

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.01

**В.В. Зорин**, д-р техн. наук, проф.

**Н.А. Докийчук**, інженер,

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Р.А. Буйный**, канд. техн. наук, доц.,

Черниговский национальный технологический университет;

**В.А. Перепечный**, канд. техн. наук, доц.,

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 кВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Предложена усовершенствованная математическая модель электрической сети многоэтажных зданий и метод расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии на основе данных измерений потерь напряжения на характерных участках схемы электрической сети. Рассмотрен алгоритм расчета таких параметров режима, как потери напряжения  $\Delta U$ , мощности  $\Delta P$  и электроэнергии  $\Delta W$  в электрической сети 0,38 кВ зданий высотной застройки города при проектной и эксплуатационной постановке задачи. На конкретном примере показана адекватность результатов расчета по предложенному методу. Простота предложенного метода расчета потерь мощности  $\Delta P$  и потерь электроэнергии  $\Delta W$  в электрической сети 0,38 кВ многоэтажного дома позволяет систематически контролировать режимы работы сети и своевременно проводить мероприятия по энергосбережению.*

**Ключевые слова:** расчетная схема, параметры режимов, потери мощности, потери напряжения, эксплуатационная постановка, проектная постановка задачи.

**Введение.** Для осуществления энергосберегающих мероприятий в городских распределительных электрических сетях необходимо систематически производить расчеты параметров режимов и делать оценку потерь мощности и электроэнергии. В [1] приведена подробная классификация методов расчета нагрузочных потерь. К ним относятся: методы поэлементных расчетов, характерных режимов, характерных суток, числа часов наибольших потерь, средних нагрузок, которые называются схмотехническими. Статистические методы не требуют проведения электрических расчетов, а используют устойчивые характеристики зависимости потерь от обобщенных параметров сети.

Объектом исследования в данной работе являются электрические распределительные сети напряжением 0,38 кВ районов города с многоэтажной застройкой.

**Целью и задачами** данной работы является разработка усовершенствованной математической модели электрической сети многоэтажных зданий для расчетов и оценки потерь мощности и электрической энергии на основе данных измерений потерь напряжения на участках электрической сети.

Один из известных способов определения потерь мощности и электроэнергии в сетях 0,38 кВ основан на использовании корреляционной связи между потерей напряжения и потерей мощности в сети и называется методом коэффициента  $K_{м/н}$  [2,3]. Выбор математических моделей и адекватных им методов расчета и анализа потерь мощности и электрической энергии определяется видом доступной информации о параметрах и режимах сети, а также целью и необходимой точностью расчета.

При выборе той или иной методики необходимо учитывать масштабы электрических сетей, массовость и периодичность расчетов. Естественно, что при разовых, индивидуальных расчетах могут быть использованы более точные методы, а при массовых, часто повторяющихся расчетах сетей большого объема, следует использовать более простые и менее точные методики. Следует иметь в виду, что при расчетах сетей больших объемов погрешности могут взаимно компенсироваться и общий результат может иметь приемлемую точность.

По требуемой степени точности расчетов можно выделить три группы моделей:

1. Оценочные модели, используемые для приближенных расчетов.

2. Более простые модели, применяемые при инженерных, оптимизационных и оперативных расчетах режимов, которые рассматриваются в данной статье.

3. Высокоточные модели, требующие детальной информации о параметрах и режимах сети, которые применяются при исследовательских и индивидуальных расчетах.

**Материал и результаты исследований.** Рассмотрим применение метода  $K_{M/H}$  для определения потерь мощности как функции от потери напряжения  $\Delta P_i = f(\Delta U)$ . В этом случае, при определении потерь мощности с использованием коэффициента  $K_{M/H}$ , необходимо в часы зимнего максимума измерять напряжение в начале  $U_1$  и на конце каждого участка  $U_2$  схемы сети на всех трех фазах. При этом потеря напряжения по отношению к номинальному  $U_n$  определяется по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_1 - U_2}{U_n} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Если фазные напряжения различны, то для дальнейших расчетов в качестве  $U_1$  и  $U_2$  рекомендуется принимать их среднее арифметическое значение.

При этом потери мощности на участке сети (в кВт или %) в сети по отношению к активной мощности на этом участке  $P_i$  вычисляются по формулам:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot K_{M/H} \cdot \Delta U_{i\%}}{100}, \text{ кВт}; \quad (2)$$

$$\Delta P_i = \frac{K_{M/H} \cdot \Delta U_{i\%}}{100}, \text{ \%}, \quad (3)$$

где  $P_i$  – измеренная активная мощность, протекающая по i-у участку электрической сети;  $K_{M/H}$  – коэффициент, взятый из табл.1;  $\Delta U_{i\%}$  – потеря напряжения на i-м участке сети.

Таблица 1 – Значения коэффициента  $K_{M/H}$  и относительных потерь мощности  $\Delta P_{\%}$  для различных видов распределения нагрузки и принятых допущений при расчете параметров схемы замещения линий

Вид распределения нагрузки и параметры схемы замещения ЛЭП	Значения коэффициента $K_{M/H}$ и относительных потерь мощности $\Delta P_{\%}$	
	$K_{M/H}$	$\Delta P_{\%}$
Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП, $x_0 = 0$ и $\cos\varphi = 1$	1	$K_{M/H} \cdot \Delta U_{\%}$
Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП, $x_0 = 0$ и $\cos\varphi \neq 1$	$\frac{1}{\cos^2 \varphi}$	
Равномерно распределенная нагрузка, $x_0 = 0$ и $\cos\varphi = 1$	0,67	
Равномерно распределенная нагрузка, $x_0 = 0$ и $\cos\varphi \neq 1$	$\frac{0,67}{\cos^2 \varphi}$	
Для любых случаев распределения нагрузки	$(1 + tg^2 \varphi) / \left( 1 + \frac{x_0}{r_0} \cdot tg^2 \varphi \right)$	

В [2,3] приводятся только общие, принципиальные положения использования коэффициента  $K_{M/H}$  для расчетов потерь мощности в электрической сети. В настоящей статье предлагается универсальная модель, удобная для обработки и не требующая большого объема исходных данных.

**Исходные данные для решения проектной задачи.** Рассмотрим проектную задачу определения потерь мощности  $\Delta P$  в электрической сети 16 этажного жилого дома (рис.1) с 3-я секциями, 3-я квартирами на этаже. В квартирах установлены электроплиты мощностью 8,5 кВт,  $\cos\varphi = 1$ . Также примем, что индуктивное сопротивление внутридомовых сетей 0,38 кВ  $x_0 = 0$ .

Стояк 1. Общее число квартир 48, удельная нагрузка на квартиру согласно [2]:

$$P_{y\partial} = 2,23 \text{ кВт/квартиру}; \quad P = 2,23 \cdot 48 = 107 \text{ кВт}; \quad I = \frac{107}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 163 \text{ А.}$$

Электрическая сеть выполнена проводом АПВ 4х95 в трубах для которого погонное активное сопротивление  $r_0 = 0,326$  Ом/км.

Стояки 1, 2, 3. Общее число квартир  $N_{\Sigma} = 48 \cdot 3 = 144$  кв., удельная нагрузка на квартиру согласно [2]:

$$P_{y\partial} = 1,56 \text{ кВт/квартиру}; \quad P_{OA} = 1,56 \cdot 144 = 225 \text{ кВт}; \quad I_{OA} = \frac{225}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 342 \text{ А.}$$

От ТП к дому подходит двухцепная КЛ 4х95мм<sup>2</sup> для которой погонное активное сопротивление  $r_0 = \frac{0,326}{2} = 0,163$  Ом/км.

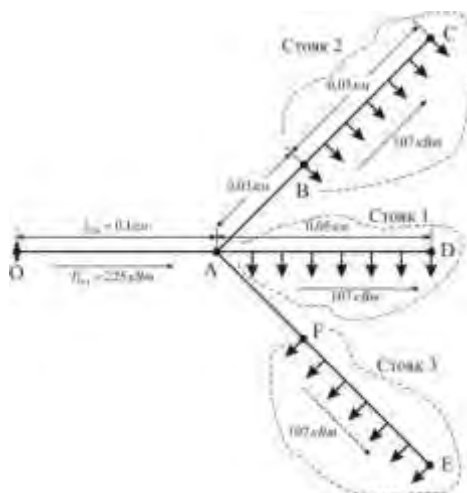


Рисунок 1 – Исходная схема сети 0,38 кВ 16-этажного жилого дома

Определим потерю напряжения на участке схемы сети OA с сосредоточенной нагрузкой по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot l_i}{10 \cdot U_H}, \quad (4)$$

где  $I_i$  – ток, протекающий на  $i$ -м участке, А;  $r_{0i}$  – погонное активное сопротивление провода на  $i$ -м участке, Ом/км;  $l_i$  – длина  $i$ -го участка, км.

Для участков OA, AB и AF с сосредоточенной нагрузкой потеря напряжения будет составлять (рис.2):

$$\Delta U_{OA\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 342 \cdot 0,163 \cdot 0,1}{10 \cdot 0,38} = 2,54 \%, \quad \Delta U_{AB\%} = \Delta U_{AF\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 163 \cdot 0,326 \cdot 0,03}{10 \cdot 0,38} = 0,73 \%.$$

Потерю напряжения на участках BC, AD, FE (рис 2) с равномерно распределенной нагрузкой определим по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot \frac{1}{2} \cdot l_i}{10 \cdot U_H}, \quad (5)$$

$$\Delta U_{BC\%} = \Delta U_{AD\%} = \Delta U_{FE\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 163 \cdot 0,326 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,05}{10 \cdot 0,38} = 0,603 \%.$$

Определяем потери мощности на участках схемы сети (рис.3) с сосредоточенной нагрузкой по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2}{U_H^2} \cdot r_{0i} \cdot l_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где  $P_i$  – активная мощность, протекающая на  $i$ -м участке, кВт.

Для участков OA, AB и AF активные потери будут составлять:

$$\Delta P_{OA} = \frac{225^2}{0,38^2} \cdot 0,163 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 5,71 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{AB} = \Delta P_{AF} = \frac{107^2}{0,38^2} \cdot 0,326 \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} = 0,775 \text{ кВт}.$$

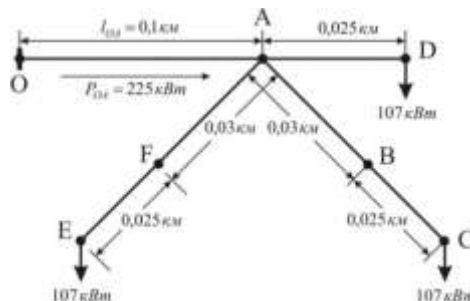


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения потерь напряжения  $\Delta U\%$

Потери мощности на участках схемы сети BC, AD, FE с равномерно распределенной нагрузкой (рис.3) определяются по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2}{U_n^2} \cdot r_{0i} \cdot \frac{1}{3} \cdot l_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad (7)$$

$$\Delta P_{BC} = \Delta P_{AD} = \Delta P_{FE} = \frac{107^2}{0,38^2} \cdot 0,326 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 0,43 \text{ кВт}.$$

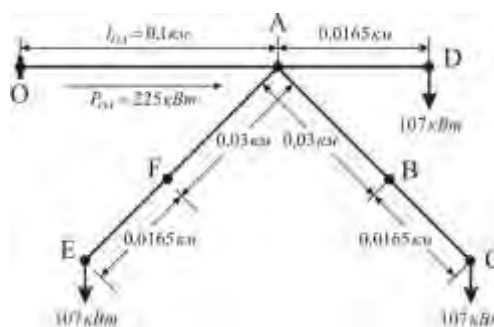


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения потерь мощности  $\Delta P$

**Эксплуатационная постановка решения задачи  $\Delta P_i = f(\Delta U)$ .** Для решения поставленной задачи определения потерь мощности в районах города с застройкой высотными зданиями необходимо в часы зимнего вечернего максимума нагрузки провести измерения потерь напряжения на каждом участке схемы сети 0,38 кВ (рис.1). Такие измерения должны проводиться одновременно приборами с классами точности 0,1 или 0,2, что позволит определить потерю напряжения с точностью до 10%.

Относительная потеря напряжения в % определяется по формуле (1).

Рассмотрим основные положения предлагаемой методики расчета потерь активной мощности  $\Delta P$  и потерь электрической энергии  $\Delta W$  по результатам измерений наибольшей потери напряжения  $\Delta U\%$  на примере 16-ти этажного жилого дома.

Определяем потери мощности  $\Delta P_i$  на участках схемы сети с сосредоточенными нагрузками по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot \Delta U_{i\%}}{100}, \quad (8)$$

а для участков с равномерно распределенными нагрузками – по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot K_{м/н} \cdot \Delta U_{i\%}}{100}. \quad (9)$$

Для сосредоточенных нагрузок на участках OA, AB и AF они равны:

$$\Delta P_{OA} = \frac{225 \cdot 2,54}{100} = 5,71 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{AB} = \Delta P_{AF} = \frac{107 \cdot 0,73}{100} = 0,78 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери мощности на участках с сосредоточенной нагрузкой:

$$\Delta P_{\Sigma \text{соср.}} = \Delta P_{OA} + \Delta P_{AB} + \Delta P_{AF} = 5,71 + 0,78 + 0,78 = 7,27 \text{ кВт}.$$

Для участков с равномерно распределенной нагрузкой:

$$\Delta P_{BC} = \Delta P_{AD} = \Delta P_{FE} = \frac{107 \cdot 0,67 \cdot 0,603}{100} = 0,43 \text{ кВт};$$

Суммарные потери по участкам с равномерно распределенной нагрузкой:

$$\Delta P_{\Sigma \text{распр.}} = \Delta P_{BC} + \Delta P_{AD} + \Delta P_{FE} = 0,43 + 0,43 + 0,43 = 1,29 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери мощности составляют:  $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma \text{соср.}} + \Delta P_{\Sigma \text{распр.}} = 7,27 + 1,29 = 8,56 \text{ кВт}$ .

Примем допущение, что потери напряжения на участках схемы сети дома, рассчитанные по данным замеров  $\Delta U_{\% \text{изм}}$ , равны расчетным потерям напряжения при проектировании  $\Delta U_{\% \text{проект}}$ :

$$\Delta U_{\% \text{изм}} = \Delta U_{\% \text{проект}}. \quad (10)$$

Такое допущение обеспечит проверку правильности расчетов по критерию  $\Delta P_i = f(\Delta U)$  предлагаемой методики. Результаты расчетов для лучшего сопоставления сведены в табл. 2, из которой видно, что они являются практически идентичными при разных постановках задачи. Это подтверждает адекватность предложенного метода.

Таблица 2 – Результаты расчетов потерь напряжения и мощности для схемы электрической сети при проектной и эксплуатационной постановках

Участки сети	Характеристика участка	Значения рассчитанных параметров режимов для задач в постановках		
		проектной		эксплуатационной
		$\Delta U_{\%}, \%$ (номер формулы)	$\Delta P_i, \text{ кВт}$ (номер формулы)	$\Delta P_i, \text{ кВт}$ (номер формулы)
OA	Сосредоточенная нагрузка	2,54 (4)	5,71 (6)	5,71 (8)
AB, AF	Сосредоточенная нагрузка	0,73 (4)	0,775 (6)	0,78 (8)
OA, AB, AF	Всего сосредоточенная нагрузка	–	7,26	7,27
AD	Распределенная нагрузка	0,603 (5)	0,43 (7)	0,43 (9)
AD, BC, FE	Всего распределенная нагрузка	–	1,29	1,29
	Всего по схеме	–	8,55	8,56

По найденным значениям максимальных потерь мощности на участках схемы сети  $0,38 \text{ кВт}$   $\Delta P_{i \text{max}}$  могут быть рассчитаны потери электроэнергии  $\Delta W_i$  через продолжительность максимальных потерь  $\tau$ :

$$\Delta W_i = \Delta P_{i \text{max}} \cdot \tau; \quad (11)$$

$$\tau \approx \left( 0,124 + \frac{T_{\max}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760, \quad (12)$$

где  $T_{\max}$  – число часов использования максимальной нагрузки.

Для рассматриваемого примера при  $T_{\max} = 3000$  имеем:

$$\tau \approx \left( 0,124 + \frac{3000}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 1575 \text{ ч/год.}$$

Для участков с сосредоточенной нагрузкой при  $\Delta P_{\Sigma \text{соср}} = 7,27$  кВт потери электроэнергии равны:

$$\Delta W_{\text{соср}} = 7,27 \cdot 1575 = 11450 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

а для участков с равномерно распределенной нагрузкой при  $\Delta P_{\Sigma \text{распр}} = 1,29$  кВт:

$$\Delta W_{\text{распр}} = 1,29 \cdot 1575 = 2032 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Суммарные потери электроэнергии по электрической сети (рис.1) составляют:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{\text{соср}} + \Delta W_{\text{распр}} = 11450 + 2032 = 13482 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Выполнение одновременных замеров напряжения в начале и в конце участков сети 0,38 кВ является весьма трудоемкой задачей для персонала электросетей города. Поэтому можно и целесообразно использовать метод случайной выборки [3]. Суть метода состоит в расчете потерь электроэнергии по методу  $K_{м/н}$  не во всех сетях, а только в их части. Если исследуемые сети 0,38 кВ можно разбить на характерные группы, то объем выборки можно существенно сократить. Например, группировать здания по этажности и числу секций в здании. Рассчитать потери электроэнергии для характерных схем каждой группы и затем распространить результаты на все множество схем.

#### Выводы

1. Рассмотрен алгоритм расчета параметров режима  $\Delta U$ ,  $\Delta P$  и  $\Delta W$  в электрической сети напряжением 0,38 кВ зданий высотной застройки города при проектной постановке задачи.

2. В проектной постановке задачи определения параметров режима работы электрической сети 0,38 кВ следует использовать расчетную модель для определения потерь напряжения  $\Delta U\%$ , представленную на рис.2, а для расчета потерь мощности  $\Delta P$  – на рис.3.

3. В эксплуатационной постановке задачи потери мощности  $\Delta P$  могут быть получены путем одновременных измерений режима напряжений в начале и в конце каждого характерного участка схемы электроснабжения дома и соответствующего коэффициента  $K_{м/н}$ .

4. Простота предложенного метода для расчета потерь мощности  $\Delta P$  и электроэнергии  $\Delta W$  в электрической сети 0,38 кВ многоэтажного дома позволяет систематически контролировать ее режимы работы и своевременно проводить мероприятия по энергосбережению.

#### Список использованной литературы

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176с.
2. Вопросы методики определения и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. – Л.: Минэнерго, 1958. – 265с.
3. Железко Ю.С. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 366с.
4. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – К.: Мінергійрозвитку та будівництва України, 2010. – 104с.
5. Зорін В.В., Штогрин Е.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи. – Ніжин: «Аспект-Поліграф», 2011. – 248с.
6. Зорин В.В., Буйный Р.А., Перепеченый В.А. Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38кВ // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – №5(136). – С.19-27.

V. Zorin, DSc, professor;  
N. Dokiychuk, engineer,  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
R. Buinyi, Ph.D., associate professor,  
Chernihiv National University of Technology;  
V. Perepechenyi, Ph.D., associate professor, O. Beketov,  
National University of Urban Economy in Kharkiv

**MODELS AND METHODS TO DETERMINE THE LOSS OF POWER AND ELECTRICITY  
IN 0.38kV URBAN ELECTRIC NETWORKS IN PROJECTED  
AND OPERATED HIGH-RISE BUILDINGS**

*An improved mathematical model of the electrical network in multi-storey buildings is proposed. It allows for an improved method of estimation and measurement of the power and power loss using the voltage loss measurements on specific areas of the electric network. Discussed is the algorithm of calculation of model parameters such as voltage drop  $\Delta U$ , power  $\Delta P$  and energy  $\Delta W$  in the electric grid of 0.38 kV high-rise buildings (projected and in operation). Using a particular example we showed the adequacy of the calculations made according to the proposed method. The simplicity of the proposed method of calculating the loss of power  $\Delta P$  and energy losses  $\Delta W$  in 0.38kV electric networks in high-rise buildings allows for systematic monitoring of the network operation modes and timely conduct energy saving activities.*

**Keywords:** calculation scheme, the parameters of the mode, power loss, voltage loss, operating statement, statement of project problems.

**References**

1. Zhelezko Yu.S. Choice of measures to reduce energy losses in electric networks. – M.: Energoatomizdat, 1989. –176p. (Rus.)
2. Questions to methods for determining the reduction of energy losses in electric power networks. – L.: Minenergo, 1958. – 265p. (Rus.)
3. Zhelezko Yu.S. Energy losses in electric networks of power systems. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 366p. (Rus.)
4. DBN V.2.5-23:2010. Design of electrical facilities for civil use. – K.: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2010. – 104p. (Ukr.)
5. Zorin V.V., Shtogryn E.A., Buinyi R.O. Electrical power networks and systems. – Nizhyn: «Aspekt-Poligraf», 2011. – 248p. (Ukr.)
6. Zorin V.V., Buinyi R.A., Perepechenyi V.A. Models and methods of calculation and estimation of power losses and electric energy distribution power networks 0.38 kV // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2015. – №5(136). – P.19-27. (Rus.)

УДК 621.311.01

**В.В. Зорін**, д-р техн. наук, професор;  
**Докійчук Н.О.**, інженер,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Р.О. Буйний**, канд. техн. наук, доцент,

Чернігівський національний технологічний університет;

**Перепечний В.О.**, канд. техн. наук, доцент,

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 0,38 кВ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

*Запропоновано вдосконалену математичну модель електричної мережі багатоповерхових будівель і метод розрахунку та оцінки втрат потужності і електричної енергії на основі даних вимірювань втрат напруги на характерних ділянках схеми електричної мережі. Розглянуто алгоритм розрахунку таких параметрів режиму, як втрати напруги, потужності і електроенергії в електричній мережі 0,38 кВ будинків висотної забудови міста при проектуванні та експлуатації. На прикладі показано адекватність результатів розрахунку запропонованим методом. Простота запропонованого методу розрахунку втрат потужності і втрат електроенергії в електричній мережі 0,38 кВ багатоповерхового будинку дозволяє систематично контролювати режими роботи мережі і своєчасно проводити заходи з енергозбереження.*

**Ключові слова:** розрахункова схема, параметри режимів, втрати потужності, втрати напруги, експлуатаційна постановка, проектна постановка задачі.

Надійшла 13.02.2017

Received 13.02.2017