

УДК 621.311

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

**Д. Р. МОРОЗ, Д. С. БАЛЫКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Е. Л. ШЕНЕЦ**

*Открытое акционерное общество «Белтрансгаз»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Значение потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия является одной из важнейших характеристик, поскольку характеризует эффективность ее работы. Определение уровня потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия является необходимым при составлении электрического баланса предприятия, например при проведении энергетического обследования или при разработке норм расхода электрической энергии на выпуск продукции.

Систему электроснабжения промышленного предприятия разделяют обычно на шесть уровней (рис. 1) [1]. Из рис. 1 видно, что каждый из уровней системы электроснабжения представляет собой распределительное устройство, которое, как правило, имеет небольшую протяженность и достаточное сечение проводникового материала, чтобы считать потери электрической энергии на каждом уровне пренебрежимо малыми. Основные потери электрической мощности в распределительной сети предприятия происходят при ее передаче от одного уровня к другому. Такая передача осуществляется с помощью кабельных или воздушных линий, как правило, имеющих значительную протяженность.

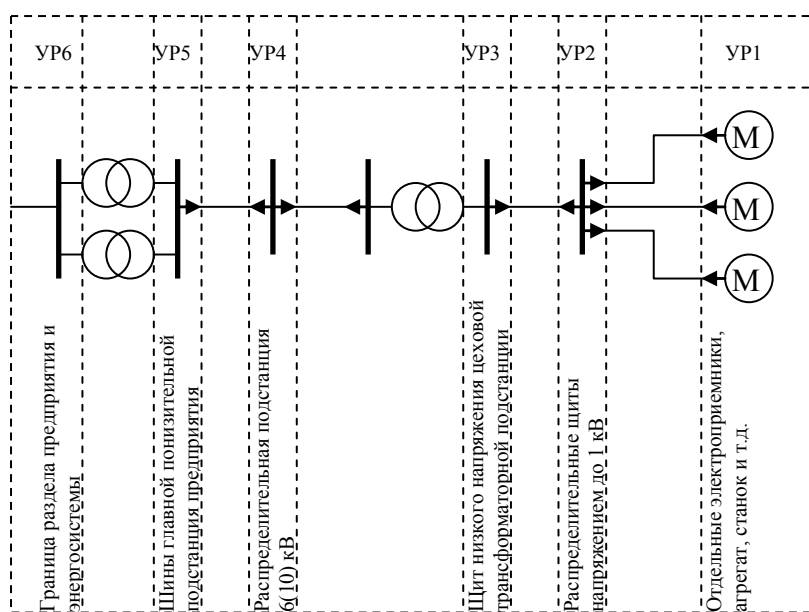


Рис. 1. Уровни системы электроснабжения промышленного предприятия

Потери электрической мощности при ее передаче от одного уровня к другому можно определить по выражению [1]:

$$\sum \Delta P = \sum_{i=1}^{i=N} I_i^2 \cdot R_i, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество линий передачи энергии от высшего уровня к низшему;  $I_i$  – сила тока, протекающего по  $i$ -й линии передачи электрической энергии, А;  $R_i$  – электрическое сопротивление  $i$ -й линии передачи энергии, Ом.

Из выражения (1) видно, что достоверность определения потерь электрической мощности будет определяться достоверностью определения тока, протекающего по линии электропередачи, и активного сопротивления этой линии.

Энергетическая служба каждого предприятия располагает сведениями о системе электроснабжения, включающими в себя информацию о типе, сечении и протяженности линий передачи электрической энергии на всех уровнях системы электроснабжения. По этой информации можно определить сопротивления всех линий передачи электрической энергии.

Сила тока, протекающего по линии передачи электрической энергии от высшего уровня системы электроснабжения к низшему, контролируется с помощью средств измерения начиная с третьего уровня вплоть до границы с энергосистемой. Это позволяет определять потери электрической мощности в распределительной сети предприятия с третьего по шестой уровень системы электроснабжения по выражению (1), основываясь на показаниях средств измерения, (точность определения потерь при этом будет главным образом обуславливаться классом точности средств измерения).

Потери электрической энергии при ее передаче с шестого на третий уровень оказываются незначительными, поскольку передача на этих уровнях производится на высоком напряжении. Большая часть потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия происходит при ее передаче с третьего на первый уровень системы электроснабжения.

Как правило, средства измерения, контролирующие силу тока или передаваемую мощность на первом и втором уровнях электроснабжения, не устанавливаются, а большое количество линий передач электрической энергии на этих уровнях (сотни при передаче электрической энергии с третьего на второй уровень и тысячи при ее передаче со второго на первый уровень системы электроснабжения), не позволяет произвести единовременного измерения силы тока по отдельным линиям для определения фактических потерь электрической энергии по выражению (1).

#### **Постановка задачи**

Необходима разработка способа оценки текущих потерь активной мощности в распределительной сети предприятия при ее передаче с третьего на первый уровень системы электроснабжения, который будет основываться на данных о топологии системы электроснабжения и текущих показаниях средств измерения, установленных на более высоких уровнях системы электроснабжения.

#### **Предлагаемый способ решения задачи**

Поскольку при передаче электрической энергии с третьего на первый уровень электроснабжения на крупных промышленных предприятиях насчитываются тысячи линий электропередач, то систему электроснабжения на этих уровнях можно рассматривать как большую систему, обладающую свойством эмерджентности. Тогда, несмотря на отдельные отклонения, сила тока для каждой линии электропередач

должна колебаться около некоторого среднего, наиболее вероятного, значения. Для определения наиболее вероятного значения силы тока для каждой линии электропередач предложено распределить ток, протекающий на более высоком уровне системы электроснабжения, пропорционально установленной мощности подключенных электроприемников. Тогда наиболее вероятное значение силы тока для  $i$ -й линии передачи электрической энергии со второго на первый уровень системы электроснабжения определится по выражению

$$I_i = I_{\text{сум}} \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i}, \text{ А}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{сум}}$  – суммарный ток, протекающий на более высоком уровне системы электроснабжения, определяемый по показаниям измерительных приборов, А;  $P_i$  – установленная мощность электроприемника, подключенного к линии электропередачи на низшем уровне системы электроснабжения;  $N$  – количество линий электропередач, шт.

В качестве суммарного тока, протекающего на более высоком уровне системы электроснабжения, целесообразно принимать ток, протекающий на 6-м уровне, поскольку его значение контролируется измерительными приборами коммерческого учета с высоким классом точности. Кроме того, показания этих приборов на большинстве промышленных предприятий выводятся на персональный компьютер и могут быть использованы для построения автоматизированной системы определения потерь электрической энергии в распределительной сети предприятия.

#### **Верификация предложенного способа**

Для верификации предложенного способа определения потерь электрической мощности при ее передаче с третьего на первый уровень системы электроснабжения необходимо сравнение фактических потерь и потерь электрической мощности, определенных предложенным способом. Поскольку сам расчет потерь электрической мощности в обоих случаях будет вестись по выражению (1), то верификация сводится к сравнению значения фактического тока, протекающего по  $i$ -й линии электропередач, с наиболее ожидаемым, определенным по выражению (2).

Ранее отмечалось, что одновременное измерение силы тока по всем линиям передачи электрической энергии с третьего на первый уровень системы электроснабжения на реальном предприятии затруднен. Поэтому верификация предложенного способа определения потерь электрической мощности производилась на модели системы электроснабжения абстрактного предприятия с заданными электрическими нагрузками. Адекватность предложенного способа определения потерь электрической мощности оценивалась на основе метода статистических испытаний Монте-Карло. Алгоритм проведения верификации представлен на рис. 2.

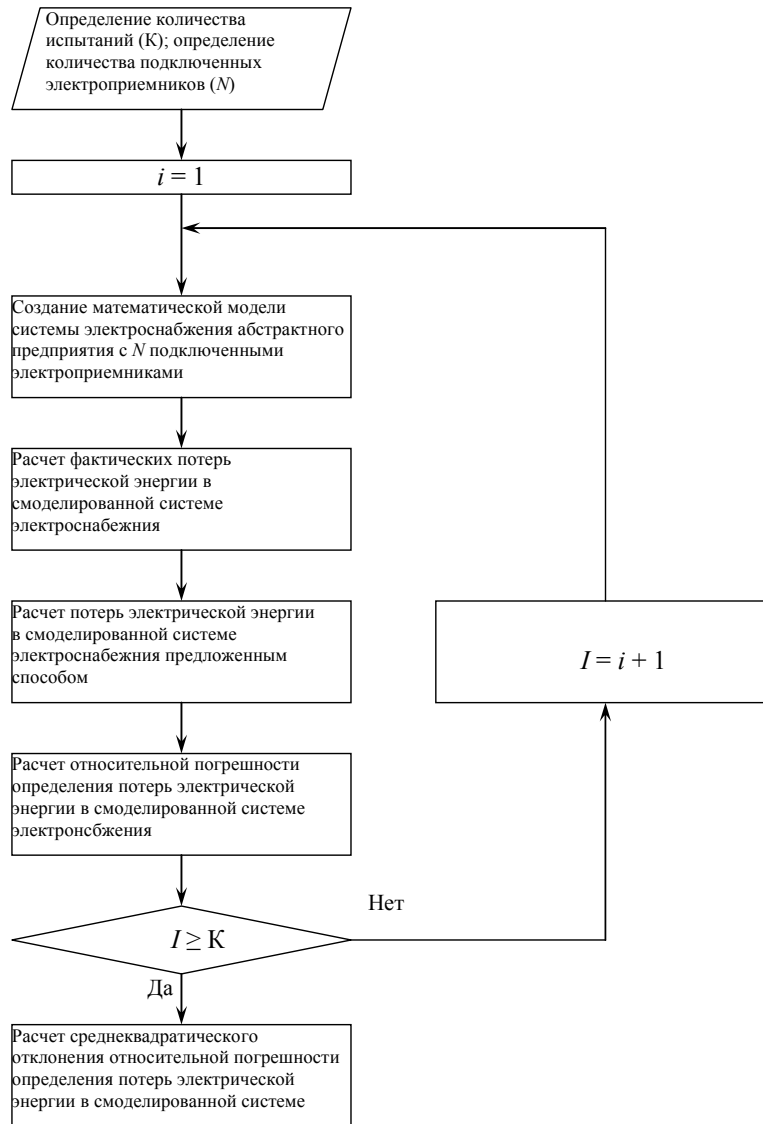


Рис. 2. Алгоритм работы программного обеспечения верификации предложенного способа определения потерь электрической энергии в распределительной сети предприятия

При верификации предложенного способа определения потерь электрической мощности задавалось количество электроприемников и необходимое количество испытаний. Программное обеспечение генерировало математическую модель системы электроснабжения, содержащую заданное количество электроприемников, произвольной установленной мощности.

Для созданной математической модели формировались значения фактической мощности потребляемой  $i$ -м электроприемником:

$$P_{\Phi i} = P_{уст_i} \cdot k_{zi}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где  $P_{уст_i}$  – установленная мощность  $i$ -го электроприемника смоделированной системы электроснабжения, кВт (генерируется случайным образом в диапазоне от 0 до 250 кВт);  $k_{zi}$  – коэффициент загрузки  $i$ -го электроприемника смоделированной системы электроснабжения (генерируется случайным образом в диапазоне от 0 до 1), о. е.

В соответствии со сгенерированной системой электроснабжения определялись фактические потери электрической мощности в каждой линии электропередачи и в системе электроснабжения в целом, кВт:

$$\Delta P_{\phi_i} = I_{\phi_i}^2 \cdot R_i = \left( \frac{P_{\phi_i}}{U} \right)^2 R_i, \quad \sum \Delta P_{\phi} = \sum_{i=1}^{i=N} \Delta P_{\phi_i}, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение, на котором работает  $i$ -я линия электропередачи, В.

Суммарная мощность, потребляемая смоделированной системой электроснабжения, определялась по выражению

$$\sum P_{\phi} = \sum_{i=1}^{i=N} P_{\phi_i} + \sum_{i=1}^{i=N} \Delta P_{\phi_i}, \text{ кВт.} \quad (5)$$

По выражению (2) определялся наиболее вероятный ток, протекающий по  $i$ -й линии электропередачи:

$$I_{\text{предп}_i} = \left( \frac{\sum P_{\phi}}{U} \right) \frac{P_{\text{уст}_i}}{\sum_{i=1}^{i=N} P_{\text{уст}_i}}, \text{ А.} \quad (6)$$

Принимая, что по  $i$ -й линии электропередач протекает наиболее вероятный ток, определялись потери электрической мощности в  $i$ -й линии и в системе электроснабжения в целом, кВт:

$$\Delta P_{\text{предп}_i} = I_{\text{предп}_i}^2 \cdot R_i, \quad \sum \Delta P_{\text{предп}} = \sum_{i=1}^{i=N} \Delta P_{\text{предп}_i}. \quad (7)$$

Относительная погрешность определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия определится по выражению

$$\delta = \frac{\sum \Delta P_{\text{предп}} - \sum \Delta P_{\phi}}{\sum \Delta P_{\phi}} 100, \%. \quad (8)$$

Оценка относительной погрешности определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия производилась 100 раз. При этом для каждой новой оценки генерировалась новая система электроснабжения с новыми параметрами режимов ее работы. После проведения 100 испытаний оценивается среднеквадратическое отклонение относительной погрешности определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=K} (\delta_i - \delta_{\text{ср}})^2}{K}}, \%, \quad (9)$$

где  $\delta_{\text{ср}}$  – среднее значение относительной погрешности определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия за  $K$  испытаний, %.

На рис. 3 представлены гистограммы распределения относительной погрешности определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия. Из рис. 3 видно, что при увеличении количества линий электропередач (количества электроприемников) относительная погрешность определения потерь

электрической мощности в распределительной сети предприятия стремится к значению 25 %. При этом среднеквадратическое отклонение относительной погрешности стремится к нулю (рис. 4).

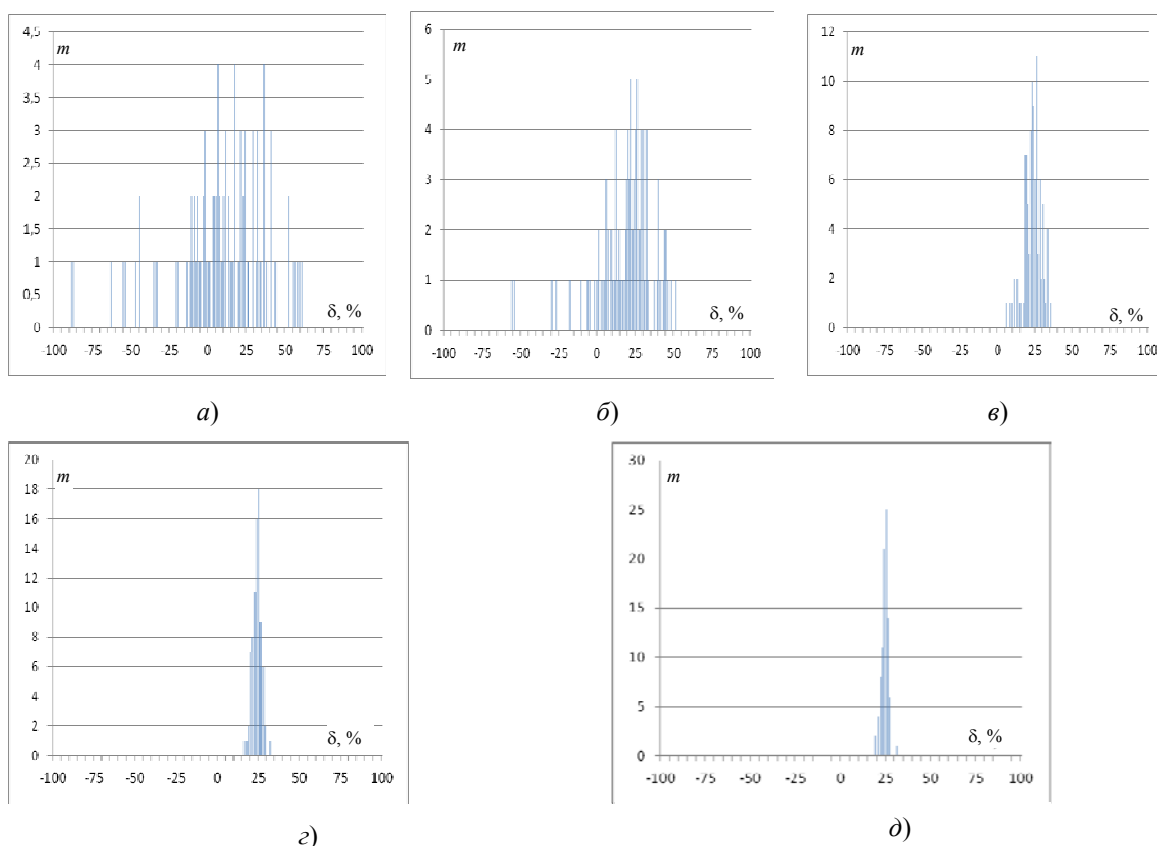


Рис. 3. Гистограммы распределения относительной погрешности определения потерь: *а* – для распределительной сети на 10 электроприемников; *б* – для распределительной сети на 100 электроприемников; *в* – для распределительной сети на 1000 электроприемников; *г* – для распределительной сети на 5000 электроприемников; *д* – для распределительной сети на 10000 электроприемников

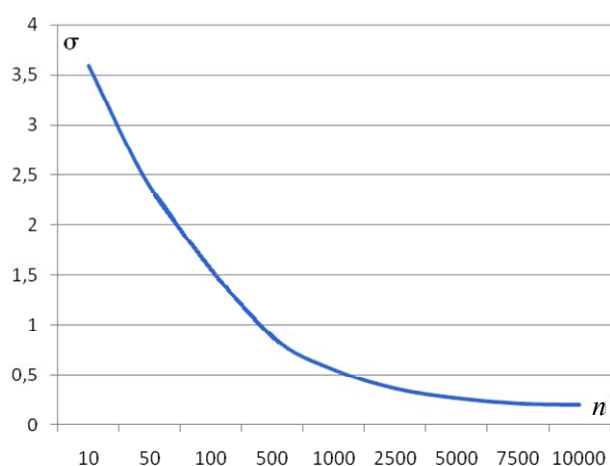


Рис. 4. Изменение среднеквадратического отклонения относительной погрешности определения потерь электрической мощности в распределительной сети

Поскольку математическое ожидание относительной погрешности определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия предложен-

ным способом стремится к 25 %, то это значение можно рассматривать как систематическую методическую погрешность. Тогда выражение для определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия примет вид:

$$\sum \Delta P = \frac{1}{1,25} \sum_{j=1}^{j=N} \left( \left( \frac{\sum P_{\phi}}{U} \right) \frac{P_{устj}}{\sum_{i=1}^{i=N} P_{устi}} \right)^2 R_i, \text{ кВт.} \quad (10)$$

Из рис. 4 видно, что при количестве электроприемников в системе электроснабжения больше 1000, среднеквадратическое отклонение относительной погрешности определения текущих потерь мощности в распределительной сети предприятия снижается до 0,5 %. С учетом нормального закона распределения относительной погрешности определения потерь электрической мощности предложенным способом (рис. 3), точность определения потерь, при количестве электроприемников более 1000 составляет  $\pm 1,5$  % (при уровне значимости 0,95). При количестве электроприемников в системе электроснабжения менее 50 среднеквадратическое отклонение относительной погрешности определения потерь мощности в распределительной сети составляет более 3 %, тогда точность определения потерь составит более  $\pm 10$  % (при уровне значимости 0,95). Это обуславливает целесообразность применения предложенного способа определения потерь мощности в распределительной сети только для крупных промышленных потребителей (с количеством электроприемников более 1000).

### Заключение

1. Предложен способ определения потерь электрической мощности в распределительной сети предприятия на основе распределения суммарной потребляемой мощности предприятия между электроприемниками пропорционально их установленной мощности.

2. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить верификацию предложенного способа определения потерь электрической мощности по методу испытаний Монте-Карло.

3. Установлено, что увеличение количества электроприемников в системе электроснабжения предприятия приводит к снижению среднеквадратического отклонения относительной погрешности определения потерь электрической мощности. Математическое ожидание относительной погрешности составляет 25 %. Эту погрешность можно учитывать как систематическую при расчете потерь мощности в распределительной сети предприятия предложенным способом.

### Литература

1. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск : Высш. шк., 1988. – 357 с.
2. Соболев, И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – Москва : Наука, 1968. – 64 с.
3. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор ; пер. Л. Г. Деденко. – Москва : Мир, 1985. – 272 с.
4. Прогноз электропотребления промышленного предприятия в условиях нестабильной экономики / Б. Н. Головкин [и др.] // Пром. энергетика. – 1996. – № 2. – С. 8–12.

Получено 26.04.2010 г.