

УДК 621.311.1

ДЕРЗСКИЙ В. Г., доктор технических наук, старший научный сотрудник

e-mail: trega@ukr.net

СКИБА В. Ф., инженер

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины, г. Киев.

ЭКСПЕРТНО-МОДЕЛИРУЮЩАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ЭКСПРЕСС-ЭНЕРГОАУДИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОБЛЭНЕРГО

Предлагается инструментарий (методика, алгоритм, программные средства) экспресс-энергоаудита электрических сетей облэнерго.

Ключевые слова: *эксперт, энергоаудит, компьютерная программа, многоцелевая оптимизация.*

Пропонується інструментарій (методика, алгоритм, програмні засоби) експрес-енергоаудиту електричних мереж облэнерго.

Ключові слова: *експерт, енергоаудит, компютерна програма, багатоцільова оптимізація.*

Введение

По данным Мирового Энергетического Агенства Украина остается одной из самых энергонезэффективных стран в Европе: энергоемкость ВВП (кг у. т./ \$) в Италии – 0,2; Великобритании – 0,26; Германии – 0,26; Венгрии – 0,39; Польше – 0,4; Белоруссии – 0,48; Российской Федерации – 0,78; Украине – 1,14. Энергоэффективность (полезный, эффективный расход энергии) является лишь одним аспектом энергосбережения, которое существенно зависит от технологического расхода электроэнергии (ТРЭ) на ее передачу и поставку в распределительных сетях облэнерго, надежности и качества электроснабжения потребителей. По данным Минэнергоуголь Украины в 2012 году выработка электроэнергии составила 198,114 млрд кВт·ч, экспорт – 9745,3 млрд кВт·ч, потребление нетто – 150,72 млрд кВт·ч, нормативная величина технологического расхода электроэнергии ТРЭ на ее передачу и поставку в электрических сетях всех классов напряжения – 23,1 млрд кВт·ч или 12,8 %. Львиная доля ТРЭ приходится на электрические сети 154–0,38 кВ. При такой величине ТРЭ не может быть обеспечено надежное и качественное электроснабжение потребителей. Для сравнения: в электрических сетях Южной Кореи потери электроэнергии не превышают 3–4 %.

Из вышеприведенного следует, что энергоаудит электрических сетей энергоснабжающих компаний – задача чрезвычайно актуальна. Однако провести энергоаудит облэнерго в полном объеме в соответствии с требованиями ДСТУ 4065-2001 «Енергозбереження. Енергетичний аудит. Загальні технічні вимоги» практически нереально из-за сотен тысяч объектов в облэнерго.

Поэтому **цель исследования** – разработка инструментария (модель, метод, алгоритм, компьютерная программа) экспресс-энергоаудита электрических сетей облэнерго.

Порядок проведения экспресс-энергоаудита

1. Описание региона.
2. Описание облэнерго.
3. Мониторинг технических, экономических, политических, социальных, организационных процессов с точки зрения их негативного влияния на энергосбережение электрической сети.
4. Выделение энергозатратных фрагментов сети, в которых предположительно не обеспечивается надежное, качественное и экономичное электроснабжение потребителей.
5. Подтвердить / опровергнуть наличие энергозатратных фрагментов сети облэнерго с помощью программного комплекса **Энерголокатор**.

6. Приведение к норме технологического расхода электроэнергии энергозатратных фрагментов сети облэнерго.

7. Методическое и программное обеспечение расчетов.

Выводы.

1. Описание региона

- Промышленный.
- Сельскохозяйственный.
- Уровень урбанизации.
- Степень индустриализации.
- Основные отрасли промышленности.
- Площадь снабжаемого региона.
- Энергоизбыточный/энергодефицитный.

2. Описание облэнерго

- Состояние приватизации компании.
- Наличие собственных электростанций.
- Обмен электроэнергией со смежными компаниями.
- Наличие/отсутствие транзита.
- Топология электрических сетей облэнерго.
- ТРЭ (отчетный, фактический, нормативный) в электрических сетях согласно відомчої форми звітності 1-б ТРЕ Міненерговугілля.
- Структура потребления электроэнергии: промышленность больше 750 кВА, промышленность до 750 кВА, электрифицированный городской транспорт, непромышленные потребители, сельское хозяйство, население, населенные пункты.

3. Мониторинг технических, экономических, политических, социальных, организационных процессов с точки зрения их возможного негативного влияния на энергосбережение электрической сети

1. Важным показателем топологии электрических сетей облэнерго является соотношение протяженности ЛЭП различного класса напряжения: $L_{110} : L_{35} : L_{10} : L_{0,38}$. Распределительные электрические сети ОЭС Украины насчитывают около 1 млн километров воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением 150–0,38 кВ, из них 47% приходится на сети 0,38 кВ. В развитых странах линии 0,38 кВ используются, как правило, для ввода к потребителю. **Уродливая топология распределительных сетей** ОЭС Украины приводит к значительному росту технологических потерь при передаче и распределении электроэнергии. Влияние топологии на величину ТРЭ демонстрируют, например, цифры потерь электроэнергии в городских электрических сетях Киевэнерго –7,12 % и в сельских сетях Киевоблэнерго –15,5 %.

2. Электрические сети общего назначения сегодня находятся в неудовлетворительном техническом состоянии, **износ** большей половины близок к 100 %, несовершенен мониторинг технического и прогнозного состояния электрических сетей. Качественной электроэнергией обеспечивается 60–65 % потребителей. Показатель надежности электроснабжения характеризуется в настоящее время длительностью отключений более чем 100 часов в год в расчете на одно хозяйство (на порядок выше, чем в развитых странах). Потери при передаче электроэнергии из-за износа верхнего проводящего слоя линий недопустимо велики и составляют сегодня 15–20 %, а в некоторых случаях и до 40 %.

Износ силового оборудования (линий электропередачи, трансформаторов и др.) зависит от срока службы. **По техническому паспорту выявляется оборудование, дата выпуска которого превышает 30 лет.**

3. Хаотический характер застройки городов, насыщение квартир новым поколением бытовой электроаппаратуры, несанкционированный отбор электроэнергии в основном мелким и средним теневым бизнесом, а также неплатежеспособным населением

порождают *случайную несимметрию нагрузки фаз линий*, что способствует появлению в нулевом проводе токов 15-20 А и выше и соответственно дополнительных потерь электроэнергии.

Поэтому следует выявить населенные пункты (города, поселки, дачные участки), в которых наблюдается интенсивная хаотическая застройка.

4. Спад промышленного производства региона снижает загрузженность по активной мощности трансформаторов силовых подстанций при сохранении *огромных потерь холостого хода. В результате опроса выявляются силовые трансформаторы ЦП, ТП и РП, время работы которых под нагрузкой не превышает 20÷30 %.*

5. Урбанизация страны, развал сельского хозяйства, отток сельского населения в города обуславливают *неполнофазные режимы* электроснабжения обезлюдивших поселков, что вызывает дополнительные потери электроэнергии. *Поэтому следует выявить линии электропередачи с неполнофазными режимами.*

6. В условиях двусторонних договоров в электрических сетях значительно возрастают потери электроэнергии из-за влияния друг на друга потоков энергии в общих элементах сети (*эффект нелинейности потерь*): от взаимодействия потоков электроэнергии в общих элементах сети (линиях, трансформаторах) возникает дополнительный ТРЭ [1]. *Поэтому следует выявить балансовую принадлежность оборудования (подстанций, ЛЭП.) электрической сети.*

7. Нескомпенсированные перетоки избыточной реактивной мощности в электрических сетях увеличивают *потери активной (реактивной) мощности и напряжения*. Снижение реактивной нагрузки из-за спада производства, недостаток количества и мощности источников реактивной мощности (ИРМ) в электрических сетях ОЭС (по данным годовых отчетов Минтопэнерго суммарная установленная реактивная мощность ИРМ в ОЭС снизилась с 2009 года в 4,2 раза) привели к появлению потоков нескомпенсированной реактивной мощности, вызывающей в электрических сетях дополнительные потери активной электроэнергии, особенно в ночной период. *Поэтому следует оценить достаточность количества, мощности и места установки ИРМ.*

8. Из-за электромагнитных процессов в трансформаторах тока и напряжения и переменных режимов работы потребителей возникают *технические потери в измерительном комплексе (ИК)*. Результирующая ошибка ИК остается отрицательной при всех возможных значениях нагрузки трансформаторов тока и напряжения, что свидетельствует о систематическом недоучете потребленной электроэнергии [2].

4. Выделение энергозатратных фрагментов электрической сети

Исходя из результатов экспертного мониторинга, выделяются фрагменты электрической сети, у которых не обеспечивается надежность, качество и экономичность электроснабжения потребителей. Обычно фрагменты электрических сетей облэнерго включают: центр питания ЦП-154 (110) кВ, трансформаторные подстанции ТП-35 кВ, распределительные подстанции РТ -10/0,4 кВ, линии электропередачи ЛЭП-110 (154) кВ, ЛЭП-35 кВ, фидеры 10 (6) кВ, линии 0,38 кВ, нагрузку (промышленную, бытовую), КУ, ИРМ (рис. 1.).

В схеме электрической сети используется поэлементный, пофидерный подход без эквивалентирования при следующих условиях.

1. Сети 0,38 кВ представлены:

- городскими кабельными линиями (неразветвленные линии с участками различного сечения и равномерно распределенной нагрузкой);
- сельскими воздушными линиями (разветвленные линии с равномерно распределенной вдоль участков нагрузкой);
- промышленными линиями с сосредоточенной в конце нагрузкой.
- транзитными линиями.

2. Линии могут быть 3-х, 2-х и 1-о фазными.

3. Нагрузка линий задается средними фазными токами. Токовая нагрузка потребителей определяется с помощью показаний счетчиков; АСКУЭ; АСКУЭ БП; программного комплекса биллинг; социальной нормы потребления электроэнергии.

4. Замкнутые контуры распределительных сетей размыкаются.

5. Расчетный режим сбалансирован.

6. Расчет режимов проводится для реальных условий эксплуатации, т. е. с учетом случайной несимметрией токовой нагрузки фаз линий; неполнофазных режимов; некомпенсированных перетоков реактивной мощности; несанкционированного отбора электроэнергии; нелинейности ТРЭ; износа оборудования (линий, трансформаторов, счетчиков); незапланированных переключений схемы; недоучета потребления электроэнергии из-за погрешностей ИК.

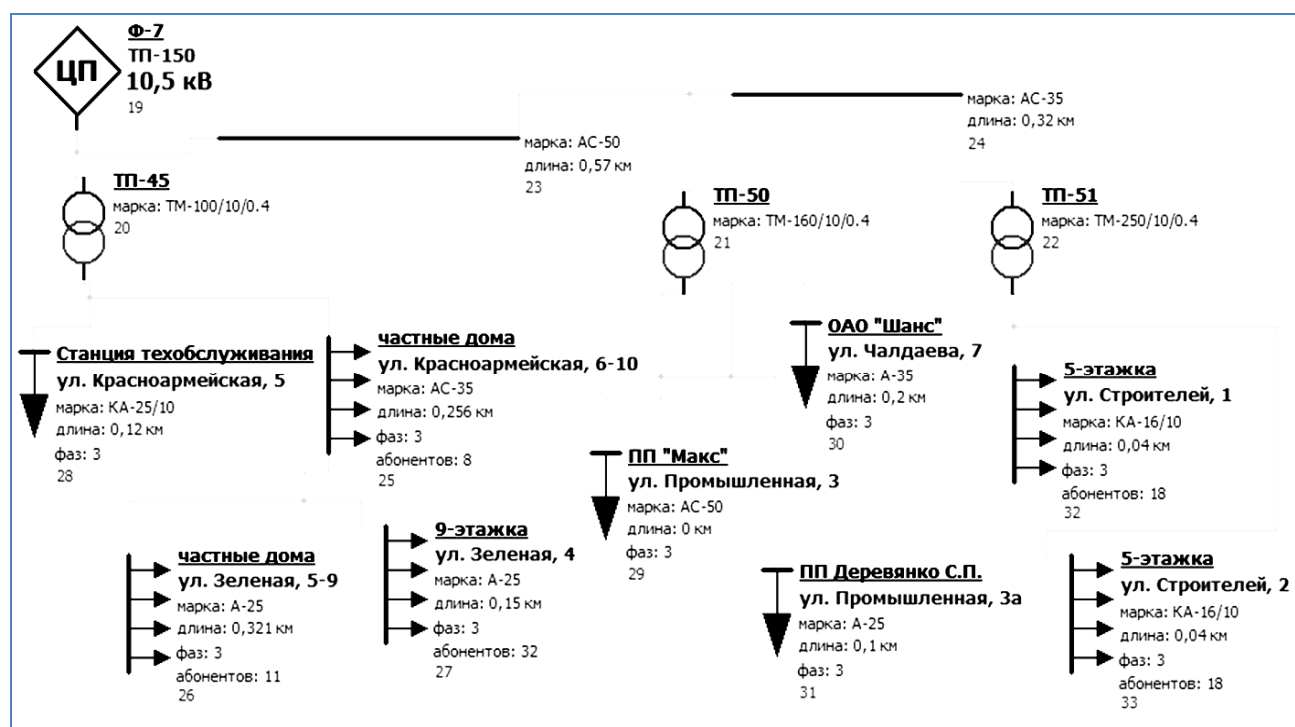


Рис. 1. Расчетная схема фрагмента электрической сети облэнерго

5. Приведение к норме ТРЭ фрагментов сети облэнерго

По Закону Украины "Про електроенергетику" поставщики электроэнергии обязаны обеспечить *надежное* снабжение потребителей *качественной* электроэнергией наиболее *экономичным* способом. Поэтому в сложившихся условиях поставленная задача решается методом многоцелевой структурной оптимизации режимов энергозатратных фрагментов сети.

Метод многоцелевой структурной оптимизации включает:

- Выбор критериев оптимизации.
- Приведение критериев в сопоставимый вид.
- Обоснование критерия оптимальности.
- Перечень мероприятий по снижению ТРЭ.

Выбор критериев оптимизации

В качестве критерия надежности принимаем энергетический баланс фрагмента электрической сети: поступления в сеть активной мощности P_{nc} должны покрывать полезный

отпуск P_{no} и потери мощности ΔP в сетях в каждый момент времени t на всех классах напряжения U :

$$\sum_U \sum_t P_{nc} = \sum_U \sum_t (P_{no} + \Delta P), \quad U \subset 154-0,38 \text{ кВ}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad (1)$$

Критерием качества электроснабжения принимаем вероятность попадания напряжения на зажимах наиболее удаленного потребителя в нормированный интервал

$$\mathcal{P}(0,95U_{ном} \leq U \leq 1,05U_{ном}) \geq 0,95, \quad U = U_a, U_b, U_c \quad (2)$$

В качестве критерия экономичности принимаем нормативное значение технологического расхода электроэнергии на ее передачу в расчетный период. В отличие от [3] в данной работе норматив ТРЭ—это граничный показатель экономичности передачи и поставки электроэнергии, при котором выполняются условия надежного (1) и качественного (2) электроснабжения потребителей. В итоге вектор критериев структурной оптимизации режимов электрической сети имеет вид

$$K = \left\{ \sum_U \sum_t (P_{no} + \Delta P), \mathcal{P}(U), \Delta \mathcal{E}_{ном} \right\}.$$

Приведение критериев в сопоставимый вид

Частные критерии $\{ \mathcal{P}(U), \sum_U \sum_t (P_{no} + \Delta P), \Delta \mathcal{E}_{ном} \}$ непрерывны, так как их уровни образуют континуумы в определенных границах, связаны между собой функционально, имеют различное направление оптимизации ($\mathcal{P}(U)$, следует увеличить, $\{ \sum_U \sum_t (P_{no} + \Delta P), \Delta \mathcal{E}_{ном} \}$ уменьшить), различный физический смысл, равнозначны (без приоритетов). Основной информацией для расчета частных критериев служат результаты расчета установившегося режима распределительной электрической сети облэнерго и технико-экономического анализа.

Чтобы объединить все частные критерии различного физического смысла с различными шкалами измерения одной числовой характеристикой в относительных единицах и тем самым выполнять операции над ними, судить о предпочтениях различных критериев в заданных диапазонах их изменения, отказаться от использования весовых коэффициентов, свести задачу максимизации одной группы критериев и минимизации другой группы к задаче максимизации полезностей по всем критериям необходимо построить так называемые функции полезности критериев [4].

Функция полезности — оценка относительного предпочтения критерия k в достижении локальной цели. Критерий k_1 предпочтительнее критерия k_2 тогда и только тогда, когда полезность критерия k_1 больше, чем полезность критерия k_2

$$k_1 \succ k_2 \leftrightarrow v(k_1) \succ v(k_2).$$

Построение функции полезности по критериям предполагает определение границ изменения критериев $k_i^{min} \leq k_i \leq k_i^{max}$, $i = 1, 2, \dots, M$; расчет штрафных функций, характеризующих ущерб, возникающий при нарушении допустимых границ, отклонения критерия от оптимальных (номинальных) значений внутри допустимых границ, приближении критерия к допустимым границам; получение аналитического выражения функции полезности по критерию.

Обоснование критерия оптимальности

Точки оптимума, полученные при решении задачи по каждому критерию $k \in K$ отдельно, не совпадают. Если один из критериев достиг своего оптимума, то улучшения по другим частным критериям векторного критерия невозможно. Из этого следует, что решение

задачи векторной оптимизации может быть только компромиссным, удовлетворяющим в определенном смысле все частные критерии векторного критерия. Необходима дополнительная информация, уточняющая, в каком смысле следует понимать оптимум по многоцелевому критерию.

В математической модели многокритериального выбора варианта решения минимизируются критерии $\sum_U (\mathcal{E}_{no} + \Delta\mathcal{E}), \Delta\mathcal{E}_{норм}$ и максимизируется критерий $\mathcal{P}(U)$.

Полученный векторный критерий полезностей $v(k) = v(k_U), \dots, v(\Delta\mathcal{E}_{норм})$ позволяет выбор предпочтительного варианта решения свести к максимизации полезностей по всем критериям $\{\mathcal{P}(U), \sum_U (\mathcal{E}_{no} + \Delta\mathcal{E}), \Delta\mathcal{E}_{норм}\}$.

Для принятия решения необходима дополнительная информация, уточняющая, в каком смысле понимать оптимум по многоцелевому критерию. В данном случае в качестве такой дополнительной информации может служить требование удаления критериев от критической границы допустимости.

В условиях случайности оптимальным является вариант, который обладает максимальной полезностью среди всех минимальных полезностей по критериям

$$optK(M) = \max_M \min_{k_i} v(K) = \max_M \min_{k_i} \{\mathcal{P}(U), \sum_U \sum_t (P_{no} + \Delta P), \Delta\mathcal{E}_{норм}\}.$$

Минимаксный критерий оптимальности направлен на отыскание компромиссного решения путем максимизации минимальной компоненты вектора критериев и обеспечивает гарантированный результат: все критерии, измеренные в относительных единицах, не хуже, чем $\min v(k_i)$. Тем самым обеспечивается выбор варианта решения, у которого наихудший компонент векторного критерия максимально удален от границы допустимости (оси абсцисс).

Выбор окончательного варианта МСП производится с учетом экономического критерия (рентабельности, приведенных затрат и др.).

6. Перечень мероприятий по снижению потерь электроэнергии

Для сетей 0,38-10 кВ

- переход на систему «глубокий ввод» 10/0,38 кВ, т. е. использование линий 0,38 кВ только для ввода к потребителю уменьшает длину линий 0,38 кВ и существенно снижает ТРЭ в сетях;
- замена изношенных (перегруженных) проводов; отключение старых или подключение новых линий к распределительным трансформаторам (РТ);
- изменение числа участков разветвленных линий;
- перевод линий на более высокое напряжение;
- замена недогруженных (перегруженных) или подключение новых РТ;
- установка регулирующих и компенсирующих устройств: БСК; трансформаторов с РПН; шунтирующих реакторов; СК с целью компенсации избыточных потоков реактивной мощности;
- установка симметрирующих тиристорных устройств при систематической и случайной несимметрии токовой нагрузки фаз, замена нулевого провода на провод большего сечения;
- АСКУЭ, АСКУЭ БП, биллинг, социальная норма потребления электроэнергии при несанкционированном отборе электроэнергии;
- замена нулевого провода на провод большего сечения при неполнофазных режимах работы линий электропередачи;
- учет погрешностей элементов измерительного комплекса (ТТ, ТН, счетчики) в зависимости от нагрузки.

Для сетей 35-154 кВ

- развитие сетей 154- 35кВ с целью приближения центров питания к потребителям и
- снижения длины фидеров 10 кВ;
- проверка эффективности внедрения однострансформаторных подстанций 154-35 кВ с автоматическим резервированием по сети 10 кВ с целью снижения потерь холостого хода и повышения надежности электро снабжения;
- перевод линий на более высокое напряжение;
- замена (отключение) недогруженных (перегруженных) трансформаторов;
- снижение расхода электроэнергии на СН подстанций.

7. Программа расчета режимов фрагментов сети облэнерго

Многофункциональный программный комплекс **Энерголокатор** предназначен для автоматизации электротехнических расчетов в распределительных сетях ОЭС в реальных условиях эксплуатации с помощью вероятностно– схемотехнического метода расчета.

Структура Энерголокатора (рис. 2.)

- графический редактор схем электросетей;
- справочники электротехнического оборудования;
- база данных абонентов электросетей;
- база данных измерительных приборов;
- учет показателей измерительных приборов с привязкой по времени;
- модуль стохастической вариации;
- расчетный модуль;
- предоставление результатов расчета в графо-аналитической форме либо в форме отчетов;

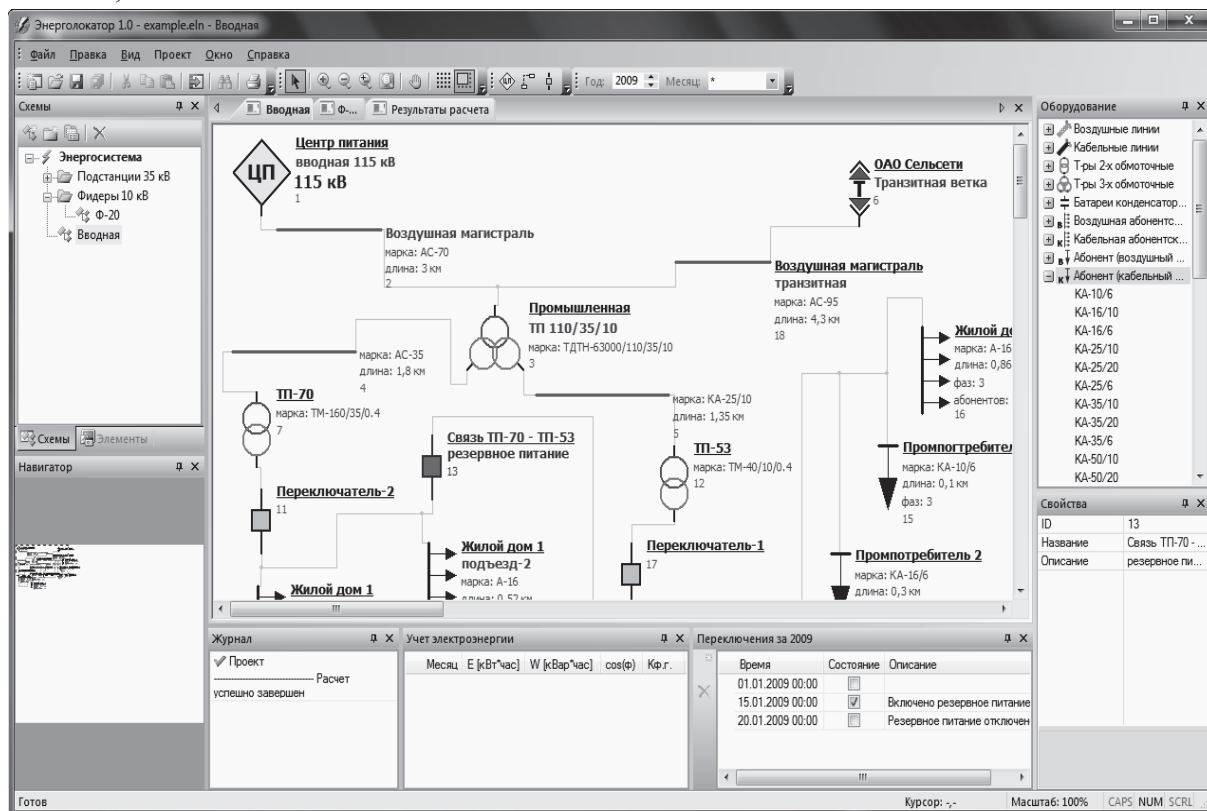


Рис. 2. Структура программного комплекса Энерголокатор

Графический редактор схем электросетей Энерголокатор включает:

- схемы электросетей с возможностью их группирования;

- справочники энергетического оборудования (воздушные и кабельные линии, двух и трехобмоточные трансформаторы, БСК и др.) с возможной коррекцией данных;
- журнал учета активной и реактивной электроэнергии потребителей;
- журнал переключений в электросетях;
- журнал сообщений, оповещающий об ошибках при анализе и расчете схем;
- навигатор – миниатюрное отображение текущей схемы.

Перед выполнением процедуры расчета **Энерголокатор** автоматически проверяет правильность введения схем электросетей на соответствие напряжений питания и номинальных напряжений элементов электросети, направлений токов, переключений. В случае возникновения ошибки анализатор укажет в каком месте и в какое время она произошла.

Основные функции Энерголокатора

- расчет установившихся режимов работы сетей с учетом реальных условий эксплуатации;
- поиск энергозатратных фрагментов сети;
- расчет сверхнормативных потерь электроэнергии.

Результаты расчетов

В результатах расчетов для каждого элемента электросети отображается информация о количестве поступившей активной и реактивной электроэнергии, потерях активной и реактивной электроэнергии в абсолютных и относительных единицах. Для каждого из узлов отображаются отклонения напряжения в узлах.

Данные статистической обработки части выходных данных (например, напряжений узлов) значительно надежнее и достовернее детерминированных результатов. Визуализация данных в графоаналитическом виде позволяет быстро и удобно оценивать обстановку, состояние и условия эксплуатации каждого элемента либо узла электросети (рис. 3).

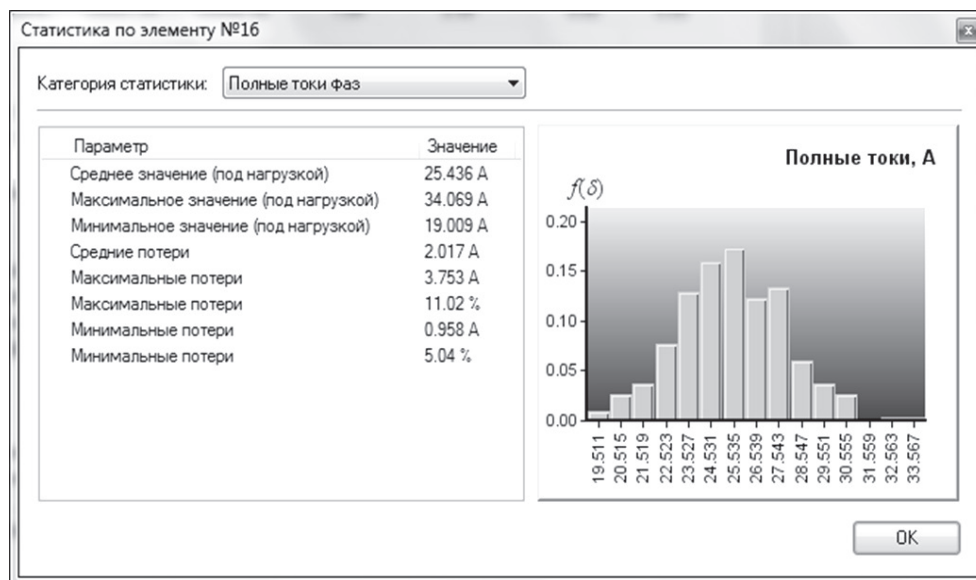


Рис. 3. Гистограмма фазного тока и параметры ТРЭ

С помощью графического редактора схем электросетей **Энерголокатор** позволяет формировать расчетную модель электросети и вносить все необходимые для расчетов данные. Сочетание методов имитационного моделирования и поэлементного подхода способно наиболее подробно и объективно представить реальную картину потокораспределения в элементах расчетной модели электросети. За счет этого удалось значительно повысить информативность результатов расчета, которая особо важна в

условиях неопределенности части исходной информации. Результаты расчетов позволяют принимать обоснованные решения. Скачать программу **Энерголокатор** можно по адресу: <http://www.energyexpert.com.ua>

Выводы

Применение экспертно-моделирующей компьютерной системы экспресс-энергоаудита электрических сетей облэнерго позволит:

- оперативно сформировать программу энергосбережения электрических сетей;
- сократить трудовые и материальные ресурсы;
- повысить не только энергосбережение в электрических сетях облэнерго, но и энергоэффективность (надежность и качество) энергоснабжения потребителей;
- повысить точность и достоверность результатов;
- проводить количественный мониторинг технического состояния объектов электрической сети. Такая система мониторинга объектов может быть неотъемлемой составляющей «интеллектуальной электросети».

Список литературы

1. Дерзский В. Г. Распределение технологического расхода электроэнергии в общих элементах электрической сети между различными потребителями // Энергетика и электрификация. – 2001. – № 3.
2. Лях В. В., Квицинський А. О. Оцінка втрат електроенергії при влаштуванні обліку з використанням вимірювальних трансформаторів // Новини енергетики. – 2002. – № 7.
3. ГНД 34.09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-154 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. – Затверджено наказом № 757 Мінпаливенерго України від 17.12.03.
4. Дерзский В. Г., Скиба В. Ф. Многокритериальная оптимизация режимов распределительных электросетей в условиях случайности // Новини енергетики. – № 12, 2012. – № 1.

EXPERT COMPUTER SIMULATION SYSTEM FOR EXPRESS ENERGY AUDIT OF ELECTRIC NETWORKS OF REGIONAL POWER DISTRIBUTION COMPANIES

DERZSKY V. G., Doctor of Engineering, Senior Researcher
SKIBA V. F., engineer

The paper presents instruments (technique, algorithm, software) for express energy audit of electric networks of regional power distribution companies.

Key words: *expert, energy audit, computer program, multipurpose optimization.*

References

1. Derzskiy, V. G. (2001), "Distribution of technological consumption of electric energy in common elements of electrical network among different users" ["Распределение технологического расхода электроэнергии в общих элементах электрической сети между различными потребителями"], *Energetika i elektrifikatsiya*, No. 3
2. Liakh, V. V., Kvytsynskyi, A. O (2002), "Analysis of electric energy loses when arranging metering using metering transformer" ["Оцінка втрат електроенергії при влаштуванні обліку з використанням вимірювальних трансформаторів"], *Novyny energetyky*, No. 7//
3. Ministry of Fuel of Ukraine Order No. 757 dd. 17.12.03, Method of formation of structure of the balance of electric power in electric networks of 0.38-154 kW, analysis of its components and setting rates of electric power technological consumption, GND 34.09.104-2003 [Metodyka skladannia struktury balansu elektroenergiyi v elektrychnykh merezhakh 0.38-154kW, analizu yogo skladovykh i normuvannia tekhnologichnykh vytrat elektrtoenergi GND 34.09.104-2003]
4. Derzskiy, V. G., Skyba, V. F. (2012), "Multicriteria optimization of modes of distribution electric networks in random conditions" ["Многокритериальная оптимизация режимов распределительных электросетей в условиях случайности"], *Novyny energetyky*, No. 12, No. 1.

Поступила в редакцию 11.04 2014 г.