

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ УСЛУГ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СТОРОННИМ ПОТРЕБИТЕЛЯМ С УЧЕТОМ ИХ ДОЛЕВЫХ ВКЛАДОВ

В данной статье подробно рассмотрены разработанные на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова метод определения долевого вклада в потери электроэнергии и метод определения стоимости потерь. Данные методы позволяют определить долевого вклада в потери электроэнергии каждого конкретного потребителя и стоимость этих потерь с учетом влияния каждого из источников электроэнергии. Применение для расчетов потерь электроэнергии данных методов позволяет рассчитывать со сторонними потребителями на основе научно обоснованных величин. Кроме того, разработанные алгоритмы позволяют потребителю на основе информации о собственной прогнозируемой нагрузке планировать затраты на покупную электроэнергию. С помощью вышеуказанных методов проводились расчеты для схемы ОАО «ММК» для сторонних потребителей. Доля нагрузочных потерь сторонних потребителей в условиях названного объекта составляет 22,13% от общей величины нагрузочных потерь.

Ключевые слова: потери электроэнергии, стоимость потерь электроэнергии, долевого вклад потребителя, модифицированный метод последовательного эквивалентирования, потребители электрической энергии, нагрузочные потери активной мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет и анализ потерь электроэнергии является одной из наиболее важных задач при управлении эксплуатационными режимами системы электроснабжения. Управление уровнем потерь в электрических сетях электроэнергии – сложная комплексная задача. В связи с развитием оптового рынка электроэнергии принято подразделять потери на технологические, коммерческие и небалансные. Наиболее полная классификация отчетных потерь с экономических позиций дается Ю.С. Железко в [1]. Для определения потерь электроэнергии традиционно используются различные методы расчета, подробно описанные в литературе.

Для снижения фактического уровня потерь электрической энергии до их экономически обоснованного и документально подтвержденного технологического уровня осуществляется нормирование потерь. Норматив потерь электрической энергии включается в тариф на передачу электрической энергии по электрическим сетям и, следовательно, оплачивается сторонними потребителями электрической энергии, подключенными к электрической сети рассматриваемого потребителя. Для правильной оценки стоимости услуг по передаче необходимо знать расчетный вклад каждого потребителя в суммарные потери электроэнергии [2]. Кроме того, одним из важнейших экономических показателей системы электроснабжения является стоимость потерь электроэнергии. Стоимость дополнительных потерь электроэнергии в сетях крупного градообразующего предприятия компенсируется за счет включения стоимости услуг по ее передаче в тарифы для сторонних потребителей предприятия. В настоящее время большинство предприятий имеют в своем составе собственные электростанции, а также покупают электроэнергию у различных энергоснабжающих организаций. Стоимость покупной электроэнергии и себестоимость электроэнергии, выработанной на собственных электростанциях, различна. Это значительно усложняет процедуру расчета с потребителями. Правильно оценить стоимость услуг по передаче электроэнергии

можно лишь, зная долю каждого потребителя в потерях активной мощности и в стоимости потерь.

Ряд печатных публикаций посвящен анализу потерь электроэнергии на основе зарегистрированных графиков нагрузки и эквивалентного сопротивления участка сети. В работе [3] описывается методика расчета интервалов неопределенности потерь электроэнергии, определяемых погрешностью исходных данных; методика ориентирована на оценку эффективности мероприятий по снижению потерь и выявление информации, подлежащей первоочередному уточнению. В [4] предлагается определение нормативов потерь в электрической сети на основе нормативов потерь в т.н. «модулях», повторяющихся частях сети. Подобный подход, предусматривающий использование ограниченного числа эквивалентных расчетных схем и времени наибольших потерь и ориентированный на сети напряжением до 10 кВ, рассмотрен в [5]. Как один из способов аппаратного определения потерь электроэнергии и их распределения между потребителями, в [6] рассматривается применение счетчиков потерь, первые конструкции которых появились еще в довоенные годы [7]. Использовать принцип функционально-стоимостного анализа технологического расхода электроэнергии с целью экономической адаптации электрической сети к изменяющимся потокам электроэнергии предлагают авторы статьи [8]. Некоторые вопросы расчета потерь по результатам телеизмерений и, при необходимости, псевдоизмерений с учетом наблюдаемости отдельных районов рассмотрены в [9] и [10]. В ряде работ потери электроэнергии рассматриваются как один из критериев оптимальности режима. Так, в [11] исследуется снижение потерь мощности и энергии за счет оперативной реконфигурации сети; в [12] потери мощности – как критерий оптимальной настройки устройств FACTS, обеспечивающих увеличение предельно допустимых перетоков. Вклад нагрузки отдельных потребителей в [13] оценивается применительно к таким параметрам режима электрической сети, как напряжения и потоки мощности и используется для решения задачи оценивания состояния.

Долевого вклад потребителя в потери в настоящее время оценивается в большинстве случаев по прибли-

женным и упрощенным методам, например по методу экспертных оценок или пропорционально потребляемой мощности без учета точки подключения [2]. Применение таких методов приводит к погрешностям и неточностям расчета потерь и, следовательно, к конфликтам при взаиморасчетах с потребителями. Поэтому разработка метода, который учитывал бы долевого вклад в потери электроэнергии каждого потребителя, является актуальной задачей на сегодняшний день.

В рамках решения этой проблемы на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова разработаны метод определения долевого вклада в потери электроэнергии и метод определения стоимости потерь. В качестве исходных данных используются результаты расчета установившегося режима. Расчет установившегося режима ведется модифицированным методом последовательного эквивалентирования [14], который учитывает всю специфику сложноразветвленных промышленных электрических сетей. Данный метод реализован с помощью приемов объектно-ориентированного программирования в интегрированной среде разработки Borland C++ Builder.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ СИСТЕМ
МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ

В алгоритме используется многолучевая схема замещения с одной поперечной ветвью, при эквивалентировании воспринимаемой как внутренние проводимости и ЭДС. Связи элемента с другими элементами являются полноправными элементами схемы замещения. На прямом ходе решения задачи (свертывание схемы) для каждого элемента схемы вызывается функция исключения единичного узла (элемента). Данный метод применяется для схем любой сложности и конфигурации, при этом прямой ход расчета никак не связан с иерархией элементов схемы и не требует специального порядка нумерации, элементы нумеруются в том же порядке, в каком они вводились в исходную схему. Прямой ход расчета заканчивается определением эквивалентных ЭДС и проводимостей на шинах n-го элемента, причем это может быть любой элемент схемы.

Обратный ход расчета (развертывание схемы) организуется в соответствии с тем же принципом, что и прямой ход, и заключается в выделении на каждом шаге из эквивалентной схемы очередного элемента. Наиболее полно модифицированный метод последовательного эквивалентирования рассмотрен в [3].

Разработанный метод определения долевого вклада в потери мощности основан на учете вклада рассматриваемого потребителя в поток мощности через каждый элемент (рис. 1). В свою очередь, долевого вклада в потери каждого элемента, через который проходит поток от данного потребителя, определяется модулем отношения полной мощности потребителя с учетом потерь на участке от потребителя до текущего элемента к полной мощности, протекающей по элементу. В схеме на рис. 1 поперечные ветви схем замещения элементов не показаны.

Долевой вклад потребителя m в суммарные нагрузочные потери в электрической сети

$$D_m = \sum_{i=1}^N d_{im} \quad (1)$$

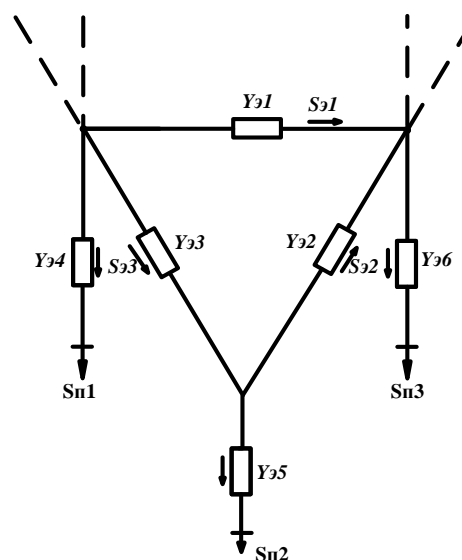


Рис. 1. Расчетная схема участка сети для определения долевого вклада в потери мощности

Долевой вклад потребителя m в потери, создаваемые в элементе i :

$$d_{\varepsilon,im} = \left| \frac{\sum \Delta \dot{S}_{\varepsilon i} + \dot{S}_{\Pi, m}}{\dot{S}_{\varepsilon i}} \right| \cdot \Delta P_i \quad (2)$$

где i – порядковый номер элемента; m – порядковый номер потребителя; N – количество элементов схемы; $S_{\varepsilon, i}$ – полная мощность, передаваемая через элемент i ; $\Delta S_{\varepsilon, i}$ – потери полной мощности в элементе i ; $S_{\Pi, m}$ – нагрузка потребителя с номером m ; ΔP_i – суммарные нагрузочные потери в элементе i , создаваемые всеми потребителями.

Вклад в потери элемента №3 потребителя №2 (см. рис. 1):

$$d_{3,2} = \left| \frac{\sum \Delta \dot{S}_{\varepsilon 3} + \dot{S}_{\Pi 2}}{\dot{S}_{\varepsilon 3}} \right| \cdot \Delta P_{\varepsilon 3}$$

На рис. 1 $\dot{S}_{\Pi 1}$, $\dot{S}_{\Pi 2}$, $\dot{S}_{\Pi 3}$ – нагрузка потребителей, $\dot{Y}_1 - \dot{Y}_6$ – проводимости системы электроснабжения. Расчет ведется для каждого из электрически несвязанных участков сети с перебором всех нагрузочных элементов. Расчет для каждого из потребителей реализован в виде рекурсивной функции, которая просматривает все связи текущего элемента. Для каждого элемента определяется поток мощности по связи с другим элементом. В случае, если поток направлен встречно направлению обхода схемы, определяется вклад по (1), после чего устанавливается соответствующий флаг. Это нужно для того, чтобы учесть уже пройденные элементы сети. При этом выполняется суммирование вкладов во все элементы сети для каждого из потребителей. Для каждой из связей рассматриваемого элемента выполняется повторный вызов рекурсивной функции. После прохода схемы до источника питания все установленные флаги сбрасываются. Далее расчет повторяется для следующего потребителя, принадлежащего данной схеме. Вклад в поток мощности и потери

для элемента №3 обусловлен потребителями П2 и П3.

Данная методика позволяет определять потери активной мощности с учетом вклада каждого отдельного потребителя в активные потери всей рассчитываемой схемы на основе параметров установившегося режима и не зависит от иерархии элемента в системе электропитания. На основе разработанной методики был написан программный модуль, включенный в программный комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0, разработанный на кафедре ЭПП МГТУ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2012612069).

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В качестве исходных данных используются результаты расчета установившегося режима, на основе которых определяются затраты на передачу электроэнергии для каждого элемента схемы сети, после чего эти величины суммируются. Дополнительными данными для расчета величины стоимости потерь является величина стоимости электроэнергии для ее источников (коп./кВт·ч). Функция определения стоимости вызывается для всех элементов, кроме источников электроэнергии и выключателей. Для связи текущего элемента определяется ток связи

$$i_{ij} = (\dot{U}_{\text{ивн}} - \dot{U}_j K_{\text{трг}}) \dot{Y}_j, \tag{4}$$

где i – текущий элемент схемы; j – связь текущего элемента с другим элементом.

При этом определяется знак величины. Если ток направлен по связи к текущему элементу, то определяется комплексный поток мощности по этой связи. Затем потоки мощности для всех элементов схемы суммируются.

$$\dot{S}_{ij} = I_{ij} \dot{U}_j; \tag{5}$$

$$\dot{S}_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^K \dot{S}_{ij}. \tag{6}$$

где i – текущий элемент схемы; j – связь текущего элемента с другим элементом; K – количество учитываемых связей.

Стоимость для текущего элемента схемы (на рис. 2 – проводимость Y_1) определяется по активной составляющей потока мощности с помощью рекурсивной функции пропорционально потокам от каждого предыдущего элемента, с которым у текущего элемента есть связь (поперечные проводимости Y_2, Y_3, Y_4 на рис. 2):

$$C_{\Sigma i} = \frac{\sum_{j=1}^K \text{Re} \dot{S}_{ij} C_{ij}}{\text{Re} \dot{S}_{\Sigma i}}, \tag{7}$$

Здесь C_{ij} – стоимость потерь электроэнергии.

Затем стоимости для каждого потребителя суммируются

$$C_{\Sigma \Delta P_{\text{нагр}}} = \sum_{i=1}^N C_{\Sigma i} \cdot \Delta P_i, \tag{8}$$

где N – количество элементов.

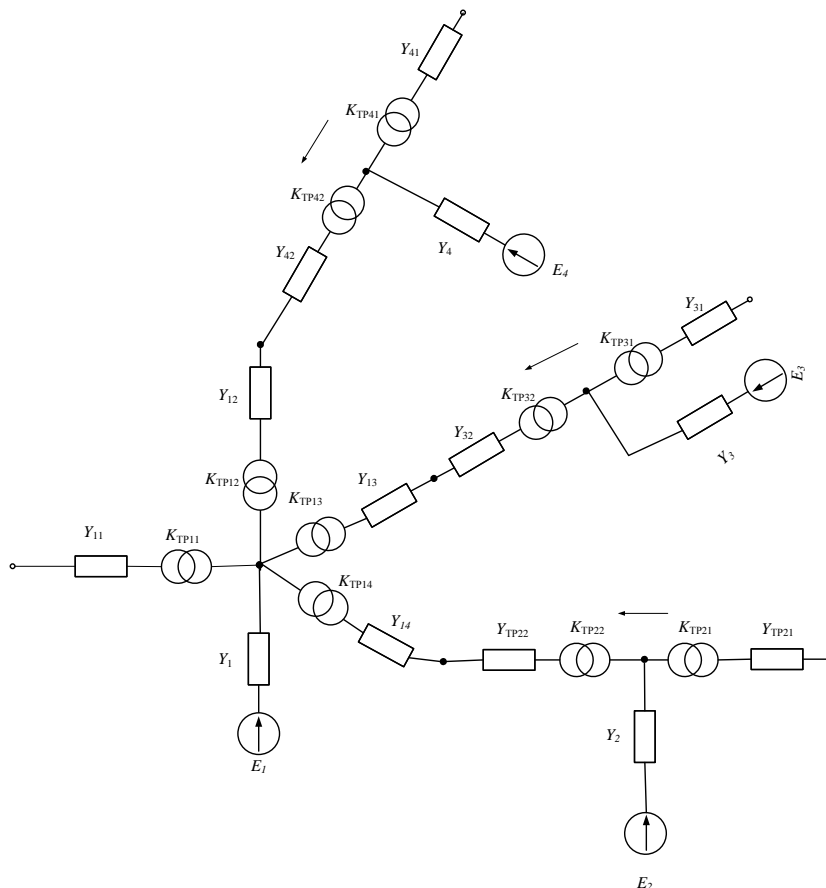


Рис. 2. Схема замещения участка сети

Расчет стоимости повторяется для следующего элемента сети, источником для которого является только что пройденный элемент. Расчет ведется для каждого из несвязанных участков сети и может начинаться с любого из элементов-источников электроэнергии. За источник электроэнергии для начала расчета берется синхронный генератор или узел связи с энергосистемой. Общая стоимость потерь электроэнергии определяется суммированием стоимостей потерь по каждому элементу.

С помощью вышеуказанных методов и разработанного программного обеспечения проводились расчеты для схемы Магнитогорского энергетического узла (МЭУ). При годовом максимуме нагрузки МЭУ около 1500 МВт нагрузочные потери активной мощности в сетях 10 кВ и выше составляют 20,2 МВт. Из них нагрузочные потери сторонних потребителей 4,47 МВт, что в процентном соотношении составляет 22,13% от общей доли нагрузочных потерь. Основными сторонними потребителями МЭУ являются:

- на напряжении 110 кВ – ОАО «ММК-Метиз», МП «Горэлектросеть», потребители юга Челябинской области и Башкирии;
- на напряжение 35 кВ – МП «Горэлектросеть», МП «Магнитострой»;
- на напряжение 10 кВ – МП «Горэлектросеть», ЗАО «Механоремонтный комплекс», Водоканал, ЗАО «Огнеупор», ЗАО «Профит», МП «Магнитострой».

Наибольшая доля потерь у потребителей на напряжение 110 ОАО «ММК-Метиз», МП «Горэлектросеть» (величина этих потерь соответственно 0,08 и 0,324 МВт). Суммарные нагрузочные потери сторонних потребителей по уровням напряжения составляют 0,97 МВт – на напряжение 110 кВ; 0,11 МВт – на напряжение 35 кВ; 3,34 МВт – на напряжение 10 кВ.

Расчитанные таким образом величины потерь и их стоимости являются основой для определения стоимости услуг по передаче электроэнергии, являющейся составной частью тарифа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместное применение для расчетов со стороны потребителя определения долевого вклада и алгоритма определения стоимости потерь позволяет осуществлять расчет на основе научно обоснованных величин, избегая упрощенных методик.

Разработанные алгоритмы позволяют потребителю на основе информации о собственной прогнозируемой нагрузке наиболее корректно планировать затраты на покупку электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.
2. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Введена приказом Минэнерго РФ №326 от 30.12.2008. М., 2008.
3. Расчеты на ЭВМ интервалов неопределенности расхода электроэнергии на ее транспорт в разомкнутых сетях 6–110 кВ / Ю.С. Железко, В.Э. Воротницкий, Р.П. Бирюкова, О.К. Хавкина // Электрические станции. 1983. №5. С. 39-42.
4. Свешников В.И. Нормирование и анализ потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистемы // Электрические станции. 1974. №2. С. 67-70.
5. Щербаков А.М. Расчет технических потерь электроэнергии в сельских электрических сетях 10 и 0,4 кВ // Энергетик. 1980. №3. С. 3-4.
6. Рыклин Ф.Г., Татаринцев А.Г. Об учете и распределении потерь электроэнергии в магистральных линиях и узлах нагрузки при помощи счетчиков потерь // Электрические станции. 1971. №8. С. 38-40.
7. Коллегин А.В. К вопросу об измерении потерь в сетях // Электрические станции. 1939. №6. С. 51.
8. Опыт нормирования технологического расхода электроэнергии в электрических сетях / Н.М. Сыч, Н.П. Кеда, Т.М. Ташпулатов, М.А. Усманова, Л.А. Евдокимов // Энергетик. 1991. №3. С. 23-24.
9. Расчет потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях в темпе процесса / В.А. Петров, В.Н. Тарасов, Е.И. Борисов, М.Г. Мазур // Энергетик. 1986. №5. С.13.
10. Курсков В.И., Мерпорт Э.И. Об оперативном расчете режима и потерь электроэнергии в электрических сетях при недостатке телеизмерений // Энергетик. 1985. №8. С. 10-11.
11. Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPO for losses reduction // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. vol. 79. No. 2. pp. 346-350.
12. Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability // IET Gener. Transm. Distrib. 2015. vol. 9. iss. 4. pp. 358-368.
13. Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation // Engineering Letters. 2015. vol. 23. iss. 1. p. 20-28.
14. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // Промышленная энергетика. 2008. №6. С.16-22.

INFORMATION IN ENGLISH

DEFINITION OF COST OF SERVICES IN ELECTRIC POWER TRANSFER THROUGH ELECTRIC NETWORKS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES TO EXTERNAL CONSUMERS TAKING INTO ACCOUNT THEIR SHARE CONTRIBUTIONS

Malafeev A.V., Yagolnikova E.B., Savinova G.Yu., Olennikova T.B., Altukhova M.A.

The article is concerned with methods of definition of losses, such as the method of definition of the share contribution to losses of electric power and the method of definition of cost of losses, which were developed by the Industrial Electric Power

Supply Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. These methods make it possible to define the share contribution to losses of electric power of each particular consumer and cost of these losses. Application of these

calculations of losses of electric power using the given methods allows the companies to settle accounts with external consumers on the basis of scientifically founded values. Besides, the developed algorithms allow the consumer to plan expenses for the purchased electric power on the basis of the information on the predicted load. The methods mentioned above were used to carry out calculations with the external customers of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". The share of load losses of external consumers was 22.13% of the total value of load losses.

Keywords: electric power losses, cost of losses of the electric power, share contribution of the consumer to electric power losses, modified method of sequential reduction, consumers of electric energy, load losses of active power.

REFERENCES

1. Zhelezko Yu.S., Artemyev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Calculation, Analysis and Rating of Electric Power Losses in Electric Networks], textbook for practical calculations, Moscow, "NTs ENAS publishing house", 2004, 280 p.
2. Instruction on the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on calculation and justification of standards of technological losses of the electric power by its transfer through electric networks. Came into effect by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 326 on 30.12.2008, Moscow, 2008.
3. Zhelezko Yu.S., Vorotnitskiy V.E., Biryukova R.P., Khavkina O.K. *Rascety na EVM intervalov neopredelyennosti raskhoda elektroenergii na eye transport v razomknytykh setyakh 6-110 kV* [Computer Calculations of Intervals of Uncertainty for Electric Power Consumption during its Transfer through 6-110 kV Open-loop networks], Power stations, 1983, no.5, pp. 39-42.
4. Sveshnikov V.I. *Normirovanie i analiz poter moschnosti i energii v elektricheskikh setyakh energosistemy* [Rating and Analysis of Power and energy Losses in Electric Power Networks of Power Grid], Power stations, 1974, no.2, pp. 67-70.
5. Scherbakov A.M. *Raschet tekhnicheskikh poter elektronergii v selskikh elektricheskikh setyakh 10 i 0.4 kV* [Calculation of Technical Losses of Electric Energy in Rural 10 and 0.4 kV Electric Power Lines], Power engineer, 1980, no.3, pp. 3-4.
6. Ryklin F.G., Tatarintsev A.G. *Ob uchete i raspredelenii poter elektroenergii v magistralnykh liniyakh i uzlakh nagruzki pri pomoschi schetchikov poter* [Accounting and Distribution of Electric Energy Losses in Backbone Power Lines and Load Centers by Means of Loss Meters], Power stations, 1971, no.8, pp. 38-40.
7. Kollegin A.V. *K voprosu ob izmerenii poter v setyakh* [Measuring of Losses in Networks], Power stations, 1939, no.6, pp. 51.
8. Sych N.M., Keda N.P., Tashpulatov T.M., Usmanova M.A., Evdokimov L.A. *Opyt normirovaniya tekhnologicheskogo raskhoda elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Practical Experience of Technological Consumption Rating of Electric Energy in Electrical Networks], Power engineer, 1991, no.3, pp. 23-24.
9. Petrov V.A., Tarasov V.N., Borisov E.I., Mazur M.G. *Raschet poter moschnosti i elektroenergii v elektricheskikh setyakh v tempe protsessa* [On-line Calculation of Power and Electric Energy Losses in Electrical Networks], Power engineer, 1986, no.5, pp. 13.
10. Kurskov V.I., Merport E.I. *Ob operativnom raschete rezhima i poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh pri nedostatke telezmereniy* [On-line Computation of Conditions and Losses of electric Energy in Electrical Networks in Case of Remote Measurement Failure], Power engineer, 1985, no.8, pp. 10-11.
11. Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2015, vol, 79, no.2, pp. 346-350.
12. Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability, IET Gener. Transm. Distrib, 2015, vol. 9, iss. 4, pp. 358-368.
13. Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation, Engineering Letters, 2015, vol. 23, iss. 1, p. 20-28.
14. Igumenshchev V.A., Zaslavets B. I., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. *Modifitsirovannii metod posledovatelnogo ekvivalentirovaniya dlya rascheta rezhimov slozhnykh system electrosnabzheniya* [The modified method of a consecutive reduction for calculation of the modes of difficult systems of power supply], Industrial power engineering, 2008, no. 6, pp. 16-22.