Для коммутационного аппарата может определяться его вид, а его тип выбирается из справочника с указанием величины допустимого и коммутируемого тока, а также с параметрами, характеризую-



Список режимов (развёрнутый)										
№	Наименование режима	Вид исходного режима	Ветвь	Выключ начала	Выключ конца	Параметр	P или U (стар.)	Q или < (стар.)	P или U (нов.)	Q или < (нов.)
10	Отключён фидер 1-114	Базовый								
10.1			1:2	o	o	Нет	0	0	0	0
10.2			1:1	B	B	Нет	0	0	0	0
20	Отключён фидер Л-3Н	Базовый								
20.1			1:1	o	o	Нет	0	0	0	0
20.2			1:1	B	B	Нет	0	0	0	0
30	Отключён фидер 1-114	Базовый								
30.1			1:2	o	o	Нет	0	0	0	0
30.2			1:3	B	B	Нет	0	0	0	0
40	Отключён фидер 2-132	Базовый								
40.1			2:2	o	o	Нет	0	0	0	0
40.2			1:3	B	B	Нет	0	0	0	0
50	Отключён фидер 2-132	Базовый								
50.1			2:2	o	o	Нет	0	0	0	0
50.2			2:1	B	B	Нет	0	0	0	0
60	Отключён фидер 2-77	Базовый								
60.1			2:1	o	o	Нет	0	0	0	0
60.2			2:1	B	B	Нет	0	0	0	0
70	Отключён фидер Л-3Н	Базовый								
70.1			1:1	o	o	Нет	0	0	0	0
70.2			72:2	B	B	Нет	0	0	0	0
80	Отключён фидер 2-77	Базовый								
80.1			2:1	o	o	Нет	0	0	0	0
80.2			72:2	B	B	Нет	0	0	0	0

Рис. 5. Развернутый список всех режимов и определяющих их действий

Коммутационные аппараты										
Номера узлов	Узел начала	Узел конца	Обозначение	Вид	Тип	Уном кВ	Ином А	Юткл кА	Идин кА	Итерм кА
543.1–542.2	Ив-10 1с	Ив-10 2с	В-101	Выключатель	-	-	-	-	-	-
544.1–543.2	Ив-10 3с	Ив-10 1с		Выключатель	-	-	-	-	-	-
546.2–547.2	РП-17 1с	РП-17 2с	В-101	Выключатель	-	-	-	-	-	-
548.2–549.1	772 2с	772 1с		Выключатель	ВКЗ-10	10	1600	31.5	300	0
550.2–551.1	880 2с	880 1с	В-101	Выключатель	ВВТЭ	10	1600	20	52	0
562.2–563.1	603 2с	603 1с		Выключатель	ВКЗ-10	10	1600	31.5	300	0
564.2–565.1	928 2с	928 1с	В-101	Выключатель	-	-	-	-	-	-
569.2–568.2	РП-15 2с	РП-15 1с		Выключатель	-	-	-	-	-	-
570.2–571.1	231 2с	231 1с	В-101	Выключатель	-	-	-	-	-	-
				Выключатель	-	-	-	-	-	-

Рис. 6. Параметры коммутационных аппаратов схемы

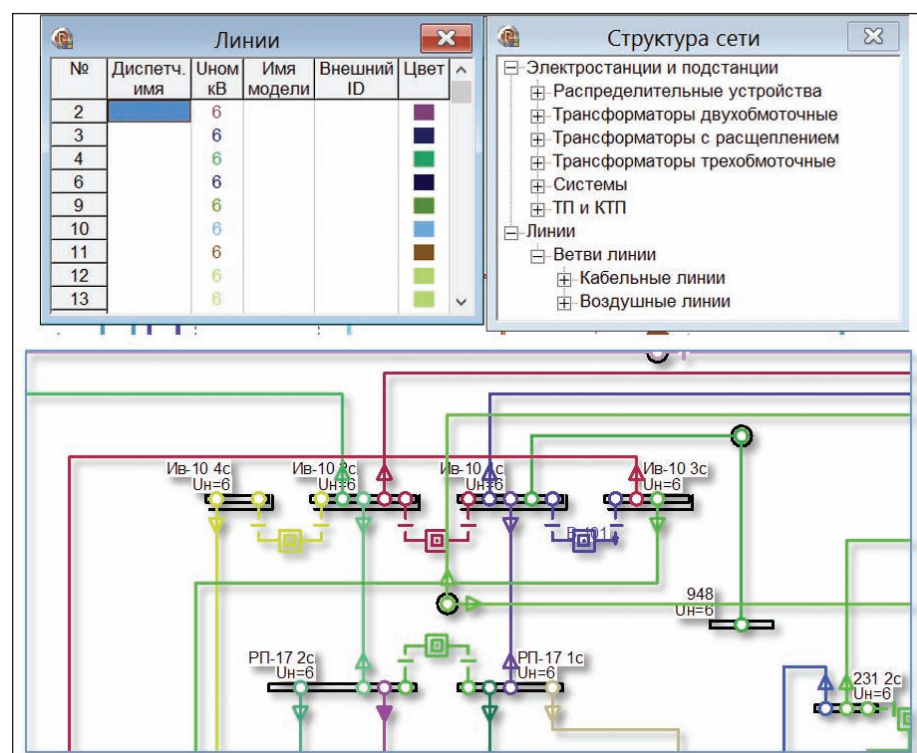


Рис. 7. Линии электропередач с их диспетчерскими обозначениями и ссылками на внешние модели и ГИС

щими его термическую и динамическую стойкость (рис. 6).

8. На схеме совокупность последовательно соединенных коммутационных аппаратов образует ячейку. Она ассоциируется с ветвью нулевого сопротивления. Очевидно, что цепочка нулевых сопротивлений имеет нулевое сопротивление. Ячейка соответствует расчетной ветви. Отключенное состояние ячейки будет задано отключением любого аппарата. А включенное соответствует включению всех элементов.

9. Линия в программах прежних версий представлялась одним топологическим участком, который имел множество конструктивных участков, выполненных кабельными или воздушными линиями либо токопроводами. Этот подход имел недостаток — линию нельзя было обозначить так, как ее понимают диспетчеры: как часть схемы, состоящую из участков линий и включающую и отключающую как единое целое — примером является линия с отпайками (очень похоже на фидер, но фидер — более широкое понятие). Теперь эта проблема устранена. Введено понятие "Линия". Линии может быть присвоено диспетчерское обозначение. Она может состоять из множества топологических участков, каждый из которых является расчетной ветвью и может, в свою очередь, состоять из множества конструктивных участков. Ввод последних осуществляется так же, как и ввод любого другого объекта схемы. При этом происходит автоматическое определение топологических участков и линий в целом. В расчете конструктивные участки формально объединяются до топологических участков, которые рассматриваются как ветви. Выделение диспетчерских линий и их топологических участков выполняется автоматически. Линии рассматриваются как суперобъекты сложной конфигурации и могут иметь свое обозначение, ссылку или привязку к ГИС. При автоматическом выделении цвета назначаются случайно, но затем их можно настроить вручную. Пример схемы с раскрашенными линиями и таблицей линий приведен на рис. 7. Необходимо отметить, что при определении конструктивных участков на их стыках появляются узлы, которые во время расчета в расчетную модель не включаются. Лишние надписи с результатами расчета на конструк-

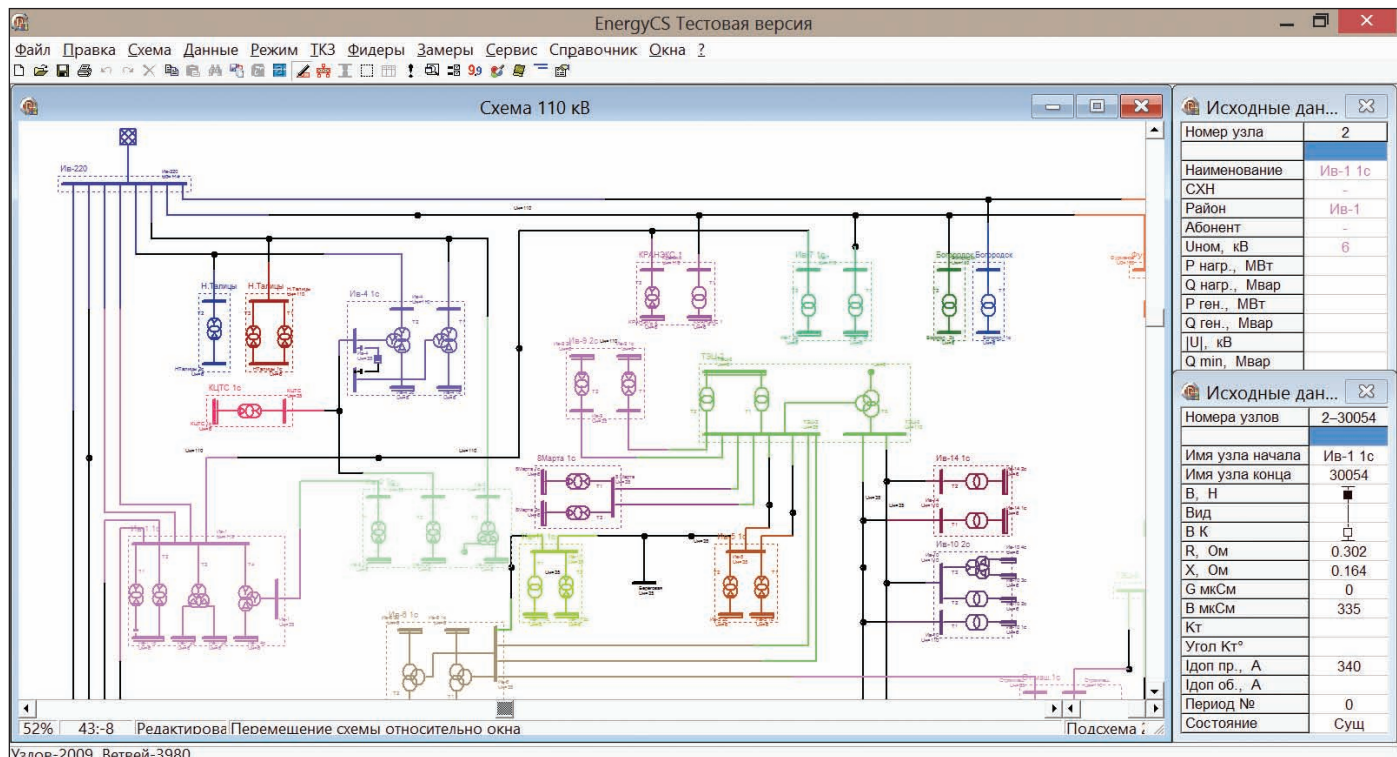


Рис. 8. Расцветка схемы по подстанциям и формальное выделение подстанций на схеме рамками с надписями

Электростанции и подстанции									
№	Диспетч. имя	Классы U, кВ	Кол-во транс.	Кол-во линий	Вид ЭС	Имя модели	Внешний ID	Цвет	
1	Ив-1 1с	110/35/6	8	26	ПС				
2	АКД-1с	6	0	3	ПС				
3	Шв.з-д 1с	6	0	2	ПС				
4	721 2с	6	0	3	ПС				
5	121	6	0	2	ПС				
6	797 1с	6	0	2	ПС				
7	297	6	0	3	ПС				
8	636	6	0	2	ПС				
9	823	6	0	2	ПС				
10	409	6	0	2	ПС				

Структура сети									
Электростанции и подстанции									
Распределительные устройства									
Коммутационные ячейки									
Трансформаторы двухобмоточные									
10003:2-30044:1   T2									
10005:2-30043:1   T1									
10005:3-30043:2   T3									
10009:6-2:6   T1									
10009:9-2:1   T2									
10014:2-30041:1									
10015:2-30042:1   T2									

Рис. 9. Список подстанций с настройкой внешней информации

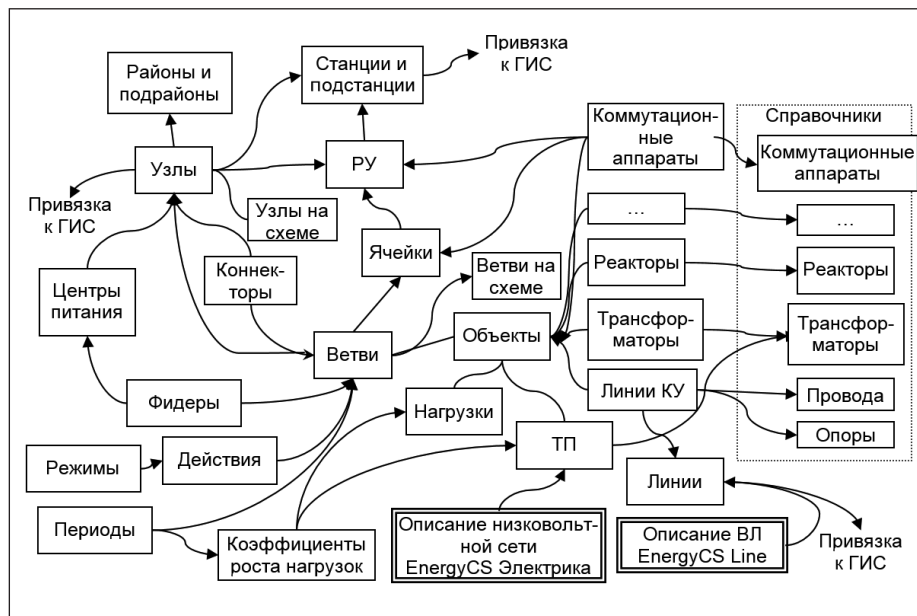


Рис. 10. Отношения между сущностями модели

тивных участках одного топологического участка также не формируются.

10. Совокупность станционного оборудования, отраженного в модели, соответствует подстанции или электростанции. Обычно необходимо ввести общее обозначение для подстанции. Добавлена новая сущность — "Подстанция". Она имеет два основных параметра: наименование и обозначение. По этим параметрам можно группировать результаты расчетов и отображать наименование и обозначение подстанции на схеме, а при необходимости очертить рамками оборудование каждой подстанции (рис. 8). Группировка объектов по подстанциям может осуществляться автоматически по специальной команде. При этом автоматически формируется список подстанций. Следует сказать, что подстанция — это устройство, отображаемое на карте, и в данных о подстанциях предусматривается внешний ID, связывающий изображение на схеме с данными ГИС и другими моделями, отображающими иные аспекты подстанции, например, компоновку РУ и ее детальную схему (рис. 9).

Структура информационной модели программного комплекса EnergyCS в виде упрощенного представления отношений между сущностями, моделируемы-



ми в программе, приведена на рис. 10. Произведенные изменения модели позволяют решать новые задачи, связан-

ные с проектированием электрических сетей. Так, например, для модели, содержащей два центра питания и по два

фидера, отходящих от каждого ЦП, можно выполнить анализ существующей схемы во времени, то есть по периодам развития, и построить таблицу параметров режимов фидеров с учетом роста нагрузок, но без учета реконструкции (рис. 11). Аналогично можно получить сводную таблицу для множества послеаварийных режимов с учетом роста нагрузок, но без учета реконструкции (рис. 12).

В результате реконструкции в схему сети вносятся изменения, и анализ основных и послеаварийных режимов даст другие результаты, приведенные на рис. 13 и 14.

Если анализ схемы показывает функциональную работоспособность сети, то с технической точки зрения приняты правильные решения. Далее остается осуществить документирование внесенных в модель изменений и расчет ожидаемых затрат на внесение принятых изменений. Такие отчеты на основании полной модели также формируются автоматически. Однако на самом деле не все так просто. Конечно, программа способна просмотреть все множество возможных режимов, автоматически выполнить все необходимые расчеты и сформировать итоговые документы, но это будет лишь формальный анализ и исключительно на основе введенной информации. В этом случае роль расчетчика, его ответственность значительно повышается. При существенном снижении объема рутинной, простой работы возникает задача интеллектуального анализа рассматриваемых моделей и, возможно, отбраковки и исключения невозможных режимов уже на уровне исполнителя. То есть применение программы, с одной стороны, значительно повышает производительность труда проектировщика, а с другой — предъявляет более высокие требования к проектировщику-исполнителю.

*Николай Ильичев,  
главный специалист CSoft Иванова,  
к.т.н., доцент*

*Елена Ильичева,  
инженер*

*Кирилл Шеринев,  
инженер-программист*

*CSoft Иванова  
Тел.: (4932) 26-9655*

Нормальные режимы с учётом нагрузок															
Правка Печать Закрыть		Номера узлов	Обозначения	L(n) км	Sr(n) кВА	dUmax(n) %	dP(n) кВт	L(n) км	Sr(n) кВА	dUmax(n) %	dP(n) кВт	L(n) км	Sr(n) кВА	dUmax(n) %	dP(n) кВт
		1	1												
		1-97	Л-3Н	10.723	473.361	2.71	11.7302	10.723	473.361	2.71	11.7302	10.723	473.361	2.71	11.7302
		1-114	1-114	1.791	221.91	0.31	2.89703	1.791	221.91	0.31	2.89703	1.791	221.91	0.31	2.89703
		Всего по ЦП			695.272										
		2	2												
		2-77	2-77	1.55	404.123	0.34	3.20405	1.55	404.123	0.34	3.20405	1.55	404.123	0.34	3.20405
		2-132	2-132	12.39	249.654	3.55	8.6824	12.39	249.654	3.55	8.6824	12.39	249.654	3.55	8.6824
		Всего по ЦП			653.777										

Рис. 11. Анализ режимов существующей сети с учетом естественного роста нагрузок

Послеаварийные режимы с учётом нагрузок														
Правка	Печать	Закрыть												
Номера узлов	Обозначения	Наименование режима	L(n) км	Sr(n) кВА	dUmax(n) %	dP(n) кВт	L(n) км	Sr(n) кВА	dUmax(n) %	dP(n) кВт	L(n) км	Sr(n) кВА	dUmax(n) %	dP(n) кВт
1	1													
1-97	Л-3Н	Отключён фидер 1-114	10.723	473.361	2.71	11.7302	10.723	473.361	2.71	11.7302	10.723	473.361	2.71	11.7302
1-97	Л-3Н	Отключён фидер 2-77	11.903	893.8	3.80	28.8077	11.903	893.8	3.80	28.8077	11.903	893.8	3.80	28.8077
1-114	1-114	Отключён фидер Л-3Н	1.791	221.91	0.31	2.89703	1.791	221.91	0.31	2.89703	1.791	221.91	0.31	2.89703
1-114	1-114	Отключён фидер 2-132	1.791	221.91	0.31	2.89703	1.791	221.91	0.31	2.89703	1.791	221.91	0.31	2.89703
1-114	1-114	Отключён фидер 2-77	2.971	623.589	1.53	11.1171	2.971	623.589	1.53	11.1171	2.971	623.589	1.53	11.1171
1-114	1-114	Отключён фидер 2-132	13.699	463.227	1.49	7.60001	13.699	463.227	1.49	7.60001	13.699	463.227	1.49	7.60001
2	2													
2-77	2-77	Отключён фидер 2-132	1.55	404.123	0.34	3.20405	1.55	404.123	0.34	3.20405	1.55	404.123	0.34	3.20405
2-77	2-77	Отключён фидер Л-3Н	10.953	879.877	2.87	16.7	10.953	879.877	2.87	16.7	10.953	879.877	2.87	16.7
2-77	2-77	Отключён фидер 1-114	2.991	619.235	0.81	7.62245	2.991	619.235	0.81	7.62245	2.991	619.235	0.81	7.62245
2-132	2-132	Отключён фидер 1-114	12.39	249.654	3.55	8.6824	12.39	249.654	3.55	8.6824	12.39	249.654	3.55	8.6824
2-132	2-132	Отключён фидер 2-77	12.39	249.654	3.55	8.6824	12.39	249.654	3.55	8.6824	12.39	249.654	3.55	8.6824
2-132	2-132	Отключён фидер 1-114	13.631	497.124	8.08	35.8484	13.631	497.124	8.08	35.8484	13.631	497.124	8.08	35.8484

Рис. 12. Анализ послеаварийных режимов для множества сгенерированных конфигураций послеаварийных режимов

Нормальные режимы с учётом развития												
Правка Печать Закрыть												
Номера узлов	Обозначения	L(n1) км	Sr/Strp(n1)	Sr(n1) кВА	dUmax(n1) %	dP(n1) кВт	L(n2) км	Sr/Strp(n2)	Sr(n2) кВА	dUmax(n2) %	dP(n2) кВт	
1	1											
1-97	Л-3Н	10.723	0.253677	473.361	2.71	11.7302	10.723	0.253677	473.361	2.71	11.7302	
1-114	1-114	1.791	0.69347	221.91	0.31	2.89703	1.791	0.69347	221.91	0.31	2.89703	
Всего по ЦП.		12.514		695.272			12.514		695.272			
2	2											
2-77	2-77	1.55	0.424054	404.123	0.34	3.20405	1.55	0.424054	404.123	0.34	3.20405	
2-132	2-132	12.39	0.392538	249.654	3.55	8.6824	12.39	0.392538	249.654	3.55	8.6824	
Всего по ЦП.		13.94		653.777			13.94		653.777			

Рис. 13. Анализ нормальных режимов с учетом естественного роста нагрузок и изменений в схеме в результате ее развития

Послеаварийные режимы с учётом развития						
Номера узлов	Обозначения	Наименование режима	Sp(n1) кВА	Потери(n1) У%	Sp(n2) кВА	Потери(n2) У%
1	1					
1-97	Л-3Н	Отключён фидер 1-114	473.361	2.71	473.361	2.71
1-97	Л-3Н	Отключён фидер 2-77	893.8	3.80	893.8	3.80
1-114	1-114	Отключён фидер Л-3Н	221.91	0.31	221.91	0.31
1-114	1-114	Отключён фидер 2-132	221.91	0.31	221.91	0.31
1-114	1-114	Отключён фидер 2-77	623.589	1.53	623.589	1.53
1-114	1-114	Отключён фидер 2-132	463.227	1.49	463.227	1.49
2	2					
2-77	2-77	Отключён фидер 2-132	404.123	0.34	404.123	0.34
2-77	2-77	Отключён фидер Л-3Н	879.877	2.87	879.877	2.87
2-77	2-77	Отключён фидер 1-114	619.235	0.81	619.235	0.81
2-132	2-132	Отключён фидер 1-114	249.654	3.55	249.654	3.55
2-132	2-132	Отключён фидер 2-77	249.654	3.55	249.654	3.55
2-132	2-132	Отключён фидер 1-114	497.124	8.08	497.124	8.08

Рис. 14. Анализ послеаварийных режимов по периодам с учетом реконструкций