

А.А. Мирошник

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ НЕСИММЕТРИЧНО НАГРУЖЕННОЙ СЕТИ

Запропоновано методи приблизного та точного визначення втрат потужності в нерівномірно навантажених сільських мережах 0,38/0,22 кВ.

Предложены методы приближенного и точного определения потерь мощности в неравномерно нагруженных сельских сетях 0,38/0,22 кВ.

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение качества электрической энергии является актуальной проблемой в сельских электрических сетях напряжением 0,38/0,22 кВ, которая неразрывно связана с уменьшением дополнительных потерь электроэнергии, вызванных несимметричной нагрузкой фаз. Анализ режимов работы сельских сетей напряжением 0,38/0,22 кВ [1, 2] показал, что несимметрия токов обусловлена коммунально-бытовой нагрузкой. Основную часть этой нагрузки составляют неравномерно распределенные по фазам однофазные электроприемники, имеющие, как правило, случайный характер электропотребления. Знание величин несимметрии токов в сети, позволяет уточнить уровень потерь электроэнергии и по возможности применить мероприятия по их снижению.

Для определения потерь активной мощности в четырехпроводных (и трехпроводных) неравномерно нагруженных линиях предложен ряд методов, основанных, главным образом, на необходимости знания величин линейных токов и тока в нулевом проводе [3]. Методы основаны, в общем, на определении степени несимметрии или коэффициентов неравномерности токов и зависящей от них кратности увеличения потерь (по отношению к потерям в симметричном режиме).

С точки зрения эксплуатации сетей 0,38 кВ, особенно сельских, нужно учесть следующее:

- неравномерно нагруженные линии с одной сосредоточенной на конце нагрузкой встречаются на практике крайне редко, нагрузка, как правило, распределена вдоль линии;

- измерение токов в проводах на многочисленных участках линий с распределенной нагрузкой крайне затруднительно, а иногда просто невозможно.

Исходя из этих соображений, основными недостатками методов следует считать:

- необходимость знания токов в трех линейных проводах и нулевом проводе на всех многочисленных участках сети;

- возможность определения потерь (или кратности их увеличения) только на каждой отдельной участке с последующим их суммированием, для чего необходимо, кроме всего прочего, измерение токов одновременно на всех участках и т.п.

Определить степень неравномерности нагрузки фаз можно через коэффициент неравномерности:

$$k_n = \frac{I_n}{I_A + I_B + I_C}, \quad (1)$$

где I_A , I_B , I_C – соответственно токи фаз А, В и С; I_n – ток в нулевом проводе.

Для оценки неравномерности нагрузок (рис. 1) можно использовать относительные разности значений фазных токов [4]:

$$a = \frac{I_{cp} - I_{min}}{I_{max}}, \quad b = \frac{I_{max} - I_{cp}}{I_{max}}, \quad (2)$$

где I_{max} , I_{cp} , I_{min} – соответственно действующие значения токов максимально, средне и минимально нагруженных фаз.

Из этих соотношений видно, что пофазно неравномерно нагруженная трехфазная сеть может быть представлена как сеть, питающая трехфазную симметричную нагрузку, определяемую величиной тока минимально нагруженной фазы (в относительных единицах), и две однофазные нагрузки, одна из которых подключена к средне нагруженной фазе и определяется величиной относительной разности токов a , а другая, определяемая суммой величин относительных разностей токов ($a + b$), подключена к максимально нагруженной фазе сети.

Для оценки увеличения потерь мощности и энергии в сети вследствие неравномерности нагрузки фаз в трехфазной четырехпроводной сети используется коэффициент увеличения потерь мощности, представляющий собой отношение потерь мощности в сети при неравномерной нагрузке фаз к потерям мощности в той же сети при той же нагрузке, но равномерно распределенной по фазам:

$$k_y = \frac{\Delta P_{нр}}{\Delta P_p}. \quad (3)$$

Если в формулу (3) ввести значение коэффициента неравномерности нагрузки фаз (1), то эта формула примет вид:

$$k_y = 1 + \left(2 + 3 \frac{r_n}{r_\phi} \right), \quad (4)$$

где r_n – активное сопротивление нулевого провода; r_ϕ – активное сопротивление фазного провода.

Ниже приведены графики зависимостей кратности увеличения потерь активной мощности на участке четырехпроводной линии (в зависимости от сечения нулевого S_n и фазного S_ϕ проводов) и в трансформаторе от коэффициента неравномерности (рис. 2, 3).

Учитывая все сказанное, приходим к заключению, что с точки зрения эксплуатации сети метод определения потерь мощности в неравномерно нагруженной линии с распределенной нагрузкой должен удовлетворять следующим требованиям:

- давать возможность вычисления потерь сразу по всей линии с любым числом неравномерно нагруженных участков;

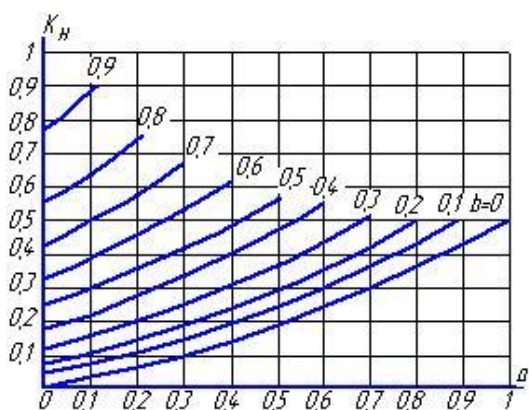


Рис. 1 Зависимость коэффициента неравномерности от разностей токов

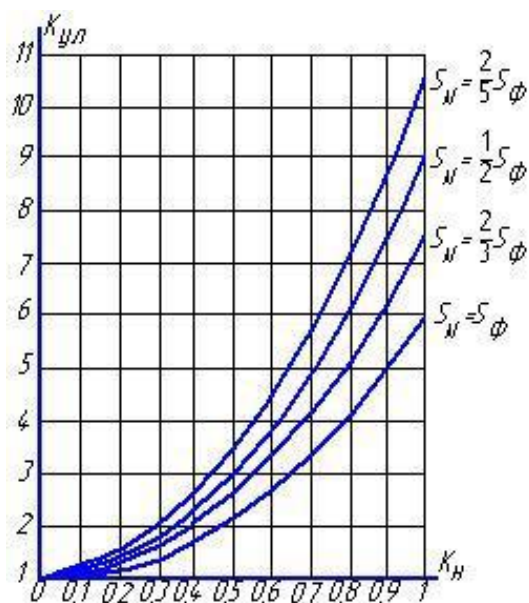


Рис. 2 Зависимость коэффициента кратности увеличения потерь активной мощности в линии от коэффициента неравномерности

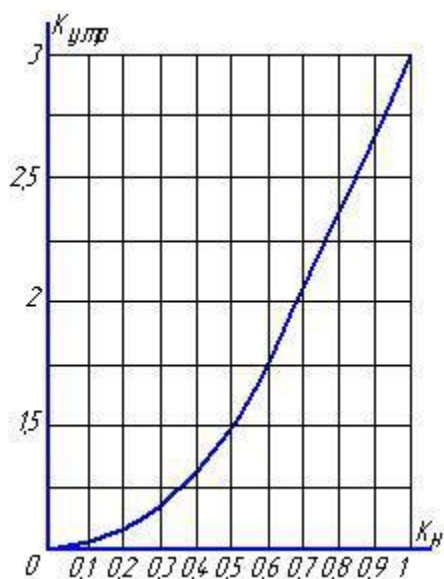


Рис. 3 Зависимость кратности увеличения потерь активной мощности в трансформаторе от коэффициента неравномерности

- не требовать для вычислений знания токов в линейных и нулевом проводах на каждом участке линии;
- позволять производить вычисления по таким доступным в эксплуатации показателям режима, как уровни напряжения в начале и в конце линии и по средним электрическим параметрам электропередачи.

Имея в виду [5, 6] соотношения между потерями активной мощности и напряжения в линиях с произвольно распределенной нагрузкой, можно использовать метод определения потерь активной мощности в любой четырехпроводной неравномерно нагруженной линии. Так для приближенного определения потерь мощности в режиме максимальных нагрузок воспользуемся выражением:

$$\Delta P\% = x + y\Delta U\% \quad (5)$$

где $\Delta U\%$ – потеря напряжения в часы максимума до электрически наиболее удаленного потребителя; x и y – коэффициенты, которые определяются в зависимости от вида нагрузки (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов		
Вид нагрузки	x	y
Производственная	1,12	0,81
Коммунально-бытовая	0,64	0,71
Смешанная	-1,26	1,01

Основываясь на изложенном, предлагается определять математическое ожидание потерь активной мощности в неравномерно нагруженной трехфазной четырехпроводной линии как сумму математических ожиданий потерь мощности в фазных и нулевом проводах по величинам математических ожиданий потерь напряжения в каждом из этих проводов, либо по величине математического ожидания средней потери напряжения.

Если в эксплуатационных условиях все же представляется возможность произвести измерение токов в проводах на головных участках фидеров 0,38 кВ, то для вычисления потерь может быть предложен метод эквивалентного тока.

Основываясь на том же исходном положении, для каждой фазы линии и для нулевого провода могут быть найдены условные эквивалентные токи, одинаковые по всей длине линии, которые создают в последней такие же потери, как и реальные линейные токи, протекающие на участках.

Если установить аналитическую связь между условным эквивалентным током и током на головном участке, то по известному значению тока на головном участке могут быть определены потери мощности [5]:

$$\Delta P_{\Sigma} = I_3^2 R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m I_i^2 R_i \quad (6)$$

Приняв k_3 коэффициент эквивалентности:

$$k_3 = \frac{I_3}{I_1} = \frac{0,41\sqrt{(m+1)(2m+1)}}{m} \quad (7)$$

где m – число участков линии; I_3 – эквивалентный ток; I_1 – ток головного участка (фазного, нулевого провода).

Можно найти связь между эквивалентным током I_3 и током главного участка I_1 :

$$I_3 = k_3 I_1 \quad (8)$$

Следует отметить, что метод эквивалентного тока позволяет определить эквивалентный коэффициент неравномерности токов в линии и увеличение потерь мощности по графикам $k_y = f(k_n)$ (рис. 2):

$$k_{нз} = \frac{I_{нз}}{I_{A3} + I_{B3} + I_{C3}}, \quad (9)$$

где $I_{нз}$ – эквивалентный ток в нулевом проводе; I_{A3} , I_{B3} , I_{C3} – эквивалентный ток соответственно в фазах А, В и С.

Для определения потерь энергии в неравномерно нагруженных элементах сети 0,38 кВ, например, линиях, необходимо знать закон изменения тока в каждой фазе и нулевом проводе не только вдоль длины линии, но и во времени.

В линии с распределенной нагрузкой потери энергии за промежуток времени t могут быть вычислены по формуле:

$$\Delta A_{\Sigma n} = \sum_{k=i=1}^3 \sum_{i=1}^m \int i_{ki}^2 r_i dt + \sum_{i=1}^m \int i_{Ni}^2 r_{Ni} dt, \quad (10)$$

где i_{ki} – линейный ток в проводе фазы k на i -м участке; i_{Ni} – ток в нулевом проводе на i -м участке; m – число участков; r_i – сопротивление фазного провода i -го участка; r_{Ni} – сопротивление нулевого провода i -го участка, а в трансформаторе:

$$\Delta A_{\Sigma m} = \sum_{k=1}^3 \int i_k^2 r_m dt + \Delta P_{cm} t. \quad (11)$$

Однако использование приведенных выражений для расчетов в сетях 0,38 кВ неудобно, т.к. закон изменения токов в элементах сети практически неизвестен и установить его достаточно трудно.

В сетях до 1000 В известны методы для определения потерь такие как, методы вычисления потерь с помощью среднего квадратичного тока и с помощью времени потерь [7]. Последний метод наиболее удобен при технико-экономическом анализе режима работы сети, однако он, как известно, основан на допущении, что максимумы графиков активной и реактивной нагрузок по времени совпадают, а коэффициенты мощности потребителей в течение года постоянны.

Этот метод может быть применен также для вычисления потерь энергии в неравномерно нагруженных элементах сетей 0,38 кВ. Так, например, по предположению выше методу могут быть найдены математические ожидания потерь мощности в фазных и нулевом проводах, которые, будучи умноженными на время потерь τ , дадут величину математического ожидания потерь энергии:

$$\Delta A_{\Sigma n} = \tau \left(\sum_{k=1}^3 \Delta P_{\phi} + \Delta P_N \right), \quad (12)$$

где ΔP_{ϕ} – потери энергии в фазных проводах; ΔP_N – потери энергии в нулевом проводе.

Годовое время потерь τ определяется как функция числа часов использования максимума нагрузки сельских сетей до 1000 В. Число часов использования максимума зависит от величины и структуры установленной мощности.

Значение времени потерь τ также можно определить из регрессионного уравнения [6]:

$$\tau = 0,69 \cdot T - 584, \quad (13)$$

где T – время использования максимума полной мощности.

На рис. 4 приведена зависимость для определе-

ния τ для сельских потребительских подстанций $\tau = f(T)$ для $T = 2300-4500$ часв/год.

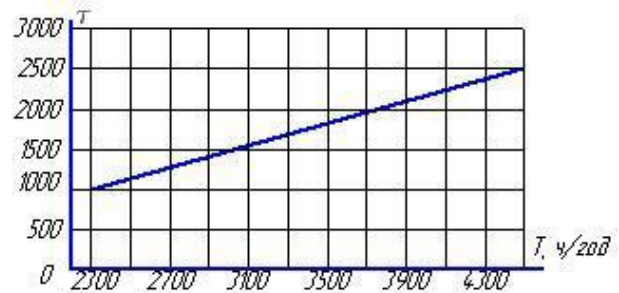


Рис. 4 Зависимость времени потерь от числа часов использования максимума полной мощности

Рассмотрим методику точного вычисления потерь мощности для общего случая несимметрично нагруженной четырехпроводной сети.

Матрица падений напряжений на любом элементе трехфазной сети в несимметричном режиме равна:

$$\Delta \dot{U}_{S3} = \dot{I}_S Z_{S3}, \quad (14)$$

где

$$Z_{S3} = \begin{bmatrix} Z_{03} & Z_{23} & Z_{13} \\ Z_{13} & Z_{03} & Z_{23} \\ Z_{23} & Z_{13} & Z_{03} \end{bmatrix};$$

$$\dot{Z}_{03} = \frac{1}{3}(Z_A + Z_B + Z_C) = Z_{03} e^{j\varphi_0};$$

$$\dot{Z}_{13} = \frac{1}{3}(Z_A + aZ_B + a^2Z_C) = Z_{13} e^{j\varphi_1};$$

$$\dot{Z}_{23} = \frac{1}{3}(Z_A + a^2Z_B + aZ_C) = Z_{23} e^{j\varphi_2};$$

где Z_A , Z_B , Z_C – сопротивления фаз элемента сети.

Из уравнения (14) может быть получена матрица сопротивлений элемента сети в схемах симметричных составляющих:

$$\Delta Z_S = \begin{bmatrix} \Delta Z_1 \\ \Delta Z_2 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{03} & Z_{23} & Z_{13} \\ Z_{13} & Z_{03} & Z_{23} \\ Z_{23} & Z_{13} & Z_{03} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \dot{\alpha}_i & \dot{\beta}_i \\ 1 & \dot{\alpha}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i \\ 1 & \dot{\beta}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i^{-1} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

где

$$\dot{\alpha}_i = \frac{I_2}{I_1} e^{j(v_2 - v_1)}; \quad \dot{\beta}_i = \frac{I_0}{I_1} e^{j(v_0 - v_1)}; \quad \dot{\gamma}_i = \frac{I_0}{I_2} e^{j(v_0 - v_2)};$$

$$I_1^{\&} = I_1 e^{ju_1}; \quad I_2^{\&} = I_2 e^{ju_2}; \quad I_3^{\&} = I_3 e^{ju_3}.$$

Из (15) вытекает, что

$$Z_S = Z_{03} + \Delta Z_S, \quad (16)$$

то есть сопротивление элемента сети току соответствующей последовательности равно его сопротивлению Z_{03} , плюс добавочное сопротивление, обусловленное протеканием по данному элементу токов всех трех последовательностей, т.е. всегда $Z_S > Z_{03}$, где

$$Z_S = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{23} & Z_{13} \\ Z_{13} & Z_{23} \\ Z_{23} & Z_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_i & \dot{\beta}_i \\ \dot{\alpha}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i \\ \dot{\beta}_i^{-1} & \dot{\gamma}_i^{-1} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

В линиях 038/0,22 кВ при неучете реактивного сопротивления могут иметь место следующие два частных случая:

1. $\dot{\alpha}_i \neq 0; \dot{\beta}_i \neq 0; \dot{\gamma}_i = 0; Z_A = Z_B = Z_C \neq 0;$
 $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 = \Delta Z_0 = 0.$
 2. $\dot{\alpha}_i \neq 0; \dot{\beta}_i \neq 0; \dot{\gamma}_i \neq 0; Z_A \neq Z_B \neq Z_C \neq 0;$
 $\Delta Z_1 \neq 0; \Delta Z_2 \neq 0; \Delta Z_0 \neq 0.$

В трансформаторах в случае, когда углы между векторами токов в фазах равны $2\pi/3$:

$$\alpha_i = \beta_i = \frac{1}{3}; \gamma_i = 0;$$

$$\Delta Z_1 = \frac{1}{3} [Z_{23} e^{j(\nu_2 - \nu_1)} + Z_{13} e^{j(\nu_0 - \nu_1)}];$$

$$\Delta Z_2 = \frac{1}{3} [Z_{13} e^{j(\nu_1 - \nu_2)} + Z_{23} e^{j(\nu_0 - \nu_2)}];$$

$$\Delta Z_0 = \frac{1}{3} [Z_{23} e^{j(\nu_1 - \nu_0)} + Z_{13} e^{j(\nu_2 - \nu_0)}].$$

Потери активной мощности в рассматриваемом режиме в элементе сети могут быть вычислены по выражению

$$\Delta P_{\text{нec}} = 3(I_1^2 \text{Re } Z_1 + I_2^2 \text{Re } Z_2 + I_0^2 \text{Re } Z_0) + 9I_0^2 \text{Re } Z_N, \quad (18)$$

где Z_N – кажущееся сопротивление нулевого провода.

Обращаясь к (15), найдем матрицу действительных частей кажущихся сопротивлений элемента сети:

$$\text{Re } \mathbf{Z}_S = \begin{bmatrix} \text{Re } Z_1 \\ \text{Re } Z_2 \\ \text{Re } Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{03} & \alpha_i Z_{23} & \beta_i Z_{13} \\ Z_{13} & \alpha_i^{-1} Z_{03} & \gamma_i Z_{23} \\ Z_{23} & \beta_i^{-1} Z_{13} & \gamma_i^{-1} Z_{03} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & g & d \\ 1 & b & e \\ 1 & c & f \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$$g = \frac{\cos(\nu_2 - \nu_1 - \varphi_0)}{\cos \varphi_0}; \quad b = \frac{\cos(\nu_1 - \nu_2 + \varphi_0)}{\cos \varphi_0};$$

$$c = \frac{\cos(\nu_1 - \nu_0 + \varphi_2)}{\cos \varphi_0}; \quad d = \frac{\cos(\nu_0 - \nu_1 + \varphi_1)}{\cos \varphi_0};$$

$$e = \frac{\cos(\nu_0 - \nu_2 + \varphi_2)}{\cos \varphi_0}; \quad f = \frac{\cos(\nu_2 - \nu_0 + \varphi_1)}{\cos \varphi_0}.$$

Легко убедиться, что кратность увеличения потерь

$$k_y = \frac{\Delta P_{\text{нec}}}{\Delta P_{\text{сим}}} = \frac{(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2) \text{Re } Z_{03} + (I_1^2 \text{Re } Z_1 + I_2^2 \text{Re } Z_2 + I_0^2 \text{Re } Z_0)}{I_{\text{cp,ap}}^2 \text{Re } Z_{03}} + \frac{3I_0^2 \text{Re } Z_N}{I_{\text{cp,ap}}^2 \text{Re } Z_{03}} > 1. \quad (20)$$

ВЫВОД

Потери активной мощности в любом элементе сети при неравномерной нагрузке фаз превышают потери в этом же элементе в симметричном режиме. Кратность увеличения потерь в реальных сетях 0,38 кВ может намного превышать единицу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин М.С. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ / М.С. Левин, Т.Б. Лещинская // Электричество. – 1999. – № 5. – С. 18-22.
2. Дерзский В.Г. Потери электроэнергии и напряжения в сетях 0,38 кВ при неполнофазных режимах работы в условиях неопределенности / В.Г. Дерзский, В.Ф. Скиба // Энергетический эксперт. – 2010.
3. Наумов И.В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств // Дисс. докт. тех. наук, 05.20.02 – Иркутск, 2002. – 387 с.
4. Рожавский С.М. Потери мощности в проводах при неравномерной нагрузке фаз / С.М. Рожавский, В.П. Позняк, В.М. Зубко // Энергетика и электрификация. – 1970. – № 1. – С. 24-25.
5. Косоухов Ф.Д. Потери мощности и напряжения в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке. – Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 3. – С. 5-8.
6. Будзко И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И.А. Будзко, М.С. Левин. – М: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
7. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

Bibliography (transliterated): 1. Levin M.S. Analiz nesimmetrichnyh rezhimov sel'skih setej 0,38 kV / M.S. Levin, T.B. Leshchinskaya // `Elektrichestvo. - 1999. - № 5. - S. 18-22. 2. Derzskij V.G. Poteri `elektro`energii i napryazheniya v setyah 0,38 kV pri nepolnofaznyh rezhimah raboty v usloviyah neopredelennosti / V.G. Derzskij, V.F. Skiba // `Energeticheskij `ekspert. - 2010. 3. Naumov I.V. Snizhenie poter' i povyshenie kachestva `elektricheskoy `energii v sel'skih raspredelitel'nyh setyah 0,38 kV s pomoshch'yu simmetriruyuschih ustrojstv//Diss. dokt. teh. nauk, 05.20.02 - Irkutsk, 2002. - 387 s. 4. Rozhavskij S.M. Poteri moschnosti v provodah pri neravnomernoj nagruzke faz / S.M. Rozhavskij, V.P. Poznyak, V.M. Zubko // `Energetika i `elektrifikaciya. - 1970. - № 1. - S. 24-25. 5. Kosouhov F.D. Poteri moschnosti i napryazheniya v sel'skih setyah 0,38 kV pri nesimmetrichnoj nagruzke. - Tehnika v sel'skom hozyajstve. - 1988. - № 3. - S. 5-8. 6. Budzko I.A. `Elektrosnabzhenie sel'skohozyajstvennyh predpriyatij i naselennyh punktov / I.A. Budzko, M.S. Levin. - M: Agropromizdat, 1985. - 320 s. 7. Zhelezko Yu.S. Vybormeropriyatij posnizheniyu poter' `elektro`energii v `elektricheskikh setyah / Yu.S. Zhelezko. - M.: `Energoatomizdat, 1989. - 176 s.

Поступила 30.06.2011

Мирошник Александр Александрович, к.т.н., доц.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко, кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий
 61052, Харьков ул. Коцарская, 9, к. 208
 тел. (097) 9506033, (057) 7123537
 e-mail: miroshnyk@rambler.ru

Miroshnyk A.A.

Calculation methods for power losses in elements of an asymmetrically loaded network.

Methods of approximate and exact calculation of power losses in irregularly loaded 0.38 / 0.22 kV networks are introduced.

Key words – asymmetric mode, electrical power loss, irregularity coefficient.