

УДК 681.03

П.Ф. Буданов<sup>1</sup>, В.С. Лучков<sup>1</sup>, М.В. Краснокутский<sup>2</sup>, Ю.В. Васюченко<sup>1</sup><sup>1</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков<sup>2</sup>Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Проведён анализ и показана необходимость создания методов расчета потерь энергии, позволяющих использовать новые информационные возможности, а также методов разработки и внедрения мероприятий по снижению потерь электроэнергии, адаптированных к новым экономическим условиям. Кроме того, показано, что основными тенденциями применения современных информационных технологий, в том числе и при расчете, анализе и снижении потерь энергии в сетях, являются: объединение в едином комплексе нескольких расчетных модулей, работающих с единой базой данных, интегрированной с другими автоматизированными системами контроля и учёта электроэнергии и получены расчетные выражения для уточненного расчета нагрузочных потерь энергии в линиях электропередач, математического ожидания напряжения в узлах сети и потоков реактивной энергии, использование которых возможно в случае совместной обработки информации автоматизированных информационно – измерительных систем контроля и учёта электроэнергии и диспетчерского управления.

**Ключевые слова:** потери электроэнергии, методы расчёта потерь электроэнергии, система электропостачания, учёт электроэнергии, расчёт технических потерь.

### Введение

#### Постановка задачи и анализ литературы.

Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях – важнейшая задача повышения эффективности электроэнергетики Украины, один из основных источников сокращения производственных издержек.

Конечная цель снижения потерь в сетях – сдерживание темпов роста тарифов на электроэнергию для потребителей.

В обзоре литературы [1 – 4] приводятся данные о росте потерь электроэнергии (ПЭ) в сетях, которые за период 1994 – 2008 годов увеличились на 37,1% в абсолютном выражении и на 3,05% (с 10,09% до 13,15%) по отношению к отпуску электроэнергии в сети, при росте этого отпуска за тот же период всего на 5,3%. В ряде энергосистем относительные потери превысили 20%, а в некоторых электросетевых предприятиях они достигают 40 – 50%. Около четверти общих ПЭ составляют коммерческие потери, обусловленные погрешностями систем учета электроэнергии и ее несанкционированным потреблением. Отмечена устойчивая тенденция к дальнейшему росту абсолютных и относительных потерь, если не принимать эффективных мер по их снижению. Очевидно поэтому одной из актуальных задач, является формирование системы постоянного мониторинга уровня и структуры потерь в электрических сетях всех напряжений энергосистем регионов Украины.

Исследованию и разработке методов расчета ПЭ, выбора мероприятий по их снижению, алгоритмов и программных комплексов для решения этих задач посвящены работы [1 – 4], в которых проблема достоверного определения технических ПЭ и их

тщательного структурного анализа становится весьма актуальной.

Взаимодействие сетевых и сбытовых компаний на информационном уровне необходимо и вполне возможно на основе использования современных информационных технологий, а именно: информационных возможностей оперативно – информационных управляющих комплексов (ОИУК), автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ), автоматизированных информационно-измерительных систем контроля и управления энергопотреблением (АИИС КУЭ).

Таким образом, внедрение современных информационных технологий позволяет получать дополнительную информацию о схемах и режимах электрических сетей, использование которой при анализе ПЭ требует дополнительных исследований с целью разработки эффективных методов расчета.

Этим и объясняется актуальность новых подходов к разработке методов расчета, анализа и снижения потерь электроэнергии.

**Целью данной статьи** является разработка методики расчёта технических потерь в электрических сетях.

### Основной материал

Общей научной задачей является совершенствование методов расчета, анализа и снижения потерь электроэнергии в сетях РСК с учетом появления новых информационных возможностей, предоставляемых АСДУ и АИИС КУЭ, и подходов к созданию систем мониторинга уровня и структуры ПЭ.

Данная общая задача разделена на следующие подзадачи: изучение современного состояния автоматизации сбора и обработки информации о режи-

мах и потоках энергии, определения потерь энергии в электрических сетях; разработка методов расчета потерь энергии в сетях 6...110 кВ на основе информации АСДУ и АИИС КУЭ; разработка методов анализа структуры потерь энергии и их снижения в сетях; разработка подходов к созданию системы мониторинга уровня и структуры потерь энергии в электрических сетях.

На основании анализа отечественных и зарубежных тенденций развития работ в области анализа контроля, учёта и снижения потерь электроэнергии (КУСПЭЭ), наращивания технического и программного обеспечения сетей, показано следующее [1, 2]:

– современная классификация составляющих ПЭ не лишена недостатков и требует дальнейшего уточнения и доработки;

– насущной становится необходимость проработки математического аппарата, моделей и методов корректного использования информации ОУИК и АИИС КУЭ в расчетах ПЭ, а также при разработке и внедрении мероприятий по снижению потерь;

– нерешенной остается задача планирования очередности выполнения мероприятий после того, как они признаны эффективными, т.е. рационально календарного планирования их внедрения;

– основными тенденциями применения совре-

$$\Delta W_{\text{на}i} + j\Delta W_{\text{пр}ij} = \frac{R_{ij} + jX_{ij}}{T \cdot M^2 U_i} \left\{ (W_{Pij}^2 + W_{Qij}^2) \cdot (1 + 3\gamma_{Ui}^2) + T^2 (\sigma_{Pij}^2 + \sigma_{Qij}^2) - \right. \\ \left. - 4T\gamma_{Ui} (W_{Pij}\sigma_{Pij}r_{Pij} + W_{Qij}\sigma_{Qij}r_{Qij}) + B_{ij}T \cdot M^2 U_i \left[ W_{Qij} + 0,25 B_{ij}T \cdot M^2 U_i (1 + \gamma_{Ui}^2) \right] \right\}, \quad (1)$$

и  $3\gamma_{Ui}^2$  а потери в проводимостях узлов  $G_i + jB_i$  по формуле (2)

$$\Delta W_{\text{на}i} + j\Delta W_{\text{пр}i} = (G_i + jB_i) \cdot T \cdot M^2 U_i (1 + \gamma_{Ui}^2), \quad (2)$$

где  $W_{Pij}$  и  $W_{Qij}$  – потоки энергии в начале ветви  $i-j$ ;  $MU_i$  и  $\gamma_{Ui}$  – математическое ожидание и коэффициент вариации напряжения в узле  $i$ ;  $\sigma_{Pij}$ ,  $\sigma_{Qij}$  – средние квадратические отклонения потоков мощности;  $r_{Pij}$ ,  $r_{Qij}$  – коэффициенты корреляции потоков мощности и напряжения;  $T$  – продолжительность расчетного периода.

Выражение (1) получено для случая, когда в расчете используются показания приборов, фиксирующих поступление энергии в линию.

$$DU_i = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial U} \right)_m^2 DU + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial P} \right)_m^2 DP + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial Q} \right)_m^2 DQ + \\ + \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U^2} \right)_m (\mu_{4U} - D^2 U) + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P^2} \right)_m (\mu_{4P} - D^2 P) + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Q^2} \right)_m (\mu_{4Q} - D^2 Q) \right] + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U \partial P} \right)_m DUDP + \\ + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U \partial Q} \right)_m DUDQ + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P \partial Q} \right)_m DPDQ + \left( \frac{d\varphi}{dU} \right)_m \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U^2} \right)_m \mu_{3U} + \left( \frac{d\varphi}{dP} \right)_m \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P^2} \right)_m \mu_{3P} + \left( \frac{d\varphi}{dQ} \right)_m \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Q^2} \right)_m \mu_{3Q}, \quad (4)$$

менных информационных технологий, в том числе и при расчете, анализе и снижении потерь энергии в сетях, являются объединение в едином комплексе нескольких расчетных модулей, работающих с единой базой данных, интегрированной с геоинформационными системами (ГИС), ОИУК, АИИС КУЭ и другими подсистемами АСУ.

2. Разработка методов расчета технических потерь энергии в сетях РСК на основе информации ОУИК АСДУ и АИИС КУЭ.

В работе представлены две методики расчета технических ПЭ – для сетей 35...110 кВ и 6...10 кВ. Особенность обеих методик – расчет ПЭ на основе разработанной теории энергораспределения, т.е. непосредственный расчет потоков энергии по ветвям схемы замещения с использованием информации об энергопотреблении (счетчиков энергии, в том числе и АИИС КУЭ) и вероятностных характеристиках режимных параметров.

Расчет технических ПЭ в сетях 35...110 кВ выполняется в ходе решения задачи энергораспределения [2, 4]. Предлагается при расчете потоков энергии в ветвях схемы замещения, характеризующихся сопротивлениями  $R_{ij} + jX_{ij}$  и емкостной проводимостью  $B_{ij}$ , нагрузочные ПЭ в линиях определять по выражению (1):

Если приборы фиксируют отпуск энергии из линии, то в третьей строке формулы знаки «плюс» должны быть заменены на «минус».

Математическое ожидание  $MU_i$  и дисперсию  $DU_i$  напряжения узлов, в которых отсутствуют телеизмерения, предлагается определять через телеизмеряемые параметры узла начала ветви по формулам (3) и (4)

$$MU_i = \varphi(MU_i, MP, MQ) + \\ + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U^2} \right)_m DU + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P^2} \right)_m DP + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Q^2} \right)_m DQ \right] + \\ + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U \partial P} \right)_m K_{PU} + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U \partial Q} \right)_m K_{QU} + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial P \partial Q} \right)_m K_{PQ}.$$

где функция

$$\varphi(U, P, Q) = \sqrt{\left[ U - \frac{PR + (Q + 0,5U^2B)X}{U} \right]^2 + \left[ \frac{PX - (Q + 0,5U^2B)R}{U} \right]^2} \quad (5)$$

учитывает наличие емкостной проводимости  $B$  в линиях электропередач;  $DU$ ,  $DP$ ,  $DQ$  – дисперсии напряжения, активной и реактивной мощностей;  $\mu_3$ ,  $\mu_4$  – третий и четвертый центральные моменты напряжения, активной и реактивной мощности;  $K_{PU}$ ,  $K_{QU}$ ,  $K_{PQ}$  – корреляционные моменты соответствующих величин.

Все перечисленные вероятностные характеристики можно найти по данным архива телеизмерений. Приведенные уточненные выражения (1) – (4) внесены в методику расчета энергораспределения с целью более точного расчета составляющих ПЭ.

В работе произведен анализ погрешностей определения составляющих технических ПЭ по выражениям (1) и (2) и упрощенным выражениям, не учитывающим наличие емкостной проводимости в схеме замещения линии.

С этой целью была разработана математическая имитационная модель в среде MathCad.

Расчет эталонных значений потерь энергии и других режимных параметров линий электропередач выполнялся в модели с использованием уравнений длинной линии.

В качестве переменных в модели приняты активная и реактивная мощности, втекающие в линию, и напряжение на передающем конце, которые задавались случайными числами с различной степенью взаимных корреляционных связей.

Расчеты выполнялись для линий электропередач напряжением 10...220 кВ для всего набора марок проводов, применяемых на этих линиях, для широкого диапазона длин линий и передаваемых мощностей, т.е. был охвачен весь спектр возможных технических и режимных параметров этих ЛЭП.

Получаемые с помощью модели значения ПЭ и математического ожидания напряжения в конце линии принимались в качестве эталонных, с которыми сравнивались значения этих параметров, вычисленные по приближенным формулам, т.е. определялись абсолютные методические погрешности приближенных выражений.

В качестве погрешностей определения нагрузочных ПЭ, в частности, были исследованы следующие:

$\delta_{(1)}$  – погрешность выражения, включающего только первую строку формулы (1);

$\delta_{(2)}$  – погрешность выражения, состоящего из двух первых строк формулы (1);

$\delta_{(3)}$  – погрешность полной формулы (1).

В ходе проведения многочисленных вычислительных экспериментов было отмечено, что:

– погрешности  $\delta_{(1)}$  и  $\delta_{(2)}$  тем больше, чем менее загружена линия, чем больше сечение провода ЛЭП и чем она длиннее;

– погрешность  $\delta_{(3)}$  практически стабильна во всем исследованном диапазоне нагрузки ЛЭП, но также растет с увеличением длины линии. Эта погрешность на один-два порядка меньше погрешностей  $\delta_{(1)}$  и  $\delta_{(2)}$ ;

– погрешности  $\delta_{(1)}$  и  $\delta_{(2)}$  всегда отрицательны, т.е. расчет по упрощенным формулам дает заниженное значение нагрузочных ПЭ в ЛЭП.

На рис. 1 в качестве примера приведен график изменения погрешностей  $\delta_{(1)}$ ,  $\delta_{(2)}$  и  $\delta_{(3)}$  в зависимости от средней протекающей мощности для кабельной линии 10 кВ.

Анализ погрешностей упрощенного определения потерь в проводимостях (без учета коэффициента вариации в формуле (2)) показал, что такое упрощение не вносит существенной погрешности в расчет, которая не превышала 0,3 %.

Полученные результаты приводят к следующим выводам:

– при выполнении расчетов ПЭ и энергораспределения по данным приборов учета электроэнергии, установленных на ЛЭП, следует учитывать наличие емкостной проводимости линии для ЛЭП-35 кВ и выше, а также для кабельных линий 10 кВ большой протяженности.

– использование при расчетах энергораспределения упрощенных формул приводит к искажению величины технических потерь энергии в ЛЭП, что неизбежно означает неверное определение коммерческой составляющей ПЭ.

Это, в свою очередь, может привести к принятию неверных решений в плане выявления неверно работающих приборов учета электроэнергии и локализации коммерческих потерь.

В работе предложен также метод расчета технических ПЭ в сетях 6...10 кВ, позволяющий корректно использовать вновь появившуюся информацию АИИС КУЭ и ОИУК АСДУ в рамках существующих проверенных подходов, в частности метода средних нагрузок.

Все множество узлов нагрузки (УН) по полноте имеющейся режимной информации разделено на два подмножества:

– подмножество УН с определенной режимной информацией КО. Для узлов этого подмножества как минимум должны быть известны энергопотребления;

– подмножество УН с неопределенной режимной информацией КН. Для этих узлов характерно полное отсутствие режимных параметров. Нагрузка таких УН обычно оценивается по номинальным мощностям питающих трансформаторов.

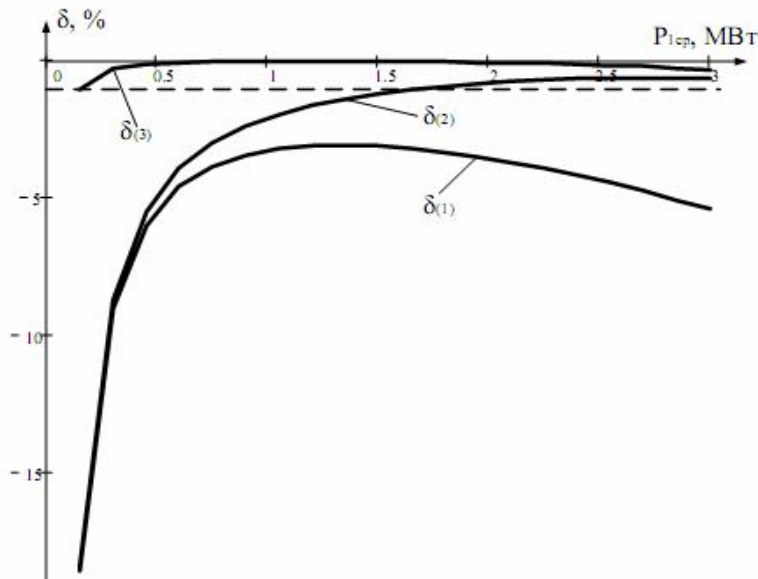


Рис. 1. Погрешности расчета нагрузочных потерь электроэнергии для кабельной линии.

Метод расчета представляет собой итерационную процедуру балансировки энергораспределения, аналогичную процедуре расчета установившегося режима «в два этапа». Перед началом расчета по любой имеющейся информации (АСДУ, АИИС КУЭ, справочные базы данных о потребителях и т.п.) определяются параметры узлов нагрузки: энергопотребления  $W_{aj}$  и  $W_{pj}$ , дисперсии мощностей нагрузок  $DP_j$  и  $DQ_j$ .

На первом этапе в направлении от УН к центру питания определяются в относительных единицах потоки энергии в ветвях схемы замещения линии 6...10 кВ с учетом потерь энергии.

$$\begin{cases} R_{эа} = \sum_{i=1}^N R_i \left[ D_{ai}^2 + \frac{2}{k_{фа}^2} D_{ai} H_{ai} + H_{ai}^2 + \frac{1}{MP_{Г}^2} \left( \sum_{j=1}^{n_j} DP_j + DP_{Г} \sum_{j=1}^{n_j} d_{aj}^2 \right) \right]; \\ R_{эп} = \sum_{i=1}^N R_i \left[ D_{pi}^2 + \frac{2}{k_{фр}^2} D_{pi} H_{pi} + H_{pi}^2 + \frac{1}{MQ_{Г}^2} \left( \sum_{j=1}^{n_j} DQ_j + DQ_{Г} \sum_{j=1}^{n_j} d_{pj}^2 \right) \right]. \end{cases} \quad (7)$$

По аналогичным выражениям определяются эквивалентные индуктивные сопротивления  $X_{эа}$ ,  $X_{эп}$ .

В выражениях (7) параметры  $d_{aj}$ ,  $d_{pj}$ ,  $D_{ai}$ ,  $D_{pi}$ ,  $H_{ai}$ ,  $H_{pi}$  характеризуют доли энергий УН, энергий в ветвях схемы замещения и потерь энергии в ветвях в энергиях на головном участке (ГУ) линии  $W_{Га}$  и  $W_{Гр}$ .

Эти параметры уточняются в ходе итерационного расчета.

Нагрузочные ПЭ в линии определяются по выражению (8)

$$\Delta W_{на} = \frac{W_{Га}^2 k_{фа}^2 R_{эа} + W_{Гр}^2 k_{фр}^2 R_{эп}}{U_{эк}^2 T} \quad (8)$$

Полученные на первом этапе значения энергий на ГУ линии сравниваются с известными величина-

ми  $W_{Га}$  и  $W_{Гр}$ . Если они различаются меньше, чем на величину заданной погрешности, то расчет заканчивается.

$$\Delta W_{на} = \frac{W_{Га}^2 k_{фа}^2 R_{эа} + W_{Гр}^2 k_{фр}^2 R_{эп}}{U_{эк}^2 T}, \quad (5)$$

а потери в проводимостях – по выражению (6)

$$\Delta W_{Па} = T \sum_{j=1}^{K_{п}} (M^2 U_j + D U_j) G_j. \quad (6)$$

Рассчитываются эквивалентные активные сопротивления распределительной линии  $R_{эа}$ ,  $R_{эп}$  по выражению (7)

ми  $W_{Га}$  и  $W_{Гр}$ . Если они различаются меньше, чем на величину заданной погрешности, то расчет заканчивается.

В противном случае производится распределение небалансов между УН подмножества  $K_{ц}$ .

На втором этапе итерационного расчета в направлении от центра питания к УН рассчитываются вероятностные параметры напряжения в узлах схемы замещения по выражениям, аналогичным (3) и (4). Особенности разработанного метода расчета ПЭ являются:

- уточнение эквивалентных параметров фидера в ходе итерационного расчета;

- максимально возможное использование информации о нагрузках, поступающей из различных источников (АСДУ, АИИС КУЭ, справочные базы данных о потребителях и т.п.);

– автоматическое снижение погрешности определения технических ПЭ с увеличением подмножества  $K_0$  узлов нагрузки, т.е. по мере насыщения сети приборами учета, электроизмерений и сбора данных.

### Выводы

Проведён анализ и показана необходимость создания методов расчета потерь энергии, позволяющих использовать новые информационные возможности, а также методов разработки и внедрения мероприятий по снижению ПЭ, адаптированных к новым экономическим условиям, а также показано, что основными тенденциями применения современных информационных технологий, в том числе и при расчете, анализе и снижении потерь энергии в сетях, являются: объединение в едином комплексе нескольких расчетных модулей, работающих с единой БД, интегрированной с автоматизированными системами контроля и учёта электроэнергии и получены расчетные выражения для уточненного расчета нагрузочных потерь энергии в ЛЭП, математического ожидания напряжения в узлах сети и потоков реактивной энергии, использование которых возможно в случае совместной обработки информации АИИС КУЭ и ОУИК АСДУ.

Разработаны методика и алгоритм расчета технических ПЭ в сетях 6...10 кВ, основанные на про-

цедуре итерационного эквивалентирования распределительных линий методом «в два этапа». Точность расчета повышается по мере насыщения сети средствами АИИС КУЭ и ОУИК АСДУ.

### Список литературы

1. Волошко А.В. Практичні аспекти впровадження автоматизованих систем контролю енерговитрат / А.В. Волошко, О.В. Коцар. Енергосберігаючі технології та автоматизація / А.В. Волошко, О.В. Коцар. – 2001. – № 4-5. – С. 16-27.
2. Степанов А.С. Расчет технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информации АСКУЭ и АСДУ / А.С. Степанов // Электричество. – 2002. – № 3. – С. 10-15.
3. Кононов Ю.Г. Интеграция баз данных энергобытовых и распределительных сетевых компаний для мониторинга потерь электроэнергии / Ю.Г. Кононов // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 195-202.
4. Пейзель В.М. Учет емкости линий электропередач в расчетах энергораспределения и потерь энергии в электрических сетях / В.М. Пейзель // Известия ВУЗов. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 63-69.

Поступила в редколлегию 26.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

П.Ф. Буданов, В.С. Лучков, М.В. Краснокутський, Ю.В. Васюченко

Проведений аналіз і показана необхідність створення методів розрахунку втрат енергії, що дозволяють використовувати нові інформаційні можливості, а також методів розробки і впровадження заходів щодо зниження втрат електроенергії, адаптованих до нових економічних умов. Крім того, показано, що основними тенденціями застосування сучасних інформаційних технологій, у тому числі і при розрахунку, аналізі і зниженні втрат енергії в мережах, є: об'єднання в єдиному комплексі декількох розрахункових модулів, що працюють з єдиною базою даних, інтегрованою з іншими автоматизованими системами контролю і обліку електроенергії і отримані розрахункові вирази для уточненого розрахунку втрат навантажень енергії в лініях електропередач, математичного очікування напруги у вузлах мережі і потоків реактивної енергії, використання яких можливо у разі сумісної обробки інформації автоматизованих інформаційно – вимірювальних систем контролю і обліку електроенергії і диспетчерського управління.

**Ключові слова:** втрати електроенергії, методи розрахунку втрат електроенергії, система електропостачання, облік електроенергії, розрахунок технічних втрат.

### METHOD OF CALCULATION OF LOSSES OF ELECTRIC POWER

P.F. Budanov, V.S. Luchkov, M.V. Krasnokutskiy, Yu.V. Vasyuchenko

An analysis is conducted and the necessity of creation of methods of calculation of losses of energy, allowing to utilize new informative possibilities, and also methods of development and introduction of measures is rotined on the decline of losses of electric power, adapted to the new economic terms. In addition, it is rotined that by the basic tendencies of application of modern information technologies, including at a calculation, analysis and decline of losses of energy in networks, are: association in the single complex of a few calculation modules, workings with a single database, computer-integrated with other automated checking and account of electric power systems and calculation expressions are got for the specified calculation of loadings losses of energy in the lines of electricity transmissions, expected value of tension in the knots of network and streams of reactive energy, use of which possibly in the case of joint treatment of information of automated informatively, – measurings checking and account of electric power and controller's management systems.

**Keywords:** losses of electric power, methods of calculation of losses of electric power, system of power supply, account of electric power, calculation of technical losses.