

УДК 621.311.01

**Зорин Владлен Владимирович**, д-р техн. наук. Национальный технический университет Украины (КПИ), г. Киев, Украина. Просп. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

**Буйный Роман Александрович**, канд. техн. наук. Национальный Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина. Ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, Украина, 14027

**Перепеченый Виталий Александрович**, канд. техн. наук. Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. М. Бекетова, г. Харьков, Украина. Ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002

### МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,38 кВ

*Статья посвящается разработке и исследованию универсальной математической модели электрической сети 0,38 кВ для расчетов потерь мощности и электрической энергии на основе информации о потерях напряжения в линиях электропередачи.*

**Зорин Владлен Володимирович**, д-р техн. наук. Національний технічний університет України (КПІ), м. Київ, Україна. просп. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

**Буйний Роман Олександрович**, канд. техн. наук. Національний Чернігівський державний технологічний університет. м. Чернігів, Україна. Вул. Шевченко, 95, м. Чернігів, Україна, 14027

**Перепечений Віталій Олександрович**, канд. техн. наук. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна. Вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

### МОДЕЛІ І МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ І ОЦІНКИ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 0,38 кВ

*Стаття присвячується розробці і дослідженню універсальної математичної моделі електричної мережі 0,38 кВ для розрахунків втрат потужності і електричної енергії на основі інформації про втрати напруги в лініях електропередачі.*

**Zorin Vladlen Vladimirovich**, D-r (Eng.) Sc. National technical university of Ukraine, Kiev, Ukraine. Peremogy av., 37, Kiev, Ukraine, 03056

**Buyniy Roman Aleksandrovich**, Cand. Sc. (Eng.). National Chernihiv state technological university, Chernigiv, Ukraine. Shevchenko st., 95, Chernigiv, Ukraine, 14027

**Perepecheniy Vitaliy Aleksandrovich**, Cand. Sc. (Eng.). Kharkov national university of municipal economy of the name O. M. Beketova, Kharkov, Ukraine. Revoliutsii, st. 12, Kharkov, Ukraine, 61002

### MODELS AND METHODS OF CALCULATION AND ESTIMATION OF LOSSES OF POWER AND ELECTRIC ENERGY IN DISTRIBUTIVE NETWORKS 0,38 kV

*The article is dedicated to development and research of universal mathematical model of electric network 0,38 kV for the calculations of losses of power and electric energy on the basis of information about the losses of tension in the lines of electricity transmission*

#### Введение

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 простые модели, используемые для приближенных расчетов.
2. Более точные 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.

### Постановка задачи

По виду моделей расчетных электрических нагрузок различают три группы методов расчета потерь мощности и электрической энергии – детерминированные, вероятностно-статистические и методы в условиях неопределенности информации.

Рассмотрим некоторые дискретные модели расчета потерь мощности и электрической энергии [1,2]:

1) метод поэлементных расчетов:

$$\Delta W_H = 3 \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^K R_i \cdot \sum_{j=1}^{T/\Delta t} I_{ij}^2, \quad (1)$$

где  $K$  – количество элементов сети;

$I_{ij}$  – токовая нагрузка  $i$ -го элемента сопротивлением  $R_i$  в момент времени  $j$ ;

$\Delta t$  – периодичность опроса датчиков нагрузки;

2) метод характерных режимов:

$$\Delta W_H = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_j, \quad (2)$$

где  $\Delta P_i$  – нагрузочные потери мощности в сети  $i$ -м режиме продолжительностью  $t_j$  часов;

$n$  – число режимов;

3) метод характерных суток:

$$\Delta W_H = \sum_{i=1}^m \Delta W_{\text{нис}} \cdot D_{\text{эки}}, \quad (3)$$

где  $m$  – количество характерных суток; потери электроэнергии, рассчитываемые по графикам нагрузки в узлах сети, составляют

$\Delta W_{\text{нис}} \cdot D_{\text{эки}}$  – эквивалентная продолжительность в году  $i$ -го характерного графика (количество суток);

4) метод, использующий количество часов наибольших потерь мощности  $\tau$

$$\Delta W_H = \Delta P_{\text{max}} \cdot \tau, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{\text{max}}$  – потери мощности в режиме наибольших нагрузок сети.

$$\tau \approx (0,124 + T_M/10^4)^2 \cdot 8760, \text{ часов}, \quad (5)$$

где  $T_M$  – количество часов использования максимальной нагрузки;

5) метод средних нагрузок:

$$\Delta W_H = \Delta P_{\text{ср}} \cdot k_{\text{ф}}^2 \cdot T, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{\text{ср}}$  – потери мощности в сети при средних нагрузках за время  $T$ ;

$k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы графика мощности или тока;

6) метод  $K_{M/H}$ :

$$\Delta P_{M,\%} = K_{M/H} \cdot \Delta U_{M,\%}, \quad (7)$$

где  $\Delta P_M$  и  $\Delta U_M$  – наибольшие потери мощности (в %) и наибольшие потери напряжения (в %) до последнего участка линии.

Коэффициент перехода  $K_{M/H}$  зависит от большого количества факторов и для реальных электрических сетей изменяется в пределах от 0,6 до 1. В литературных источниках [1,3] рассматривались, в основном, принципиальные возможности расчета потерь

электроэнергии в городских и сельских сетях напряжением до 1000 В на основании измеренных потерь напряжения в линиях от шин ТП до наиболее электрически удаленной точки сети.

**Целью и задачей исследования** явились разработка и исследование усовершенствованной универсальной математической модели электрической сети 0,38 кВ для расчетов потерь мощности и электрической энергии на основе информации о потерях напряжения в линиях электропередачи.

**Объектом исследования** являются распределительные электрические сети напряжением 0,38 кВ с воздушными линиями электропередачи.

**Материалы и результаты исследований**

Распределительные электрические сети напряжением до 1000 В занимают важное место в электросетевом хозяйстве предприятий электрических сетей. К таким сетям могут быть подключены как сосредоточенные, так и равномерно-распределенные нагрузки потребителей. Распределительные сети (воздушные и кабельные) отличаются большим разнообразием структуры и конфигурации, величиной, характером и взаимным расположением нагрузок и их параметрами.

Широкое распространение компьютерной техники потребовали разработки таких математических моделей, которые были бы удобны и эффективны при расчетах. Такие модели с одной стороны должны в достаточной степени отражать особенности рассчитываемой сети, а с другой – отличаться простотой, наглядностью и не требовать чрезмерно больших объемов исходных данных.

В целом ряде случаев в системах электроснабжения городов, сельских районов и промышленных предприятий встречаются электрические линии, у которых приблизительно одинаковые величины нагрузок расположены на равных расстояниях друг от друга. К ним могут быть отнесены линии уличного освещения, воздушные линии напряжением 0,38/0,22 кВ вдоль улиц с малоэтажной застройкой, стояки многоэтажных зданий и питание однотипного электрооборудования от магистральных шинопроводов в цехах промышленных предприятий. Такие линии называют линиями с равномерно распределенной нагрузкой.

На рис. 1 [3] приведен участок электрической сети с равномерно распределенной нагрузкой, а на рис. 2 – известные формулы для различных случаев при расчете потерь мощности  $\Delta P$  и потерь напряжения  $\Delta U$ .

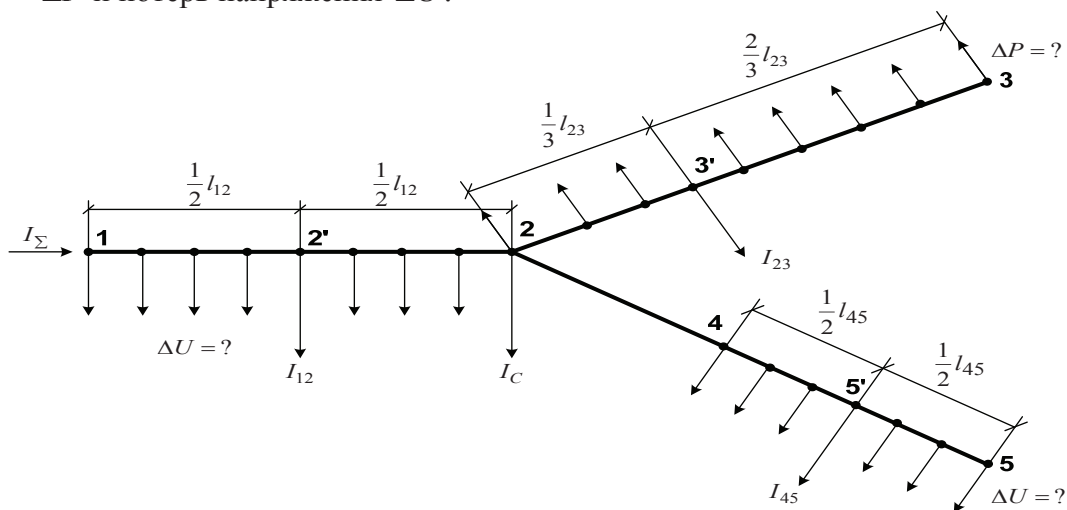


Рис. 1. Рассматриваемый пример участка воздушной электрической сети

Если суммарную нагрузку приложить к концу указанного участка, то потери в ней будут в 3 раза большими, чем при равномерно распределенной нагрузке. При расчетах потерь мощности  $\Delta P$  следует нагрузку участка приложить на расстоянии 1/3 его длины (см. рис. 2, а).

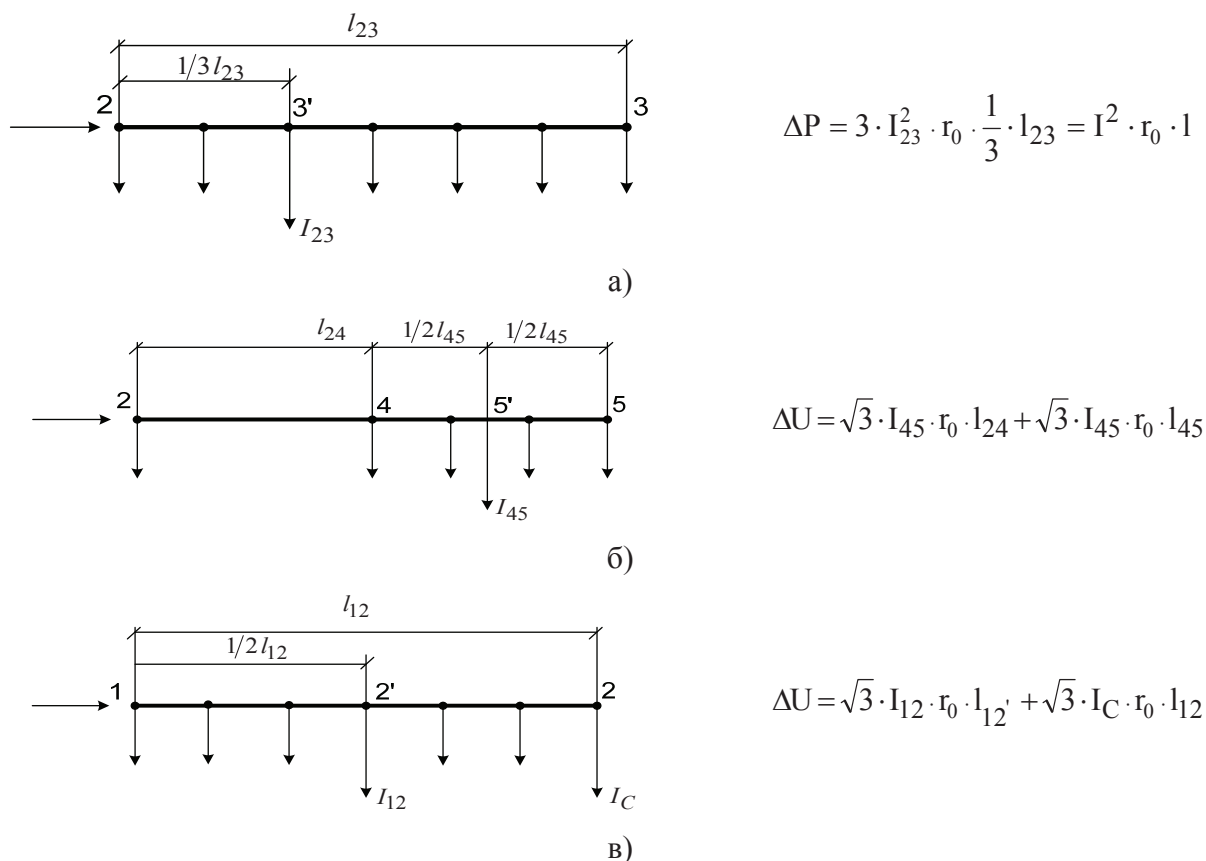


Рис. 2. Формулы для расчета потерь мощности  $\Delta P$  и напряжения  $\Delta U$  для различных конфигураций участков сети

В ветви 2–5 (рис. 2,б) нагрузка равномерно распределена лишь на части линии. Эту ветвь можно рассматривать как состоящую из двух участков 2–4 и 4–5. При расчетах потерь напряжения  $\Delta U$  суммарную нагрузку участка 4–5 (ток  $I_{23}$ ) следует приложить в точке 5' – в середине участка 4–5. На участке 1–2 (рис. 2,в) протекает распределенный ток  $I_{12}$ , равный сумме токов на участках 2'–2 и 1–2', а на конце сосредоточенный ток  $I_C$ .

Электрические сети напряжением до 1000 В отличаются от сетей 6–10 кВ и выше большей разветвленностью и суммарной протяженностью. Информация о параметрах режима таких сетей наименее полная и наименее достоверная. В лучшем случае известны лишь токовые нагрузки головных участков линий или энергия, отпущенная в эти линии с шин ТП 6–10/0,4 кВ. Информация о нагрузках в узлах сети, как правило, отсутствует. Ниже речь будет идти в основном о городских и сельских электрических сетях.

Наиболее приемлемым для расчета потерь мощности в таких сетях может оказаться метод, основанный на измерении потери напряжения до наиболее электрически удаленной точке сети (так называемый метод  $K_{M/H}$ ) [1, 3–5]. Однако в указанной литературе рассмотрены, в основном, лишь принципиальные положения такого подхода. В настоящей статье предлагается универсальная математическая модель, удобная для компьютерной обработки. Суть метода состоит в определении относительных потерь мощности  $\Delta P \%$  по наибольшей относительной потере напряжения  $\Delta U \%$ , приведенной в табл. 1.

Измеренная величина потери напряжения в %, определяется по формуле:

$$\Delta U \% = \frac{(U_1 - U_2)}{U_1} \cdot 100, \quad (8)$$

где  $U_1$  – фазное напряжение, измеренное на шинах 0,4 кВ ТП;  $U_2$  – наименьшее фазное напряжение на всех участках линии.

Рассмотрим основные положения предлагаемой методики расчета потерь активной мощности  $\Delta P, кВт$  и потери электрической энергии  $\Delta W, кВт \cdot ч$  по результатам измерений наибольшей потери напряжения  $\Delta U\%$  на примере воздушной линии электропередач 0,38 кВ [5].

Известно, что длина ЛЭП  $L=1 км$ , ток головного участка линии  $I_{\Sigma} = 100 А$ , распределенная нагрузка на участке линии BD с удельным значением  $I_{0A} = 100 А/км$ , провод АС-50,  $r_0 = 0,62 Ом/км$ ,  $\cos \varphi = 1$  (рис. 3).

Таблица 1

Значения  $K_{M/H}$ ,  $\Delta P\%$  и схемы замещения

№ п.п.	Характеристика электрической линии	Значение $K_{M/H}$	Значение $\Delta P\%$
1	Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП при $r_0$ и $\cos \varphi = 1$	1	$\Delta P\% = K_{M/H} \cdot \Delta U\%$
2	То же, но при $\cos \varphi \neq 1$	$\frac{1}{\cos^2 \varphi}$	$\Delta P\% = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta U\%$
3	Равномерно распределенная нагрузка при $r_0$ и $\cos \varphi = 1$	0,67	$\Delta P\% = 0,67 \cdot \Delta U\%$
4	То же, но при $\cos \varphi \neq 1$	$\frac{0,67}{\cos^2 \varphi}$	$\Delta P\% = 0,67 \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta U\%$
5	Схема замещения для $\Delta U\%$		
6	Схема замещения для $\Delta P\%$		

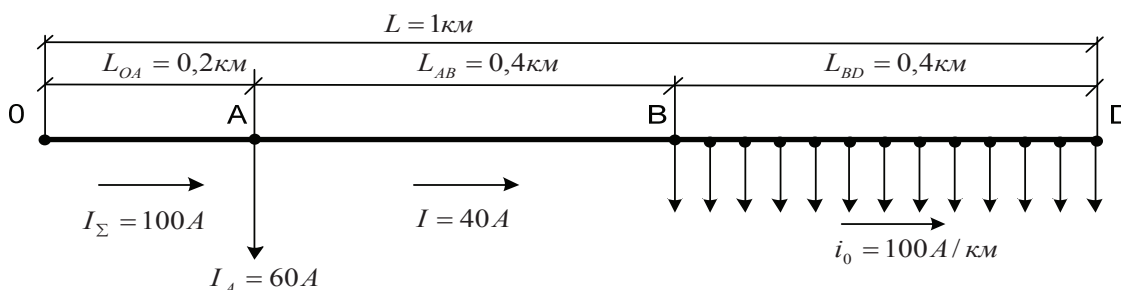


Рис. 3. Исходная существующая схема линии 0,38 Кв

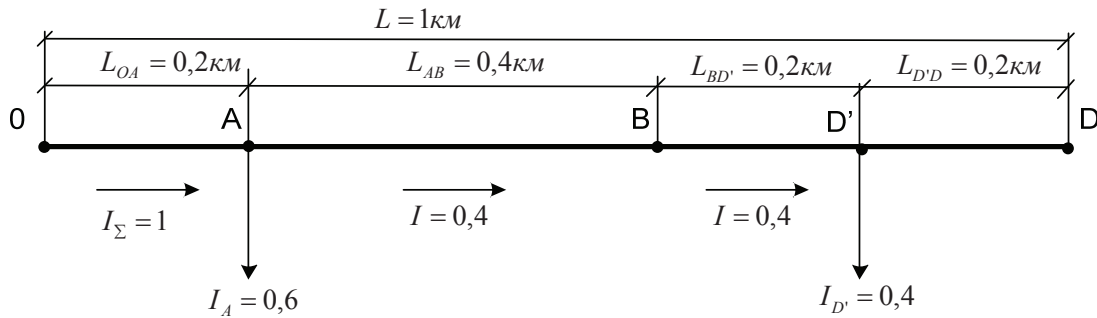


Рис. 4. Расчетная схема для определения потери напряжения  $\Delta U \%$ .

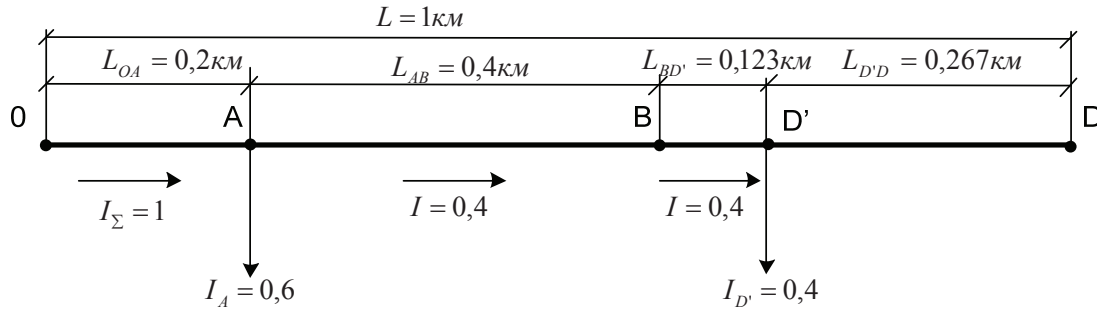


Рис. 5. Расчетная схема для определения потери мощности  $\Delta P \%$

Для определения потерь мощности и электрической энергии в распределительной сети напряжением до 1000 В с помощью предлагаемой методики необходимы следующие исходные данные:

1. Схема сети с указанием номинального напряжения  $U_n$ , общая длина магистральной линии  $L$  и протяженность отдельных участков и ответвлений  $l_i$ , марка и сечение провода, сосредоточенные нагрузки и ответвления, участки с равномерной нагрузкой.

2. Характер подключенных к линии потребителей, суточный график нагрузки, максимальный ток головного участка  $I_m, T_m, \cos\varphi$ .

3. Составляется исходная схема электрической линии 0,38 кВ на основе всей доступной информации (рис. 3).

4. Далее составляется расчетная схема сети (рис. 4) [6] для вычислений потерь напряжения  $\Delta U \%$  на каждом участке схемы и суммарные потери напряжения  $\Delta U \%_{\Sigma}$  до конца магистрали. На расчетной схеме показаны сосредоточенные нагрузки крупных потребителей (школы, детсады, ответвления от магистрали), на участке с равномерно распределенной нагрузкой, последняя заменяется сосредоточенной и приложенной к середине участка BD в точке D' (рис. 4). Таким образом, расчетная схема представляет собой магистраль с двумя сосредоточенными нагрузками в узлах A и D'. Потери напряжения определяются по формуле:

$$\Delta U \% = K \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_0 \cdot l_i / 10 \cdot U_n. \quad (9)$$

Для удобства расчетов постоянные величины вынесены за знак суммы и обозначены коэффициентом  $K$ , а токи и длины участков выражены в относительных единицах:

$$K = \sqrt{3} \cdot I_{\Sigma} \cdot r_0 \cdot l_i / 10 \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot 100 \cdot 0,62 \cdot 1 / 10 \cdot U_n. \quad (10)$$

Тогда потери напряжения будут равны:

$$\begin{aligned} \Delta U_{OA} &= 28,22 \cdot 0,2 = 5,64\%; & \Delta U_{AB} &= 28,22 \cdot 0,4 \cdot 0,4 = 4,52\%; \\ \Delta U_{BD'} &= 28,22 \cdot 0,2 \cdot 0,4 = 2,26\%; & \Delta U_{\Sigma} &= 12,42\%. \end{aligned}$$

5. После этого производятся измерения потери напряжения  $\Delta U \%$  в натуре от шин 0,4 кВ ТП до наиболее удаленного пункта линии 0,38 кВ и в нескольких промежуточных точках.



Добиваясь желаемой точности определения потери напряжения 10% нужно использовать высокоточные приборы с классом точности 0,1 и 0,2 [7] электродинамической системы. Таким образом, для проведения измерений выбираем вольтметры типа Д5055 с конечным значением диапазона измерения 300 В и ценой деления шкалы 1 В.

Относительная потеря напряжения %, определяется по формуле (8). Если фазные напряжения различны, то в качестве  $U_1$  и  $U_2$  рекомендуется принимать их среднее арифметическое значение.

Измерения следует производить в период вечернего зимнего максимума. Выполнение одновременных замеров напряжения в начале и в конце линии 0,38 кВ весьма трудоемка. Поэтому на практике для оценки потерь напряжения  $\Delta U\%$  в совокупности сетей 0,38 кВ оправданным можно считать метод случайной выборки. Если исследуемые сети можно разбить на характерные группы, то объем выборки можно существенно сократить.

6. Далее необходимо сравнить значения потерь напряжения, рассчитанные при принятых исходных данных по формулам с измеренными значениями. Если разница будет значительной, то надо скорректировать некоторые исходные данные (протяженность участков линии и некоторых нагрузок). В данном примере расчета считаем, что разница незначительная, поэтому можно перейти к расчету потерь мощности по величине потерь напряжения в % и соответствующих коэффициентов перехода  $K_{M/H}$  (табл. 1).

7. Для определения потерь мощности  $\Delta P\%$  используется расчетная схема сети, приведенная на рис. 5.

На участке BD равномерно распределенная нагрузка заменяется сосредоточенной в пункте D' (т.е. приложена на расстоянии 1/3 от начала участка BD.)

8. Определяется потокораспределение активной мощности  $P_i, кВт$  по формуле:

$$P_i = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_i \cdot \cos\varphi_i, кВт . \quad (11)$$

Для рассматриваемого примера:

$$P_{OA} = \sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 100 \cdot 1 = 66 кВт ; \quad P_{AB} = P_{BD'} = \sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 40 \cdot 1 = 26,3 кВт ; \\ P_{\Sigma} = 66 + 26,3 = 92,3 кВт .$$

9. Определяются потери активной мощности на участках (в кВт и %):

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2}{U_i^2} \cdot r_0 \cdot l_i \cdot 10^{-3}, кВт , \quad \Delta P_i, \% = \frac{\Delta P_i}{P_{\Sigma}} \cdot 100 . \quad (12)$$

Для рассматриваемого примера:

$$\Delta P_{OA} = \frac{66^2}{0,38^2} \cdot 0,62 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 3,74 кВт ; \quad \Delta P_{OA} = \frac{3,74}{66} \cdot 100 = 5,67 \% . \\ \Delta P_{AB} = \frac{26,3^2}{0,38^2} \cdot 0,62 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 1,19 кВт ; \quad \Delta P_{AB} = \frac{1,19}{26,3} \cdot 100 = 4,52 \% . \\ \Delta P_{BD'} = \frac{26,3^2}{0,38^2} \cdot 0,62 \cdot 0,133 \cdot 10^{-3} = 0,39 кВт ; \quad \Delta P_{BD'} = \frac{0,39}{26,3} \cdot 100 = 1,48 \% . \\ \Delta P_{\Sigma} = 3,74 + 1,19 + 0,39 = 5,39 кВт ; \quad \Delta P_{\Sigma} = \frac{5,39}{92,3} \cdot 100 = 5,76 \% .$$

10. Выполняется такой же расчет по предлагаемой математической модели для сосредоточенной нагрузки в конце участка по формуле:

$$\Delta P_i = P_i \cdot \Delta U\% / 100, кВт , \quad (13)$$

и для равномерно распределенной нагрузки и  $K_{M/H} = 0,67$  по формуле:

$$\Delta P_i = P_i \cdot 0,67 \cdot \Delta U \% / 100, \text{ кВт} . \quad (14)$$

Для рассматриваемого примера:

$$\Delta P_{OA} = 66 \cdot 5,6 / 100 = 3,7 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{AB} = 26,3 \cdot 4,52 / 100 = 1,19 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{BD'} = 26,3 \cdot 0,67 \cdot 2,26 / 100 = 0,4 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 3,74 + 1,19 + 0,4 = 5,28 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{\Sigma} = \frac{5,29}{92,3} \cdot 100 = 5,72\% .$$

По найденным значениям максимальных потерь мощности могут быть рассчитаны потери электроэнергии  $\Delta W$  по формуле (4) с учетом (5).

Для рассматриваемого примера:

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

$$\Delta W_{OA} = 3,7 \cdot 1575 = 5828 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad \Delta W_{AB} = 1,19 \cdot 1575 = 1874 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta W_{BD'} = 0,4 \cdot 1575 = 630 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta W_{\Sigma} = 5828 + 1874 + 630 = 8332 \text{ кВт} \cdot \text{ч} .$$

### Выводы

1. Следует отметить простоту метода и алгоритма, а также минимум исходной информации для получения оценочной величины потерь напряжения  $\Delta U\%$  путем одновременного измерения уровня напряжения в начале и в конце линии 0,38 кВ, а затем по ним рассчитать потери мощности и потери электрической энергии, используя коэффициент  $K_{M/H}$ .

2. Эквивалентная конфигурация расчетной модели предельно проста и представляет собой магистральную линию с сечением головного участка с несколькими сосредоточенными нагрузками. Не имеет значения, какого вида исходная линия: с ответвлениями или без, с равномерно распределенными нагрузками или сосредоточенными, при  $\cos \varphi = 1$  или  $\cos \varphi \neq 1$ .

3. Зависимость потерь мощности от потери напряжения

$$\Delta P \% = f(\Delta U \%).$$

– для сосредоточенной нагрузки в конце линии  $\cos \varphi = 1$

$$K_{M/H} = 1; \quad \Delta P \% = K_{M/H} \cdot \Delta U \% .$$

– тоже, но  $\cos \varphi \neq 1$

$$K_{M/H} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}; \quad \Delta P \% = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta U \% .$$

– для равномерно распределенной нагрузки  $\cos \varphi = 1$

$$K_{M/H} = \frac{2}{3}; \quad \Delta P \% = 0,67 \cdot \Delta U \% .$$

– тоже, но  $\cos \varphi \neq 1$

$$K_{M/H} = \frac{2}{3 \cdot \cos^2 \varphi}; \quad \Delta P \% = 0,67 \cdot \frac{\Delta U \%}{\cos^2 \varphi} .$$



4. Простота метода  $K_{м/н}$  расчета и оценки потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ позволяет систематически контролировать режим работы сети 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. – 176 с.
2. Зорін В. В., Штогрин Е. А., Буйний Р. О. Електричні мережі та системи. – Ніжин: «Аспект-Поліграф», 2011.– 248 с.
3. Поспелов Г. Е., Сыч Н. М. Потери мощности и энергии в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1981. – 216 с.
4. Железко Ю. С. и др. Потери электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 366 с.
5. Вопросы методики определения и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. – НИС – Минэнерго, 1958 – 366 с.
6. Зорин В. В., Тисленко В. В. Системы электроснабжения общего назначения. – Чернигов: ЧГТУ, 2005.– 341 с.
7. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.5. Облік електроенергії. – К.: Міненерговугілля, 2014. – 19 с.

**Referenses:**

1. Zhelezko Yu.S. (1989), Choice of measures to reduce electric energy losses in electricity grids [Vybor meroproiyatiy po snizheniyu poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh], Energoatomizdat, Moscow, 176 p.
2. Zorin, V.V., Shtogryn, E.A, Buyniy, R.O. (2011), Electricity grids and systems [Elektrychni merezhi ta systemy], Aspekt-Poligraf, Nizhyn, 248 p.
3. Pospelov, G.E., Sych, N.M. (1981), Losses of power and energy in electricity grids [Poteri moshchnosti i energii v elektricheskikh setyakh], Energoatomizdat, Moscow, 216 p.
4. Zhelezko, Yu.S. et al (1983), Losses of electric energy in electricity grids [Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh], Energoatomizdat, Moscow, 366 p.
5. NIS Minenergo (1958), Problems of the methods of evaluation and reduction of electric energy losses in electricity grids [Voprosy metodiki opredeleniya i snizheniya poter v elektricheskikh setyakh], NIS Minenergo, 366 p.
6. Zorin, V.V., Tislenko, V.V. (2005), General purpose electric power supply systems [Sistemy elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya], ChGTU, Chernigov, 341 p.
7. Minenergovygiillia (2014), Guidelines for arrangement of electric installations. Section 1. General Rules. Chapter 1.5. Electricity metering [Pravyla oblashtuvannia elektroinstallatsiy. Rozdil 1. Zagalni pravyla. Glava 1.5. Oblik elektroenergii], Kyiv, Minenergovygiillia, 19 p.

Поступила в редакцию 21.04 2015 г.