

## РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ГрафИн

Описывается программа расчета установившегося режима электрических сетей на основе метода поочередного уточнения потокораспределения и напряжений с использованием геоинформационных технологий. Кратко описываются используемые структуры данных и интерфейс программы.

Проблема расчета установившегося режима является базовой в задачах проектирования, эксплуатации и развития электрических сетей. Существуют различные методы, позволяющие решать данную задачу в той или иной мере. Наиболее распространенными являются модели, в основу которых положено решение уравнений балансов мощности методом Ньютона – Рафсона и его модификации [1]. Однако все известные варианты обладают различными недостатками, мешающими их полноценному широкому применению:

- отсутствует контроль существования математического решения задачи;
- отсутствует управление итерационным процессом для удержания результатов итераций в области притяжения к физически правильному математическому решению;
- слабо представлена графическая часть, не позволяющая широко использовать графовые модели изображаемых сетей.

В настоящее время все больше используются комплексные системы, совмещенные с геоинформационными системами (ГИС) и позволяющие отображать различные коммуникации не только схематично, но и на плане местности.

В данной работе представлены результаты разработки и реализации программы расчета установившегося режима электрических сетей на основе метода поочередного уточнения потокораспределения и напряжений как наиболее эффективного для электрических сетей с радиальной структурой и малым количеством контуров, что встречается наиболее часто на практике [2].

### Модель электрической сети

Исходной информацией для расчета режима электрической сети является графическое изображение однолинейной оперативной схемы и атрибутивное описание элементов, участвующих в передаче электрической энергии (ЛЭП, силовых трансформаторов, токоограничивающих реакторов), и элементов, участвующих в управлении режима (батареи статических конденсаторов – БСК, шунтирующие реакторы). В разработанной программе возможны следующие варианты модели учета электрических нагрузок:

- отбор активной и реактивной мощностей;
- статические характеристики мощностей по напряжению;
- суточные графики мощностей.

Расчетная модель сети формируется в виде графа, у которого вершинам ставится в соответствие следующая информация:

- $U_i$  – модуль заданного напряжения;
- $\dot{Y}_{i0}$  – комплексная проводимость на шину нулевого потенциала, включающая поперечные проводимости ЛЭП, силовых трансформаторов, проводимости шунтирующего реактора или БСК, присоединенных к узлу;

–  $P_i Q_i$  – активная и реактивная составляющие мощности потребляемой энергии, которые могут быть также представлены в виде функций напряжения  $U_i$ .

Ветви графа представляются комплексными сопротивлениями  $Z_{ij}$  и идеальной трансформацией силовых трансформаторов. На рис. 1 представлен пример обобщенной вершины графа с примыкающими ребрами. Ребра с трансформациями напряжений и токов имеют сопротивления, приведенные к сторонам высокого напряжения.

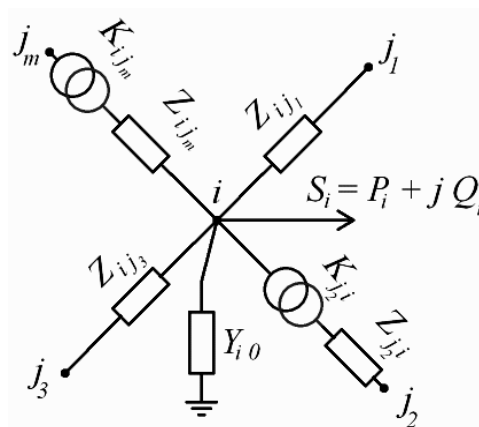


Рис. 1. Модель электрической сети

Условно алгоритм расчета установившегося режима можно представить в виде последовательности следующих шагов. Предполагается, что электрическая схема задана, а также определена вершина графа, являющаяся базисным и балансирующим узлом по мощности (базисный узел).

Шаг 1. Выполняется сортировка всех вершин графа, в результате которой в начале списка вершин оказывается базисный узел, затем все смежные с ним вершины, затем смежные со смежными и т.д.

Шаг 2. Осуществляется уточнение токораспределения, проходя по всем вершинам списка в обратном порядке, заканчивая в базисном узле.

Шаг 3. Осуществляется уточнение напряжений, проходя по всем вершинам списка в прямом порядке, начиная с базисного узла.

Шаг 4. Имитируется работа технических средств регулирования напряжения для обеспечения заданных уровней напряжения на шинах потребителей энергии.

Шаг 5. Проверяется достигнутая точность расчета. Если она не достигнута, то переходим к шагу 2.

Для повышения удобства применения и надежности алгоритма в программе предусмотрены до-

полнительные функции.

1. Выделение рассчитываемой части сети.

Эта функция необходима, поскольку часто бывает целесообразно рассчитывать режим не всей сети энергосистемы, а только какой-то ее части

Выделение осуществляется автоматически с учетом состояния коммутаторов (включено/выключено). Для этого достаточно имитировать указанное состояние соответствующих коммутаторов. Предоставляется также возможность дополнения сети новыми объектами. Для этого достаточно создать их графическое изображение и ввести значения атрибутов.

2. Контроль отсутствия решения задачи.

Известно, что любой ветви электрической сети соответствуют предельные значения мощностей передаваемой энергии [3]. Они определяются напряжением на входе и сопротивлением ветви.

Если в процессе расчета создается ситуация, при которой хотя бы для одной ветви формируется необходимость передачи энергии мощностью, превышающей предельное значение, то решение задачи в целом не существует.

Такие ситуации могут возникать в процессе формирования структуры рассчитываемой сети (наложение нескольких послеаварийных ситуаций) и в результате ошибок при вводе исходной информации. На стадии уточнения потокораспределения для каждого узла сети делается проверка возможности передачи сформировавшегося потока энергии по примыкающим ветвям.

В случаях, когда потоки оказываются выше предельных значений, выполняется коррекция узловых потоков  $S_i$ , и расчет продолжается. По окончании расчета выдается сообщение о том, в каких узлах и насколько были изменены узловые мощности. Это позволяет расчетчику быстро найти причину отсутствия решения задачи в исходной постановке.

3. Улучшение условий сходимости.

При условии существования решения, для схем, имеющих радиальную структуру без контуров, сходимость обеспечивается за 1 итерацию.

Для схем, содержащих контуры, на сходимость большое влияние оказывает наличие узлов, к которым примыкают ветви с существенно отличными друг от друга модулями сопротивлений. Например, у автотрансформаторов и трехобмоточных трансформаторов для узлов – средних точек их трехлучевых моделей – такими ветвями, как правило, являются лучи, моделирующие обмотки средних напряжений, сопротивления которых близки к нулю. Кроме того, встречаются ветви, моделирующие участки ЛЭП малой протяженности.

Для ветви с малым сопротивлением даже небольшие перепады напряжений обуславливают большие потоки мощности. Это приводит к колебательному характеру процесса уточнения потокораспределения и, как следствие, к увеличению числа итераций, а иногда и к расходимости итерационного процесса. Для преодоления этой трудности предусмотрены два специальных алгоритмических приема.

Первый заключается в том, что ветви с малыми сопротивлениями заменяются двумя ветвями с до-

полнительным узлом так, чтобы их суммарное сопротивление равнялось исходному сопротивлению ветви. Вторым приемом является демпфирование на итерациях колебаний потокораспределения.

4. Обеспечение физически правильного математического решения.

В силу нелинейности соотношений параметров в выражениях потоков мощностей существует несколько математических решений задачи.

В алгоритме программы на стадии уточнения потокораспределения на итерациях контролируются и при необходимости редактируются соотношения параметров ветви с целью обеспечения их физической реализуемости. Это приводит к удержанию итераций в области правильного математического решения.

Решение задачи считается завершенным, если напряжения в узлах нагрузок достаточно близки к заданным значениям. Для обеспечения этого условия на итерациях осуществляется имитация работы технических средств регулирования напряжения – регуляторы переменного напряжения (РПН) силовых трансформаторов, БСК [3]. Перечисленные степени свободы используются поочередно по классам напряжений.

Так, например, для сетей 220 кВ в качестве степеней свободы используются коэффициенты трансформации трансформаторов, связывающих сеть 220 кВ с сетью 500 кВ. Критериями использования степеней свободы являются характер отклонения напряжений на выходах ЛЭП 220 кВ и чувствительность этих напряжений к регулируемому воздействию коэффициентов трансформации силовых трансформаторов.

## Основные типы данных

ГИС ГрафИн 4.0 предоставляет богатые функциональные возможности для создания карт и чертежей, в частности схем электросетей (рис. 2), а также позволяет использовать удобную встроенную графовую модель представления данных [4].

Данные об электрической схеме хранятся в ГИС ГрафИн 4.0 в слое чертежа специального вида. Для его создания необходимо выбрать в меню системы ГИС пункт Слои | Создать новый слой | Слои чертежа, а затем выбрать в появившемся окне тему «Электрические сети».

В программе для расчетов режимов поддерживается ряд типов исходных данных, позволяющих моделировать энергосистему в полном объеме. Рассмотрим основные типы.

1. Линия электропередачи. Линии электропередачи характеризуются номинальным напряжением  $U_{ном}$  и моделируются последовательностью участков воздушного или кабельного исполнения. Участки имеют следующие параметры:

- $R_0, X_0$  – погонное активное и реактивное сопротивление;
- $G_0, B_0$  – погонная активная и ёмкостная проводимости;
- $L$  – длина участка.

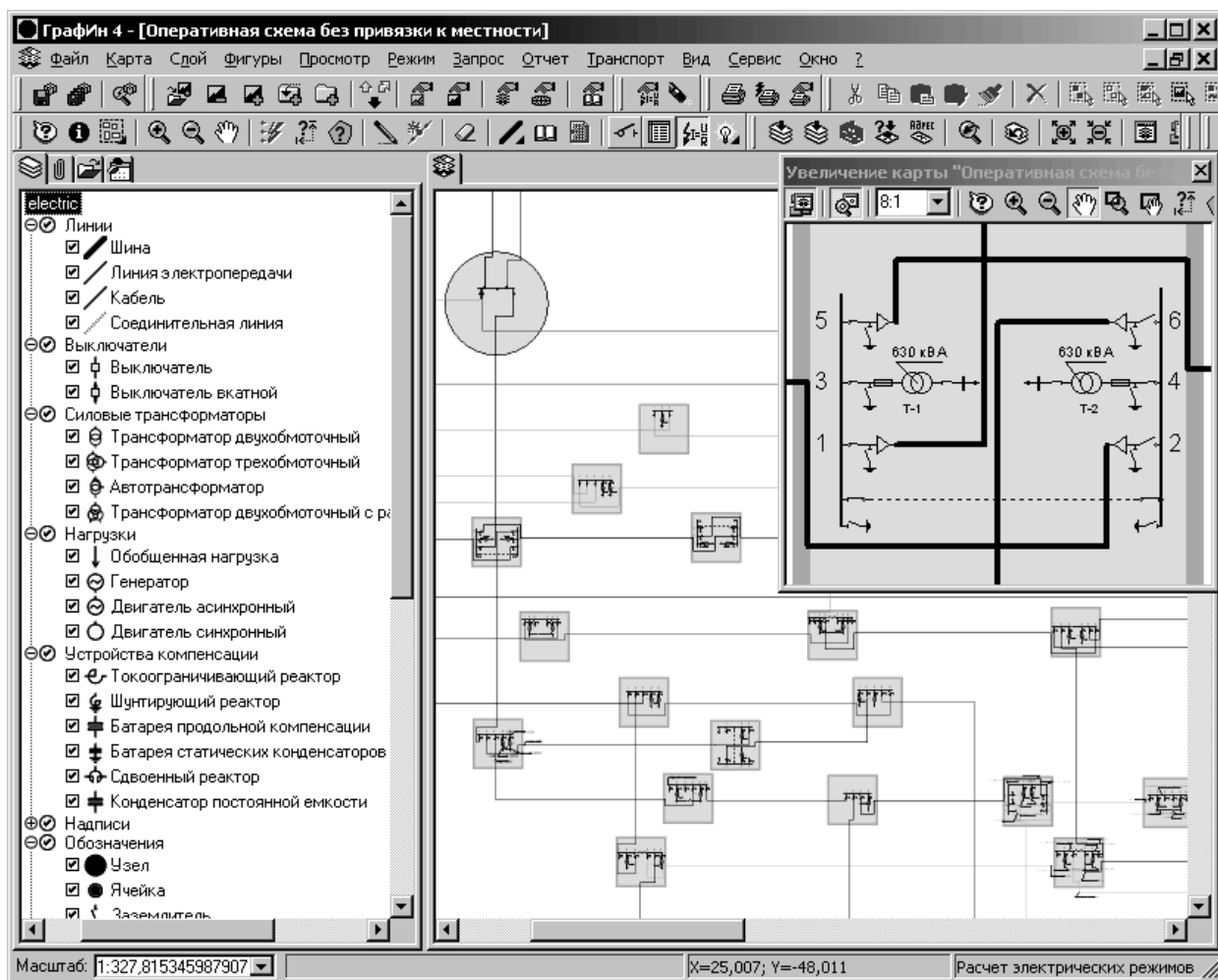


Рис. 2. Представление схемы электрической сети в ГИС Графин 4.0

На рис. 3 приведен пример диалогового окна, позволяющего ввести эти параметры. Для упрощения ввода данных в программе предусмотрен

справочник кабелей, содержащий большинство современных применяемых на практике видов кабелей (рис. 4).

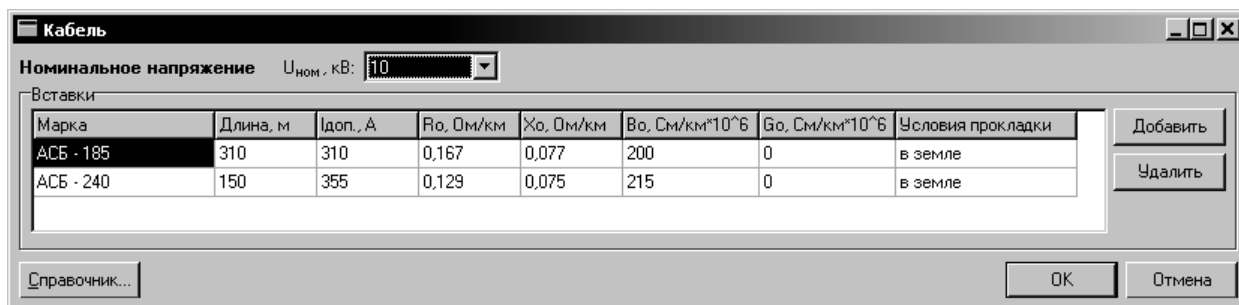


Рис. 3. Ввод данных по кабелям

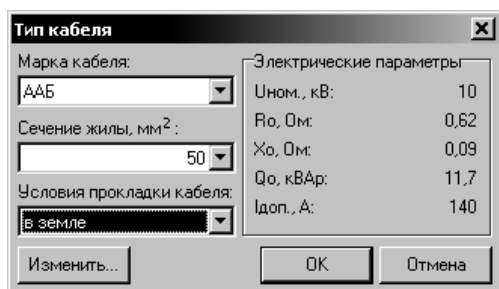


Рис. 4. Справочник кабелей

2. Соединительная линия. Электрическим сопротивлением и другими электрическими характери-

стиками не обладает и используется для соединения секций трансформаторных подстанций, а также в некоторых других случаях.

3. Шина. Используется в основном для обозначения секций трансформаторных подстанций, электрических характеристик не имеет. В отличие от соединительных линий имеет не два контакта на концах, а является сплошным контактом.

4. Коммутаторы. В данную группу входят различные выключатели, разъединители и переключки. Все эти элементы не имеют электрических характеристик и работают как соединительные линии (в случае, если выключатели находятся во включенном положении).

5. Двухобмоточные силовые трансформаторы обладают следующими параметрами (рис. 5):

- $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора;
- $R, X$  – активное и реактивное сопротивление;
- $U_{нв}, U_{нн}$  – номинальные высокое и низкое напряжения;
- $\Delta P_{xx}, \Delta Q_{xx}$  – потери холостого хода;

Рис. 5. Ввод данных двухобмоточного трансформатора

–  $K_T, \psi_T$  – модуль и фазовый угол коэффициента трансформатора ( $K_T > 1$ ).

6. Трехобмоточные силовые трансформаторы и автотрансформаторы имеют следующие параметры (рис. 6):

- $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора;
- $U_{нв}, U_{нс}, U_{нн}$  – номинальные высокое, среднее и низкое напряжения;
- $R_b, X_b, R_c, X_c, R_n, X_n$  – активное и реактивное сопротивления на высокой, средней и низкой сторонах трансформатора;
- $\Delta P_{xx}, \Delta Q_{xx}$  – потери холостого хода;
- $K_{твс}, \psi_{твс}, K_{твн}, \psi_{твн}$  – модули и фазовые углы коэффициентов трансформации между высокой и средней, высокой и низкой сторонами.

Для упрощения ввода данных по всем видам трансформаторов имеются справочники трансформаторов. В этих справочниках кроме всего прочего содержится также информация о числе и проценте отпаек. Это позволяет автоматизировать процесс выбора коэффициента трансформации, для чего предназначен соответствующий диалог, появляющийся при нажатии кнопки «Установка  $K_T$ » (рис. 7–8).

Рис. 6. Ввод данных трехобмоточного трансформатора

Рабочее положение	Уотп. в, кВ
1	108,86
2	110,91
3*	112,95
4	115,00
5	117,05
6	119,09
7	121,14
8	123,19
9	125,23
10*	127,28
11	129,33
12	131,38
13	133,43
14	135,48
15	137,53

Рис. 7. Выбор коэффициента трансформации

7. Обобщенная нагрузка. В зависимости от способа учета нагрузки, который задается в диалоге настройки программы расчета режимов, используются следующие параметры:

№	Тип	$S_{ном}$ , МВА	$U_{ном. в}$ , кВ	$U_{ном. с}$ , кВ	$U_{ном. н}$ , кВ	$dP_{xx}$ , кВт	$U_{квс}$ , %	$U_{квн}$ , %	$U_{ксн}$ , %	$S_{ном. с}$ , %	$S_{ном. н}$ , %	$k_{xx}$ , %
12	TMTN	16	36,73	13,8	6,3	23	8	17	7,5	100	100	0,65
13	TMTN	16	36,73	15,75	6,6	23	8	17	7,5	100	100	0,65
14	TMTN	10	36,75	10,5	6,3	18	16,5	8	7,2	100	100	0,85
15	TMTN	6,3	115	22	6,6	14	10,5	17	6	100	100	1,2
16	TMTN	6,3	115	38,5	11	14	10,5	17	6	100	100	1,2

Рис. 8. Справочник трехобмоточного трансформатора

- $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение;
- $P_{\text{max}}, Q_{\text{max}}, P_{\text{min}}, Q_{\text{min}}$  – максимальные и минимальные активные и реактивные мощности. Предусмотрено представление информации о нагрузке токами ввода низкой стороны силового трансформатора, которые потом для расчетов преобразуются в мощности с заданными коэффициентами мощности ( $I_A, I_B, I_C, \cos \varphi$ );
- $a_p, b_p, a_q, b_q$  – коэффициенты статической характеристики нагрузки по напряжению;
- суточный график нагрузки с настраиваемым интервалом дискретности.

Рис. 9. Ввод данных нагрузки

На рис. 9 приведен пример диалогового окна, позволяющего ввести эти параметры. Для упрощения ввода данных в программе предусмотрен справочник наиболее распространенных типов нагрузок (рис. 10).

№	Тип потребителя	Интервал времени
1	Жилый дом с электрическими плитами	2 часа
2	Жилый дом с газовыми плитами	1 час
3	Дом быта	30 минут

Рис. 10. Справочник типов нагрузок

8. *Устройства компенсации.* Установки продольной компенсации, токоограничивающие и шунтирующие реакторы, батареи статических конденсаторов имеют параметры:

- $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение;
- $S_{\text{ном}}$  или  $Q_{\text{ном}}$  – номинальная мощность;
- $R$  – активное сопротивление;
- $X$  – реактивное сопротивление.

9. *Узел.* Устанавливается в узлах схемы с заданными напряжениями и имеет только один параметр  $U$  – номинальное напряжение данного узла.

10. *Ячейка.* Устанавливается на шинах подстанций и является корневой вершиной разомкнутых подсхем – отходящих фидеров. Это позволяет произвести окрашивание линий, входящих в состав фидера, определенным цветом для повышения наглядности схемы.

11. *Надписи и обозначения.* Служат для подписывания различных объектов. Некоторые могут быть настроены на отображение значений исходных или расчетных параметров описанных выше элементов.

После создания изображения электрической схемы и занесения необходимых параметров элементов можно приступить к выполнению расчетов.

Для этого необходимо выбрать в ГИС ГрафИн режим расчета режимов и указать на карте базисный узел. После этого будут выполнены все необходимые расчеты, на экране появится окно с результатами расчета, на разных страницах которого можно получить сводную информацию и отдельную по всем узлам и ветвям электрической сети (рис. 11). Кроме того, часть рассчитанной информации будет выведена на все установленные в схеме полочки. На полочки около концов линий выдаются значения потоков мощности в направлении от ближайшего узла, а состав данных полочек узлов и середин ветвей задается в настройках.

Параметр	Значение
Метод расчета:	двухэтапный
Начальные приближения для фазовых углов:	не вычислялись
Число итераций:	24
Достигнутая точность по напряжениям, %:	0,1
Достигнутая точность по фазовым углам, %:	0,1
Изменение нагрузок:	нет
Суммарные потери в линиях электропередачи:	
потери активной мощности dPл, кВт:	34,372
потери реактивной мощности dQл, кВАр:	15,341
потери на корону dPкор, кВт:	0,000
генерация линий dQс, кВАр:	661,125
Суммарные потери в обмотках трансформаторов:	
потери активной мощности dPт, кВт:	54,185
потери реактивной мощности dQт, кВАр:	190,459
активные потери холостого хода dPхх, кВт:	74,774
реактивные потери холостого хода dQхх, кВАр:	810,669
Суммарные потери в сети:	
потери активной мощности dPсумм, кВт:	163,331
потери активной мощности dPсумм, %:	2,279
потери реактивной мощности dQсумм, кВАр:	1677,593
Суммарная потребляемая в сети мощность:	
активная мощность Pсумм, кВт:	7001,903
реактивная мощность Qсумм, кВАр:	2420,118

Рис. 11. Результаты расчета установившегося режима

Для управления различными параметрами алгоритма расчета и вывода итоговой информации можно вызвать диалог настройки программы расчетов режимов, представленной в виде двух страниц (рис. 12–13).

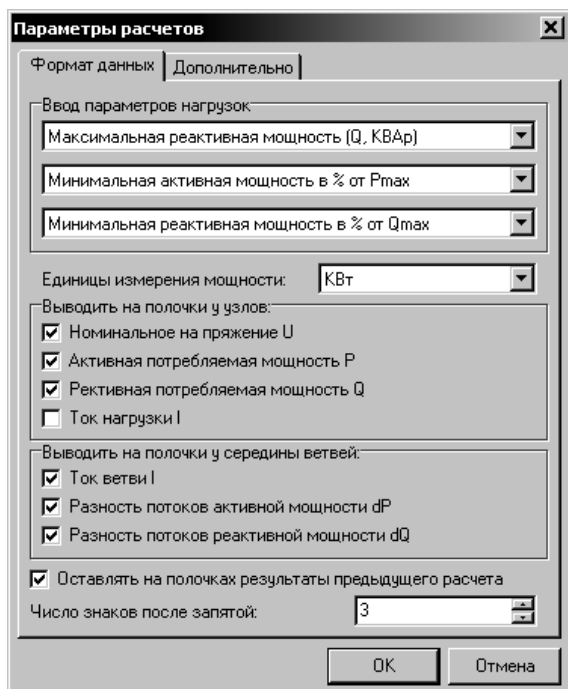


Рис. 12. Форматы входных и выходных данных

При задании способа учета нагрузок в узлах электрической сети возможны следующие варианты.

«Отбор мощности в узлах» означает, что в качестве значений потребляемой мощности будут браться максимальные значения нагрузок. Если выбран пункт «Статические характеристики по напряжению», то в качестве номинальных значений нагрузки будут использоваться максимальные значения, и при выполнении расчетов значения нагрузок будут пересчитываться для измененных на итерациях напряжений. Причем если в каких-либо нагрузках не будут заданы индивидуальные коэффициенты статических характеристик, то для этих нагрузок будут использованы типовые статические характеристики для данных классов напряже-

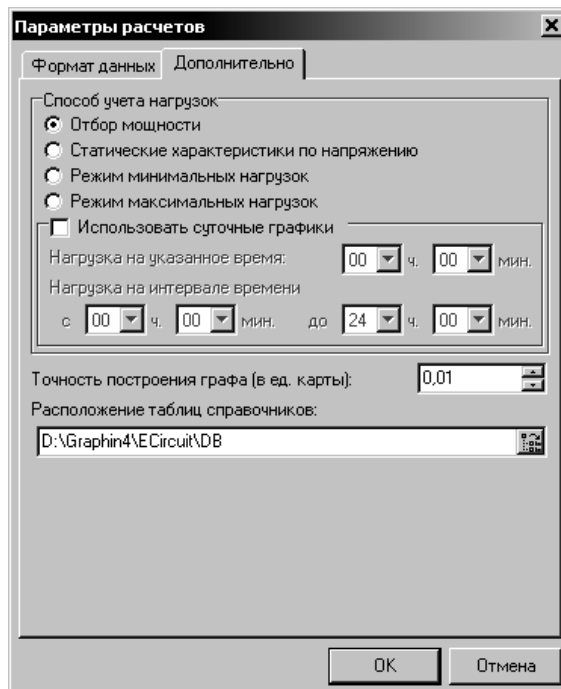


Рис. 13. Дополнительные параметры расчетов

ний. Статические характеристики можно также использовать совместно с суточными графиками. В этом случае в качестве номинальных нагрузок будут взяты значения нагрузок, заданных в суточных графиках.

В режиме минимальных или максимальных нагрузок с использованием суточных графиков в качестве значений потребляемой мощности берутся соответственно минимальные или максимальные значения нагрузок на заданном промежутке времени.

При некорректно заданной исходной информации дополнительно выдается сообщение с указанием узлов, в которых были изменены узловые мощности, показывая тем самым, что с исходными их значениями режим не существует.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Идельчик В.И. Расчет установившихся режимов электрических систем. М.: Энергия, 1977. 192 с.
2. Слюсаренко С.Г. Модификация алгоритма расчета установившихся режимов электрических систем на основе поочередного уточнения потокораспределения и напряжений // Процессы и режимы электрических систем. 1990. С. 37–43.
3. Бабкевич Г.Г. Алгоритм оперативной коррекции напряжений в узлах электрической сети с использованием регулируемых трансформаторов связи // Энергетика. 1991. № 7.
4. Сворцов А.В. Геоинформационная система ГрафИн 4.0 и ее применения // Наст. журн.

Статья представлена НПО «Сибгеоинформатика» и кафедрой теоретических основ информатики факультета информатики Томского государственного университета, поступила в научную редакцию номера 3 декабря 2001 г.